

RANTAI PASOKAN

(Supply Chains)

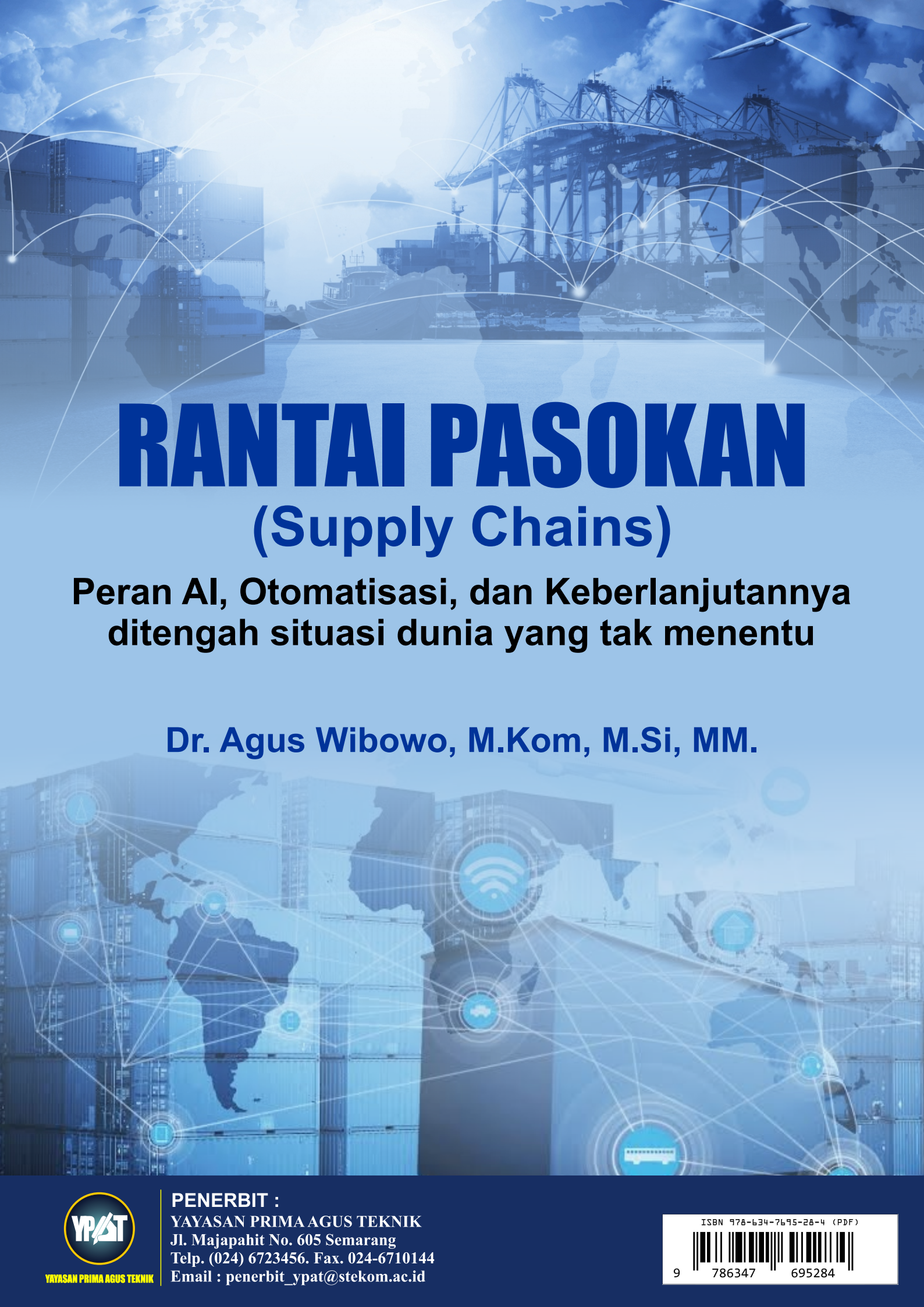
**Peran AI, Otomatisasi, dan Keberlanjutannya
ditengah situasi dunia yang tak menentu**

Dr. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM.



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK





RANTAI PASOKAN

(Supply Chains)

**Peran AI, Otomatisasi, dan Keberlanjutannya
ditengah situasi dunia yang tak menentu**

Dr. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM.



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PENERBIT :

YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

Jl. Majapahit No. 605 Semarang

Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144

Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

ISBN 978-634-7695-28-4 (PDF)



9

786347

695284

RANTAI PASOKAN (Supply Chains)

Peran AI, Otomatisasi, dan Keberlanjutannya ditengah situasi dunia yang tak menentu

Penulis :

Dr. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM.

ISBN : 978-634-7695-28-4 (PDF)

Editor :

Dr. Joseph Teguh Santoso, S.Kom., M.Kom.

Penyunting :

Dr. Mars Caroline Wibowo. S.T., M.Mm.Tech

Desain Sampul dan Tata Letak :

Irdha Yuniarto, S.Ds., M.Kom

Penebit :

Yayasan Prima Agus Teknik Bekerja sama dengan
Universitas Sains & Teknologi Komputer (Universitas STEKOM)

Anggota IKAPI No: 279 / ALB / JTE / 2023

Redaksi :

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. 08122925000

Fax. 024-6710144

Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

Distributor Tunggal :

Universitas STEKOM

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. 08122925000

Fax. 024-6710144

Email : info@stekom.ac.id

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa ijin dari penulis

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga buku "*Rantai Pasokan (Supply Chains)*" ini dapat diselesaikan. Perubahan besar dalam lanskap ekonomi dan teknologi selama beberapa tahun terakhir menempatkan rantai pasokan pada persimpangan yang menentukan. Gangguan berskala luas termasuk pandemi global, gangguan geopolitik, tekanan pada rantai pasokan bahan baku, serta perubahan iklim telah menguji ketahanan sistem logistik dan memaksa para pemangku kepentingan untuk meredefinisi prioritas: dari efisiensi biaya semata ke ketahanan, kelincahan, dan keberlanjutan jangka panjang. Di saat yang sama, kemajuan pesat pada bidang kecerdasan buatan (AI), *Internet of Things* (IoT), blockchain, manufaktur aditif, dan arsitektur data membuka peluang baru untuk merancang ulang dan mengoptimalkan rantai pasokan secara fundamental.

Buku ini hadir sebagai upaya sistematis untuk menjembatani teori, bukti empiris, praktik industri, serta kebijakan public dengan fokus pada bagaimana teknologi digital dan pendekatan ekonomi sirkular dapat dipadukan untuk mencapai rantai pasokan yang tangguh, transparan, dan berkelanjutan. Tersusun dalam dua puluh bab yang saling melengkapi, buku ini membentang dari pembahasan konseptual hingga metode teknis, studi kasus, serta panduan implementasi praktis.

Bab awal membangun pijakan konseptual tentang ketahanan rantai pasokan dan pelajaran pasca-pandemi. Di sinilah pembaca akan menemukan analisis tentang sumber kerentanan, kerangka manajemen risiko, serta strategi untuk membangun ketahanan yang adaptif. Pembahasan ini memberikan konteks mengapa transformasi digital bukan sekadar pilihan teknologi, melainkan kebutuhan strategis.

Selanjutnya, buku menyoroti peran AI termasuk AI generative dalam mendukung pengambilan keputusan rantai pasokan. Bab tentang AI generatif dan LLM+RAG menampilkan pendekatan teknis untuk tinjauan kontrak, penilaian pemasok, dan otomatisasi proses pengetahuan. Pembahasan ini menguraikan manfaat produktivitas sekaligus tantangan adopsi seperti fragmentasi data, kebutuhan standarisasi, dan risiko etika. Kerangka ekonomi sirkular mendapat perhatian khusus sebagai alternatif model produksi dan konsumsi yang mempertahankan nilai material lebih lama. Bagian yang membahas ekonomi rantai pasokan sirkular memadukan konsep, indikator sirkularitas, mekanisme kontrak berbasis kinerja, serta peta jalan nasional dan perusahaan. Analisis ini penting bagi pembaca yang ingin menerjemahkan prinsip keberlanjutan ke dalam keputusan operasional yang konkret.

Visibilitas ujung-ke-ujung (E2E) menjadi landasan operasional yang diuraikan melalui arsitektur IoT dan ekosistemnya. Bab terkait menjelaskan bagaimana sensor, platform telemetri, dan aliran data real-time dapat meningkatkan ketepatan prediksi, mitigasi risiko, serta transparansi rantai pasokan. Disertakan pula pembahasan tentang batasan teknis dan desain arsitektur yang dapat diandalkan.

Transparansi dan kepercayaan di rantai pasokan juga dianalisis melalui lensa blockchain. Buku ini mengevaluasi peran teknologi ledger terdistribusi dalam menyederhanakan auditabilitas, menurunkan risiko penipuan, dan memperkuat akuntabilitas sambil menimbang isu skalabilitas dan integrasi dengan sistem lama. Dalam bab yang membahas sistem otonom, manufaktur aditif, dan inventaris digital, pembaca diperkenalkan pada bagaimana otomatisasi end-to-end dan kemampuan produksi desentralisasi dapat mengubah model inventaris tradisional, memperpendek lead time, dan meningkatkan responsivitas terhadap gangguan.

Data dan optimasi menjadi benang merah teknis yang menghubungkan banyak topik. Bagian-bagian tentang big data, AutoML, dan optimasi berbasis AI memandu pembaca pada metode analitis dan alat yang dapat dipakai untuk meningkatkan efisiensi operasional, pengambilan keputusan stok, routing, dan perencanaan produksi. Terdapat juga diskusi tentang fungsi organisasi dan perubahan struktur kerja yang diperlukan untuk mengelola kapabilitas ini. Transformasi yang efektif menuntut perubahan manusiawi: pengembangan talenta digital, manajemen perubahan, dan tata kelola etika mendapatkan porsi yang signifikan. Buku ini menyajikan kerangka kerja untuk membangun kompetensi baru, mengatasi kesenjangan teori-praktik, serta menempatkan tata kelola AI etis dan aspek sosial sebagai bagian integral dari strategi rantai pasokan. Keamanan siber dan pendekatan Zero Trust dibahas dalam konteks perlindungan aset digital rantai pasokan mulai dari integritas data sensor IoT hingga keandalan model AI. Pembaca diberi panduan arsitektural dan strategi mitigasi untuk menjaga operasi tetap aman di tengah ancaman yang terus berkembang.

Bab akhir merangkum model konseptual dan tema inti untuk revolusi rantai pasokan berbasis AI & ML, faktor kunci untuk transformasi, serta peta jalan keberlanjutan yang membantu organisasi menavigasi perjalanan transformatif mereka. Penutup buku menekankan pentingnya sinergi antara teknologi, kebijakan, praktik bisnis, dan perubahan budaya organisasi untuk mewujudkan rantai pasokan yang tidak hanya efisien, tetapi juga adil dan berkelanjutan.

Kami berharap karya ini berfungsi sebagai sumber referensi komprehensif bagi berbagai audiens: pembuat kebijakan yang merumuskan regulasi dan insentif, eksekutif dan manajer yang merancang strategi korporat, praktisi logistik yang mengelola operasi sehari-hari, serta akademisi dan mahasiswa yang menelaah teori dan bukti empiris. Lebih dari sekadar peta teknologi, buku ini menawarkan kerangka pemikiran untuk menggabungkan tujuan ekonomi, sosial, dan lingkungan dalam praktik rantai pasokan.

Ucapan terima kasih khusus kami sampaikan kepada penulis-penulis bab yang berbagi keahlian, pihak mitra penelitian dan industri yang menyediakan data serta studi kasus, serta tim editorial dan produksi yang mendedikasikan waktu untuk memastikan kualitas karya ini. Kami juga menghargai masukan dari rekan sejawat dan praktisi yang telah menguji konsep-konsep awal selama proses penyusunan.

Akhir kata, tantangan dalam mendesain rantai pasokan masa depan tidak dapat diselesaikan oleh satu teknologi atau satu kelompok saja. Diperlukan kolaborasi lintas sektor antara industri, akademika, regulator, dan Masyarakat untuk membangun sistem yang tangguh,

transparan, dan berkelanjutan. Semoga buku ini menjadi salah satu alat dalam perjalanan itu, memicu diskusi, solusi praktis, dan aksi yang berkelanjutan.

Semangat & Selamat Membaca....!!!!

Semarang, Mei 2026
Penulis

Dr. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	iv
BAB 1 AI DAN OTOMASI UNTUK RANTAI PASOK TANGGUH BERKELANJUTAN.....	1
1.1 Pendahuluan.....	1
1.2 Memahami Ketahanan Rantai Pasokan.....	2
1.3 Manajemen Risiko Rantai Pasokan.....	2
1.4 Dampak Pandemi Terhadap Kerentanan Rantai Pasokan	2
1.5 Membangun Ketahanan Pasca-Pandemi.....	4
1.6 Masa Depan Ketahanan Rantai Pasokan	5
1.7 Dampak Covid-19 Terhadap Orientasi Rantai Pasokan	8
BAB 2 PERAN AI GENERATIF DALAM KEPUTUSAN RANTAI PASOKAN	10
2.1 Gen-AI Dalam Pengambilan Keputusan Rantai Pasokan	10
2.2 Produktivitas Dan Otomatisasi Dalam SCM.....	11
2.3 Pemetaan Temuan Utama Dan Tantangan Adopsi AI.....	14
2.4 Fragmentasi Dan Standardisasi Data Rantai Pasokan	18
2.5 Teknologi AI Generatif	19
2.6 Strategi LLM+RAG Untuk Peninjauan Kontrak Dan Penilaian Pemasok	20
BAB 3 EKONOMI RANTAI PASOKAN SIRKULAR.....	21
3.1 Ekonomi Rantai Pasokan Sirkular: Ruang Lingkup Dan Konsep.....	21
3.2 Memahami Konsep Ekonomi Sirkular Dalam Rantai Pasokan.....	22
3.3 Mekanisme Ekonomi Rantai Pasokan Sirkular.....	23
3.4 Kontrak Berbasis Kinerja Dalam Rantai Pasok Sirkular.....	23
3.5 Keputusan Operasional Dalam Rantai Pasok Tertutup.....	25
3.6 Indikator Sirkularitas Material (MCI)	25
3.7 Standar Desain Untuk Reparabilitas Dan Daur Ulang	28
3.8 Perubahan Dalam Pekerjaan Dan Struktur.....	28
3.9 Bukti Empiris Ekonomi Sirkular Berbagai Sektor	29
3.10 Hambatan Teknologi Dan Operasional	30
3.11 Bukti Empiris Dan Dampak Sirkular Lintas Sektor	30
3.12 Peta Jalan Ekonomi Sirkular Nasional.....	31
3.13 Peta Jalan Ekonomi Sirkular Perusahaan.....	33
3.14 Hambatan Perilaku Terhadap Pengembalian Konsumen	33
3.15 Menyatukan Rantai Pasok Sirkular Dan Kebijakan Publik	34
BAB 4 ARSITEKTUR IOT UNTUK VISIBILITAS UJUNG-KE-UJUNG.....	37
4.1 IoT Untuk Visibilitas Ujung-Ke-Ujung (E2E) Rantai Pasokan	37
4.2 Definisi Dan Ruang Lingkup Visibilitas Rantai Pasokan	38
4.3 Internet Of Things (IoT) Dalam Logistik Dan Rantai Pasokan	38
4.4 Visibilitas Ujung-Ke-Ujung (E2E): Konsep Dan Manfaat.....	42

4.5	Tantangan IoT Pada Visibilitas Rantai Pasok.....	43
4.6	Masa Depan IoT Dan Visibilitas Rantai Pasok.....	45
4.7	IoT Sebagai Fondasi Rantai Pasokan Cerdas.....	46
BAB 5	BLOK BANGUNAN EKOSISTEM IOT YANG TRANSPARAN	47
5.1	Arsitektur Berlapis Sistem IoT	47
5.2	Karakteristik Fundamental Dan Batasan Perangkat IoT	50
5.3	Arsitektur End-To-End Dan Aliran Pemrosesan Data Pada Sistem IoT	50
5.4	IoT Sebagai XaaS: Konsep Dan Mekanisme	53
5.5	Peran IoT Dalam Integrasi Fisik–Digital	56
BAB 6	BLOCKCHAIN UNTUK TRANSPARANSI RANTAI PASOK	57
6.1	Peran Blockchain Dalam Rantai Pasokan.....	57
6.2	Teknik Pengumpulan Data CATI	59
6.3	Dampak Dan Metrik Keberhasilan Blockchain Perusahaan	59
6.4	Tantangan Skalabilitas Blockchain	66
BAB 7	SISTEM OTONOM DALAM OPERASI RANTAI PASOKAN	68
7.1	Definisi Dan Konsep Sistem Otonom Dalam Logistik	68
7.2	Tujuan Dan Ruang Lingkup Bab Ini	70
7.3	Pemantauan Riset Sistematis (SLR)	70
7.4	Evolusi Dan Klasifikasi Sistem Otonom Dalam Logistik	71
7.5	Peran Sistem Otonom Dalam Operasi Rantai Pasokan.....	76
BAB 8	OPTIMASI DATA UNTUK KETAHANAN RANTAI PASOK GENERASI BARU	78
8.1	Peran Data Dalam Optimasi Rantai Pasokan	78
8.2	Teknologi Informasi Dalam Manajemen Logistik Modern	79
8.3	Peran Data Sebagai Dasar Optimasi	80
8.4	Pentingnya Data Dalam Manajemen Rantai Pasokan	80
8.5	Teknologi Pendukung Pengumpulan Dan Pembahasan Data.....	81
8.6	Aplikasi Model Optimasi Dan Riset Operasi Logistik	85
8.7	Fungsi Departemen Dalam Manajemen Rantai Pasokan	89
BAB 9	OPTIMASI RANTAI PASOKAN BERBASIS DATA	90
9.1	Peran Data Dan Optimasi Berbasis AI Dalam SCM	90
9.2	Pembahasan Big Data (BDA) Dalam Praktik Ekonomi	91
9.3	ML Otomatis Dalam Optimasi Rantai Pasokan	96
9.4	Optimasi SCM Di Persimpangan Big Data, AI, Dan AutoML	105
BAB 10	PETA JALAN TRANSFORMASI KEBERLANJUTAN	107
10.1	Keblanjutan Dan Metodologi Roadmap	107
10.2	Transformasi Keberlanjutan	109
10.3	Struktur Peta Jalan Keberlanjutan	110
10.4	Prinsip Dasar Peta Jalan Keberlanjutan	116
10.5	Roadmap Sebagai Pilar Transformasi Berkelanjutan	118
BAB 11	REDESAIN RANTAI PASOKAN CERDAS & BERKELANJUTAN	120
11.1	Ketahanan Rantai Pasokan Di Era Gejolak Global	120

11.2	Metode Dan Bahan Eksperimental.....	121
11.3	Nearshoring Sebagai Strategi Ketahanan	121
11.4	Landasan Konseptual Nearshoring.....	121
11.5	Faktor Pendorong Adopsi Nearshoring	121
11.6	Manfaat Nearshoring	122
11.7	Tantangan Dan Risiko Nearshoring.....	123
11.8	Studi Kasus Industri	124
11.9	Konsep Viabilitas Keberlanjutan Dan Adaptabilitas Jangka Panjang.....	124
11.10	Masa Depan Pembelajaran Nearshoring.....	124
11.11	Redesain Jaringan & Kembaran Digital.....	125
11.12	Tantangan Implementasi Kembaran Digital	127
11.13	Keberlanjutan & ESG Rantai Pasok	129
11.14	Evaluasi Empiris Kinerja Dan Metrik Rantai Pasokan	132
11.15	Rekomendasi Strategis Transformasi Rantai Pasokan	134
11.16	Perubahan Paradigma Rantai Pasokan Global	135
BAB 12	PENGEMBANGAN TALENTA RANTAI PASOK DIGITAL	136
12.1	Pergeseran Paradigma Rantai Pasokan 4.0	136
12.2	Profesional Rantai Pasok Masa Depan	138
12.3	Strategi SDM Untuk Rantai Pasokan Generasi Berikutnya	140
12.4	Kesenjangan Teori Praktik Dalam Pendidikan Rantai Pasokan	142
12.5	Studi Kasus Maersk: Transformasi Ke Logistik Berbasis Teknologi	144
12.6	Tenaga Kerja Sebagai Sumber Keunggulan Kompetitif.....	145
BAB 13	MANAJEMEN PERUBAHAN RANTAI PASOK	149
13.1	Transformasi Rantai Pasokan Sebagai Imperatif Strategis.....	149
13.2	Manajemen Perubahan Sebagai Jembatan Antara Inovasi Dan Kinerja	150
13.3	Kerangka Kerja Untuk Manajemen Perubahan Rantai Pasokan.....	154
13.4	Pentingnya Kepemimpinan Dan Struktur Tata Kelola.....	156
13.5	Tantangan Teknis: Data, AI, IoT, Blockchain, Dan Infrastruktur TI	157
13.6	Menghubungkan Hambatan Dengan Tujuan Transformasi Berkelanjutan	158
13.7	Dampak Teknologi Digital Terhadap Kecanggihan Rantai Pasokan	158
BAB 14	TEKNOLOGI & MODEL BARU	159
14.1	Konvergensi Disiplin Dan Ketergantungan Antar Sektor	159
14.2	Kerangka Kerja Terpadu Untuk Migrasi Data Cerdas.....	162
14.3	Peran AI Generatif Dalam Migrasi Data Lintas Domain.....	167
14.4	Integrasi Data Petrokimia–Medis: Enam Kasus Simulasi.....	171
14.5	Evaluasi Sintetis Kerangka Migrasi Data AI	175
14.6	Penjelasan Untuk Transformasi Semantik	179
14.7	Arsitektur Simulasi AI Migrasi Data Lintas Domain	180
BAB 15	KEAMANAN SIBER DAN ZERO TRUST DALAM RANTAI PASOKAN	181
15.1	Zero Trust Untuk Rantai Pasokan.....	181
15.2	Ancaman Siber Pada Rantai Pasokan Dan Kebutuhan Zero Trust	182

15.3	Arsitektur Dalam Lanskap Rantai Pasokan	183
15.4	Pilar-Pilar Zero Trust Dalam Konteks Rantai Pasokan	184
15.5	Implementasi ZTA: Pergeseran Arsitektur	187
15.6	Zero Trust Untuk Teknologi Rantai Pasokan Generasi Berikutnya.....	187
15.7	Tantangan Implementasi ZTA Dalam Rantai Pasokan.....	187
15.8	Tren Masa Depan Zero Trust.....	188
15.9	Zero Trust Untuk Ketahanan Rantai Pasok Digital	188
BAB 16	MANUFAKTUR ADITIF DAN MUNCULNYA INVENTARIS DIGITAL.....	190
16.1	Keterbatasan Model Inventaris Fisik	190
16.2	Mendefinisikan Paradigma Inventaris Digital	191
16.3	Manufaktur Aditif Sebagai Teknologi Pendukung	191
16.4	Ketahanan, Kelincahan, Dan Optimasi Biaya Strategis	192
16.5	Manufaktur Aditif (AM) Dan Keberlanjutan Rantai Pasokan	193
16.6	Hambatan Transisi Ke Inventaris Digital	193
16.7	Mengintegrasikan Inventaris Digital Dengan AI Dan IoT	194
16.8	Strategi Transisi Bertahap Ke Inventaris Digital	196
BAB 17	TATA KELOLA ETIKA DAN SOSIAL RANTAI PASOKAN DIDUKUNG AI	197
17.1	Pentingnya AI Etis Dalam Rantai Pasokan Global	197
17.2	Tantangan Etika Inti Yang Ditimbulkan Oleh AI Rantai Pasokan	200
17.3	Dampak Etis Dan Sosial AI Dalam Rantai Pasokan	202
17.4	Kerangka Tata Kelola AI Etis Dalam Rantai Pasokan	204
17.5	Tata Kelola Sosial Berbasis Nilai.....	206
17.6	Mekanisme Operasional Tata Kelola AI Etis	208
17.7	Metrik, Pelaporan, Dan Peningkatan Tata Kelola AI	210
17.8	Menavigasi Dilema Etis Dan Tata Kelola AI Dalam Rantai Pasokan	211
17.9	Peran Penting Tata Kelola AI Etis & Sosial Dalam Rantai Pasokan.....	213
BAB 18	MODEL KONSEPTUAL REVOLUSI RANTAI PASOKAN DENGAN AI & ML.....	215
18.1	AI Dan ML Dalam Transformasi Rantai Pasok Global	215
18.2	AI Dan ML Sebagai Penguat Ketahanan Rantai Pasokan	216
18.3	Pendekatan Konseptual AI & ML Dalam SCM	218
18.4	Model Konseptual AI & ML Untuk Rantai Pasokan Cerdas	219
18.5	Lima Tema AI & ML Dalam SCM	220
18.6	Implikasi Manajerial AI & ML	221
18.7	AI & ML Sebagai Pengungkit Ketangkasan Dan Ketahanan.....	222
18.8	Arah Pembelajaran AI & ML Dalam SCM.....	223
BAB 19	FAKTOR KUNCI AI UNTUK TRANSFORMASI RANTAI PASOKAN.....	225
19.2	Aplikasi AI Dalam SCM, Keberlanjutan, XAI, Dan Kembaran Digital.....	227
19.3	Pendekatan Smart Untuk Transformasi Manufaktur Cerdas.....	229
19.4	Hasil Smart: Strategi Berbasis Data Lebih Unggul	232
19.5	Evaluasi Pendekatan Cerdas Untuk Manufaktur Cerdas	235
BAB 20	KECERDASAN BERKELANJUTAN: AI ETIS UNTUK RANTAI PASOKAN GLOBAL ..	236

20.1	AI Rantai Pasokan: Efisiensi & Risiko Etis.....	236
20.2	Tiga Ranah: AI & Keberlanjutan, Etika AI, Tata Kelola AI	237
20.3	Kesenjangan Etika Dan Keberlanjutan AI Dalam Rantai Pasok.....	240
20.4	Kerangka Teoretis AI Berkelanjutan Dalam SCM Global.....	241
20.5	Kecerdasan Berkelanjutan Berbasis AI Dalam Rantai Pasok	244
20.6	Implikasi Kebijakan AI Berkelanjutan	247
20.7	Kesimpulan	249
DAFTAR PUSTAKA		252

BAB 1

AI DAN OTOMASI UNTUK RANTAI PASOK TANGGUH BERKELANJUTAN

1.1 PENDAHULUAN

Bab ini membahas bagaimana krisis Covid-19 menimbulkan kelemahan sistemik dalam rantai pasokan global dan mendorong perubahan dari model berbasis efisiensi menjadi model berbasis ketahanan. Bab ini memberikan pendekatan holistik untuk membangun rantai pasokan yang tangguh dan berkelanjutan, yang dibangun di atas fleksibilitas, ketangkasan, dan redundansi, serta didukung oleh teknologi terbaru termasuk AI/otomasi/blockchain. Bab ini membandingkan pendekatan lama dengan pendekatan baru dalam manajemen risiko, dengan mengambil pelajaran penting dari pandemi, dan menekankan kebutuhan yang semakin meningkat akan transparansi, keberlanjutan, dan diversifikasi strategis.

Rekomendasi praktis diberikan untuk membantu organisasi mempersiapkan diri menghadapi gangguan di masa depan dan membangun rantai pasokan yang adaptif dan siap menghadapi masa depan. Selain kemajuan teknologi, bab ini menjelaskan bagaimana prinsip-prinsip keberlanjutan seperti model ekonomi sirkular, pengadaan yang etis, dan pengurangan jejak karbon harus diintegrasikan ke dalam strategi rantai pasokan. Dengan studi kasus dan contoh dari seluruh dunia, buku ini menawarkan model yang menunjukkan bagaimana inovasi digital yang dikombinasikan dengan sistem keberlanjutan dapat membantu organisasi merespons perubahan lebih cepat, mengelola risiko secara lebih efektif, dan mengembangkan pendekatan inovatif untuk keunggulan kompetitif jangka panjang di dalam atau di luar industri.

Di dunia pasca-pandemi, ketahanan bukan lagi hanya kemampuan untuk bangkit kembali dari guncangan. Ketahanan juga mencakup kemampuan untuk meramalkan, menyerap, menyesuaikan diri, dan pulih dari berbagai ancaman yang seringkali tidak terduga, baik dari pandemi, ketegangan geopolitik, bencana alam, maupun bencana siber. Pandemi mempercepat pergeseran paradigma, memaksa perusahaan untuk menyeimbangkan kembali prioritas mereka dari efisiensi tepat waktu menuju kesiapan untuk berjaga-jaga. Inti dari transformasi ini terletak pada integrasi teknologi disruptif, seperti kecerdasan buatan (AI), otomatisasi, dan blockchain.

Bab ini memberikan pemantauan menyeluruh tentang ketahanan dalam rantai pasokan dari perspektif teknologi dan keberlanjutan. Bab ini dimulai dengan mengklarifikasi istilah ketahanan untuk skenario rantai pasokan, kemudian menjelaskan tiga dimensi ketahanan (fleksibilitas, ketangkasan, dan redundansi) serta indikator terukurnya. Selanjutnya, bab ini membahas kerangka kerja manajemen risiko, membandingkan kerangka kerja tradisional dengan analitik prediktif yang didukung AI. Berdasarkan pelajaran dari pandemi dan krisis global lainnya, bab ini berfokus pada kerentanan struktural dan menggunakan studi kasus untuk menunjukkan kegagalan penting dan strategi penting apa saja. Terakhir, bab ini menawarkan cara-cara praktis untuk mengembangkan rantai pasokan yang siap menghadapi

masa depan, tangguh, berkelanjutan, dan didukung teknologi untuk bertahan dari perubahan dunia yang cepat.

1.2 MEMAHAMI KETAHANAN RANTAI PASOKAN

Ketahanan rantai pasokan tidak lagi dipandang sebagai respons reaktif, melainkan sebagai karakteristik sistemik, fitur dinamis yang terintegrasi ke dalam desain, tata kelola, dan infrastruktur teknologi jaringan rantai pasokan. Di era peristiwa angsa hitam, ketidakstabilan geopolitik, guncangan iklim, dan ancaman siber, rantai pasokan harus berjalan efisien dalam hal prinsip reguler dan bertindak tangguh di bawah tekanan serta beradaptasi selama pemulihan. Ketahanan, kemudian, bukanlah tindakan menghindari gangguan, tetapi memiliki kemampuan untuk bertahan, menyesuaikan diri, dan tumbuh melaluinya. Pada dasarnya, ketahanan rantai pasokan merupakan kombinasi dari tiga elemen yang saling terkait: fleksibilitas, kelincahan, dan redundansi. Ketiga hal ini bersama-sama menciptakan triad inti yang memungkinkan organisasi untuk merespons gangguan sebagai kondisi yang harus dirancang, bukan ancaman eksistensial yang menghadirkan masalah yang dapat kami selesaikan untuk Anda.

1.3 MANAJEMEN RISIKO RANTAI PASOKAN

Dalam rantai pasokan, manajemen risiko adalah mengidentifikasi, menilai, dan memprioritaskan risiko dan gangguan yang diharapkan yang dapat memengaruhi keberlanjutan operasi rantai pasokan. Manajemen risiko dapat ditingkatkan dengan bantuan AI melalui pembahasan dampak potensial dari berbagai risiko yang berkaitan dengan risiko keuangan, operasional, lingkungan, atau politik.

1.4 DAMPAK PANDEMI TERHADAP KERENTANAN RANTAI PASOKAN

Gangguan yang Disebabkan oleh Krisis Global

Krisis Covid-19 bertindak seperti gempa bumi bagi rantai pasokan dunia, menyoroiti kerapuhan praktik rantai pasokan konvensional dan secara signifikan menghambat pergerakan barang. Pabrik, jaringan transportasi, dan perbatasan internasional ditutup secara tiba-tiba dan global. Penutupan pabrik, terutama di Tiongkok, menyebabkan kekurangan bahan baku dan komponen inti yang berdampak di seluruh sektor elektronik dan otomotif. Pada saat yang sama, perlambatan transportasi, khususnya angkutan udara dan laut, menyebabkan penumpukan dan kekurangan persediaan produk, yang mengakibatkan penundaan produk yang signifikan. Kekurangan tenaga kerja akibat sakit, karantina, dan penguncian wilayah memperburuk situasi. Perusahaan harus beroperasi dengan staf terbatas, yang menyebabkan penurunan produksi dan perlambatan di berbagai tahap rantai pasokan.

Efek Berantai Pada Jaringan Pasokan Global

Efek Domino Dari Gangguan

Dampak lanjutan pandemi Covid-19 bergema di seluruh rantai pasokan global, karena satu titik masalah dalam rantai pasokan seringkali menyebabkan penundaan dan kekurangan

lebih lanjut di hilir. Misalnya, kekurangan semikonduktor, akibat penutupan pabrik di Asia, sangat memukul sektor otomotif. Pabrik-pabrik yang memproduksi chip tersebut tutup.

Kerentanan dalam Sistem Persediaan *Just-In-Time* (JIT)

Pandemi Covid-19 telah mengungkap kelemahan yang mencolok dalam sistem persediaan JIT (*Just-In-Time*) yang mengutamakan efisiensi biaya daripada ketahanan rantai pasokan. Sistem tersebut dioptimalkan untuk mengurangi biaya stok dan penyimpanan dan tidak memiliki stok penyangga yang dapat digunakan jika terjadi guncangan. Dengan perusahaan yang mengalami lonjakan atau penurunan permintaan produk secara tiba-tiba, banyak yang menyadari kekeliruan mengandalkan strategi JIT untuk produk-produk penting. Saksikan industri otomotif sebagai contoh, yang mengandalkan sistem persediaan JIT. Kekurangan, khususnya komponen-komponen penting seperti semikonduktor, menyebabkan penundaan produksi yang lama, yang menggarisbawahi tantangan yang dapat dihadapi oleh model inventaris ramping di masa krisis.

Kompleksitas Rantai Pasokan

Namun, selama pandemi Covid-19, sifat sebenarnya dari tantangan yang tersirat dalam rantai pasokan global menjadi jauh lebih jelas. Pada saat itu, bisnis memiliki hubungan yang panjang dan renggang dengan pemasok yang tidak dapat dengan cepat beradaptasi dengan gangguan. Kompleksitas ini tidak hanya mempersulit penyelesaian masalah dengan cepat, tetapi juga lambat untuk berubah. Tidak ada yang kebal, bahkan bisnis dengan mesin teknologi yang konon hebat seperti Walmart dan Amazon mengalami gangguan besar.

Studi Kasus Gangguan Rantai Pasokan Utama Selama Pandemi

Studi Kasus: Amazon dan Kekurangan Inventaris Selama Pandemi

Rantai pasokan global menjadi kacau akibat pandemi Covid-19, terutama raksasa e-commerce seperti Amazon. Dengan pandemi yang menyebabkan penutupan pabrik dan penundaan transportasi di seluruh dunia, Amazon mengalami kesulitan besar dalam menjaga stok barang-barang pentingnya. Dengan pabrik-pabrik yang tutup dan gangguan signifikan pada rute pengiriman akibat penutupan pabrik dan pelabuhan serta kekurangan tenaga kerja, perusahaan mengalami kekurangan stok yang meluas.

Pada awal tahun 2020, Amazon menghadapi kekurangan barang-barang seperti pembersih tangan, produk pembersih, dan makanan tahan lama. Setelah permintaan untuk barang-barang ini melonjak, perusahaan dengan cepat menyadari bahwa mereka tidak dapat memenuhi permintaan, dan permintaan tersebut telah dipercepat oleh krisis kesehatan dan migrasi orang-orang yang berbelanja online. Untuk mengatasi masalah tersebut, Amazon mengurangi prioritas barang-barang yang tidak penting, menyesuaikan logistiknya untuk mengirimkan barang-barang penting terlebih dahulu, dan mempekerjakan 175.000 pekerja baru.

3M dan Kekurangan Masker N95

Rantai pasokan layanan kesehatan dan farmasi mengalami tekanan besar akibat pandemi Covid-19, yang disertai dengan lonjakan permintaan yang belum pernah terjadi sebelumnya untuk peralatan medis penyelamat jiwa, termasuk APD, ventilator, dan alat uji. Hal ini diperparah oleh perlambatan produksi dan penutupan pabrik yang disebabkan oleh

lockdown, serta gangguan dalam jaringan logistik global. Salah satu contoh utamanya adalah 3M, tetapi mereka jauh dari sendirian; produsen masker N95 ini tidak dapat mengimbangi permintaan yang sangat besar untuk alat pelindung diri (APD) ketika pandemi dimulai. Karena rumah sakit di seluruh dunia mengalami kekurangan yang parah akan pasokan penting ini, 3M kesulitan memenuhi permintaan jika mereka meningkatkan produksi untuk memenuhi kebutuhan global, bukan hanya kebutuhan domestik.

Perusahaan tersebut berada dalam dilema. Kapasitas manufaktur mereka sendiri terbatas, dan rantai pasokan global kacau. Hal ini mengakibatkan keterlambatan distribusi masker N95 kepada petugas kesehatan garda depan serta bencana kesehatan. Pada saat yang sama, produsen obat seperti Pfizer didorong untuk meningkatkan produksi vaksin Covid-19 dengan tantangan tersendiri dalam mengatasi hambatan rantai pasokan.

Tyson Foods dan Gangguan Pasokan Daging

Sektor pangan termasuk yang paling terdampak selama pandemi Covid-19, dengan kekurangan tenaga kerja, penutupan pabrik, dan gangguan besar pada rantai pasokan. Termasuk penutupan pabrik pengolahan daging yang berdampak besar setelah wabah Covid-19 di antara para pekerja. Hal ini memaksa penutupan pasokan daging terbesar dalam sejarah yang mengakibatkan kekurangan dan lonjakan harga di semua sektor. Tyson Foods, pengolah daging utama Amerika, menghadapi tantangan signifikan selama pandemi. Tyson harus menutup beberapa pabrik karena wabah Covid-19 merajalela di beberapa fasilitasnya, menghantam volume produksinya. Hal itu menyebabkan kekurangan daging sapi, ayam, dan babi di toko-toko bahan makanan di negara tersebut, karena pasokan daging olahan menjadi terbatas. Gangguan tersebut membuat rak-rak kosong, dan juga mendorong kenaikan harga pangan karena permintaan daging melebihi pasokan.

1.5 MEMBANGUN KETAHANAN PASCA-PANDEMI

Pandemi Covid-19 telah secara tak terbantahkan mengungkap kerapuhan rantai pasokan modern sekaligus menyoroti peran strategisnya. Pandemi ini telah menjadi peringatan bagi organisasi, mendorong mereka untuk mengembangkan rencana kontingensi yang kuat untuk mengatasi ketidakpastian di masa depan dan meningkatkan ketahanan rantai pasokan di dunia pasca-pandemi. Terlepas dari gangguan yang signifikan, salah satu hasil positifnya adalah kesadaran bahwa pendekatan tradisional terhadap ketahanan rantai pasokan tidak cukup untuk mengelola guncangan skala besar seperti itu.

Peran Teknologi dalam Memperkuat Ketahanan: AI, Otomatisasi, dan Blockchain

Memperkuat ketahanan dan keberlanjutan rantai pasokan dan proses manufaktur membutuhkan integrasi teknologi yang lebih canggih yang terkait dengan revolusi industri kelima (Industri 5.0). Komponen inti Industri 5.0 yang digerakkan oleh AI, seperti sistem siber-fisik, otomatisasi, IoT, dan blockchain, bekerja secara sinergis dengan kecerdasan manusia untuk membuka cakrawala baru dalam inovasi dan kesiapan. Teknologi-teknologi ini telah memainkan peran penting dalam mengatasi gangguan yang belum pernah terjadi sebelumnya yang disebabkan oleh pandemi Covid-19 dan dalam membentuk operasi yang lebih gesit, adaptif, dan siap menghadapi masa depan. Seperti yang dibahas oleh Ahmed dan rekan-rekan,

Industri 5.0 (I5.0), bersama dengan AI, menghadirkan peluang transformatif untuk menciptakan masa depan yang inklusif secara digital dengan meningkatkan ketahanan dan keberlanjutan rantai pasokan. Mereka mendokumentasikan bahwa pemantauan rantai pasokan secara real-time yang dimungkinkan oleh IoT muncul sebagai faktor paling penting dalam meningkatkan ketahanan dan kelangsungan hidup rantai pasokan manufaktur.

Pengadaan Strategis dan Diversifikasi Pemasok

Riset telah membahas berbagai strategi pengadaan untuk meningkatkan ketahanan dan kinerja rantai pasokan. Strategi pengadaan tunggal hanya melibatkan satu pemasok; ini berarti biaya produksi yang lebih rendah, tingkat persediaan yang lebih rendah, hubungan pemasok yang lebih baik, dan informasi yang lebih aman. Namun, hal ini menimbulkan risiko kegagalan yang lebih tinggi. Di sisi lain, pengadaan ganda melibatkan banyak pemasok. Strategi ini dapat mengurangi risiko selama periode gangguan dan mendorong daya saing di antara pemasok. Namun, mengelola banyak pemasok menyebabkan kompleksitas operasional yang lebih besar dan peningkatan biaya.

Gangguan berkepanjangan yang disebabkan oleh pandemi Covid-19 telah memicu diskusi baru mengenai strategi pengadaan dan ketahanan yang ada untuk memastikan kelangsungan rantai pasokan. Echefaj dan rekan-rekan. menyajikan kerangka kerja yang menggabungkan elemen ekonomi sirkular dengan strategi pengadaan yang lebih tangguh. Hal ini menyoroti perlunya koordinasi yang efektif antara siklus sumber daya, saling ketergantungan rantai pasokan, dan ketidakpastian umum di seluruh jaringan yang terhubung.

Kolaborasi dan Transparansi Rantai Pasokan untuk Manajemen Risiko

Suatu perusahaan dianggap transparan ketika secara publik membagikan informasi rinci tentang pemasoknya, standar keberlanjutan, dan praktik pembelian. Transparansi rantai pasokan mengacu pada sejauh mana perusahaan memiliki informasi penting tentang aktivitas hulu dan hilir dalam jaringan pasokannya. Hal ini juga melibatkan kesediaan suatu organisasi untuk secara publik membagikan informasi ini. Selain itu, transparansi rantai pasokan juga dapat mengurangi risiko rantai pasokan dan meningkatkan ketahanan. Untuk mendapatkan manfaat dari pemangku kepentingan dan memenuhi persyaratan pemerintah, perusahaan kini secara proaktif mengungkapkan informasi.

Secara historis, rantai pasokan global telah berjuang dengan transparansi dan ketertelusuran, masalah yang membutuhkan koordinasi banyak pihak dan proses teknologi baru. Namun, perkembangan terkini menunjukkan pergeseran ke arah penggunaan inovasi untuk memecahkan masalah ini. Di antara solusi-solusi tersebut, teknologi blockchain semakin populer untuk meningkatkan visibilitas dan akuntabilitas rantai pasokan.

1.6 MASA DEPAN KETAHANAN RANTAI PASOKAN

Pelajaran yang Dipetik dan Strategi Jangka Panjang

Pentingnya rantai pasokan yang tangguh menjadi peringatan bagi bisnis di seluruh dunia selama pandemi Covid-19. Ke depan, bisnis tidak hanya harus pulih dari dampak pandemi tetapi juga mempersiapkan diri untuk gangguan di masa depan, seperti tantangan ekonomi, lingkungan, atau teknologi.

Kemampuan Beradaptasi Lebih Penting daripada Efisiensi

Rantai pasokan di masa depan harus cukup gesit untuk beralih strategi dengan cepat jika dan ketika gangguan muncul. Bisnis harus menemukan keseimbangan yang tepat antara efisiensi dan ketahanan dengan membangun lebih banyak fleksibilitas dalam pengadaan, manufaktur, dan distribusi mereka.

Diversifikasi Pemasok

Pandemi menunjukkan bahaya terlalu bergantung pada pemasok atau wilayah tunggal. Perusahaan harus bertujuan untuk mengembangkan jaringan pasokan global dan membuatnya kebal terhadap gangguan akibat bencana alam atau pandemi. Taktik seperti pengadaan regional, penggunaan pemasok alternatif untuk mendapatkan produk-produk penting, dan kemitraan di pasar lokal dapat membantu perusahaan untuk melindungi diri dari guncangan di masa depan.

Transformasi Digital

Strategi jangka panjang yang penting untuk meningkatkan ketahanan rantai pasokan adalah adopsi teknologi digital. Gangguan seperti pandemi menunjukkan bahwa kelincahan dan kemampuan untuk beradaptasi dengan cepat bergantung pada aliran informasi waktu nyata dan alat digital. Teknologi seperti AI, IoT, komputasi awan, dan blockchain menyediakan kemampuan yang dibutuhkan untuk pembahasan tingkat lanjut, memungkinkan organisasi untuk mengantisipasi tantangan di masa depan. Seperti yang dicatat oleh Chauhan dan rekan-rekan, prediksi yang lebih baik pada akhirnya mengarah pada keputusan yang lebih baik.

Membangun Hubungan yang Lebih Kuat dengan Pemasok

Bisnis juga perlu melakukan diversifikasi dan menjadi kurang transparan terkait pemasok mereka. Artinya, berbagi bukan hanya data tetapi juga tujuan keberlanjutan, termasuk praktik ketenagakerjaan etis yang berkomitmen dan operasi manajemen risiko bersama. Dalam kondisi terbaik, praktik ini akan memfasilitasi komunikasi yang lebih cepat dan deteksi ancaman lebih awal di saat krisis.

Bagaimana Organisasi dapat Mempersiapkan Diri Menghadapi Gangguan di Masa Depan

Untuk bersiap menghadapi gangguan berikutnya, organisasi perlu mengambil pendekatan proaktif untuk melihat apa saja risiko yang mungkin terjadi. Ini melibatkan penerapan sistem dan kerangka kerja yang meningkatkan transparansi, meningkatkan keselarasan inventaris, dan mendukung penilaian risiko yang lebih baik.

Pembahasan Prediktif dan Pemodelan Risiko

Pemodelan risiko prediktif menggunakan AI dan pembelajaran mesin akan memainkan peran penting dalam memprediksi potensi gangguan. Perusahaan dapat menggunakan teknologi ini untuk mengolah data dalam jumlah besar dan memprediksi gangguan sebelum terjadi. Misalnya, dengan menggunakan algoritma AI, perusahaan dapat memprediksi keterlambatan pengiriman berdasarkan data historis, cuaca, dan peristiwa geopolitik beberapa bulan ke depan dan mengatur operasi rantai pasokan mereka terlebih dahulu.

Pemantauan Waktu Nyata dan Respons yang Tangkas

Kemampuan bisnis untuk melacak barang dan aset di mana pun dalam rantai pasokan akan dimungkinkan oleh perangkat berbasis IoT dan sistem pemantauan waktu nyata.

Visibilitas yang lebih besar ini akan memungkinkan organisasi untuk bereaksi lebih baik ketika kejutan yang tak terhindarkan terjadi yang menyebabkan gangguan di pelabuhan, pemasok yang offline, perubahan permintaan di pasar. Data real-time membuat bisnis menjadi lincah dan mampu membuat keputusan yang cerdas.

Optimalisasi Inventaris

Perusahaan juga harus mengevaluasi kembali strategi inventaris mereka untuk mencapai keseimbangan antara operasi yang ramping dan tangguh. Model just-in-time memberikan banyak keuntungan, tetapi pandemi memperjelas bahwa mempertahankan stok penyangga untuk produk-produk penting sangat penting, terutama selama masa-masa yang tidak pasti. Rantai pasokan di masa depan harus mencakup sistem inventaris yang lebih fleksibel yang mampu bereaksi terhadap perubahan permintaan dan kemungkinan gangguan.

Perencanaan Skenario dan Keberlanjutan Bisnis

Perusahaan juga harus secara teratur melakukan latihan perencanaan skenario di mana gangguan disimulasikan untuk melihat bagaimana rantai pasokan akan merespons. Hal ini dapat menarik perhatian pada kerentanan yang perlu diperbaiki dalam rantai pasokan.

Integrasi Praktik Berkelanjutan ke dalam Rantai Pasokan yang Tangguh

Ketahanan rantai pasokan jangka panjang bukan lagi pilihan. Keberlanjutan kini menjadi bagian penting dalam membangun rantai pasokan yang kuat dan tahan lama. Seiring dunia mengatasi masalah lingkungan dan sosial, bisnis perlu membawa keberlanjutan ke dalam rantai pasokan, tidak hanya untuk meminimalkan risiko jangka panjang, tetapi yang lebih penting untuk membuktikan keunggulan kompetitif mereka.

Model Ekonomi Sirkular

Semakin banyak perusahaan yang menggunakan prinsip ekonomi sirkular, yang berarti produk dirancang untuk umur panjang, perbaikan, dan pada akhirnya daur ulang. Ketergantungan yang lebih sedikit pada sumber daya yang terbatas dan lebih sedikit limbah memungkinkan perusahaan untuk mengembangkan rantai pasokan yang lebih berkelanjutan dan kuat. Misalnya, IKEA berupaya menggunakan sumber daya yang ramah lingkungan dan mempromosikan produk yang dapat didaur ulang atau digunakan kembali setelah masa pakainya berakhir.

Pengadaan Berkelanjutan dan Rantai Pasokan yang Etis

Organisasi perlu memperhatikan tidak hanya dari mana bahan baku diperoleh, tetapi juga praktik lingkungan dan etika dari pemasok yang mereka gunakan untuk melakukan outsourcing. Dengan bekerja sama dengan pemasok yang mendukung standar tenaga kerja yang berkelanjutan dan etis, organisasi dapat membantu memerangi risiko lingkungan dan sosial jangka panjang. Hal ini juga bermanfaat bagi citra merek perusahaan, karena konsumen dan investor semakin condong ke bisnis yang memiliki citra berkelanjutan yang kuat.

Efisiensi Energi dan Pengurangan Jejak Karbon

Perusahaan juga dapat membangun ketahanan rantai pasokan dengan meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan jejak karbon mereka. Beralih ke energi terbarukan, mengoptimalkan rute transportasi untuk meminimalkan pemborosan bahan bakar fosil, atau menerapkan logistik hijau adalah kunci dalam upaya menciptakan rantai pasokan yang lebih

berkelanjutan. Lebih lanjut, mengurangi dampak lingkungan dapat membantu bisnis untuk memenuhi persyaratan peraturan yang berubah, seperti kebijakan pajak karbon atau kewajiban pelaporan keberlanjutan.

Transparansi Rantai Pasokan

Baik keberlanjutan maupun ketahanan bergantung pada transparansi. Pelacakan dampak keberlanjutan dari setiap langkah dalam rantai pasokan secara visual memungkinkan perusahaan untuk menjamin bahwa mereka memenuhi tujuan keberlanjutan mereka dan tidak mengambil risiko seperti greenwashing. Teknologi seperti blockchain dapat memberikan transparansi dengan memungkinkan pemangku kepentingan untuk melacak produk dari asal hingga konsumen akhir untuk menjamin bahwa praktik etis dan berkelanjutan dipatuhi di setiap tahap dalam rantai pasokan.

Mempersiapkan Masa Depan yang Tak Terduga

Masa depan ketahanan rantai pasokan adalah kemampuan untuk mengatasi dunia yang semakin volatil, tidak pasti, kompleks, dan ambigu (VUCA). Percepatan kemajuan teknologi, perubahan geopolitik, dan transformasi ekonomi dan sosial adalah realitas baru, dan bisnis perlu berani, gesit, kreatif, dan tangguh untuk menghadapinya.

Pembelajaran dan Peningkatan Berkelanjutan

Mengembangkan ketahanan berarti memiliki kemauan untuk belajar dari kejadian-kejadian tersebut. Bisnis harus melihat ke masa lalu, baik pandemi Covid-19 atau bentuk gangguan lainnya, dan menyempurnakan strategi rantai pasokan mereka secara berkelanjutan. Ini termasuk pemeriksaan rutin terhadap sistem manajemen risiko, investasi teknologi, dan hubungan pemasok.

Kolaborasi Lintas Industri

Ketahanan seharusnya bukan hanya tugas satu organisasi, tetapi membutuhkan kerja sama antar industri. Berbagi praktik terbaik, menciptakan kemitraan, dan bekerja sama pada faktor risiko umum dapat membantu mengembangkan ekosistem rantai pasokan yang lebih tangguh dan dapat diprediksi bagi bisnis. Hal ini sangat penting di perusahaan seperti industri farmasi, di mana kolaborasi selama pandemi membantu mempercepat distribusi dan respons vaksin.

1.7 DAMPAK COVID-19 TERHADAP ORIENTASI RANTAI PASOKAN

Pandemi global Covid-19 telah mengubah cara perusahaan memandang rantai pasokan. Jika sebelumnya fokusnya adalah efisiensi dan efektivitas, kini bergeser ke arah ketahanan dan kelincahan. Bab ini membahas gagasan bahwa pada intinya, ketahanan lebih merupakan kemampuan ekspansif daripada sikap reaktif, yang dibangun di atas fleksibilitas, ketangkasan, dan penyediaan yang berlebihan. Pemanfaatan teknologi futuristik seperti AI, otomatisasi, blockchain, dan analitik prediktif memungkinkan organisasi untuk bersiap menghadapi gangguan yang akan datang dan mengubah strategi dengan fokus yang berorientasi ke masa depan.

Selain itu, hal ini memastikan bahwa faktor lingkungan juga mendapatkan perhatian yang semestinya. Rantai pasokan untuk masa depan harus beroperasi berdasarkan prinsip

ekonomi sirkular, pengadaan yang etis, dan tanggung jawab lingkungan/akuntabilitas sosial untuk memenuhi harapan pemangku kepentingan serta bersiap menghadapi risiko apa pun yang akan datang. Negara-negara Quad dapat memperkuat keamanan kolektif mereka dengan bekerja sama untuk membuat rantai pasokan lebih transparan dan tangguh. Ini bukan proyek sekali jalan, tetapi upaya berkelanjutan yang membutuhkan infrastruktur digital, kerja sama lintas industri, dan pembagian risiko. Keberhasilan juga bergantung pada pergeseran prioritas dari sekadar meminimalkan biaya menjadi mempertahankan nilai di tengah ketidakpastian, yang didukung oleh investasi baru. Organisasi yang menerapkan pendekatan ini tidak hanya akan bertahan dari krisis di masa depan tetapi juga akan berkembang di dunia yang kompleks.

BAB 2

PERAN AI GENERATIF DALAM KEPUTUSAN RANTAI PASOKAN

2.1 GEN-AI DALAM PENGAMBILAN KEPUTUSAN RANTAI PASOKAN

Bab ini membahas kemajuan terkini dalam penerapan kecerdasan buatan generatif (Gen-AI) pada pengambilan keputusan rantai pasokan. Studi dari sektor manufaktur, ritel, farmasi, e-commerce, dan rantai pasokan hijau menunjukkan peningkatan peran teknologi seperti model bahasa besar (LLM), jaringan adversarial generatif (GAN), generasi yang diperkuat dengan pengambilan (RAG), pembelajaran penguatan (RL), dan kembar digital. Riset secara seragam menunjukkan adanya peningkatan akurasi peramalan, penghematan biaya, dan efisiensi operasional dengan manfaat signifikan seperti peramalan permintaan yang lebih baik, biaya persediaan yang lebih rendah, pengurangan waktu pemrosesan, dan ketahanan rantai pasokan yang lebih tinggi.

Selain efisiensi, Gen-AI memfasilitasi manajemen risiko, perencanaan skenario, dan program keberlanjutan yang memungkinkan organisasi untuk merespons gangguan secara lebih dinamis. Namun, masih ada hambatan yang harus diatasi, terutama terkait kualitas data, ancaman etika dan privasi, bias algoritma, integrasi dengan sistem lama, dan kebutuhan akan tenaga profesional yang terampil. Pembelajaran juga menunjukkan bahwa keunggulan teknologi dioptimalkan melalui penggabungan dengan modal manusia, dukungan manajerial, dan rencana adopsi yang terkoordinasi. Secara keseluruhan, Gen-AI menggambarkan kemampuan transformatif dalam analitik prediktif, optimasi logistik, dan pengambilan keputusan strategis, dan pengembangan di masa depan akan bergantung pada kemampuan menjelaskan, kerangka kerja spesifik domain, dan praktik implementasi yang bertanggung jawab.

Kecerdasan buatan generatif, atau Gen-AI, adalah sekelompok metode pembelajaran mesin canggih yang dapat menciptakan data, solusi, dan wawasan baru yang dapat diterapkan secara kontekstual. Tidak seperti model prediktif konvensional, model generatif seperti model bahasa besar (LLM), jaringan adversarial generatif (GAN), generasi yang diperbesar dengan pengambilan (RAG), dan kembar digital tidak hanya memeriksa pola dalam data tetapi juga menciptakan keluaran baru, memfasilitasi aplikasi yang melampaui sekadar peramalan. Seiring dengan itu, pengambilan keputusan rantai pasokan telah menjadi lebih canggih dengan globalisasi, fluktuasi permintaan, ketidakpastian geopolitik, dan isu keberlanjutan. Organisasi perlu membuat keputusan yang cepat namun tepat tentang pengadaan, manajemen inventaris, logistik, risiko, dan strategi jangka panjang. Pendekatan tradisional seringkali kesulitan untuk menangani sifat dinamis, tidak pasti, dan berbasis data dari rantai pasokan kontemporer. Konvergensi Gen-AI dengan manajemen rantai pasokan sangat menjanjikan dalam mengurangi tantangan ini.

Melalui fasilitasi peningkatan peramalan permintaan, manajemen gangguan, optimasi sumber daya, dan simulasi skenario waktu nyata, Gen-AI menawarkan strategi yang lebih adaptif dan tangguh kepada para pengambil keputusan. Misalnya, model generatif dapat

memodelkan skenario "bagaimana jika" untuk lonjakan permintaan, mengoptimalkan transportasi dalam gangguan, atau menciptakan jaringan pasokan rendah karbon. Di sektor ritel, Gen-AI dapat mendorong rekomendasi yang dipersonalisasi dan perencanaan inventaris adaptif, sementara di sektor farmasi, Gen-AI dapat mempercepat logistik untuk distribusi obat. Memahami konvergensi ini sangat penting karena organisasi berupaya mencapai keseimbangan antara efisiensi, ketahanan, dan keberlanjutan dalam lingkungan yang sangat dinamis.

Studi terbaru mengidentifikasi manfaat peningkatan presisi peramalan, biaya yang lebih rendah, dan ketangkasan yang lebih besar dan jebakan, seperti ancaman privasi data, integrasi sistem lama, dan persyaratan untuk tata kelola etis. Pemantauan ini memberikan nilai tambah dengan mengintegrasikan bukti terkini untuk membangun kerangka kerja sistematis mengenai bagaimana Gen-AI dapat merevolusi pengambilan keputusan rantai pasokan. Pemantauan ini mengkaji teknologi dominan, keunggulan yang diklaim, aplikasi di dunia nyata, dan faktor pembatas yang ada, serta kesenjangan yang muncul dalam pembelajaran dan panduan masa depan untuk penerapan yang etis dan efektif.

2.2 PRODUKTIVITAS DAN OTOMATISASI DALAM SCM

Pengaruh dan tantangan persepsi tenaga kerja: Kumar dan Jauhar (n.d.) menunjukkan bahwa Gen-AI meningkatkan produktivitas dan otomatisasi dalam SCM, tetapi penerimaannya bergantung pada keterampilan, kepuasan kerja, dan dukungan manajemen; manfaat pragmatismenya adalah pengambilan keputusan yang lebih cepat dengan definisi peran yang lebih baik; kendalanya adalah resistensi, biaya pelatihan, dan ancaman etika/privasi.

Generative AI dan inovasi manajemen mencakup Zhang dan Zhang yang berpendapat bahwa Gen-AI meningkatkan pemahaman manajerial, mengurangi asimetri informasi, dan memfasilitasi algoritma yang lebih bijaksana antar fungsi. Manfaatnya adalah peningkatan keputusan strategis dan kombinasi pengetahuan; kendalanya adalah bias, privasi, dan kebutuhan akan tata kelola.

Dampak Gen-AI Pada Keunggulan Operasional SCM

- Bukti kuantitatif peningkatan waktu tunggu, pengiriman tepat waktu, dan perputaran persediaan; manfaatnya adalah peningkatan kinerja yang terukur; keterbatasannya adalah ambiguitas kausalitas dan generalisasi sektor. Menara kendali AI dan Gen-AI dalam SCM ritel mencakup Bathina yang melaporkan peningkatan signifikan dalam visibilitas, deteksi gangguan, dan latensi pengambilan keputusan; manfaatnya adalah kesadaran situasional ujung-ke-ujung; keterbatasannya adalah kompleksitas integrasi dan keselarasan sosio-teknis.

Gen-AI

- Manfaat yang luas di seluruh industri – pemeliharaan prediktif, pembuatan prototipe virtual, desain kreatif; manfaatnya adalah pemanfaatan multi-domain; kendalanya adalah fragmentasi data, biaya tinggi, dan interoperabilitas.

AI/Gen-AI dalam E-Commerce dan SCM

- Veluru mengidentifikasi peningkatan dalam peramalan, personalisasi, deteksi penipuan, dan optimasi logistik; manfaatnya adalah efisiensi yang berpusat pada pelanggan; kendalanya adalah privasi, biaya, dan kekurangan keterampilan. AI Generatif dan Adaptif untuk Desain Rantai Pasokan Berkelanjutan VAE+NSGA-II+DQN menghasilkan kompromi rendah karbon dan biaya rendah; kekuatannya adalah penyeimbangan biaya-emisi yang eksplisit; kelemahannya adalah ketergantungan data sintetis dan beban komputasi yang tinggi. Paradoks Kolaborasi mencakup konfigurasi LLM multi-agen yang dapat memperburuk efek bullwhip tanpa eksekusi yang kuat (misalnya VMI); kekuatannya adalah pembangkitan kebijakan strategis; kelemahannya adalah ketidakstabilan dari kerja sama agen yang naif.

Gen-AI dan Keputusan Kewirausahaan Strategis (SLR)

- Peningkatan akurasi/efektivitas dan inovasi di UKM; kekuatannya terletak pada dukungan pengambilan keputusan dalam ketidakpastian; kelemahannya adalah bias data dan validasi longitudinal yang buruk.

Studi Kasus Multi-Gen-AI dalam Pekerjaan/Keputusan

- Bukti organisasi aktual tentang tugas yang lebih cepat, kreativitas, dan produktivitas departemen di mana budaya AI hadir; Kekuatannya terletak pada peningkatan fungsi secara menyeluruh; kelemahannya adalah fokus pada satu perusahaan dan bias kualitatif.

Gen-AI + Agen RAG dalam SCM

- Gaddala menempatkan RAG untuk peramalan, manajemen pemasok, dan pengambilan keputusan secara real-time; manfaatnya adalah landasan pada jawaban yang berdasar dengan pengambilan data; kendalanya adalah ketergantungan pada data dan eksperimen industri yang terbatas.

Gen-AI yang Berpusat pada Manusia dalam Risiko Rantai Pasokan (EDAS + R. Graph)

- Ini menetapkan model kelas GPT pertama untuk risiko rantai makanan dengan MCDM kausal; manfaatnya adalah kejelasan kriteria dan pengembangan model saling ketergantungan; kendalanya adalah sifat pracetak dan asumsi pemodelan.

SCM yang Didukung Gen-AI

- Koordinasi dan dinamisme mencakup penggunaan yang intensif yang meningkatkan kinerja melalui koordinasi pembeli/pemasok, ditingkatkan di pasar yang dinamis; manfaatnya adalah bukti mekanisme mediasi; kendalanya adalah survei satu negara dan desain korelasional. Gen-AI dan DNN dalam rantai pasokan farmasi memungkinkan prediksi permintaan, peramalan risiko, dan koneksi penemuan-logistik; manfaatnya adalah otomatisasi spesifik domain; kendalanya adalah masalah regulasi/privasi dan data kepemilikan.

Gen-AI untuk Peningkatan Operasi dan SCM

- Pemantauan sistematis menunjukkan keuntungan dalam peramalan, penilaian risiko dan pemasok; kekuatannya adalah peta peluang holistik; Kendala yang dihadapi adalah integrasi sistem lama, biaya komputasi, dan etika.

Ketahanan Gen-AI dalam Rantai Pasokan (Fuzzy AHP)

- Memprioritaskan ketangkasan > fleksibilitas > visibilitas > berbagi informasi > kolaborasi; kekuatan terletak pada prioritas yang dapat ditindaklanjuti; kendalanya adalah sampel ahli yang terbatas dan subjektivitas.

Gen-AI untuk Strategi Rantai Pasokan Baru – Tren/Inovasi

- Menekankan sistem pembelajaran mandiri, kembaran digital, dan ekosistem kolaboratif; manfaatnya adalah pemindaian cakrawala strategis; kendalanya adalah biaya, keamanan, dan hambatan regulasi.

Gen-AI dalam Manajemen Rantai Pasokan (Konseptual)

- Mengintegrasikan penggunaan dalam risiko, inventaris, pengadaan, logistik dengan kebutuhan XAI; manfaatnya adalah penerapan yang luas; kendalanya adalah kesenjangan keterampilan dan kualitas data.

Gen-AI Merevolusi Scm

- Menyebutkan pengurangan biaya (~15%) dan inventaris (~35%) serta peningkatan layanan; manfaatnya adalah dampak bisnis yang terukur; kekurangannya adalah tantangan manajemen perubahan dan skalabilitas.

Gen-AI

- Peluang dan arah pembelajaran untuk ketahanan rantai pasokan: delapan area ketahanan, fokus pada kembaran digital dan adaptasi proaktif; manfaatnya adalah perspektif pembelajaran/peta jalan; kekurangannya adalah halusinasi/ancaman keamanan dan persyaratan keterlibatan manusia.

Apakah Gen-AI/Chatgpt Merupakan Pengubah Permainan untuk OSCM?

- Survei (Inggris/AS) menunjukkan efisiensi, responsivitas, dan kelincahan yang lebih besar di antara para pengadopsi; manfaatnya adalah sinyal pasar makro; kendalanya adalah desain lintas sektoral dan bias wilayah.

Gen-AI dalam Rantai Pasokan/Operasi

- Kerangka kerja berbasis kemampuan menyelaraskan tujuh kemampuan AI (pembelajaran, persepsi, prediksi, interaksi, adaptasi, penalaran, kreativitas) dengan 13 keputusan; manfaatnya adalah perancah yang didasarkan pada teori (RBV/DC); kendalanya adalah verifikasi empiris yang diperlukan.

Model Pembelajaran Tingkat Lanjut (LLM) dan Model Pembelajaran Tingkat Lanjut (SLM) untuk Pengambilan Keputusan dan Keberlanjutan dalam Manajemen Rantai Pasokan (SCM)

- LLM Strategis/ESG; UKM, SLM khusus domain; manfaatnya adalah kerangka adopsi lima langkah yang sesuai dengan kematangan; kendalanya adalah komputasi/bias dan fragmentasi data.

Chatgpt dan Gen-AI dalam OSCM (Survei Eksplorasi)

- Keunggulan dalam kepuasan pelanggan, biaya, efisiensi, risiko; industri bervariasi dalam kematangan; manfaatnya adalah gambaran adopsi; kendalanya adalah masalah kualitas data dan penggabungan dengan AI non-generatif.

Memaksimalkan Fungsi Karyawan di Era Gen-AI (AHP)

- Kriteria utama meliputi inovasi, produktivitas, CX; strateginya meliputi organisasi adaptif, tim AI, tata kelola etika; manfaatnya adalah panduan SDM untuk kolaborasi; kendalanya adalah keterbatasan kumpulan ahli dan efek ekonomi yang tidak disimulasikan.

Gen-AI Menghadirkan Desain Alur Kerja Adaptif (RPA)

- GPT+RPA mengurangi waktu pemrosesan sekitar 35% dan meningkatkan kepuasan; manfaatnya adalah alur kerja yang dapat menyesuaikan diri; kendalanya adalah kompleksitas pengaturan, ketergantungan data, dan keamanan.

Peran Etis Gen-AI dalam SDM (SLR)

- Menyarankan paradigma hibrida manusia-AI untuk pilihan SDM; manfaatnya adalah efisiensi dengan panduan etis; kendalanya adalah bias, privasi, dan kesenjangan penjelasan.

Perencanaan Probabilistik Generatif untuk Jaringan SC

- Pendekatan yang menggunakan pembelajaran penguatan offline, jaringan saraf graf, dan kebijakan generatif dilaporkan menghasilkan rencana yang kuat dan dioptimalkan secara global dibandingkan dengan heuristik. Manfaatnya adalah ketahanan ujung-ke-ujung dalam kondisi ketidakpastian; kendalanya adalah biaya komputasi dan kemampuan transfer.

LLM + Graf Pengetahuan untuk Visibilitas SC

- Pendekatan konseptual menggunakan NER/RE zero-shot untuk membangun graf pengetahuan multi-tingkat dari data publik, mengungkapkan tautan rantai pasokan yang mendasarinya. Manfaat utamanya adalah mencapai visibilitas di luar Tingkat-1 tanpa memerlukan berbagi data; kendala utamanya adalah menangani jargon khusus domain dan hanya menghasilkan snapshot statis.

Gen-AI untuk Prediksi Hubungan dalam KG SC (Studi Kasus)

- Penyematan LLM ditambah ML meningkatkan prediksi tautan dan inferensi risiko kontekstual; manfaatnya adalah peningkatan pemahaman jaringan untuk pengambilan keputusan; Kendala yang dihadapi adalah halusinasi dan ketergantungan pada dataset/embedding.

2.3 PEMETAAN TEMUAN UTAMA DAN TANTANGAN ADOPSI AI

Tabel 2.1 mengumpulkan temuan utama, pendekatan, kekuatan, dan kelemahan studi terkini yang berfokus pada integrasi AI Generatif ke dalam pengambilan keputusan rantai pasokan. Tabel ini menggabungkan berbagai studi dari bidang manufaktur, ritel, farmasi, e-commerce, keberlanjutan, dan perencanaan tenaga kerja. Melalui perbandingan sistematis tujuan pembelajaran, pengaturan, metode, teknologi yang digunakan, dan hasil yang dilaporkan, tabel ini tidak hanya menunjukkan keuntungan yang terukur, misalnya, peningkatan akurasi peramalan, penghematan biaya, dan daya tanggap, tetapi juga kekhawatiran yang masih ada, seperti kualitas data, bahaya etika, dan kesulitan implementasi.

Tabel 2.1. Tabel perbandingan pemantauan riset

Judul Makalah	Tujuan/Sasaran Penelitian	Domain/Konteks	Metodologi/ Pendekatan	Teknologi/Model yang Digunakan	Temuan Utama/Kontribusi	Tantangan/Keterbatasan
---------------	---------------------------	----------------	------------------------	--------------------------------	-------------------------	------------------------

Pengaruh dan tantangan dari persepsi tenaga kerja	Mempelajari persepsi tenaga kerja dan etika dalam adopsi Gen-AI	Manajemen rantai pasok	Survei (132 profesional) ditambah pemodelan	Variabel adopsi Gen-AI	Meningkatkan produktivitas tetapi kesenjangan keterampilan tetap ada	Resistensi, kebutuhan pelatihan, etika
Dampak kecerdasan buatan generatif pada inovasi manajemen	Mengeksplorasi dampak GAI pada inovasi manajemen	Manajemen/Inovasi Organisasi	Tinjauan literatur ditambah analisis konseptual	LLM, NLP, GAN, graf pengetahuan (<i>knowledge graphs</i>)	Meningkatkan akurasi keputusan, mengurangi kesenjangan informasi	Privasi, bias, kekhawatiran etis/hukum
Dampak kecerdasan buatan generatif pada keunggulan operasional...	Mengukur efek Gen-AI pada kinerja SCM	SCM (Perusahaan manufaktur)	Studi kuantitatif pra/pasca (100 perusahaan)	Gen-AI untuk peramalan (<i>forecasting</i>), penjadwalan	Meningkatkan waktu tunggu (<i>lead times</i>), pengiriman tepat waktu	Bias, batasan kausalitas, pengaruh budaya
Menara kontrol AI dan kecerdasan buatan generatif dalam SCM ritel	Menganalisis menara kontrol (<i>control towers</i>) berbasis GenAI	SCM Ritel	Bukti studi kasus ditambah sintesis	Menara kontrol (<i>control towers</i>), NLP, analitik	↑ visibilitas (88%), ↓ biaya (25%)	Kompleksitas integrasi, etika, kesiapan
Kecerdasan Buatan Generatif untuk Industri 5.0	Mempelajari Gen-AI dalam Industri 5.0	Industri 5.0 (multi-sektor)	Tinjauan literatur ditambah analisis produk	ChatGPT, DALL-E, GAN, RL (<i>Reinforcement Learning</i>)	Mengoptimalkan produksi, pembuatan prototipe	Biaya tinggi, privasi, masalah interoperabilitas
AI dan Gen-AI dalam SCM E-Commerce	Meninjau AI/GenAI dalam SCM e-commerce	E-commerce dan SCM	Tinjauan literatur yang komprehensif	ML (<i>Machine Learning</i>), GAN, sistem rekomendasi	Meningkatkan peramalan (<i>forecasting</i>), personalisasi	Privasi, biaya, kelangkaan keterampilan

Judul Makalah	Tujuan/Sasaran Penelitian	Domain/Konteks	Metodologi/Pendekatan	Teknologi/Model yang Digunakan	Temuan Utama/Kontribusi	Tantangan/Keterbatasan
AI Generatif dan Adaptif untuk Desain Rantai Pasok Berkelanjutan	GenAI hibrida, RL untuk SCM biaya rendah/emisi rendah	SCM Berkelanjutan	VAE, NSGA-II, agen RL	VAE, NSGA-II, DQN	Pemotongan emisi 50%, kenaikan biaya 15%	Data sintetis, beban komputasi berat (<i>comp. heavy</i>)
Paradoks Kolaborasi	Mempelajari agen GenAI kolaboratif dalam SCM	Simulasi rantai pasok	Simulasi multi-agen	LLM, RAG, VMI, MAS	Paradoks kolaborasi: penimbunan (<i>hoarding</i>)	Simulasi yang disederhanakan, tidak ada validasi industri

Gen-AI dan keputusan strategis dalam kewirausahaan	Dampak GenAI pada keputusan strategi UKM	Kewirausahaan/strategi	Tinjauan literatur sistematis	LLM, GAN, analitik	Akurasi dan efisiensi yang lebih baik	Bias, integrasi, validasi UKM yang terbatas
Studi multi-kasus tentang GenAI dalam dunia kerja	Menunjukkan penggunaan nyata GenAI di departemen organisasi	Pengambilan keputusan organisasi (ritel)	Multi-kasus, 31 partisipan	ChatGPT, AI multimodal	Tugas lebih cepat, kreativitas ↑	Hanya satu organisasi, hanya kualitatif
GenAI dan RAG dalam SCM	Mengeksplorasi peran agen GenAI dan RAG	Manajemen rantai pasok	Tinjauan literatur, kerangka kerja (<i>framework</i>)	GAN, GPT, RAG	Peramalan (<i>forecasting</i>) dan manajemen pemasok yang lebih baik	Ketergantungan data, keterinterpretasian (<i>interpretability</i>)
GenAI yang berpusat pada manusia dalam risiko Rantai Pasok	Manajemen risiko melalui MCDM kausal dan GenAI	Manajemen risiko SC (rantai makanan)	EDAS yang ditingkatkan, Graf R.	GPT, BERT, RoBERTa, T5	GPT efektif dalam manajemen risiko	Pracetak (<i>preprint</i>), asumsi sintetis

Judul Makalah	Tujuan/Sasaran Penelitian	Domain/Konteks	Metodologi/Pendekatan	Teknologi/Model yang Digunakan	Temuan Utama/Kontribusi	Tantangan/Keterbatasan
GenAI dalam SCM: Koordinasi dan Dinamisme	Menilai kedalaman penggunaan GenAI pada kinerja SCM	SCM (Perusahaan Cina)	Survei (236 perusahaan), mediasi	LLM, NLP, model DL (<i>Deep Learning</i>)	Koordinasi memediasi manfaat	Konteks Cina, hanya berupa korelasi
GenAI dan DNN dalam Rantai Pasok Farmasi	GenAI, DNN dalam SCM farmasi	Rantai pasok farmasi	Tinjauan literatur, studi kasus	GAN, VAE, DNN	Peramalan (<i>forecasting</i>) dan optimasi yang lebih baik	Privasi/regulasi, bias
GenAI dalam Operasional dan SCM	Peluang/tantangan dalam SCM	Operasional (<i>Ops</i>) dan SCM	Tinjauan literatur, kerangka kerja (<i>framework</i>)	LLM, GAN, CV (<i>Computer Vision</i>), ML	Meningkatkan peramalan (<i>forecasting</i>), manajemen risiko	Integrasi sistem lama (<i>legacy</i>), etika
GenAI dalam Ketahanan Rantai Pasok (Fuzzy AHP)	Menilai dampak GenAI pada penggerak ketahanan rantai pasok (<i>SC resilience</i>)	Ketahanan rantai pasok (<i>SC resilience</i>)	Tinjauan literatur, survei ahli, Fuzzy AHP	GenAI, Fuzzy AHP	Kelincahan (<i>agility</i>) adalah penggerak paling kritis	Sampel ahli berukuran kecil
GenAI untuk Strategi Rantai Pasok dan Tren Masa Depan	Meninjau tren GenAI dalam strategi SCM	Strategi dan inovasi rantai pasok (<i>SC</i>)	Tinjauan literatur	GAN, transformer, IoT, Blockchain	Mendukung peramalan (<i>forecasting</i>), risiko, kolaborasi	Privasi, biaya, regulasi
GenAI dalam Operasional SCM	Dampak pada SCM (risiko, inventaris, logistik)	Manajemen rantai pasok	Tinjauan literatur, contoh-contoh	GAN, NLP, XAI (<i>Explainable AI</i>)	Peramalan (<i>forecasting</i>) dan pengadaan (<i>procurement</i>) yang lebih baik	Keterampilan, data, etika

Merevolusi SCM dengan GenAI	Mentransformasi fungsi SCM dengan GenAI	SCM	Tinjauan literatur, kasus industri	GAN, ChatGPT, analitik	Pengurangan biaya (15%), inventaris lebih rendah (35%)	Integrasi, kesenjangan keterampilan, etika
-----------------------------	---	-----	------------------------------------	------------------------	--	--

Judul Makalah	Tujuan/Sasaran Penelitian	Domain/Konteks	Metodologi/Pendekatan	Teknologi/Model yang Digunakan	Temuan Utama/Kontribusi	Tantangan/Keterbatasan
Arah Penelitian GenAI dan Ketahanan Rantai Pasok	Mengeksplorasi GenAI untuk ketahanan di berbagai domain	Ketahanan Rantai Pasok (<i>SC Resilience</i>)	Tinjauan literatur, kerangka kerja	LLM, RAG, <i>Digital Twins</i>	8 domain ketahanan berhasil diidentifikasi	Halusinasi, risiko siber
GenAI/ChatGPT sebagai Pengubah Permainan SCM	Menyurvei pengadopsi SCM vs. non-pengadopsi (Inggris, AS)	Operasional (<i>Ops</i>) dan SCM	Survei (315), teori OL	ChatGPT, LLM	↑ efisiensi, kelincahan (<i>agility</i>); risiko pada data	Adopsi awal, bersifat potong-lintang (<i>cross-sectional</i>)
Kerangka Kerja GenAI dalam SCM dan Operasional	Kerangka kerja pemetaan AI/GenAI ke fungsi-fungsi SCM	SCM dan Operasional (<i>Ops</i>)	Kerangka konseptual (RBV+DC)	GAN, GPT, DALL-E, IoT	7 kapabilitas inti AI berhasil dipetakan	Memerlukan validasi empiris
GenAI dan LLM dalam Keberlanjutan SCM	Dampak LLM/SLM pada keputusan SCM	SCM Berkelanjutan	SLR (88 makalah), Kerangka kerja	LLM (GPT), SLM (Phi)	LLM unggul dalam tugas-tugas strategis	Kesenjangan UKM (<i>SME gaps</i>), biaya komputasi tinggi
ChatGPT dan GenAI dalam OSCM	Mengeksplorasi adopsi, manfaat, tantangan dalam OSCM	Operasional dan SCM (Perusahaan AS/Inggris)	Survei (300 respons)	ChatGPT, LLM, NLP	↑ kepuasan, efisiensi	Kualitas data, resistensi
Mengoptimalkan Peran di Era GenAI	Mendefinisikan ulang peran untuk ko-kreasi manusia-AI	SDM/Tenaga Kerja (<i>HR/Workforce</i>)	SLR, MCDM (AHP), para ahli	GenAI (LLM, CV, ML)	Kriteria utama: Keinovatifan (<i>Innovativeness</i>), Produktivitas	Sampel ahli berukuran kecil

Judul Makalah	Tujuan/Sasaran Penelitian	Domain/Konteks	Metodologi/Pendekatan	Teknologi/Model yang Digunakan	Temuan Utama/Kontribusi	Tantangan/Keterbatasan
Desain Alur Kerja GenAI + RPA	Otomatisasi alur kerja adaptif dengan GenAI, RPA	Alur Kerja Perusahaan (<i>E-commerce</i>)	Kerangka kerja, Studi kasus	GPT, RPA, Analitik	Pemrosesan 35% lebih cepat, ↑ akurasi	Biaya pengaturan (<i>setup</i>) tinggi, risiko keamanan
Peran Etis GenAI dalam SDM	Kerangka kerja hibrida untuk keputusan SDM (<i>HR</i>)	Manajemen SDM (<i>HR</i>)	SLR (50 studi), Bibliometrik	ChatGPT, Bard, LLM	AI membantu SDM tetapi manusia memastikan etika	Bias, privasi, ketergantungan berlebih
Perencanaan Probabilistik Generatif dalam SCN	Menggunakan GenAI, RL untuk perencanaan rantai pasok	Perencanaan Jaringan SC (<i>SCN</i>)	RL Luring (<i>Offline RL</i>), Simulasi GNN	GNN, RL, Kebijakan GenAI	Rencana yang tangguh, lebih baik daripada heuristik	Komputasi tinggi, batas transfer
LLM + KG untuk Visibilitas SC	Menggunakan LLM, KG untuk meningkatkan visibilitas SC	Visibilitas/Risiko SC	<i>Zero-shot</i> , Pembuatan KG	LLM, KG, Alat NER/RE	Mengekstrak ketergantungan SC yang tersembunyi	Batasan istilah domain, data statis

GenAI untuk Prediksi Hubungan dalam KG Rantai Pasok	Meningkatkan prediksi tautan dalam graf pengetahuan (<i>knowledge graphs</i>) SC	Visibilitas dan risiko SC	<i>Embeddings</i> , ML, Studi kasus	LLM, ML, KG	Mengungguli garis dasar (<i>baselines</i>) dalam tautan SC	Halusinasi, ketergantungan pada set data
---	--	------------------------------	---	-------------	--	--

2.4 FRAGMENTASI DAN STANDARDISASI DATA RANTAI PASOKAN

Masalah yang paling sering muncul dalam studi yang ditinjau adalah data rantai pasokan yang terfragmentasi dan tidak konsisten. Data tersebut tersebar di antara pemasok, produsen, penyedia logistik pihak ketiga, dan pengecer, dan kemungkinan besar disimpan dalam ERP lama atau basis data yang terisolasi. Model AI generatif yang berbasis pada kumpulan data besar dan berkualitas tinggi akan gagal jika diberikan input yang tidak lengkap atau tidak konsisten. Misalnya, artikel tentang menara kontrol dan ketahanan menyoroti bahwa integrasi data yang suboptimal menyebabkan kesalahan dalam peramalan dan manajemen gangguan. Tanpa adanya alur data yang kuat dan standardisasi, bahkan model yang paling canggih pun cenderung memperkuat inefisiensi yang ada daripada mengatasinya.

Biaya Komputasi dan Intensitas Sumber Daya

Model bahasa besar, GAN, atau agen pembelajaran penguatan membutuhkan biaya komputasi yang tinggi untuk diterapkan dan dilatih. Mereka membutuhkan komputasi berkinerja tinggi, klaster GPU, dan infrastruktur penyimpanan yang besar. Hal ini mahal bagi perusahaan multinasional tetapi jauh kurang layak untuk bisnis kecil dan menengah. Studi Industri 5.0 dan desain berkelanjutan, mengamati bahwa meskipun AI dapat meminimalkan emisi atau memaksimalkan pertukaran biaya, investasi awalnya sangat besar. Akibatnya, skalabilitas masih menjadi masalah, dan banyak organisasi tidak dapat berkembang melampaui proyek percontohan.

Risiko Etika, Privasi, dan Keamanan

Salah satu keterbatasan terbesar adalah aspek etika dan hukum dari pemanfaatan data. Rantai pasokan berurusan dengan informasi sensitif seperti perjanjian pemasok, pesanan pembeli, dan bahkan data keuangan atau identifikasi. Penggunaannya dalam model generatif menimbulkan risiko pelanggaran privasi, paparan kekayaan intelektual, dan kepatuhan perlindungan data regional. Sejumlah artikel memperingatkan bahwa bias data dapat menghasilkan hasil yang tidak adil, termasuk penilaian pemasok yang berbeda atau keputusan personel yang bias. Lebih lanjut, tidak adanya akuntabilitas yang jelas untuk keluaran AI membuat regulasi menjadi rumit, yang membuat perusahaan ragu-ragu untuk menerapkannya secara menyeluruh.

Keterbatasan Model: Halusinasi, Bias, dan Penjelasan

Model generatif, seefektif apa pun, cenderung mengalami halusinasi – hasil yang terdengar masuk akal tetapi belum tentu benar. Dalam situasi rantai pasokan, satu ketidakakuratan dalam perkiraan atau optimasi dapat menyebabkan gangguan operasional yang signifikan. Beberapa pemantauan menekankan pentingnya skema AI penjelasan (XAI) yang memungkinkan manajer untuk memahami dan memvalidasi hasil model. Bias adalah masalah lain: ketika model dilatih pada data yang bias atau tidak lengkap, model tersebut

melanggengkan ketidaksetaraan yang ada, seperti memprioritaskan beberapa pemasok secara berlebihan atau mendistorsi tren permintaan. Masalah-masalah ini menurunkan kepercayaan organisasi terhadap rekomendasi berbasis AI.

Hambatan Organisasi dan Tenaga Kerja

Selain tantangan teknis, kematangan organisasi dan sikap karyawan memiliki dampak kritis pada adopsi. Pembelajaran di lingkungan yang berfokus pada manusia dan SDM menunjukkan bahwa pekerja cenderung memandang AI sebagai ancaman terhadap keamanan kerja, dengan adanya resistensi dan keengganan untuk bekerja bersama sistem yang didukung AI. Meskipun manajemen mendukung adopsi, pelatihan dan manajemen perubahan yang tidak memadai menunda integrasi. "Paradoks kolaborasi" menunjukkan bahwa tanpa koordinasi yang tepat, agen AI dapat semakin memperburuk ketidakpastian rantai pasokan. Hal ini menekankan bahwa Gen-AI bukanlah teknologi plug-and-play; potensinya hanya terwujud jika didukung oleh intervensi manajerial, pelatihan karyawan, dan budaya kolaborasi.

2.5 TEKNOLOGI AI GENERATIF

Teknologi AI generatif untuk pengambilan keputusan rantai pasokan menunjukkan kematangan dan kesiapan yang tidak merata: LLM tanpa pengambilan masih dalam tahap uji coba ($\approx$ TRL 5–6) cukup baik untuk ringkasan dan penyusunan draf tetapi tidak aman untuk tindakan berisiko tinggi karena mengalami halusinasi dan pergeseran pengetahuan; LLM dengan RAG siap produksi dalam konteks kaya dokumen ($\approx$ TRL 7–8) jika Anda memiliki korpus yang terversi, kontrol akses yang ketat, dan telemetri pengambilan; grafik pengetahuan dengan ekstraksi LLM berada pada tingkat kematangan menengah ($\approx$ TRL 5–6), menghasilkan visibilitas multi-tingkat hanya jika Anda membayar untuk desain ontologi, resolusi entitas, dan kurasi berkelanjutan; GAN/VAE menawarkan cakupan kejadian langka yang berguna ($\approx$ TRL 6–7) tetapi perlu lulus uji realisme/transfer independen sebelum dapat memberikan informasi untuk kebijakan; Kembaran digital semakin mendekati tahap produksi di mana telemetri dan data master sudah tepat sasaran ($\approx$ TRL 6–8), tetapi cepat mengalami degradasi akibat kesenjangan data dan kerusakan model; perencanaan RL+GNN masih jarang diterapkan ($\approx$ TRL 4–6) karena biaya komputasi, desain imbalan/kendala, dan kesenjangan simulasi-ke-nyata – tetap dalam mode bayangan dengan perisai pengaman dan rollback; dan LLM multi-agen masih dalam tahap pembelajaran ($\approx$ TRL 3–4) karena risiko ketidakstabilan (misalnya, bullwhip, kolusi) mencegahnya untuk diterapkan dalam produksi. Secara praktis, terapkan LLM+RAG dan kembaran digital terlebih dahulu di mana kontrak data dan tata kelola sudah ada; tambahkan KG ketika kurasi disponsori; gunakan GAN/VAE untuk uji stres dan bukan untuk menggantikan kebenaran dasar; pertahankan RL sebagai dukungan pengambilan keputusan offline sampai keamanan/generalisasi ditetapkan; dan membatasi LLM multi-agen ke lingkungan uji coba (sandbox) dengan XAI, audit pengambilan/akurasi, dan akuntansi biaya/energi sebagai kontrol yang tidak dapat dinegosiasikan di semua aspek.

2.6 STRATEGI LLM+RAG UNTUK PENINJAUAN KONTRAK DAN PENILAIAN PEMASOK

Untuk mengubah visi masa depan ini menjadi agenda pembelajaran yang dapat ditindaklanjuti dalam bentuk naratif, pertama-tama kita akan memperkuat LLM+RAG untuk peninjauan kontrak dan penilaian pemasok dengan membandingkan secara ketat pengambilan data, pengelompokan, dan pemeringkatan ulang pada dokumen perusahaan sambil tetap mencatat jejak pengambilan data – menyempurnakan faktualitas, cakupan sumber, kesegaran, dan tingkat eskalasi untuk meningkatkan TRL dari pilot ke produksi. Secara bersamaan, kita akan memungkinkan penjelasan dukungan pengambilan keputusan melalui evaluasi eksperimental kontrafaktual, rasionalisasi yang dikaitkan dengan sumber, dan atribusi fitur dalam proses perencanaan langsung, dengan tujuan untuk mencapai pengurangan pengesampingan, peningkatan kepatuhan SLA, dan percepatan pengambilan keputusan. Kita akan memastikan visibilitas multi-tingkat melalui grafik pengetahuan berkelanjutan yang menggabungkan NER/RE streaming dengan kurasi manusia dalam lingkaran, mengaudit presisi/recall, dan waktu untuk menandai risiko guna mengelola keusangan. Untuk memanfaatkan data sintetis dengan aman, kami akan melakukan validasi silang skenario GAN/VAE dengan evaluasi pelatihan pada data sintetis/pengujian pada data nyata, diagnostik kausal/temporal, dan pengujian di luar domain, hanya mensubsidi skenario yang meningkatkan kinerja kebijakan di dunia nyata.

Kembaran digital akan dijalankan dengan tujuan fidelitas yang jelas (MAPE, latensi, cakupan) dan gerbang tahap ROI, seperti monitor varians kembaran ke dunia nyata, sakelar pemutus, dan peringatan kesenjangan data. Perencana RL+GNN akan tetap dalam mode bayangan hingga keamanan terjamin, menggunakan teknik konservatif offline/terbatas/terlindung, evaluasi di luar kebijakan, dan pemicu pengembalian untuk memastikan kepatuhan SLA di bawah gangguan. Kami akan merancang perencana OR × Gen-AI hibrida yang memungkinkan LLM untuk mengusulkan hipotesis atau dekomposisi sementara MILP/CP menjamin kelayakan/optimalitas, dengan membandingkan biaya layanan, waktu penyelesaian, ketahanan, dan pengerjaan ulang manusia untuk menjamin serah terima.

Pada skala besar, kita akan memiliki tujuan yang mempertimbangkan biaya dan energi di seluruh RAG, kembaran, dan RL sehingga setiap persen peningkatan layanan direncanakan berdasarkan nilai dolar dan kWh/CO₂, serta dasbor tata kelola dan pengadaan. Kontrak data, akses berdasarkan peran, retensi/silsilah, uji bias, dan latihan tim merah akan membentuk inti tata kelola yang menghindari kebocoran, penyimpangan, dan ketidakadilan sambil mempertahankan utilitas. Terakhir, negosiasi LLM multi-agen akan dibatasi pada simulator pasar sandbox untuk menerapkan protokol stabilitas (batasan, penalti, keyakinan bersama) yang meredam efek bullwhip dan kolusi sebelum integrasi langsung. Di seluruh jalur, tolok ukur terbuka, skema telemetri, jejak audit, dan paket reproduksibilitas akan mengubah proyek percontohan menjadi implementasi yang stabil, sesuai, dan hemat biaya.

BAB 3

EKONOMI RANTAI PASOKAN SIRKULAR

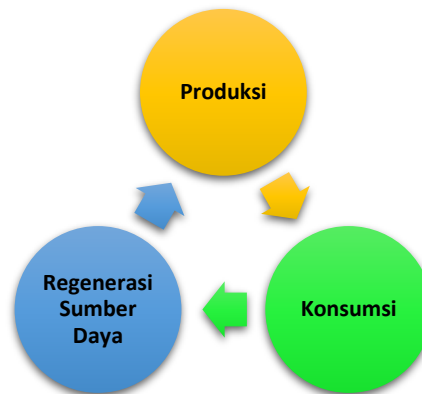
3.1 EKONOMI RANTAI PASOKAN SIRKULAR: RUANG LINGKUP DAN KONSEP

Ekonomi rantai pasokan sirkuler menyelidiki dampak transisi dari rantai pasokan linier yang berlaku saat ini, yaitu ambil-buat-buang, ke model bisnis sirkuler dan bentuk rantai pasokan terhadap penciptaan nilai, biaya, risiko, daya saing bisnis, keamanan sumber daya, dan kinerja lingkungan. Bab ini merupakan survei lapangan tentang teori, temuan empiris, model ekonomi, ukuran, dan intervensi kebijakan yang berlaku untuk rantai pasokan sirkuler.

Bab ini mengintegrasikan riset multidisiplin ekologi industri dan riset operasi, makroekonomi, dan perdagangan internasional dan memberikan kerangka kerja praktis kepada praktisi dan pembuat kebijakan untuk menilai, merancang, dan meningkatkan skala rantai pasokan sirkuler. Bidang-bidang seperti logistik tertutup, produk sebagai layanan dan platform berbagi, ekonomi manufaktur ulang dan penggunaan kembali, retensi nilai dalam material, alat akuntansi siklus hidup dan input-output, pendorong pasar dan regulasi, studi kasus transisi tingkat perusahaan, hambatan dan pendorong, serta kesenjangan pembelajaran adalah beberapa hal utama yang perlu dipertimbangkan. Bab ini diakhiri dengan menyoroti rekomendasi kebijakan, peta jalan implementasi, dan prioritas pembelajaran di masa mendatang.

Ekonomi global dibangun berdasarkan penyediaan bahan baku, pengolahan dan pembuatan barang, distribusi barang, dan sebagian besar pembuangan barang di akhir masa pakainya. Paradigma neo-liberal ini telah mendorong ekspansi ekonomi yang belum pernah terjadi sebelumnya dengan biaya ekologis dan sosial yang meningkat: penipisan sumber daya, akumulasi limbah, emisi gas rumah kaca, dan kerentanan keamanan pasokan. Ekonomi sirkular (ES) mendefinisikannya kembali dan berupaya untuk memastikan nilai produk, komponen, dan material setinggi mungkin melalui penggunaan kembali selama mungkin, mendaur ulang sistem alam, dan memisahkan aktivitas ekonomi dan sumber daya. Dukungan operasional transisi ini didasarkan pada rantai pasokan. Bab ini mengidentifikasi subjek ekonomi rantai pasokan sirkular sebagai pemahaman tentang proses ekonomi, motivasi, dan hasil yang mengatur proses sirkular barang dan material melalui produksi, distribusi, konsumsi, dan pemulihan.

Pertanyaannya adalah: Dengan cara apa dan pada titik mana sirkularitas menciptakan nilai ekonomi bersih (keuntungan perusahaan, surplus konsumen, kesejahteraan nasional), pertukaran apa yang tercipta, dan kebijakan atau inovasi model bisnis apa yang diperlukan untuk meningkatkan skala rantai pasokan sirkular? Hal ini secara alami bersifat interdisipliner dan merupakan campuran dari mikroekonomi (penetapan harga, kontrak, persediaan), riset operasi (logistik terbalik, perencanaan produksi), ekologi industri (akuntansi aliran material), dan makroekonomi serta perdagangan. Diskusi selanjutnya didasarkan pada laporan praktisi tingkat atas dan riset yang ditinjau oleh rekan sejawat untuk menawarkan saran konseptual dan praktis.



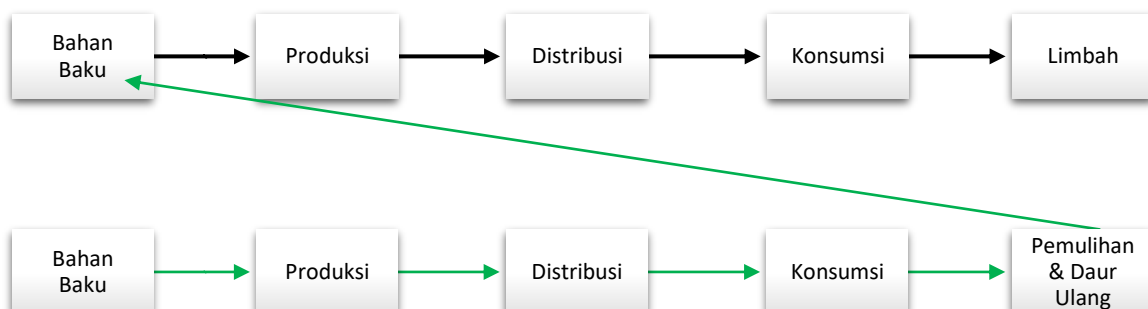
Gambar 3.1. Kerangka rantai pasokan sirkular

3.2 MEMAHAMI KONSEP EKONOMI Sirkular DALAM RANTAI PASOKAN

Rantai Pasokan dan Prinsip-Prinsip Ekonomi Sirkular

Yayasan Ellen MacArthur (EMF) menggambarkan ekonomi sirkular melalui tiga prinsip desain: penghapusan limbah dan polusi, sirkulasi produk dan material pada nilai maksimum, dan regenerasi sistem alam. Dalam hal rantai pasokan, hal tersebut akan diubah menjadi desain yang tahan lama dan dapat diperbaiki, desain modular yang dapat dibongkar, model bisnis yang mempertahankan kepemilikan (produk-sebagai-layanan), logistik terbalik untuk mengumpulkan barang bekas, dan simbiosis industri untuk menggunakan input (produk sampingan) dalam proses lain. Rantai pasokan sirkular memerlukan pemikiran ulang tentang aliran fisik serta aliran informasi/keuangan yang mengelola pengambilan, perbaikan, dan redistribusi.

Perbedaan konsep meliputi loop tertutup, loop sirkular, dan loop lambat/cepat. Istilah serupa yang ditemukan dalam riset meliputi rantai pasokan tertutup (CLSC), logistik terbalik, dan rantai pasokan sirkular. Rantai pasokan siklik mengintegrasikan CLSC ke dalam tujuan sistemik yang lebih besar (retensi nilai material, regenerasi ekosistem): dengan motif keuntungan, CLSC terutama memprioritaskan optimalisasi operasional pengembalian, pembuatan ulang, dan daur ulang; dan pengembangan tata kelola, kebijakan, dan kolaborasi antar sektor yang baru seringkali dibutuhkan. Bentuk strategi sirkular lainnya melibatkan penggunaan apa yang disebut siklus perlambatan (ketahanan, perbaikan) dan siklus penutupan (daur ulang, pembuatan ulang).



Gambar 3.2. Alur rantai pasokan linier versus sirkular. Untuk versi berwarna dari gambar ini.

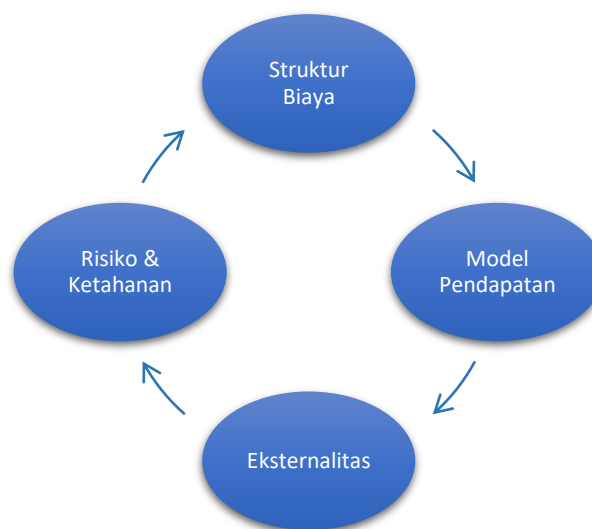
3.3 MEKANISME EKONOMI RANTAI PASOKAN SIRKULAR

Sirkularitas mengubah hubungan ekonomi fundamental. Mekanisme kunci dijelaskan di bawah ini, dan implikasinya disajikan.

Ekonomi Unit dan Struktur Biaya

Perubahan komposisi biaya tetap dan variabel tergantung pada model sirkular:

- Peningkatan biaya desain awal dan pengembangan produk (ketahanan desain, modular; R&D material). Biaya variabel material yang lebih rendah jika input yang dipulihkan menggantikan bahan baku mentah - pemulihan akan mencakup biaya pengumpulan, penyortiran, transportasi, dan pengendalian kualitas.



Gambar 3.3. Mekanisme ekonomi dalam rantai pasokan sirkular

- *Biaya operasional baru*: logistik terbalik, pusat perbaikan, pengujian, manajemen garansi, dan platform ketertelusuran. Berbagai depresiasi dan akuntansi aset: dalam model produk sebagai layanan, perusahaan dapat mempertahankan kepemilikan dan dengan demikian dapat memperlakukan produk sebagai aset berumur panjang yang perlu dipelihara tetapi juga memungkinkan pendapatan berulang. Dampak bersih ditentukan oleh tingkat pemulihan, tingkat manufaktur yang dipulihkan, dan perbedaan harga antara bahan baku dan bahan yang dipulihkan. Keunggulan biaya sirkular bahkan lebih mudah dipahami di perusahaan yang sangat padat material dan yang desain produknya stabil. Studi empiris dari badan multilateral dan studi kasus menunjukkan bahwa solusi sirkular dapat membantu menurunkan harga material dan risiko lonjakan harga komoditas terutama di pasar yang bergejolak.

3.4 KONTRAK BERBASIS KINERJA DALAM RANTAI PASOK SIRKULAR

Rantai pasokan sirkular sering dikaitkan dengan model pendapatan alternatif:

- PaaS (*Product-as-Service*): perusahaan tidak memiliki produk tetapi mengenakan biaya per penggunaan (leasing, berlangganan).

Hal ini menyelaraskan insentif produsen diberi imbalan atas daya tahan dan pemeliharaan. Platform yang menangani barang bekas memiliki pasar yang dapat tumbuh dan nilai berdasarkan produk bekas dapat dipanen.

Kontrak Berbasis Kinerja

Pembayaran yang terkait dengan hasil (misalnya, waktu operasional, efisiensi energi) mendorong umur produk yang panjang dan pemeliharaan yang efektif. Persepsi (kualitas, status), perbedaan harga, dan penyediaan layanan purna jual memengaruhi kesediaan konsumen untuk membayar produk yang diperbarui atau disewa. Dalam kasus pasar B2B, PaaS lebih menarik karena adanya hubungan yang lebih panjang dan permintaan layanan yang dapat diprediksi.

Forum Ekonomi Dunia 3.3 Risiko dan Efek Ketahanan

Rantai pasokan sirkular mampu meningkatkan ketahanan melalui pengurangan ketergantungan pada bahan baku impor (stok strategis bahan yang dipulihkan), penggunaan sumber input yang lebih beragam (jaringan pemulihan lokal), dan pengurangan jarak logistik. Namun demikian, transisi membawa risiko operasional baru, termasuk logistik balik yang rumit, variabilitas kualitas input yang dipulihkan, dan ketidakpastian peraturan. Pembahasan makro menunjukkan bahwa relokasi produksi kembali ke dalam negeri atau lokalisasi ekstrem diketahui merusak PDB, tetapi kebijakan sirkular yang mendorong diversifikasi dan efisiensi sumber daya dapat meningkatkan ketahanan tanpa menimbulkan dampak ekonomi yang besar.

Eksternalitas dan Kegagalan Pasar

Dampak positif lingkungan dari sirkularitas juga merupakan eksternalitas (polusi lebih rendah, emisi berkurang), yang tidak dihargai oleh pasar dan, akibatnya, solusi sirkular tidak cukup diinvestasikan. Solusi kebijakan seperti standar, insentif, atau mandat diperlukan untuk menginternalisasi eksternalitas dalam kegagalan koordinasi di seluruh rantai pasokan yang terfragmentasi untuk mengatasi kerugian sebagai pelopor. Penilaian menjadi rumit karena masalah pengukuran (emisi yang terkandung, kualitas material).

Pemodelan Ekonomi Rantai Pasokan Sirkular

Bagian ini menguraikan teknik pemodelan utama yang diterapkan untuk mengukur kinerja ekonomi dan lingkungan dari rantai pasokan sirkular. Penilaian Siklus Hidup (LCA) mengevaluasi dampak lingkungan sepanjang siklus hidup suatu produk, yang meliputi ekstraksi bahan baku, fase manufaktur, distribusi, penggunaan, dan akhir masa pakai. LCA diperlukan untuk memperkirakan pengurangan jumlah gas rumah kaca (GRK) dan pengurangan penggunaan sumber daya dalam kasus sirkular (misalnya, manufaktur ulang vs. manufaktur baru). Namun demikian, LCA didasarkan pada batasan dan asumsi sistem (unit fungsional, pembagian beban daur ulang), yang perlu diungkapkan dalam evaluasi ekonomi.

Model PMC untuk Pembahasan *Input-Output* (IO) dan Aliran Material (MFA)

MFA mengikuti bagaimana material bergerak melalui suatu ekonomi atau industri. LCA input-output hibrida menggunakan tabel IO moneter dan data fisik untuk mengetahui bagaimana kebijakan sirkular memengaruhi seluruh perekonomian. OECD dan organisasi lain telah membuat inventaris indikator ekonomi sirkular dan pembahasan berbasis IO untuk

mengetahui bagaimana perekonomian makro terpengaruh (misalnya, bagaimana efisiensi material memengaruhi PDB dan lapangan kerja). Model-model ini berguna untuk melihat efek sistemik, efek rebound, dan efek lintas sektor.

3.5 KEPUTUSAN OPERASIONAL DALAM RANTAI PASOK TERTUTUP

Riset operasi memberi bisnis alat mikroekonomi untuk membantu mereka membuat keputusan, seperti cara terbaik untuk membeli dan menyimpan barang ketika barang tersebut kembali ke rantai pasokan, cara menetapkan harga dan membuat produk dalam jaringan loop tertutup, dan cara menulis kontrak untuk pemroses pengembalian pihak ketiga. Model rantai pasokan tertutup klasik menentukan kapan pengumpulan, perbaikan, atau daur ulang masuk akal berdasarkan tingkat pengembalian, hasil manufaktur ulang, dan seberapa besar keinginan masyarakat terhadap barang yang telah diperbaiki. Model-model ini menunjukkan efek ambang batas, yang berarti bahwa operasi sirkular berhenti menguntungkan ketika tingkat pengembalian atau tingkat kualitas turun di bawah titik tertentu.

Model Berbasis Agen dan Dinamika Sistem

Para peneliti menggunakan model berbasis agen dan dinamika sistem untuk menjelaskan dinamika perilaku (seperti perilaku pengembalian konsumen dan adopsi PaaS) dan lingkaran umpan balik (termasuk ketersediaan material dan harga pasar). Hal ini membantu kita memahami ketergantungan jalur dan titik kritis, atau bagaimana penerapan praktik sirkular sejak dini dapat menghasilkan skala ekonomi yang menurunkan biaya dan mendorong lebih banyak orang untuk melakukan hal yang sama.

Metrik dan Indikator untuk Rantai Pasokan Sirkular

Serangkaian metrik yang kuat diperlukan untuk menilai rantai pasokan sirkular dalam hal biaya dan dampak lingkungan.

3.6 INDIKATOR Sirkularitas Material (MCI)

Ini adalah indikator sirkularitas material (MCI) atau metrik serupa yang mengukur persentase material yang digunakan kembali atau didaur ulang dan perpanjangan umur produk. Biaya siklus hidup (LCC) mencakup biaya akuisisi, operasi, pemeliharaan, dan akhir masa pakai di berbagai model kepemilikan.

- Tingkat pengembalian dan hasil pemulihan: persentase unit yang terjual yang dikembalikan dan persentase yang dapat digunakan kembali atau didaur ulang.
- Margin remanufaktur dan indeks harga di pasar sekunder untuk barang bekas.
- Total biaya kepemilikan (TCO) bagi pelanggan adalah faktor penting yang perlu dipertimbangkan ketika membandingkan PaaS dengan pembelian.

Indikator untuk Sistem dan Makro

- Intensitas material terhadap PDB (MI/PDB): berapa kilogram material yang digunakan untuk setiap unit PDB.
- Proporsi bahan baku sekunder dalam keseluruhan input material.
- Dampak pada lapangan kerja: berapa banyak dan jenis pekerjaan apa yang tercipta dalam perbaikan dan logistik terbalik.

- Metrik untuk emisi GHG per nilai tambah dan produktivitas sumber daya.

OECD telah menyusun banyak daftar indikator ekonomi sirkular untuk kota dan wilayah untuk membantu mereka membuat dan melacak kebijakan. Metrik standar membantu mencegah hasil yang buruk, seperti penggunaan energi yang lebih banyak saat mengangkut barang dalam logistik terbalik, dengan menunjukkan bagaimana berbagai area saling memengaruhi.

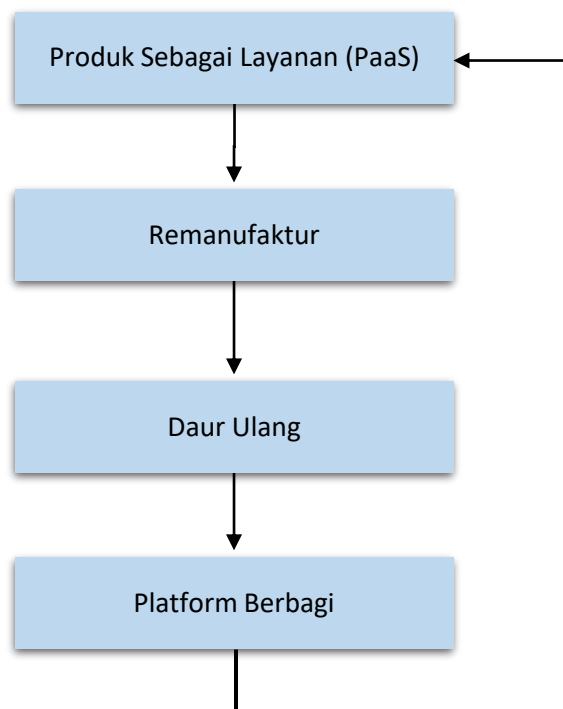
Rencana untuk Bisnis dan Model Bisnis

Berbagai model bisnis menunjukkan bagaimana ekonomi rantai pasokan sirkular bekerja. Di bawah ini, kita akan membahas jenis-jenis arketipe utama dan cara kerjanya.

Produk Sebagai Layanan (PaaS)

- Mekanika: perusahaan mempertahankan kepemilikan dan mengenakan biaya berdasarkan penggunaan atau hasil (leasing, langganan).
- Ekonomi: mengubah cara pengakuan pendapatan dari penjualan satu kali menjadi aliran pendapatan berulang dan mengubah biaya produk menjadi aset jangka panjang yang membutuhkan investasi pemeliharaan.

PaaS mendorong daya tahan dan perbaikan, menyelaraskan insentif produsen untuk efisiensi material dan dapat membantu mengatasi fluktuasi permintaan. Keberhasilan bergantung pada seberapa sering aset digunakan, berapa biaya pemeliharaannya, berapa nilainya setelah dijual, dan seberapa baik pelanggan menerimanya. PaaS dapat membantu Anda menghasilkan lebih banyak uang dalam jangka panjang dan membangun hubungan yang lebih kuat dengan klien Anda untuk produk yang harganya mahal (seperti peralatan industri dan alat kesehatan).



Gambar 3.4. Model bisnis rantai pasokan sirkular

Membangun Kembali dan Memperbaiki

- Mekanika: mengumpulkan produk yang sudah tidak berguna, memperbaikinya hingga kondisi seperti baru, dan menjualnya kembali.
- Ekonomi: pembuatan ulang biasanya lebih murah dalam hal bahan dan energi daripada membuat barang baru, tetapi membutuhkan jaringan pengumpulan dan pekerja terampil.

Jumlah pengembalian, modularitas produk, dan harga pasar untuk barang yang dibuat ulang semuanya memengaruhi seberapa menguntungkan suatu bisnis. Pembuatan ulang dapat memberikan margin yang baik dan melindungi Anda dari siklus komoditas untuk banyak barang tahan lama, seperti suku cadang mobil, suku cadang industri, dan elektronik.

Mendaur Ulang dan Mendapatkan Kembali Bahan Baku

- Mekanika: mendapatkan kembali bahan baku dari produk yang sudah tidak berguna dan menggunakannya kembali dalam proses manufaktur.
- Ekonomi: daur ulang mengubah limbah menjadi bahan baku sekunder. Ekonominya bergantung pada nilai bahan, biaya pemrosesannya, tingkat kontaminasi, dan harga bahan baku baru.

Daur ulang mekanis mungkin mahal dan tidak terlalu produktif untuk aliran limbah campuran bernilai rendah. Namun, logam, yang merupakan material bernilai lebih tinggi, biasanya memiliki ekonomi yang baik. Teknologi canggih untuk penyortiran dan daur ulang bahan kimia dapat membantu meningkatkan hasil, tetapi memiliki masalah dengan skala dan penggunaan energi.

Laporan mengatakan bahwa daur ulang saja tidak dapat mengisi kesenjangan dalam permintaan material; untuk meningkatkan sirkularitas material secara keseluruhan, penting untuk merancang barang-barang sehingga dapat digunakan kembali dan didaur ulang.

Platform untuk Berbagi dan Pengumpulan

- Mekanika: platform yang memungkinkan banyak orang berbagi barang yang tidak banyak mereka gunakan (seperti mobil dan peralatan).
- Ekonomi: berbagi membuat barang lebih bermanfaat dan menurunkan biaya modal untuk setiap pengguna, tetapi membutuhkan kepercayaan, penjadwalan, dan seringkali tata kelola platform.

Skala dan efek jaringan sangat penting. Platform dapat memusatkan logistik balik dan pemeliharaan, yang dapat menghemat uang.

Alat untuk Desain Kebijakan dan Pasar

Kegagalan pasar dan masalah koordinasi membuat kebijakan publik perlu mempercepat adopsi rantai pasokan sirkular. Alat yang baik adalah:

- Tanggung jawab produsen yang diperluas (EPR): ini membuat produsen bertanggung jawab untuk mengelola akhir masa pakai produk. Ini juga mendorong mereka untuk mendesain produk yang dapat didaur ulang dan membayar biaya pemulihan.
- Sistem deposit-pengembalian dana: membuat orang ingin mengembalikan barang, seperti wadah minuman.

- Keringanan atau kredit pajak: untuk investasi dalam manufaktur ulang, penggunaan bahan sekunder, atau proyek percontohan PaaS.
- Tarif dan fasilitasi perdagangan: direncanakan dengan cermat untuk mempermudah logistik terbalik terjadi lintas batas tanpa hambatan tambahan. Studi OECD menunjukkan bagaimana kebijakan perdagangan memungkinkan barang untuk bergerak melingkar lintas batas.

3.7 STANDAR DESAIN UNTUK REPARABILITAS DAN DAUR ULANG

- Standar desain tentang seberapa mudah memperbaiki barang dan seberapa mudah mendaur ulangnya (misalnya, suku cadang harus tersedia).
- Persyaratan kandungan daur ulang minimum diperlukan agar masyarakat mau menggunakan bahan sekunder.
- Regulasi yang memberikan hak kepada masyarakat untuk memperbaiki barang guna mengurangi keusangan yang direncanakan dan memudahkan pihak ketiga untuk memperbaiki barang.

Dukungan untuk Pengadaan Publik dan Inovasi

Pemerintah dapat menggunakan pengadaan untuk menciptakan pasar bagi produk sirkular dan membiayai proyek percontohan yang menurunkan risiko investasi (seperti hibah inovasi dan proyek demonstrasi).

Standar dan Infrastruktur untuk Informasi

Paspor produk digital dan platform ketertelusuran (komposisi material, riwayat kepemilikan) memudahkan masyarakat untuk berbagi informasi dan menurunkan biaya berbisnis dalam rantai pasokan sirkular. Standar untuk kualitas bahan daur ulang sama di mana-mana, sehingga dapat digunakan dalam manufaktur. Saat membuat kebijakan, Anda perlu menemukan keseimbangan antara ambisi dan pertimbangan untung rugi. Misalnya, relokasi produksi yang agresif atau langkah-langkah lokalisasi yang kurang tepat dapat merugikan kesejahteraan, sementara keterbukaan, diversifikasi, dan sirkularitas dapat membuat ekonomi lebih tangguh tanpa mengorbankan banyak PDB. OECD memperingatkan terhadap rencana relokasi produksi yang sederhana dan menekankan perlunya kebijakan yang konsisten.

3.8 PERUBAHAN DALAM PEKERJAAN DAN STRUKTUR

Aktivitas sirkular seperti perbaikan, manufaktur ulang, dan logistik biasanya membutuhkan lebih banyak orang daripada manufaktur primer otomatis. Hal ini dapat menciptakan lapangan kerja di daerah tersebut, tetapi keterampilan dan upah untuk pekerjaan ini mungkin berbeda. Pembelajaran menunjukkan bahwa efek lapangan kerja bersih bergantung pada adanya peningkatan produktivitas yang menyertai pergeseran tenaga kerja dan kemampuan sektor yang menurun (misalnya, ekstraksi primer) untuk melatih kembali pekerja untuk peran sirkular.

Arus Perdagangan dan Logistik ke Arah yang Berlawanan

Agar bersifat sirkular, barang bekas dan bahan sekunder seringkali harus melintasi perbatasan. Untuk mempermudah rantai pasokan balik, aturan perdagangan dan prosedur bea cukai perlu diubah agar barang yang dipulihkan tidak diperlakukan sebagai limbah. Untuk membantu aliran balik sambil melindungi standar lingkungan, OECD telah mengeluarkan pedoman tentang bagaimana menyelaraskan kebijakan perdagangan dan ekonomi sirkular.

Dampak Geopolitik dan Keamanan Sumber Daya

Rantai pasokan sirkular dapat meminimalkan risiko geopolitik sumber daya dengan mengurangi ketergantungan pada bahan baku dan meningkatkan pasokan bahan baku sekunder. Dalam kasus sektor yang intensif sumber daya, seperti baterai, logam tanah jarang, dan logam kritis, strategi sirkular (penambangan perkotaan, pengembalian baterai) merupakan bagian dari kebijakan industri nasional.

3.9 BUKTI EMPIRIS EKONOMI SIRKULAR BERBAGAI SEKTOR

Bagian ini merangkum bukti empiris, serta contoh kasus perusahaan/negara. Menurut laporan Forum Ekonomi Dunia dan Yayasan Ellen MacArthur, jumlah nilai ekonomi yang dihasilkan oleh intervensi sirkular dan tingkat pengurangan emisi bervariasi menurut sektor. Sebagai ilustrasi, terdapat potensi besar untuk pemulihan dan pembuatan ulang material di industri elektronik dan industri otomotif; tekstil memiliki peluang potensial untuk digunakan kembali dan dijual kembali dengan tantangan pemilahan dan daur ulang serat. Mirip dengan laporan makro, isu utamanya adalah daur ulang tidak cukup untuk memenuhi permintaan material dan kombinasi memperlambat, mempersempit, dan menutup siklus sangat penting.

Contoh nyata

- Philips (pencahayaan): eksperimen dengan PaaS pada tahap awal dan pengambilan kembali.
- Program dalam konteks pencahayaan sebagai layanan menghasilkan pendapatan yang konsisten dan kemungkinan untuk meningkatkan produk dan menggunakannya kembali (seperti model layanan yang menyelaraskan insentif untuk menciptakan daya tahan).
- Remanufaktur otomotif: remanufaktur mesin, transmisi, dan elektronik juga dijalankan oleh banyak OEM – memulihkan suku cadang bernilai tinggi dan menghemat material dan energi dibandingkan dengan pembuatan baru.
- Tekstil dan mode: model non-kepemilikan dibutuhkan oleh model recommerce dan penyewaan (beberapa perusahaan fast-fashion dan merek mewah khusus) tetapi skalabilitasnya dibatasi oleh biaya logistik dan harga pembersihan.
- Contoh-contoh tersebut menyiratkan bahwa ekonomi sirkular sangat ditentukan oleh fitur sektoral (durasi produk, modularitas, nilai material).

3.10 HAMBATAN TEKNOLOGI DAN OPERASIONAL

Hambatan Teknologi dan Operasional

- Tingkat pengembalian yang rendah: pelanggan tidak dijamin akan kembali dengan produk; insentif dan kemudahan sangat penting.
- Variabilitas kualitas: bahan dan komponen yang didaur ulang tidak berkualitas baik, yang membuat pemrosesan menjadi lebih mahal.
- Kendala desain: pilihan sirkular terbatas oleh produk yang tidak dirancang untuk dibongkar.
- Kesenjangan data: kurangnya ketertelusuran dan data material akan menghambat penggunaan kembali.

Hambatan Ekonomi dan Pasar

- Persaingan harga input bahan baku baru yang rendah: daur ulang dan manufaktur ulang mengalami tekanan harga ketika harga bahan baku baru rendah.
- Intensitas modal dan skala: sistem perbaikan dan logistik balik perlu diinvestasikan di awal.
- Keselarasan insentif yang buruk: penjual lebih cenderung memilih penjualan satu kali daripada bentuk layanan; investor mungkin meremehkan pengembalian sirkular dalam jangka panjang.

Kebijakan dan Hambatan Kelembagaan

- Ketidakpastian regulasi: pemrosesan pengembalian yang dipersonalisasi dan aturan nasional yang ketat menghambat arus sirkular lintas batas.
- Tidak adanya standar: tidak ada standar kualitas untuk bahan sekunder.

Pendukung

- Digitalisasi: IoT, sertifikat produk, dan blockchain berpotensi memfasilitasi logistik balik otomatis dan mengurangi gesekan informasi.
- Standar dan mandat: EPR, mandat kandungan daur ulang, dan undang-undang hak untuk memperbaiki dapat mengubah insentif.
- Inovasi keuangan: pengurangan risiko investasi sirkular dapat dilakukan melalui obligasi hijau, pembiayaan campuran, dan pembayaran berbasis kinerja.
- Konsorsium: skala ekonomi dan infrastruktur bersama dapat dicapai melalui konsorsium industri dan program penambangan perkotaan.

Dengan menurunkan kebutuhan akan material baru dan meningkatkan pasokan material bekas, rantai pasokan sirkular dapat mengurangi ancaman geopolitik sumber daya. Bagi industri yang menggunakan banyak sumber daya, seperti baterai, logam tanah jarang, dan logam kritis, strategi sirkular seperti penambangan perkotaan dan pengembalian baterai merupakan bagian penting dari kebijakan industri nasional.

3.11 BUKTI EMPIRIS DAN DAMPAK SIRKULAR LINTAS SEKTOR

Bagian ini menyajikan data dan contoh dunia nyata dari bisnis dan negara.

Hasil untuk Seluruh Dunia dan untuk Setiap Sektor

Forum Ekonomi Dunia dan Yayasan Ellen MacArthur menyatakan bahwa intervensi sirkular dapat menciptakan banyak nilai ekonomi dan mengurangi emisi, tetapi hasilnya berbeda di setiap sektor. Misalnya, industri elektronik dan otomotif memiliki banyak ruang untuk pemulihan dan pembuatan ulang material. Di sisi lain, tekstil memiliki peluang untuk digunakan kembali dan dijual kembali, tetapi menghadapi masalah dalam pemilahan dan daur ulang serat. Laporan makro menunjukkan bahwa daur ulang saja tidak dapat memenuhi permintaan material. Sebaliknya, diperlukan kombinasi antara memperlambat, mempersempit, dan menutup siklus.

Contoh Perusahaan

- Philips (pencahayaan): eksperimen PaaS awal dan program pengembalian untuk pencahayaan sebagai layanan menghasilkan penjualan yang stabil dan peluang untuk meningkatkan dan menggunakan kembali produk (contoh model layanan yang menyelaraskan insentif untuk daya tahan).
- Remanufaktur otomotif: banyak produsen peralatan asli (OEM) menjalankan program untuk meremajakan mesin, transmisi, dan elektronik. Ini menghemat material dan energi dibandingkan dengan membuat yang baru.
- Tekstil dan fesyen: platform recommerce dan model penyewaan (beberapa perusahaan fast-fashion dan merek mewah khusus) menunjukkan bahwa orang menginginkan model yang tidak memerlukan kepemilikan, tetapi biaya logistik dan pembersihan mempersulit pertumbuhan model-model ini.

Kasus-kasus ini menunjukkan bahwa karakteristik suatu sektor (daya tahan produk, modularitas, dan nilai material) memiliki dampak besar pada ekonomi sirkular.

3.12 PETA JALAN EKONOMI Sirkular Nasional

Masalah dengan Teknologi dan Operasi

- Tingkat pengembalian rendah: pelanggan mungkin tidak mengembalikan barang; insentif dan kemudahan penggunaan sangat penting.
- Perubahan kualitas: kualitas material dan komponen yang dipulihkan bervariasi, yang meningkatkan biaya pemrosesan.
- Kendala desain: pilihan sirkular dibatasi oleh produk yang tidak dapat dipisahkan.
- Kesenjangan data: kurangnya keterlacakan dan data material mempersulit penggunaan kembali.

Hambatan Terhadap Ekonomi dan Pasar

- Persaingan harga dengan input bahan baku baru yang murah: ketika harga bahan baku baru rendah, daur ulang dan pembuatan ulang harus menghadapi tekanan harga.
- Intensitas modal dan skala: Anda harus menginvestasikan uang ke dalam sistem logistik terbalik dan perbaikan di muka.
- Insentif yang tidak selaras: penjual mungkin lebih menyukai penjualan satu kali daripada model layanan, dan investor mungkin tidak melihat nilai pengembalian sirkular jangka panjang.

Hambatan dalam Kebijakan dan Institusi

- Aturan yang tidak jelas: perlakuan bea cukai terhadap pengembalian dan aturan yang berbeda di berbagai negara mempersulit terjadinya aliran sirkular lintas batas.
- Tidak ada standar: tidak ada standar kualitas yang jelas untuk bahan sekunder.

Hal-Hal yang Membantu

- Digitalisasi: IoT, paspor produk, dan blockchain dapat mempermudah berbagi informasi dan memungkinkan logistik terbalik otomatis.
- Standar dan aturan: EPR, mandat konten daur ulang, dan hukum hak untuk memperbaiki dapat mengubah cara orang bertindak.
- Inovasi keuangan: obligasi hijau, pembiayaan campuran, dan pembayaran berbasis kinerja dapat membuat investasi sirkular menjadi kurang berisiko.
- Platform kolaboratif: kelompok industri dan proyek penambangan perkotaan dapat berbagi infrastruktur dan mendapatkan skala ekonomi.

Memeriksa Kelayakan Ekonomi

Daftar periksa ini dapat membantu perusahaan mempertimbangkan investasi rantai pasokan sirkular:

1. Nilai material dan komponen: Apakah material yang dipulihkan bernilai dan dapatkah digunakan sebagai pengganti material baru?
2. Potensi pengembalian: Berapa tingkat pengembalian dan kualitas yang realistis berdasarkan bagaimana pelanggan bertindak dan apa yang ditawarkan kepada mereka?
3. Fleksibilitas desain: Apakah mungkin untuk mendesain ulang produk sehingga dapat dibongkar dan dipasang kembali tanpa menimbulkan biaya yang terlalu besar?
4. Logistik dan geografi: Apakah jaringan pengumpulan dan pusat perbaikan memungkinkan dengan biaya yang wajar, mengingat jarak dan volumenya?
5. Lingkungan peraturan: Apakah ada kebijakan yang membantu (seperti EPR dan keringanan pajak) atau hambatan perdagangan yang mempersulit terjadinya aliran balik?
6. Permintaan pasar: Apakah ada cukup banyak orang yang bersedia membayar untuk model yang diperbarui atau model layanan?
7. Kesiapan digital: Apakah mungkin menggunakan ketertelusuran dan jaminan kualitas untuk menurunkan biaya transaksi?
8. Pembiayaan: Apakah ada cara untuk mendapatkan uang untuk menutupi biaya awal dan periode pengembalian yang lebih lama?

Perusahaan harus melakukan pembahasan sensitivitas pada tingkat pengembalian, hasil manufaktur ulang, dan perbedaan harga untuk bahan sekunder untuk menemukan titik impas untuk opsi sirkular. Model inventaris dan penetapan harga siklus tertutup riset operasi dapat memberikan aturan keputusan formal.

Saran untuk Kebijakan

Untuk mengembangkan rantai pasokan sirkular di tingkat nasional dan regional, prioritas kebijakan berikut disarankan:

- Membuat atau meningkatkan kerangka kerja EPR (*Extended Producer Responsibility*) yang memberikan tanggung jawab kepada produsen atas produk mereka setelah produk tersebut rusak, sambil memastikan bahwa biaya jelas dan penyedia layanan pemulihan dapat bersaing satu sama lain.
- Untuk mempermudah logistik terbalik, aturan bea cukai dan perdagangan untuk barang bekas dan bahan sekunder harus sama. Hal ini harus dilakukan dengan perlindungan lingkungan yang ada. Saran OECD tentang perdagangan dan ekonomi sirkular menunjukkan jalannya.
- Mewajibkan informasi produk dan paspor digital untuk memungkinkan pelacakan dan memastikan kualitas di seluruh aliran sirkular yang melintasi perbatasan.
- Mendukung kebijakan yang melindungi hak untuk memperbaiki dan merancang standar untuk mempermudah perbaikan dan ketersediaan suku cadang.
- Menggunakan kemitraan publik-swasta dan alat keuangan hijau untuk membiayai infrastruktur sirkular seperti jaringan pengumpulan dan pusat perbaikan.
- Investasikan dana untuk pelatihan dan program kerja guna memberikan keterampilan baru kepada pekerja dalam bidang perbaikan, pembuatan ulang, dan logistik terbalik.
- Gunakan kebijakan pengadaan yang mendukung penawaran sirkular dan berbasis layanan untuk menjaga permintaan tetap stabil.
- Untuk melacak kemajuan dan menghindari greenwashing, pantau dan laporkan indikator sirkularitas standar yang sesuai dengan inventaris OECD.

3.13 PETA JALAN EKONOMI Sirkular PERUSAHAAN

Berikut adalah rencana bertahap yang bermanfaat:

- Penilaian strategis (0–6 bulan): cari tahu lini produk mana yang memiliki dampak terbesar, lakukan pembahasan materialitas, dan petakan rantai nilai.
- Proyek percontohan (6–24 bulan): mulai program percontohan untuk PaaS pada produk khusus, lini manufaktur ulang untuk suku cadang tertentu, atau program pengembalian dengan pengecer mitra.
- Skala operasi (2–5 tahun): siapkan pusat khusus untuk perbaikan, tambahkan paspor produk digital, dan kembangkan pasar sekunder.
- Integrasi sistem (5+ tahun): logistik terbalik yang terhubung jaringan, platform bagi banyak perusahaan untuk berbagi infrastruktur, dan pengadaan sirkular di seluruh operasi.

Faktor-faktor penting untuk keberhasilan meliputi kepemimpinan yang kuat, tim lintas fungsi (R&D, rantai pasokan, hukum, keuangan), kemitraan dengan para ahli di bidang logistik dan perbaikan, serta KPI yang jelas yang terkait dengan profitabilitas dan kinerja sirkular.

3.14 HAMBATAN PERILAKU TERHADAP PENGEMBALIAN KONSUMEN

Meskipun keadaan semakin membaik, masih ada pertanyaan pembelajaran penting yang perlu dijawab:

- Hambatan perilaku terhadap pengembalian: Intervensi mana yang paling efisien meningkatkan tingkat pengembalian konsumen di berbagai sektor?
- Jaminan kualitas untuk bahan baku sekunder: cara yang ampuh untuk memeriksa dan menstandarisasi kualitas bahan baku sekunder dalam skala besar.
- Pemodelan makro transisi sirkular: model penilaian terintegrasi yang menghubungkan keputusan perusahaan mikro, perdagangan, dan neraca nasional untuk menunjukkan bagaimana pengaruhnya terhadap seluruh perekonomian.
- Bagaimana kita menentukan harga aset sisa di masa depan dan membuat kontrak untuk PaaS agar investor tertarik pada pembiayaan dan penilaian?
- Dampak distribusi dan transisi tenaga kerja: pemeriksaan efek transisi sirkular terhadap upah, ketidaksetaraan, dan lapangan kerja regional, beserta peran kebijakan dalam memfasilitasi transisi yang adil.

Para akademisi harus mengintegrasikan studi kasus perusahaan empiris dengan model sistemik untuk mengekstrak wawasan kebijakan yang relevan secara kontekstual.

3.15 MENYATUKAN RANTAI PASOK SIRKULAR DAN KEBIJAKAN PUBLIK

Ekonomi rantai pasokan sirkular merupakan cara yang menjanjikan untuk memisahkan aktivitas ekonomi dari penggunaan sumber daya mentah sekaligus membuat bisnis lebih tangguh dan membuka peluang baru. Namun, untuk mewujudkan janji ini, kita perlu memikirkan kembali bagaimana kita mendesain produk, membuat kontrak, menangani logistik, mengukur keberhasilan, dan membuat kebijakan publik. Ketertelusuran digital, koordinasi multi-pemangku kepentingan, dan cara baru untuk menangani uang adalah pendorong penting. Para pembuat kebijakan harus memprioritaskan aturan yang harmonis untuk logistik terbalik, insentif yang ditargetkan, dan infrastruktur data. Perusahaan harus menguji dan mengembangkan model sirkular di mana ekonomi menguntungkan bagi intensitas material dan desain produk. Seiring dengan perkembangan pembelajaran dan praktik secara bersamaan, indikator yang kuat dan studi empiris yang cermat akan membantu memastikan bahwa transisi ekonomi sirkular bermanfaat bagi perekonomian dan lingkungan.

Tabel 3.1. Ekonomi rantai pasokan sirkular versus linier

Dimensi	Ekonomi rantai pasokan linier	Ekonomi rantai pasokan sirkular
Prinsip inti	Ambil → buat → buang	Kurangi → gunakan kembali → daur ulang → regenerasi
Penggunaan sumber daya	Arus sumber daya ekstraktif, satu arah	Regeneratif, siklus sumber daya (bahan, energi, air)
Model ekonomi	Fokus pada penjualan volume, transaksi satu kali	Penekanan pada retensi nilai, layanan, dan berbagai siklus hidup
Struktur biaya	Biaya bahan baku tinggi, biaya pengelolaan limbah rendah	Ketergantungan bahan baku yang lebih rendah, biaya

		logistik balik dan desain ulang di muka yang lebih tinggi
Model pendapatan	Kepemilikan produk berpindah ke pelanggan	Produk sebagai layanan (PaaS), leasing, manufaktur ulang, kredit daur ulang
Pendorong keuntungan	Skala ekonomi, input murah, siklus produksi lebih cepat	Efisiensi sumber daya, nilai produk yang diperpanjang, ketahanan, premi untuk keberlanjutan
Eksternalitas	Eksternalitas negatif tinggi (polusi, limbah, jejak karbon)	Pengurangan eksternalitas melalui aliran sirkular, peningkatan kinerja ESG
Fokus inovasi	Efisiensi proses, pengurangan biaya	Desain ramah lingkungan, sistem siklus tertutup, teknologi hijau
Model bisnis	Produksi massal, ritel linier	Platform berbagi, logistik terbalik, simbiosis industri
Risiko dan ketahanan	Rentan terhadap kelangkaan sumber daya, guncangan geopolitik	Lebih tangguh melalui diversifikasi sumber daya, siklus lokal, dan daur ulang
Ketergantungan kebijakan	Bergantung pada subsidi, deregulasi untuk pertumbuhan	Sangat terkait dengan insentif pemerintah, tanggung jawab produsen yang diperluas (EPR)
Peran pemangku kepentingan	Perusahaan mendominasi; konsumen pembeli pasif	Multi-pemangku kepentingan: perusahaan, pemerintah, konsumen, LSM, akademisi
Hasil lingkungan	Emisi GHG tinggi, pertumbuhan tempat pembuangan sampah, hilangnya keanekaragaman hayati	Emisi lebih rendah, pengalihan limbah, peningkatan keanekaragaman hayati melalui regenerasi
Hasil sosial	Penciptaan lapangan kerja jangka pendek, tetapi penipisan sumber daya merusak masa depan	Pekerjaan hijau, model inklusif, partisipasi konsumen dalam keberlanjutan
Integrasi teknologi	Terbatas (sebagian besar otomatisasi produksi)	Canggih (IoT untuk pelacakan, AI untuk optimasi, blockchain untuk ketertelusuran)
Keterlibatan konsumen	Rendah – konsumsi dan buang	Sistem pengembalian tinggi, penggunaan bersama, kreasi bersama
Tantangan	Penipisan sumber daya, krisis limbah, tekanan kebijakan	Investasi awal tinggi, pergeseran perilaku konsumen, biaya teknologi

Keberlanjutan jangka panjang	Tidak berkelanjutan, penurunan keuntungan karena kelangkaan sumber daya	Berkelanjutan, regeneratif, selaras dengan SDGs dan tujuan iklim
------------------------------	---	--

BAB 4

ARSITEKTUR IOT UNTUK VISIBILITAS UJUNG-KE-UJUNG

4.1 IOT UNTUK VISIBILITAS UJUNG-KE-UJUNG (E2E) RANTAI PASOKAN

Kompleksitas rantai pasokan global yang semakin meningkat membutuhkan pendekatan baru untuk mencapai transparansi, efisiensi, dan ketahanan. Bab ini mengeksplorasi peran *Internet of Things* (IoT) sebagai fondasi untuk visibilitas ujung-ke-ujung (E2E) dalam manajemen logistik dan rantai pasokan. IoT memungkinkan pengumpulan, transmisi, dan pembahasan data secara real-time melalui perangkat dan sensor yang saling terhubung, mendukung peningkatan pemantauan, analitik prediktif, dan pengambilan keputusan.

Bab ini menyajikan arsitektur berlapis IoT yang terdiri dari lapisan persepsi, komunikasi, pemrosesan, dan aplikasi menyoroti kemampuannya untuk mengintegrasikan beragam sumber data dan memberikan visibilitas komprehensif di seluruh rantai nilai. Berbagai model IoT, termasuk arsitektur berbasis cloud, terdistribusi, hibrida, dan berbasis agen, dibahas dalam kaitannya dengan penerapannya dalam berbagai konteks rantai pasokan. Manfaat adopsi IoT meliputi peningkatan pelacakan dan transparansi, manajemen inventaris yang dioptimalkan, pemeliharaan prediktif, efisiensi operasional, kemampuan beradaptasi terhadap gangguan, dan kontribusi terhadap tujuan keberlanjutan.

Pada saat yang sama, bab ini mengidentifikasi tantangan seperti integrasi sistem, kualitas data, risiko keamanan siber, biaya implementasi yang tinggi, dan resistensi organisasi. Ke depan, pengembangan IoT dalam rantai pasokan akan semakin terintegrasi dengan kecerdasan buatan (AI), big data, dan blockchain untuk memungkinkan sistem otonom, prediktif, dan pengoptimalan mandiri. Pembahasan menyimpulkan bahwa IoT bukan hanya teknologi pendukung tetapi juga penggerak strategis rantai pasokan generasi berikutnya, di mana visibilitas ujung ke ujung sangat penting untuk daya saing di pasar yang dinamis dan tidak pasti. Munculnya *Internet of Things* (IoT) juga telah menciptakan peluang untuk solusi kreatif terhadap tantangan manajemen rantai pasokan. Teknologi IoT berpotensi untuk mengubah visibilitas, pelacakan, manajemen, dan pengiriman barang dengan mengintegrasikan perangkat cerdas, sensor, dan jaringan yang ditingkatkan di seluruh rantai pasokan.

Bab ini akan mengeksplorasi potensi revolusioner IoT dan kemampuannya dalam meningkatkan visibilitas ujung-ke-ujung dalam rantai pasokan. Melalui pengumpulan dan pembahasan data secara real-time, IoT membekali mitra rantai pasokan dengan sarana yang diperlukan untuk mencapai visibilitas ujung-ke-ujung, yang pada gilirannya mengarah pada pemenuhan permintaan pelanggan yang terus meningkat. Visibilitas rantai pasokan secara real-time memberikan pandangan lengkap dan menyeluruh tentang proses logistik secara real-time. Rantai pasokan tipikal mencakup fungsi-fungsi seperti desain produk, pemesanan bahan baku dan suku cadang, peramalan permintaan, pengorganisasian pengiriman untuk saluran penjualan tertentu, dan penyediaan layanan pelanggan dan visibilitas di seluruh proses

pemesanan. Semua proses dan elemen yang saling bergantung ini harus dikelola secara sinkron; jika tidak, konsep rantai pasokan itu sendiri akan menjadi tidak berarti.

4.2 DEFINISI DAN RUANG LINGKUP VISIBILITAS RANTAI PASOKAN

Visibilitas rantai pasokan berarti kemampuan perusahaan mitra untuk terus memantau dan mengawasi aliran bahan baku, komponen, dan produk jadi mulai dari pengadaan, melalui produksi dan pergudangan, hingga pengiriman ke pelanggan akhir. Ini juga mencakup kemampuan untuk melacak tingkat persediaan, jadwal produksi, dan transportasi secara real-time. Pengetahuan terperinci tentang tingkat persediaan pada berbagai tahap aliran memungkinkan respons segera terhadap ketidakberaturan dan menghindari kelebihan stok maupun kekurangan, yang pada gilirannya menghasilkan biaya penyimpanan yang lebih rendah dan likuiditas operasional.

Jika penjual atau pemasok dapat terus menunjukkan lokasi produk dan kapan akan dikirim, informasi ini secara signifikan membangun kepercayaan timbal balik dan loyalitas pelanggan, yang berdampak positif pada kepuasan pelanggan dan pengalaman pembelian. Peningkatan visibilitas dalam rantai pasokan juga membantu mengidentifikasi potensi titik kegagalan, menanggapi keterlambatan dan kekurangan, serta memenuhi persyaratan hukum dan organisasi. Memantau hanya proses dalam rantai pasokan kita sendiri tidaklah cukup. Memperoleh visibilitas juga membutuhkan pengetahuan tentang apa yang terjadi dengan mitra dan peserta dalam rantai pasokan mereka, serta kondisi pasar, peraturan, dan bahkan cuaca saat ini. Pengetahuan ini memungkinkan untuk memprediksi gangguan, risiko, dan operasi rantai pasokan yang fluktuatif.

Masalah kolaborasi muncul ketika mitra menggunakan prosedur, standar, dan alat yang berbeda, sehingga mencegah integrasi dan koordinasi yang efektif dalam visibilitas rantai pasokan. Perusahaan dapat mencapai tingkat visibilitas yang tinggi hanya ketika mereka menggabungkan teknologi modern dengan integrasi data internal dan eksternal, membangun hubungan kolaboratif dan transparan dengan mitra, dan berupaya memastikan bahwa proses dan informasi yang dihasilkannya konsisten dan dikelola dengan benar. Ini adalah tugas yang sulit dan menuntut, terutama karena biaya, persyaratan organisasi, dan integrasi.

4.3 INTERNET OF THINGS (IOT) DALAM LOGISTIK DAN RANTAI PASOKAN

Komunikasi terjadi secara real-time dan melibatkan sejumlah besar data mengenai proses, aliran, objek, dan lingkungan. Dalam logistik, IoT digunakan secara luas karena kegunaan dan kemampuannya dalam pelacakan otomatis dan berkelanjutan dari proses komponen transportasi, pergudangan, pasokan, produksi, dan distribusi, yang diterjemahkan menjadi manajemen proses logistik yang efisien dan efektif. Kompleksitas jaringan pasokan yang terus meningkat, perubahan permintaan yang membutuhkan respons yang lebih cepat dan lebih fleksibel daripada sebelumnya, dan peningkatan tekanan untuk mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan dan melindungi lingkungan, semuanya berkontribusi pada pentingnya teknologi ini dalam logistik modern.

Arsitektur IoT

Dalam konteks rantai pasokan modern, arsitektur IoT didasarkan pada struktur berlapis. Arsitektur IoT dibangun di atas model empat lapis yang terukur dan efisien yang memastikan toleransi kesalahan dan keamanan data. Struktur ini memungkinkan pelacakan, pemantauan, dan pengawasan yang komprehensif, serta otomatisasi dan optimasi proses logistik. Dalam struktur ini, setiap lapisan memenuhi peran yang berbeda namun saling melengkapi dan mendukung siklus penuh akuisisi, transmisi, pemrosesan, dan pembahasan data secara real-time.

Model IoT untuk Rantai Pasokan

Logistik saat ini bergantung pada proses yang dinamis dan berlapis-lapis, sebagai konsekuensi dari pasar dan lingkungan ekonomi yang bergejolak. Oleh karena itu, dibutuhkan model arsitektur IoT yang fleksibel dan terukur. Model-model ini berbeda dalam tingkat desentralisasi, lokasi pemrosesan data, integrasi dengan sistem TI, dan tingkat otonomi. Tergantung pada kebutuhan operasional perusahaan dalam rantai pasokan dan kematangan digitalnya, terdapat lima model arsitektur dasar untuk IoT.

Model arsitektur berlapis pertama dan paling klasik, membagi sistem IoT menjadi lapisan fungsional yang diurutkan secara logis: sensorik, komunikasi, pemrosesan, dan aplikasi. Model ini memiliki fitur-fitur berikut:

- pemisahan tanggung jawab yang jelas di dalam setiap lapisan;
- modularitas tinggi, memfasilitasi modernisasi komponen individual;
- skalabilitas dan kompatibilitas dengan sistem ERP/WMS/TMS yang ada.

Model ini paling sering digunakan di gudang dengan tingkat otomatisasi tinggi, pusat distribusi, dan pelabuhan kontainer. Model kedua adalah model terdistribusi (arsitektur terdistribusi/berbasis fog), di mana pemrosesan data terjadi di dekat titik pembangkitan. Pendekatan ini meminimalkan latensi dan mengurangi beban jaringan. Fitur utama model ini meliputi:

- mendukung skenario yang membutuhkan respons cepat (misalnya, peringatan kargo yang terlalu panas);
- mendukung otonomi perangkat lokal (misalnya, robot gudang);
- beroperasi dalam kondisi konektivitas cloud yang terbatas.

Model terdistribusi digunakan dalam proses logistik berpendingin, untuk pemantauan transportasi secara real-time dan untuk deteksi lokasi jarak jauh dengan cakupan jaringan yang terbatas.

Model selanjutnya adalah model berpusat pada cloud (arsitektur berpusat pada cloud), di mana sebagian besar fungsi yang terkait dengan pemrosesan, penyimpanan, dan pembahasan data dilakukan di cloud. Di sini, perangkat IoT memainkan peran utama dalam akuisisi data. Model cloud dicirikan oleh:

- integrasi yang mudah dengan analitik prediktif dan AI;
- kemampuan untuk mengagregasi data dari berbagai lokasi;
- ketersediaan layanan SaaS dan PaaS untuk perusahaan dari semua ukuran.

Model ini menemukan aplikasinya dalam rantai pasokan internasional, platform pasar, dan operator 3PL.

Model hibrida (arsitektur hibrida) adalah model yang menggabungkan elemen model cloud dan terdistribusi. Ini memungkinkan pengalihan tugas dinamis, tergantung pada kebutuhan. Ciri-cirinya adalah:

- ketahanan tinggi terhadap gangguan komunikasi;
- fleksibilitas dalam menyesuaikan sumber daya dengan kebutuhan saat ini;
- kemampuan untuk menyeimbangkan beban kerja secara cerdas.

Ini digunakan dalam jaringan logistik kompleks di mana banyak lokasi dengan berbagai tingkat kemajuan teknologi harus diintegrasikan.

Model terakhir adalah arsitektur berbasis agen, yang didasarkan pada agen otonom – perangkat atau proses yang berkomunikasi dan berkolaborasi secara terdesentralisasi. Model ini:

- mendukung manajemen logistik adaptif secara real-time;
- memfasilitasi respons fleksibel terhadap perubahan permintaan, kondisi jalan, atau kejadian tak terduga;
- dapat menggunakan AI untuk pengambilan keputusan lokal.

IoT dapat diaplikasikan dalam sistem pengiriman jarak terakhir yang dinamis, robotika mobile di gudang, dan logistik perkotaan. Memilih arsitektur IoT yang tepat untuk rantai pasokan tertentu terutama bergantung pada spesifikasi operasional rantai tersebut, batasan waktu yang diinginkan, ketersediaan infrastruktur jaringan yang diperlukan, dan tingkat integrasi digital dengan mitra rantai lainnya. Model hibrida semakin banyak digunakan dalam praktik bisnis karena menggabungkan keunggulan komputasi lokal dan cloud, memastikan kecepatan dan pembahasan data strategis di seluruh rantai pasokan.

Manfaat IoT dalam Rantai Pasokan

Implementasi solusi IoT dalam rantai pasokan menghasilkan hasil positif di banyak bidang operasional, ekonomi, dan strategis. Mengintegrasikan perangkat IoT dengan sistem TIK yang ada dalam rantai pasokan memungkinkan terciptanya nilai baru berupa sistem yang sepenuhnya digital, cerdas, dan fleksibel untuk mengelola aliran barang dan informasi. Manfaat penerapan IoT dalam rantai pasokan dapat dilihat dalam bentuk:

1. Peningkatan visibilitas, transparansi, pemantauan, pengawasan, dan pelacakan waktu nyata. Semua ini dimungkinkan berkat penggunaan sensor, dan sensor yang terus menerus memberikan informasi tentang lokasi, status, dan kondisi barang dalam perjalanan. Manfaat ini paling signifikan untuk proses transportasi, karena memungkinkan pelacakan pengiriman dengan akurasi yang sangat tinggi, mengurangi jumlah barang yang hilang, rusak, atau dicuri, dan memfasilitasi kepatuhan terhadap peraturan hukum.
2. Peningkatan manajemen inventaris dan gudang. Di bidang ini, IoT memungkinkan pemantauan otomatis tingkat inventaris dan deteksi cepat kekurangan atau kelebihan, yang pada gilirannya menghasilkan ruang penyimpanan yang optimal. Implementasi IoT mengurangi stok pengaman tanpa risiko kekurangan, memungkinkan operasi just-

in-time melalui pengisian ulang inventaris otomatis, dan mempersingkat waktu pengambilan pesanan dan pengiriman.

3. Meningkatkan efisiensi operasional, yang dimungkinkan oleh otomatisasi proses dan analitik prediktif. Akibatnya, semua proses di seluruh rantai pasokan disederhanakan, terutama dengan mendeteksi dan menghilangkan hambatan secara real-time, mengoptimalkan rute pengiriman dan transportasi, jadwal produksi dan distribusi, serta mengurangi kesalahan manusia dan waktu henti yang tidak terduga.
4. Memprediksi dan mencegah kerusakan. IoT memungkinkan rantai pasokan untuk memeriksa dan memantau kondisi teknis kendaraan, mesin, dan peralatan secara real-time. Hal ini memungkinkan pemeliharaan prediktif, yang mencegah kerusakan dengan mendeteksi tanda-tanda keausan sebelum mencapai kondisi kerusakan total. Ini secara signifikan mengurangi biaya waktu henti dan perbaikan mesin dan peralatan, serta memperpanjang siklus hidup aset.
5. Fleksibilitas dan adaptabilitas rantai pasokan yang lebih besar, yang berarti respons dinamis terhadap perubahan permintaan, situasi krisis, dan gangguan pasokan. Nilai di sini terletak pada kemampuan untuk langsung mendesain ulang rute dan saluran logistik, secara otomatis mengalokasikan sumber daya berdasarkan kebutuhan saat ini, dan memodelkan berbagai skenario berdasarkan parameter yang telah ditetapkan yang berasal dari perangkat IoT.
6. Pengambilan keputusan berbasis data (rantai pasokan berbasis data) dengan mengintegrasikan IoT dengan sistem analitik, ERP, dan AI serta memanfaatkan data terkini dan akurat yang diambil secara real-time. Hal ini memungkinkan perencanaan yang lebih baik untuk proses permintaan, produksi, dan logistik, memperpendek siklus pengambilan keputusan, dan secara signifikan meningkatkan akurasi perkiraan dan simulasi.
7. Pembangunan berkelanjutan dan pengurangan biaya lingkungan, karena IoT membantu perusahaan mitra mengurangi konsumsi sumber daya alam dan mengurangi emisi karbon dioksida dengan mengoptimalkan proses logistik. Hal ini dicapai dengan mengurangi jarak tempuh dan konsumsi bahan bakar kendaraan transportasi, mengoptimalkan suhu dan konsumsi energi di ruang pendingin dan gudang, serta memantau jejak karbon secara real-time dan memengaruhi pengurangannya.

Rantai pasokan tradisional saat ini sedang diubah, berkat penggunaan IoT, menjadi sistem cerdas dan terintegrasi yang mampu merespons dengan cepat, belajar mandiri, dan terus menerus melakukan perbaikan. Ini merupakan langkah maju yang signifikan, dan tren perkembangan ini harus dipertahankan, karena memungkinkan untuk membangun posisi kompetitif yang kuat dalam lingkungan ekonomi dan pasar yang volatil, tidak pasti, dan kompleks.

4.4 VISIBILITAS UJUNG-KE-UJUNG (E2E): KONSEP DAN MANFAAT

Visibilitas ujung-ke-ujung (E2E) dalam rantai pasokan berarti kemampuan untuk memantau sepenuhnya dan terus menerus aliran bahan baku, produk, dan informasi di sepanjang seluruh rantai pasokan dan di seluruh prosesnya, hingga pengiriman produk jadi ke pelanggan akhir. Visibilitas ujung ke ujung (E2E) ini merupakan salah satu tujuan utama transformasi digital dalam bidang logistik. Hal ini karena visibilitas memberikan kontrol yang lebih baik atas semua proses logistik dan memungkinkan pengambilan keputusan yang cepat dan berdasarkan informasi di berbagai tingkatan operasional. Dalam konteks logistik ini, teknologi *Internet of Things* (IoT) memainkan peran penting, bahkan mendasar. Hal ini karena IoT secara otomatis dan terus menerus memperoleh data dan mengintegrasikannya secara real-time.

Mekanisme utama yang memungkinkan visibilitas E2E mencakup pemantauan lokasi dan kondisi barang yang dikirim menggunakan teknologi seperti GPS, RFID, sensor lingkungan, dan beacon BLE. Solusi ini memungkinkan pelacakan kargo dengan akurasi yang sangat tinggi, terlepas dari lokasi geografisnya. Data yang diperoleh dengan cara ini juga mencakup informasi rinci tentang kondisi transportasi kargo, termasuk tidak hanya lokasi saat ini tetapi juga faktor-faktor seperti suhu, kelembaban, tingkat getaran, dan bahkan pembukaan kontainer. Dengan semua informasi ini, perusahaan dapat segera menanggapi setiap penyimpangan dari norma, meningkatkan keamanan dan kualitas layanan logistik.

Arsitektur IoT yang digunakan saat ini memungkinkan integrasi data dari berbagai sumber yang terkait dengan sistem rantai pasokan tertentu. Informasi dikumpulkan dari gudang, kendaraan transportasi, unit produksi, dan gerai ritel, dan meskipun jumlahnya banyak, informasi tersebut dapat dikumpulkan pada satu platform untuk memberikan pandangan yang terpadu dan konsisten tentang seluruh proses logistik. Integrasi ini memungkinkan perusahaan mitra untuk memperoleh konteks bisnis yang komprehensif, sehingga menghindari “titik buta” yang tidak terlihat atau sulit dideteksi dalam rantai pasokan tradisional.

Visibilitas E2E dalam rantai pasokan juga berguna untuk manajemen proses logistik yang dinamis dan real-time. Misalnya, jika terjadi keterlambatan, kemacetan, atau kerusakan kendaraan selama transportasi, sistem IoT dapat secara otomatis memulai tindakan korektif, seperti pengalihan rute, pengalihan kargo ke titik lain, atau penjadwalan ulang pengiriman untuk perbaikan. Kemampuan tersebut secara signifikan meningkatkan ketahanan rantai pasokan terhadap semua jenis gangguan dan kejadian tak terduga. Lebih lanjut, data yang diperoleh oleh perangkat IoT digunakan sebagai masukan untuk algoritma prediktif. Algoritma ini dapat mendeteksi risiko spesifik sejak dini dan mengembangkan solusi untuk menghindari konsekuensinya.

Aspek lain dari memastikan visibilitas rantai pasokan E2E penuh adalah kemampuan untuk berbagi data di antara semua peserta rantai pasokan. Platform IoT memungkinkan semua informasi yang diperlukan untuk dibagikan secara otomatis dengan pemasok, produsen, operator logistik, pengecer, dan pelanggan akhir. Hal ini menciptakan tingkat transparansi yang tinggi sekaligus memupuk kepercayaan timbal balik, menyederhanakan

komunikasi, dan memfasilitasi kolaborasi antara semua mitra rantai pasokan. Lebih lanjut, IoT dan visibilitas rantai pasokan E2E yang dihasilkan dikombinasikan dengan kemajuan teknologi modern lainnya seperti blockchain, memastikan integritas data dan ketertelusuran produk penuh (ini sangat penting di industri yang diatur seperti farmasi dan makanan).

Efek positif dari pencapaian visibilitas E2E melalui IoT adalah manfaat bisnis yang terukur untuk seluruh rantai pasokan. Perusahaan mitra dapat secara signifikan mengurangi biaya bisnis mereka dengan mengurangi stok pengaman, meningkatkan pemanfaatan sumber daya, dan menghilangkan proses dan aktivitas yang tidak perlu. Pelanggan akhir juga mendapat manfaat, karena mereka menerima tingkat layanan pelanggan yang lebih tinggi melalui pelacakan pesanan yang akurat dan tanggal pengiriman yang dapat diprediksi. Sama pentingnya adalah fakta bahwa sistem IoT sangat efektif dalam manajemen risiko dan merespons gangguan jauh lebih cepat. Hal ini secara signifikan meningkatkan ketahanan seluruh rantai pasokan dan secara signifikan mendukung pembangunan keunggulan kompetitif di pasar. Mengingat semua manfaat penggunaan IoT untuk mencapai visibilitas ujung-ke-ujung, upaya ini perlu dipertahankan dan rantai pasokan tradisional perlu ditransformasikan menjadi rantai pasokan yang lebih modern, yang disesuaikan dengan kebutuhan transformasi digital yang sedang berlangsung, sehingga tetap berada pada tingkat perkembangan teknis dan teknologi terkini.

4.5 TANTANGAN IOT PADA VISIBILITAS RANTAI PASOK

Terlepas dari banyaknya manfaat penerapan teknologi IoT untuk mencapai visibilitas ujung-ke-ujung penuh dalam rantai pasokan, yang telah dibahas sebelumnya, penting untuk dicatat bahwa implementasi tersebut juga menimbulkan sejumlah tantangan dan hambatan. Hal ini harus diatasi, dan sumber daya teknis yang tepat akan sangat penting, termasuk kematangan digital setinggi mungkin untuk perusahaan tertentu, keterbukaan untuk berkolaborasi dengan mitra rantai pasokan, dan kebutuhan serta kemauan untuk beradaptasi dengan perubahan dalam budaya organisasi perusahaan.

Salah satu tantangan terbesar di era teknologi digital adalah integrasi sistem dan standar komunikasi yang heterogen. Karena rantai pasokan modern biasanya tersebar secara geografis dan teknologi, dan karena para pesertanya menggunakan berbagai solusi ERP, WMS, TMS, dan IoT, seringkali ternyata semua sistem ini, dan karenanya rantai itu sendiri, tidak kompatibel. Kurangnya protokol data yang seragam ini, ditambah dengan kesulitan dalam pertukaran informasi antar mitra rantai pasokan, menyebabkan terciptanya silo data, yang secara signifikan membatasi efektivitas solusi IoT dan dengan demikian menghambat pencapaian visibilitas rantai pasokan. Masalah keamanan dan privasi data juga menjadi penghalang. IoT menghasilkan sejumlah besar informasi, yang seringkali bersifat sensitif. Oleh karena itu, penyimpanan, transmisi, dan pemrosesannya secara real-time secara signifikan meningkatkan risiko pelanggaran keamanan, serangan siber, atau akses tidak sah.

Mencegah situasi tersebut membutuhkan implementasi mekanisme enkripsi, otentikasi, dan manajemen akses yang canggih. Solusi bagus lainnya adalah menggunakan peraturan internasional seperti GDPR dan standar industri untuk perlindungan data di bidang

logistik. Hambatan lain adalah tingginya biaya implementasi dan pemeliharaan infrastruktur IoT, terutama untuk usaha kecil dan menengah, yang biasanya memiliki sumber daya keuangan yang lebih terbatas daripada perusahaan besar. Pembelian sensor, perangkat edge, dan sistem analitik, serta integrasinya dengan infrastruktur TI perusahaan yang ada, menimbulkan beban anggaran yang signifikan. Ditambah lagi dengan kebutuhan akan peningkatan perangkat keras yang konstan dan pemeliharaan konektivitas dan daya untuk semua perangkat yang terdistribusi, yang secara alami menghasilkan biaya tambahan yang dapat menghalangi perusahaan untuk berinvestasi dalam sistem IoT.

Kurangnya keterampilan teknologi dan analitis di antara karyawan juga merupakan hambatan yang signifikan. Implementasi IoT yang sukses tidak hanya membutuhkan instalasi perangkat tetapi juga kemampuan untuk mengkonfigurasinya dan kemudian mengelola data yang diperoleh, pembelajaran hasilnya, dan membuat keputusan berdasarkan data tersebut. Oleh karena itu, banyak perusahaan, biasanya pada tahap awal transformasi digital mereka, mengalami kesulitan dalam merekrut atau melatih spesialis di bidang IoT, keamanan siber, analitik data, dan integrasi sistem.

Kesenjangan keterampilan ini merupakan hambatan signifikan untuk sepenuhnya mewujudkan potensi IoT untuk visibilitas rantai pasokan E2E. Resistensi organisasi dan kurangnya kepercayaan antara mitra rantai pasokan juga menimbulkan tantangan. Karena visibilitas E2E bergantung pada prinsip transparansi dan berbagi data antara banyak peserta, hambatan ini sering muncul karena perusahaan-perusahaan ini tidak selalu menerima prinsip-prinsip tersebut karena keyakinan bisnis mereka sendiri. Hal ini dapat disebabkan oleh kekhawatiran kehilangan keunggulan kompetitif, pengungkapan informasi komersial rahasia, atau penyalahgunaan data oleh mitra lain, yang secara efektif dapat membatasi kolaborasi penuh dalam sistem IoT.

Terakhir, penting untuk menunjukkan hambatan yang diakibatkan oleh kekurangan infrastruktur. Jika terdapat kurangnya akses ke jaringan komunikasi yang stabil dan cepat, throughput data yang terbatas, atau masalah dalam memberi daya pada perangkat IoT dalam kondisi lingkungan yang keras, arsitektur IoT tidak berfungsi dengan baik, dan seluruh sistem kehilangan visibilitas rantai pasokan. Meskipun teknologi seperti 5G, LPWAN, dan edge computing dirancang untuk secara bertahap mengurangi keterbatasan ini, teknologi tersebut tetap menjadi faktor risiko dan hambatan yang signifikan, terutama dalam proses logistik internasional dan lintas batas.

Pembahasan menunjukkan bahwa implementasi IoT sebagai alat untuk visibilitas ujung-ke-ujung dalam rantai pasokan tidak hanya terkait dengan potensi manfaat positif yang sangat besar, tetapi juga dengan berbagai tantangan dan hambatan. Untuk mengatasi tantangan ini, pendekatan sistem sangat penting, dengan berinvestasi dalam keterampilan digital karyawan dan membangun sistem yang berbasis kepercayaan dan kolaborasi di seluruh proses. Semua tindakan ini akan memungkinkan pemanfaatan penuh peluang yang muncul dari fungsionalitas IoT dalam logistik generasi berikutnya.

4.6 MASA DEPAN IOT DAN VISIBILITAS RANTAI PASOK

Tren perkembangan IoT dalam logistik saat ini terus meningkat, bahkan memasuki fase baru di mana peran data tidak lagi terbatas pada pelacakan peristiwa pasif. Hal ini menunjukkan bahwa rantai pasokan di masa depan akan dibentuk oleh sistem dalam format baru sistem yang tidak hanya mengumpulkan informasi secara real-time tetapi juga menafsirkannya dan membuat keputusan secara otonom dan dengan waktu respons yang lebih cepat daripada manusia. Dalam konteks ini, visibilitas itu sendiri kehilangan kepentingannya sebagai fitur yang berdiri sendiri dan menjadi fondasi untuk membangun rantai pasokan yang fleksibel, prediktif, dan mengoptimalkan diri sendiri.

Pengembangan teknologi digital modern untuk rantai pasokan tidak diragukan lagi akan bergerak menuju integrasi yang lebih dalam dari data IoT dengan pembelajaran mesin dan algoritma AI. Di masa depan, sistem ini, alih-alih peringatan sederhana tentang keterlambatan atau penyimpangan dari norma, akan memprediksi peristiwa tersebut sebelumnya dan secara otomatis merekomendasikan atau menerapkan tindakan perbaikan, sehingga menghilangkan kebutuhan intervensi manusia dalam banyak situasi rutin. Pada titik ini, visibilitas E2E dalam rantai pasokan akan memperoleh format baru untuk lapisan pengambilan keputusan, sehingga menjadi lebih fleksibel, dinamis, dan cerdas. Pada saat yang sama, semua model pemrosesan data terdesentralisasi, seperti edge computing dan fog computing, akan berkembang, karena pemrosesan informasi edge akan mendapatkan peran kunci dalam situasi di mana waktu respons sangat penting. Sistem yang dimodernisasi, alih-alih mengirimkan data ke cloud, akan pembelajarannya secara lokal, mempersingkat waktu respons dan mengurangi risiko downtime dalam situasi kritis. Kemampuan ini juga akan tercermin dalam peningkatan ketahanan rantai pasokan terhadap gangguan, yang sangat penting dalam lingkungan ekonomi dan politik yang bergejolak saat ini.

Selain itu, ada masalah kepercayaan dan berbagi informasi antar peserta rantai, karena masa depan visibilitas E2E dalam rantai pasokan akan bergantung pada sejauh mana perusahaan bersedia berbagi data, tidak hanya dengan mitra dagang tetapi juga dengan sistem eksternal dan konsumen. Di sinilah teknologi blockchain berperan, memungkinkan integritas dan transparansi data tanpa perlu sentralisasi. Hal ini juga memungkinkan pengembangan sistem logistik terdistribusi dan terbuka di mana kepercayaan berasal dari teknologi, bukan hanya dari hubungan antar perusahaan mitra. Saat ini, generasi baru perangkat IoT semakin banyak muncul di pasaran. Perangkat ini lebih kecil, lebih murah, lebih hemat energi, dan mampu beroperasi lebih lama tanpa pengisian daya. Penggunaan perangkat ini akan memungkinkan perluasan visibilitas rantai pasokan ke area yang sebelumnya terabaikan, seperti pengiriman tahap akhir (*last mile*), logistik terbalik, dan pemantauan produk setelah meninggalkan toko. Dikombinasikan dengan meningkatnya ketersediaan jaringan 5G dan pengembangan LPWAN, rantai pasokan di masa depan akan berfungsi seperti organisme hidup – terus memantau fungsinya, belajar, dan beradaptasi dengan perubahan lingkungan.

Arah masa depan pengembangan teknologi IoT dalam logistik sudah jelas terlihat, meskipun masih banyak tantangan dan hambatan yang harus diatasi. Lingkungan rantai pasokan harus belajar berfungsi dalam realitas digital baru dan menyesuaikan operasinya

dengan tren saat ini. IoT bukan lagi sekadar teknologi pendukung, tetapi menjadi elemen sentral dari strategi manajemen rantai pasokan.

4.7 IOT SEBAGAI FONDASI RANTAI PASOKAN CERDAS

Dalam struktur rantai pasokan global yang kompleks dan rumit, teknologi *Internet of Things* (IoT) secara signifikan mentransformasi manajemen barang fisik dan aliran informasi di sepanjang rantai. Dalam konteks ini, visibilitas ujung-ke-ujung bukan hanya tujuan teknologi tetapi juga prasyarat untuk mendapatkan keunggulan kompetitif di pasar yang tidak pasti dan bergejolak. IoT, dengan kemampuannya untuk mengumpulkan, memproses, dan mengirimkan data secara real-time, merupakan fondasi bagi rantai pasokan yang cerdas dan fleksibel.

Seluruh arsitektur IoT dibangun berlapis-lapis, menciptakan model yang koheren dan terukur yang memungkinkan pemantauan komprehensif dan manajemen aliran yang efektif di seluruh rantai nilai. Solusi tambahan seperti komputasi tepi, sistem ERP, platform prediktif, dan komunikasi 5G berkontribusi pada pembangunan rantai pasokan generasi berikutnya yang transparan, tangguh, dan berkelanjutan. Terlepas dari tantangan dan hambatan yang ada yang menghambat implementasi IoT dalam rantai pasokan, ada baiknya untuk lebih fokus pada manfaat implementasi ini, karena visibilitas, transparansi, peningkatan kualitas layanan pelanggan, pengurangan biaya, dan banyak manfaat lainnya patut dipertimbangkan.

Pengembangan IoT di masa depan dalam logistik dan manajemen rantai pasokan akan bergerak menuju otonomi, prediktabilitas, dan ketahanan yang lebih besar. Teknologi pendukung lainnya akan lebih terintegrasi dengan IoT, membangun rantai pasokan yang mampu belajar secara otonom, memprediksi peristiwa, dan membuat keputusan secara real-time. Visibilitas rantai pasokan ujung-ke-ujung kemudian tidak lagi menjadi fitur tetapi prasyarat untuk pengoperasian yang efektif dari setiap perusahaan modern.

BAB 5

BLOK BANGUNAN EKOSISTEM IOT YANG TRANSPARAN

5.1 ARSITEKTUR BERLAPIS SISTEM IOT

Evolusi teknologi digital yang berkelanjutan telah menjadikan *Internet of Things* (IoT) sebagai penggerak inovasi yang penting di sektor publik dan swasta. Domain seperti pertanian, perawatan kesehatan, transportasi, dan rumah pintar semakin memanfaatkan IoT untuk meningkatkan visibilitas operasional, otomatisasi, dan layanan yang dipersonalisasi. Ekosistem ini biasanya terdiri dari perangkat yang saling terhubung, platform cloud, dan layanan berbasis internet sehingga memunculkan kebutuhan yang lebih tinggi akan mekanisme perlindungan data yang kuat.

Seiring dengan meluasnya permukaan serangan IoT, memastikan keamanan sistem secara menyeluruh sangat penting untuk mencegah akses tidak sah, pelanggaran data, dan potensi kerugian finansial. Bab ini menyajikan eksplorasi komprehensif arsitektur IoT, dengan fokus pada perannya dalam memungkinkan visibilitas ujung-ke-ujung. Bab ini membahas struktur berlapis sistem IoT dari pembangkitan data di tingkat perangkat hingga pemrosesan waktu nyata dan analitik berbasis cloud. Bab ini juga memperkenalkan area aplikasi utama dan menyoroti transisi menuju model *Everything-as-a-Service* (XaaS).

Selain itu, bab ini membahas prinsip-prinsip desain arsitektur penting yang mendukung skalabilitas, interoperabilitas, dan keamanan. Bab ini memberikan penekanan khusus pada integrasi IoT dengan komputasi awan, menguraikan bagaimana platform awan memfasilitasi konektivitas perangkat yang lancar, penyimpanan data, dan penyampaian layanan sesuai permintaan. Bab ini diakhiri dengan menyoroti tantangan keamanan yang terkait dengan integrasi awan dan merekomendasikan strategi untuk membangun ekosistem IoT yang tangguh dan aman. Istilah *Internet of Things* (IoT) pertama kali diperkenalkan pada tahun 1999 oleh Kevin Ashton di MIT Auto-ID Center, dalam konteks pelacakan rantai pasokan berbasis identifikasi frekuensi radio (RFID). Sejak itu, kemajuan dalam teknologi informasi dan elektronik telah mendorong proliferasi perangkat yang terhubung ke internet, sehingga hampir semua objek fisik dapat menjadi perangkat IoT.

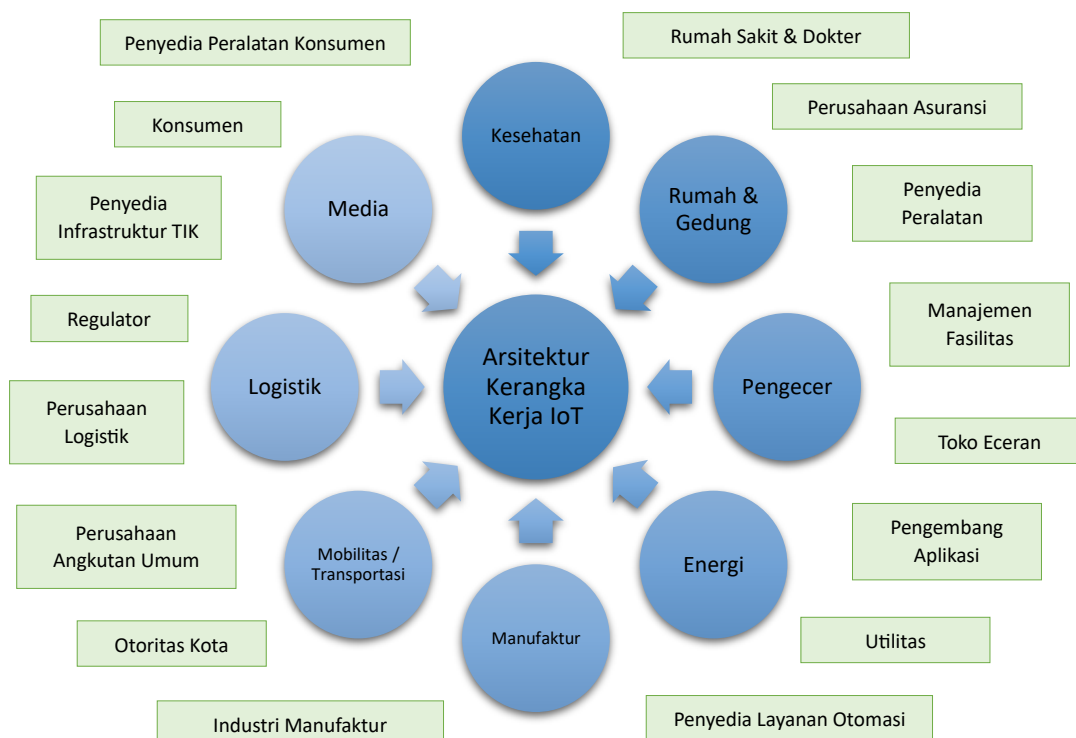
Para peneliti seperti Gubbi dan rekan-rekan. mendefinisikan IoT sebagai konvergensi sistem tertanam, sensor, aktuator, dan komputasi awan untuk menciptakan jaringan "benda" yang ada di mana-mana yang mampu merasakan, berkomunikasi, dan bertindak tanpa campur tangan manusia. "Benda" dalam IoT dapat mencakup objek apa pun yang terhubung ke internet, seperti televisi, ponsel pintar, sensor, atau perangkat yang dapat dikenakan. Integrasi yang mulus antara dunia fisik dan digital melalui IoT menghasilkan peningkatan efisiensi, akurasi, dan kenyamanan yang menguntungkan penyedia layanan dan pengguna akhir.

IoT merupakan kombinasi dari dorongan teknologi dan tarikan manusia untuk konektivitas yang lebih banyak dan terus meningkat dengan segala sesuatu yang terjadi di lingkungan terdekat dan yang lebih luas, perluasan logis dari daya komputasi dalam satu mesin

ke lingkungan: lingkungan sebagai antarmuka. Kombinasi dorongan-tarik ini membuatnya sangat kuat, tak terbandung, cepat, dan sangat disruptif.

Manajemen penyimpanan yang efisien membantu bisnis menurunkan biaya dan meningkatkan pemanfaatan sumber daya material dan manusia. Misalnya, manajemen penyimpanan berbasis IoT mengintegrasikan sensor dengan pengontrol logika yang dapat diprogram (PLC). Sensor mengirimkan sinyal analog ke PLC, yang mengubahnya menjadi instruksi digital dan mengirimkannya sebagai string data. Di sisi perangkat lunak, aplikasi dapat menampilkan informasi yang relevan pada dasbor seperti jenis produk dalam baki, jumlah produk, dan detail item. Integrasi model AI dengan sistem IoT berbasis cloud dapat meningkatkan kinerja, misalnya tanaman dapat dilindungi dari hewan dengan mengaktifkan model AI untuk mendeteksi hewan guna melindungi tanaman dari kerusakan akibat gangguan hewan.

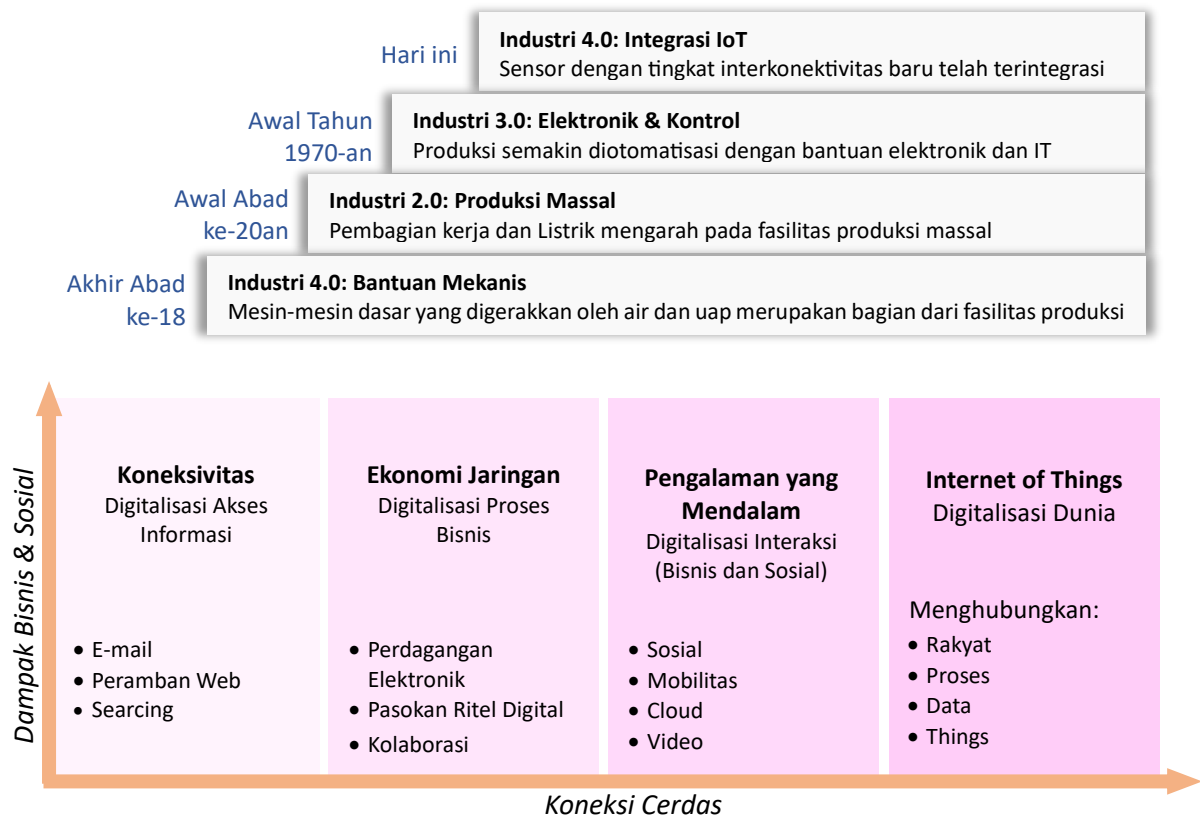
IoT diterapkan secara luas di berbagai sektor. Misalnya, perusahaan logistik menggunakan sensor IoT untuk melacak pengiriman secara real-time, memungkinkan pengiriman tepat waktu dan manajemen masalah yang proaktif. Dalam infrastruktur perkotaan, otoritas lalu lintas menggunakan data IoT untuk mengelola kemacetan. Dalam perawatan kesehatan, perangkat yang dapat dikenakan memantau tanda-tanda vital pasien seperti kadar oksigen dan detak jantung, memicu peringatan untuk intervensi segera bila diperlukan. Sektor IoT yang ditunjukkan pada Gambar 5.1 mengilustrasikan berbagai macam domain yang mengadopsi aplikasi IoT.



Gambar 5.1. Sektor-sektor IoT. Untuk versi berwarna dari gambar ini.

Konsep Industri 4.0 sangat bergantung pada perangkat IoT, karena hampir setiap industri modern terintegrasi dengan teknologi internet dan sistem informasi. Sistem-sistem ini

berfokus pada aliran data yang aman dan optimasi operasional. Hubungan antara Industri 4.0 dan IoT yang ditunjukkan pada Gambar 5.2 menyoroti koneksi ini.



Gambar 5.2. Hubungan antara Industri 4.0 dan IoT

Adopsi IoT juga dapat dikategorikan menjadi penggunaan industri dan konsumen. IoT industri mencakup domain seperti ritel, manufaktur, konstruksi, dan perawatan kesehatan, sedangkan IoT konsumen berfokus pada elektronik, rumah pintar, perangkat yang dapat dikenakan, dan kendaraan terhubung. Gambar 5.3 merangkum klasifikasi ini.

Kategori	Subkategori	
Banyak konsumen 	Elektronik konsumen	Televisi pintar, hiburan rumah (konsol game, speaker), pribadi hiburan (pemutar MP3, perangkat game portabel), set-top box
	Rumah pintar	Peralatan rumah tangga (kulkas, mesin cuci), infrastruktur rumah (router), keamanan rumah (alarm), pemantauan energi (termostat)
	Perangkat yang dapat dikenakan	Pelacak kebugaran (termasuk pelacak kesehatan pribadi), jam tangan pintar
	Kendaraan pintar	Mobil terhubung, sepeda terhubung, telematika asuransi
	Konsumen - lainnya	Alat pelacak untuk anak-anak, lansia, dan hewan peliharaan, serta drone dan robot.
Banyak industri	Kota pintar	Transportasi umum, pengawasan, pengisian daya kendaraan listrik, penerangan jalan, parkir, pengelolaan sampah
	Utilitas cerdas	Pengukuran cerdas energi, air, dan gas, jaringan cerdas.



Ritel cerdas	PoS, papan reklame digital, mesin penjual otomatis, ATM
Manufaktur yang cerdas	Pelacakan inventaris, pemantauan dan diagnostik, manajemen gudang
Bangunan pintar	Pemanas dan pendingin udara, keamanan, penerangan, meja kerja bergantian, peralatan kantor
Kesehatan	Pemantauan jarak jauh perangkat medis, infrastruktur kendaraan darurat.
Perusahaan lain	Manajemen armada, aplikasi di bidang pertanian, minyak, pertambangan, konstruksi.

Gambar 5.3. Penggunaan Perangkat IoT Berdasarkan Kategori

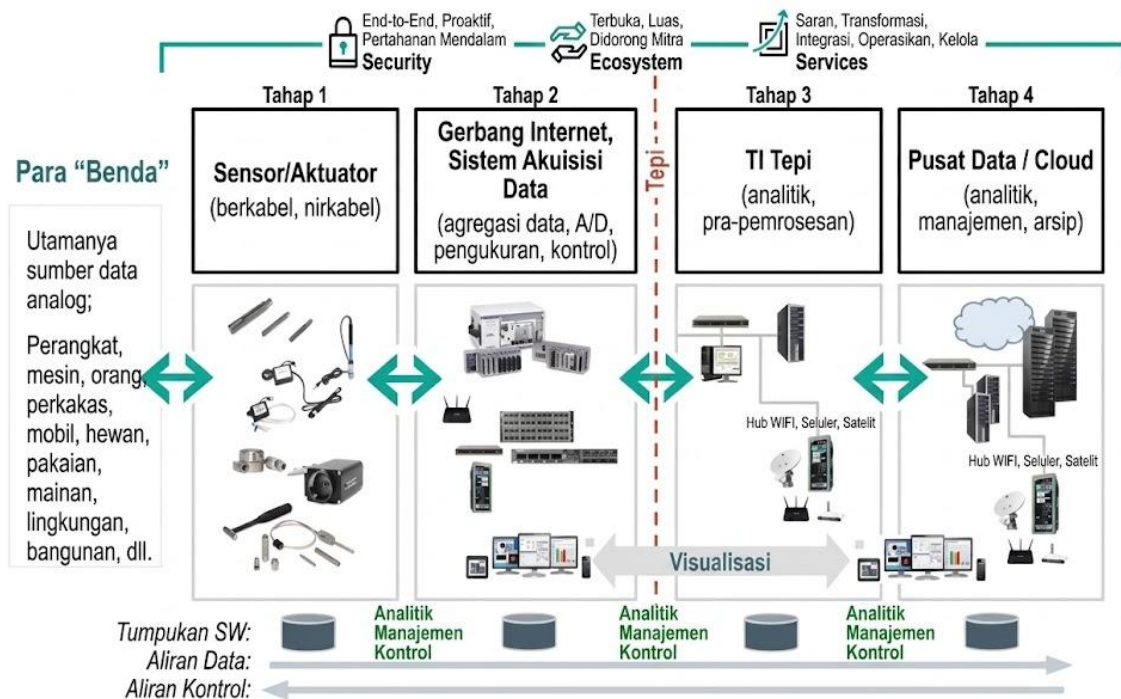
5.2 KARAKTERISTIK FUNDAMENTAL DAN BATASAN PERANGKAT IOT

Sistem IoT diharapkan menunjukkan beberapa karakteristik utama:

- Biaya rendah – perangkat harus murah untuk memastikan penyebaran skala besar.
- Konsumsi daya rendah – node IoT harus beroperasi dengan kebutuhan energi minimal.
- Masa pakai baterai yang lama – perangkat sering berfungsi di lokasi terpencil dan membutuhkan durasi baterai yang lama.
- Konektivitas tinggi – sistem IoT harus mendukung beberapa koneksi simultan untuk transfer data dan pertukaran perintah dengan cloud.
- Persyaratan kecepatan bit variabel – aplikasi yang berbeda membutuhkan kecepatan komunikasi yang berbeda tergantung pada jenis data dan urgensinya.
- Rentang bandwidth yang fleksibel – tergantung pada aplikasinya, beberapa perangkat mungkin memerlukan komunikasi jarak jauh (misalnya, Low-Power Wide-Area Network (LPWAN)) sementara yang lain membutuhkan jarak pendek (misalnya, Bluetooth, Zigbee).
- Daya pemrosesan terbatas – sebagian besar perangkat IoT beroperasi dengan kemampuan komputasi rendah karena keterbatasan perangkat keras.
- Kapasitas penyimpanan rendah – karena menyimpan data secara lokal meningkatkan risiko pencurian, perangkat IoT mengandalkan penyimpanan cloud.
- Desain ringkas – perangkat harus kecil, ringan, dan portabel untuk digunakan di berbagai lingkungan.
- Protokol jaringan sederhana – arsitektur IoT biasanya menggunakan protokol komunikasi ringan yang mudah diadopsi oleh pengguna non-ahli.

5.3 ARSITEKTUR END-TO-END DAN ALIRAN PEMROSESAN DATA PADA SISTEM IOT

Seperti yang disebutkan sebelumnya, IoT memungkinkan produk analog atau digital untuk terhubung ke internet dan bertukar data atau mengikuti instruksi. Arsitektur IoT memiliki empat tahap, yaitu sensor/aktuator, gateway internet dengan sistem akuisisi data, Edge IT, dan pusat data atau cloud. Gambar 5.4 menunjukkan arsitektur IoT 4 tahap.



Gambar 5.4. Arsitektur IoT empat tahap

Sensor/Aktuator

Ini adalah tahap pertama dan bertanggung jawab untuk menangkap data fisik dari lingkungan. Perangkat yang digunakan pada lapisan ini meliputi sensor analog dan digital, tag RFID, kamera, perangkat yang dapat dikenakan, dan aktuator. Komponen-komponen ini ditempatkan di tepi fisik dan berkomunikasi menggunakan protokol kabel atau nirkabel. Peran utamanya adalah mengumpulkan data seperti suhu, gerakan, dan tekanan, serta mengirimkannya untuk diproses lebih lanjut. Misalnya, sensor suhu yang tertanam dalam pendingin udara menyesuaikan pendinginan berdasarkan suhu ruangan secara real-time.

Gateway Internet dengan Sistem Akuisisi Data

Tahap kedua dari gateway internet digunakan untuk menghubungkan jaringan sensor ke jaringan berbasis Protokol Internet (IP). Tahap ini menangani penerjemahan protokol, pengkondisian sinyal, dan buffering. Jika diperlukan, tugas-tugas seperti konversi sinyal analog ke sinyal digital, penggabungan data, dan penerapan penyaringan awal dilakukan. Gateway berfungsi sebagai jembatan antara jaringan sensor tingkat rendah dan sumber daya komputasi tingkat tinggi. Perangkat seperti gateway, PLC, unit terminal jarak jauh (RTU), router tepi digunakan pada tahap ini. PLC (*Process Control Unit*) adalah komputer digital industri yang digunakan untuk otomatisasi proses elektromekanik (misalnya, jalur perakitan, mesin), sedangkan RTU (*Remote Terminal Unit*) adalah perangkat yang dikendalikan mikroprosesor yang berinteraksi dengan sensor dan aktuator di lapangan dan mengkomunikasikan data ke sistem kontrol pusat, yang sering digunakan dalam sistem pengawasan dan akuisisi data (SCADA). Misalnya, PLC mengumpulkan data dari beberapa sensor dan mengirimkannya ke gateway lokal.

Heterogenitas dalam protokol komunikasi perangkat merupakan tantangan utama dalam sistem IoT. Penerjemahan protokol mengacu pada proses konversi sinyal komunikasi dan format data dari satu protokol ke protokol lain untuk memastikan transmisi data yang lancar antara perangkat heterogen dalam ekosistem IoT. Dalam IoT, perangkat yang berbeda (sensor, aktuator, pengontrol) seringkali menggunakan protokol komunikasi yang berbeda tergantung pada pabrikan, tujuan, atau lingkungannya. Karena perangkat-perangkat ini perlu berkomunikasi satu sama lain dan dengan internet, penerjemahan protokol menjadi sangat penting. Jika perangkat IoT menggunakan protokol non-IP, gateway harus mengonversinya menjadi protokol berbasis IP untuk memastikan konektivitas cloud yang lancar. Hal ini juga memastikan interoperabilitas di antara berbagai perangkat dari berbagai vendor. Dengan demikian, penerjemahan protokol memungkinkan komunikasi yang terukur dan aman di seluruh lapisan.

Gateway Industrial Internet of Things (IIoT) pada lapisan tepi mengimplementasikan fungsi pengkondisian sinyal, akuisisi data, dan pra-pemrosesan sinyal. Sinyal yang dihasilkan sensor mungkin terdistorsi atau mengandung noise. Pengkondisian sinyal adalah proses di mana gateway memurnikan sinyal/data sensor mentah yang masuk ini dengan menghilangkan noise dan menormalkan level. Misalnya, di perusahaan manufaktur cerdas, sensor getaran pada mesin berputar dapat mengirimkan sinyal analog ke PLC terdekat. PLC kemudian memperkuat sinyal ini, menyaring kebisingan listrik dari motor, mendigitalkannya menggunakan ADC presisi tinggi, dan mengirimkannya melalui Ethernet ke SCADA atau platform cloud.

Edge IT

Tahap ketiga berfokus pada analitik di dekat sensor dan penyaringan data. Tujuan utamanya adalah untuk mengurangi latensi, mengoptimalkan bandwidth, dan meminimalkan volume data mentah yang dikirim ke cloud.

Fungsi utama Edge IT meliputi:

- Analitik lokal – mengidentifikasi anomali secara real-time.
- Pengurangan kebisingan – menyaring data yang tidak relevan atau berlebihan.
- Peringatan berbasis peristiwa – memicu tindakan segera tanpa menunggu pemrosesan cloud.

Perangkat pada tahap ini termasuk server Edge dan node komputasi lokal. Misalnya, node edge yang memantau motor dapat mendeteksi getaran abnormal dan memicu peringatan lokal segera, mencegah kerusakan peralatan. Dengan memproses data tersebut secara lokal, Edge IT mengurangi ketergantungan pada sistem cloud terpusat dan memastikan pengambilan keputusan yang lebih cepat.

Pusat Data/Cloud

Tahap keempat menyediakan pemrosesan skala penuh, penyimpanan jangka panjang, dan analitik canggih. Cloud bertindak sebagai tulang punggung integrasi IoT dengan menawarkan:

- Penyimpanan yang dapat diskalakan – menangani volume data sensor yang sangat besar.

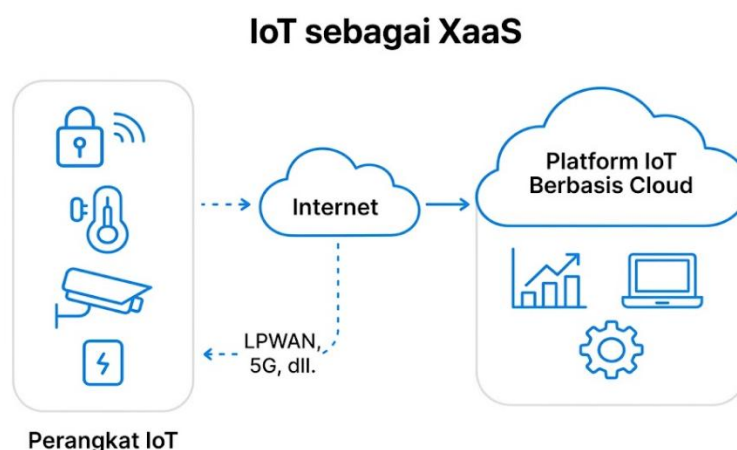
- Manajemen terpusat – mengintegrasikan input dari perangkat IoT yang terdistribusi.
- Pembelajaran mesin dan analitik AI – memungkinkan pemeliharaan prediktif, deteksi anomali, dan optimasi.
- Dasbor visualisasi – menyajikan wawasan kepada pengguna akhir secara real-time.
- API untuk integrasi – memungkinkan konektivitas tanpa hambatan dengan aplikasi bisnis.

Layanan cloud sering memanfaatkan server perusahaan, platform big data, dan hub IoT. Misalnya, solusi pemeliharaan prediktif menggunakan data IoT dari ribuan mesin di berbagai pabrik, yang dikumpulkan dan dipembahasan pada platform seperti AWS IoT Core, Microsoft Azure IoT Hub, atau Google Cloud IoT.

5.4 IOT SEBAGAI XAAS: KONSEP DAN MEKANISME

Ketika kemampuan atau layanan IoT ditawarkan kepada pelanggan sesuai permintaan, layanan ini disebut XaaS. Layanan ini ditawarkan melalui cloud, di mana pelanggan tidak dibebani untuk membeli atau memelihara infrastruktur lengkap yang dibutuhkan. Dengan kata lain, pengguna dapat berlangganan XaaS daripada membeli dan menyiapkan perangkat keras, perangkat lunak, dan platform analitik IoT mereka sendiri. Kendala teknis dan ekonomi dalam mengelola dan menangani layanan tersebut dilakukan oleh penyedia layanan, dan pengguna dapat fokus pada penggunaan layanan tersebut. Hal ini menghemat waktu dan biaya bagi pengguna yang berlangganan.

Dalam XaaS, perangkat IoT dipasang di lokasi pelanggan, yang menghasilkan data. Transmisi data dari perangkat IoT ke platform cloud terjadi melalui jaringan IoT penyedia layanan, seperti LPWAN, 5G, atau Wi-Fi. Setelah data ditransfer melalui jaringan tersebut, pemrosesan dan pembahasan data dapat dilakukan di cloud, tempat pengguna berlangganan. Hasil pembahasan dan visualisasi lainnya dapat ditampilkan kepada pengguna di dasbor mereka yang dapat diakses melalui web atau seluler. Selain itu, pengguna memiliki fleksibilitas untuk membayar layanan per penggunaan, seperti pembayaran per perangkat, per bulan, atau per volume data. Gambar 5.5 mendemonstrasikan IoT sebagai XaaS.



Gambar 5.5. IoT sebagai XaaS

Manfaat XaaS

XaaS memberikan manfaat berikut:

- Biaya awal lebih rendah karena tidak diperlukan investasi modal besar dalam pengaturan IoT.
- Penyebaran lebih cepat karena platform dan perangkat siap pakai tersedia.
- Peningkatan skalabilitas karena perangkat dapat ditambahkan atau dihapus dengan mudah.
- Peningkatan keamanan karena pembaruan otomatis untuk firmware, analitik, dan patch keamanan akan tersedia.
- Operasi yang lebih baik karena layanan dikelola oleh para ahli dari penyedia layanan.

Misalnya, petani dapat berlangganan sensor tanah IoT dan analitik cuaca daripada membelinya. Perusahaan logistik dapat membayar bulanan untuk pelacakan GPS dan pemantauan bahan bakar. Otoritas sipil dapat memiliki penerangan jalan dan pengelolaan limbah melalui IoT sebagai layanan. Pabrik dapat berlangganan jaringan sensor getaran dan suhu untuk pemeliharaan prediktif. Penyedia layanan seperti AWS IoT, Bosch IoT Suite, PTC ThingWorx, dan Siemens MindSphere menyediakan layanan XaaS.

Tantangan Keamanan

Ketika IoT dan komputasi awan diintegrasikan, keduanya menciptakan ekosistem yang kuat untuk pengumpulan, penyimpanan, dan pemrosesan data, serta memperkenalkan beberapa tantangan keamanan di berbagai lapisan. Tantangan ini dapat dikategorikan sebagai tantangan tingkat perangkat, tantangan tingkat jaringan, tantangan tingkat awan, keamanan dan privasi data, serta tantangan integrasi dan manajemen.

Tantangan Tingkat Perangkat

Tantangan di tingkat perangkat dapat berupa otentikasi yang lemah, kerentanan firmware, dan kerusakan fisik atau perlindungan perangkat yang terbatas. Coston dan rekan-rekan. melakukan studi komprehensif dan menyimpulkan bahwa perangkat IoT mengalami masalah kredensial yang lemah atau terprogram secara permanen. Peretas dapat meretas kredensial yang lemah atau kredensial default seperti admin/admin. Namun, hal ini dapat diatasi dengan menggunakan kredensial yang lebih kuat dan memperbarui kata sandi secara teratur.

Tantangan tingkat perangkat dapat disebabkan oleh buffer overflow, pembaruan firmware yang tidak aman, dan kerentanan terhadap rekayasa balik dan ekstraksi fisik. Bakhshi dan rekan-rekan. menemukan bahwa firmware perangkat IoT sering menjadi sasaran melalui kerusakan memori (misalnya buffer overflow), kesalahan konfigurasi, dan kontrol akses yang tidak memadai. Almutairi dan Sheldon melakukan survei dan menyimpulkan bahwa tantangan tingkat perangkat meliputi keterbatasan pemrosesan, memori, dan baterai, yang menghambat implementasi enkripsi standar atau mekanisme otentikasi yang kuat. Hal ini juga menunjukkan otentikasi yang lemah, pembaruan firmware yang tidak aman, dan keamanan fisik yang buruk sebagai kerentanan umum.

Tantangan Tingkat Jaringan

Komunikasi perangkat IoT dengan lingkungan cloud memainkan peran penting dalam pemrosesan data real-time yang aman dan tepat waktu. Tanpa komunikasi yang aman (TLS/SSL), penyerang dapat mencegat dan mengubah data antara IoT dan cloud. Beberapa protokol komunikasi mungkin rentan terhadap komunikasi yang aman. Perangkat IoT yang dikompromikan dapat digunakan sebagai botnet untuk menyerang infrastruktur cloud. Jika data tidak dienkripsi selama transmisi, data sensor yang sensitif dapat terekspos ke jaringan terbuka, dan serangan dapat dilakukan pada salah satu lingkungan tersebut. Menggunakan komunikasi yang dibatasi, koneksi yang disengaja, menonaktifkan port, dan pembatasan laju dapat membantu mengatasi lapisan jaringan. Selain itu, sebuah organisasi dapat menentukan bagaimana perangkat tersebut akan digunakan. Perangkat tersebut mungkin dibatasi untuk beberapa kemampuan dan dinonaktifkan untuk beberapa kemampuan yang tidak digunakan. Hal ini dapat mencegah penyalahgunaan kemampuan perangkat IoT.

Tantangan Tingkat Cloud

Meskipun cloud menyediakan skalabilitas, penggunaannya meningkatkan kemungkinan kebocoran data. Penyimpanan cloud yang salah konfigurasi dapat mengekspos data IoT. Kesalahan konfigurasi, kontrol akses yang tidak tepat, dan kompleksitas dalam mengelola layanan multi-tenant adalah penyebab umum paparan dan pelanggaran data, karena keamanan cloud terbagi antara penyedia dan pelanggan¹. Selain itu, staf cloud atau akun yang diretas dapat menyalahgunakan akses istimewa. Interaksi yang rumit antara sistem ini dan perangkat IoT tradisional membutuhkan strategi komprehensif untuk melindungi integritas data dan privasi pengguna.

Keamanan Dan Privasi Data

Saluran data IoT-ke-cloud sering membawa telemetri pribadi, lokasi, atau industri yang sensitif. Pilihan kriptografi yang lemah, penanganan kunci yang buruk, dan berbagi data lintas domain dapat mengekspos data mentah atau metadata. Pembelajaran terbaru menunjukkan bahwa perlindungan ujung-ke-ujung dapat mengurangi risiko hingga tingkat tertentu dengan penggunaan teknologi seperti blockchain, pembelajaran mesin, fog computing, dan edge computing. Opsi kriptografi pasca-kuantum cocok untuk edge/IoT sehingga telemetri yang disimpan di cloud tetap rahasia terhadap musuh di masa depan.

Tantangan Integrasi Dan Manajemen

Integrasi IoT dengan layanan cloud dapat menimbulkan tantangan operasional seperti heterogenitas perangkat dan protokol, kompleksitas manajemen kunci, dan manajemen patch dan pembaruan. Karena integrasi memerlukan penggunaan layanan dari beberapa vendor, tantangan heterogenitas perangkat dan protokol muncul karena vendor yang berbeda menggunakan standar yang berbeda, sehingga mempersulit interoperabilitas.

Kompleksitas manajemen kunci muncul karena kompleksitas kunci keamanan yang digunakan untuk enkripsi selama tahap transmisi data. Karena kunci tersebut dikonfigurasi dengan kompleksitas, mendistribusikan, memutar, dan mengelola kunci enkripsi secara aman dalam skala besar menjadi sulit. Jika kunci-kunci ini sering diubah karena alasan keamanan, memperbarui kunci-kunci ini di semua stasiun IoT dan server cloud dapat menjadi

membosankan dan menyebabkan kesalahan manusia. Karena pembaruan perangkat lunak selalu merupakan proses yang berkelanjutan, patch terkait keamanan perlu diunduh dan diinstal secara teratur. Manajemen patch dan pembaruan memastikan keamanan yang selalu terbaru. Namun, pembaruan firmware dan perangkat lunak yang konsisten di ribuan perangkat yang tersebar dapat tetap menjadi tantangan utama.

5.5 PERAN IOT DALAM INTEGRASI FISIK–DIGITAL

IoT telah muncul sebagai teknologi transformatif, yang memungkinkan interaksi tanpa batas antara lingkungan fisik dan digital. Melalui arsitektur berlapisnya yang mencakup sensor, gateway, komputasi edge, dan platform cloud, IoT memberikan visibilitas ujung-ke-ujung di berbagai domain seperti perawatan kesehatan, logistik, industri, dan kota pintar. Integrasi IoT dengan komputasi awan semakin meningkatkan skalabilitas, analitik waktu nyata, dan penyampaian layanan, khususnya di bawah model XaaS, yang mengurangi biaya operasional dan mempercepat adopsi. Namun, integrasi ini juga menghadirkan tantangan keamanan dan manajemen yang substansial. Pada tingkat perangkat, sistem IoT menghadapi ancaman dari otentikasi yang lemah, kerentanan firmware, dan kerusakan fisik. Pada tingkat jaringan, protokol yang tidak aman, intersepsi data, dan serangan penolakan layanan mengancam keandalan komunikasi. Pada tingkat cloud, masalah seperti kesalahan konfigurasi, multi-tenancy, dan penyalahgunaan oleh pihak internal meningkatkan risiko pelanggaran data.

Lebih lanjut, keamanan dan privasi data tetap menjadi perhatian kritis, karena saluran IoT-cloud sering membawa informasi pribadi dan industri yang sensitif dan rentan terhadap kebocoran, kerusakan, atau ancaman kriptografi jangka panjang. Terakhir, tantangan integrasi dan manajemen, termasuk heterogenitas perangkat, manajemen kunci yang kompleks, dan patching skala besar, menambah kesulitan dalam menjaga ketahanan. Menangani kekhawatiran ini membutuhkan pendekatan keamanan berlapis. Enkripsi ujung-ke-ujung, skema kriptografi ringan, manajemen firmware yang aman, standardisasi protokol, dan arsitektur zero-trust merupakan pengamanan penting. Solusi yang muncul seperti blockchain, pembelajaran federasi, komputasi fog/edge, dan kriptografi pasca-kuantum menjanjikan peningkatan kepercayaan, privasi, dan ketahanan jangka panjang.

Kesimpulannya, meskipun ekosistem IoT-cloud menghadirkan peluang yang belum pernah terjadi sebelumnya untuk inovasi dan efisiensi, keberhasilannya bergantung pada prinsip desain arsitektur yang kuat yang menyeimbangkan skalabilitas, interoperabilitas, dan keamanan. Dengan menanamkan pertimbangan keamanan dan privasi ke dalam setiap lapisan arsitektur, organisasi dapat membangun ekosistem IoT yang dapat dipercaya dan mampu mendukung gelombang transformasi digital berikutnya.

BAB 6

BLOCKCHAIN UNTUK TRANSPARANSI RANTAI PASOK

6.1 PERAN BLOCKCHAIN DALAM RANTAI PASOKAN

Teknologi blockchain, yang awalnya dipopulerkan melalui mata uang kripto, semakin diakui sebagai alat transformatif dalam manajemen rantai pasokan. Atribut intinya transparansi, kekebalan terhadap perubahan, dan keamanan menawarkan solusi untuk tantangan utama seperti pemalsuan, aliran informasi yang terfragmentasi, dan keterlacakan yang terbatas. Bab ini mengkaji potensi blockchain untuk meningkatkan transparansi dan efisiensi rantai pasokan, menyajikan wawasan teoritis dan temuan empiris. Survei dilakukan di antara 219 perusahaan non-keuangan menengah dan besar yang beroperasi secara internasional, dilengkapi dengan studi kasus dari sektor-sektor termasuk ritel, logistik makanan, otomotif, dan perdagangan internasional.

Pembelajaran ini mengidentifikasi indikator kinerja yang paling relevan dengan implementasi blockchain, yang mencakup hasil keuangan, kepuasan pelanggan, efisiensi operasional, dan pengembangan karyawan. Studi kasus Carrefour, Walmart, Renault, dan otoritas bea cukai Mesir menunjukkan kapasitas blockchain untuk mengurangi waktu keterlacakan, meningkatkan kepatuhan, dan menyederhanakan aliran dokumen. Namun, studi ini juga menyoroti hambatan signifikan terhadap adopsi, seperti biaya energi yang tinggi, keterbatasan skalabilitas, kerangka hukum yang tidak memadai, dan tantangan organisasi.

Hasil pembelajaran menunjukkan bahwa meskipun blockchain memberikan manfaat terukur dalam pengurangan biaya, peningkatan kualitas, dan kepercayaan pelanggan, adopsinya secara luas membutuhkan upaya untuk mengatasi kendala teknologi dan regulasi. Bab ini menyimpulkan bahwa blockchain dapat merevolusi logistik dengan memperkuat transparansi dan kredibilitas pemangku kepentingan, meskipun dampaknya di masa depan akan bergantung pada penyelarasan kemampuan teknis dengan sistem pengukuran kinerja dan mengatasi hambatan eksternal.

Dalam iklim ekonomi saat ini, teknologi blockchain telah mendapatkan popularitas yang signifikan, terutama berkat mata uang kripto seperti Bitcoin. Riset menekankan bahwa blockchain jauh lebih dari sekadar fondasi untuk mata uang digital. Selain itu, sifat uniknya berpotensi merevolusi berbagai bidang bisnis, termasuk manajemen rantai pasokan. Secara konseptual, di masa lalu, itu adalah neo-Taylorisme. Saat ini, itu adalah manajemen ramping dan produksi ramping, dan di masa depan, itu adalah Pabrik Pintar, organisasi virtual, dan rantai pasokan digital. Di bidang solusi, mekanisasi dan otomatisasi (periode masa lalu) mendominasi.

Saat ini, solusi didasarkan pada otomatisasi dan komputerisasi; Masa depan di bidang ini adalah virtualisasi dan integrasi sistem, robotika, kecerdasan buatan (AI) dan sistem siber-fisik. Blockchain adalah basis data terdesentralisasi di mana informasi disimpan dalam blok yang terhubung secara kronologis dan aman secara kriptografis. Setiap blok berisi data transaksi, pengidentifikasi blok unik (hash) dan hash dari blok sebelumnya, memastikan

kontinuitas dan kekebalan buku besar. Blok ditambahkan ke rantai melalui proses yang disebut "penambangan", yang membutuhkan pemecahan teka-teki matematika yang kompleks, mengamankan blockchain dari manipulasi.

Terdapat berbagai jenis blockchain, yang dapat dibagi menjadi dua kategori utama: publik dan privat. Blockchain publik, seperti Bitcoin dan Ethereum, adalah jaringan terbuka dan terdesentralisasi yang dapat diikuti oleh siapa pun. Blockchain privat, seperti Hyperledger Fabric dan Corda, adalah jaringan tertutup yang dikelola oleh satu organisasi, hanya dapat diakses oleh pengguna yang berwenang.

Potensi inovatif yang dihasilkan dari fitur unik teknologi blockchain diakui oleh banyak bisnis. Fitur utama blockchain adalah:

- ketersediaan data;
- keamanan;
- transparansi.
- Ketersediaan data berarti bahwa:
- banyak mitra bisnis dapat mengerjakan dokumen yang sama secara real-time tanpa kehilangan data;
- setiap pengguna dapat melacak semua informasi dan perubahan sebelumnya;
- semua data disimpan secara digital, menghilangkan kebutuhan akan dokumentasi kertas;
- tidak ada lembaga pusat yang bertanggung jawab atas verifikasi dan berbagi data. Keamanan berasal dari fakta bahwa:
- blockchain adalah teknologi terdesentralisasi dan datanya dibagikan melalui cloud, artinya catatan dipublikasikan secara online; akses ke informasi terenkripsi tidak otomatis, karena mitra bisnis harus memverifikasi dan menyetujui untuk mengakses data tertentu;
- Informasi dalam blok tidak dapat dimanipulasi atau dipalsukan karena setiap catatan baru mewakili informasi dalam blok baru;
- Sifat blockchain yang terdistribusi dan terenkripsi membuatnya sulit untuk diretas, yang menawarkan potensi keamanan yang lebih besar untuk Internet of Things;
- Rantai tertentu hanya dapat dilihat oleh mereka yang berwenang untuk membukanya dan melihat data yang terkandung di dalamnya.

Memastikan keamanan telah menjadi salah satu tantangan terbesar yang dihadapi rantai pasokan global dalam beberapa tahun terakhir. Implementasi teknologi blockchain telah menjadi salah satu tantangan terbesar yang dihadapi rantai pasokan global dalam beberapa tahun terakhir. Lebih lanjut, teknologi blockchain dapat membantu meningkatkan keamanan aliran data rantai pasokan, serta data IoT yang dihasilkan di seluruh rantai pasokan.

Blockchain menghilangkan kemungkinan pemalsuan data karena setiap transaksi aman secara kriptografis dan tidak dapat diubah. Ini berarti bahwa setelah dicatat, informasi tidak dapat diubah atau dihapus tanpa persetujuan semua peserta jaringan. Hal ini membuat penipuan seperti pemalsuan dokumen atau penggantian produk hampir tidak mungkin.

Terdapat berbagai jenis blockchain. Blockchain dapat dibagi menjadi dua kategori utama: publik dan privat. Blockchain publik, seperti Bitcoin dan Ethereum, adalah jaringan terbuka dan terdesentralisasi di mana siapa pun dapat berpartisipasi. Blockchain privat, seperti Hyperledger Fabric dan Corda, adalah jaringan tertutup yang dikelola oleh satu organisasi, hanya dapat diakses oleh pengguna yang berwenang.

6.2 TEKNIK PENGUMPULAN DATA CATI

Populasi pembelajaran meliputi perusahaan yang beroperasi di pasar global. Pembelajaran kuantitatif dilakukan menggunakan teknik CATI (*Computer-Assisted Telephone Interviewing*). Populasi pembelajaran meliputi perusahaan menengah dan besar di sektor perusahaan non-keuangan. Responden adalah manajer perusahaan yang menerapkan teknologi blockchain. Jumlah survei yang dikirim adalah 234, dengan tingkat pengembalian 219. Kelompok perusahaan yang disurvei meliputi perusahaan dari berbagai industri yang telah menggunakan solusi blockchain setidaknya selama satu tahun. Perusahaan dengan sejarah implementasi teknologi blockchain yang singkat mendominasi kelompok perusahaan yang disurvei, dengan jumlah responden mencapai 60%. Perusahaan dengan masa penggunaan blockchain selama tiga tahun mencapai 30%, sedangkan sisanya, yaitu 10%, adalah perusahaan dengan masa penggunaan blockchain selama dua tahun.

6.3 DAMPAK DAN METRIK KEBERHASILAN BLOCKCHAIN PERUSAHAAN

Studi Kasus Implementasi Teknologi Blockchain: Implementasi Praktis

Dengan mengamati perilaku perusahaan saat ini dan cara penggunaan teknologi modern dalam implementasi praktisnya, dimungkinkan untuk menyajikan contoh bagaimana mengimplementasikan proses blockchain secara efektif di perusahaan.

- XCEED (*eXtended Compliance End-to-End Distributed*). Solusi berbasis blockchain baru ini bertujuan untuk memantau kepatuhan ribuan komponen yang terpasang di mobil dalam waktu hampir nyata. Solusi teknologi blockchain baru ini dikembangkan dan diproduksi oleh Farecia, Groupe Renault, Knauf Industries, simoldes, dan Coskunz bekerja sama dengan IBM untuk industri otomotif Eropa. Ini memungkinkan sertifikasi kepatuhan semua komponen kendaraan, dari desain hingga produksi. Proyek ini telah diimplementasikan di pabrik mitra di Bursa (Turki), Douai (Prancis), dan Palencia (Swiss). Proyek XCEED sekarang terbuka untuk produsen lain dan ratusan pemasok rantai pasokan global, terlepas dari ukurannya. Ini adalah alat yang memenuhi persyaratan transparansi yang semakin meningkat.
- Berbeda dengan manajemen hierarkis tradisional, tata kelola jaringan mengasumsikan kerja sama antara pemangku kepentingan independen dan mengembangkan aturan, proses, dan struktur manajemen umum yang membantu seluruh organisasi beroperasi secara efektif dan efisien.

Berdasarkan data pada Tabel 6.1, tujuan perusahaan dalam menggunakan teknologi blockchain berpusat pada sistem pertukaran data, khususnya pembaruan dan keaslian data, serta aliran dokumen yang tidak terputus, di mana pemangku kepentingan – mitra dagang,

lembaga pemerintah, dan perusahaan logistik yang terlibat dalam proses produksi, transportasi, penjualan, dan keuangan – dapat menggunakan sumber data yang sama. Lebih lanjut, mereka mengharapkan informasi dan dokumen yang diautentikasi secara digital. Mereka melihat potensi dalam digitalisasi semua tahapan transportasi, transparansi penuh proses produksi, dan kontrol kualitas yang lebih baik.

Akses real-time ke informasi produk meningkatkan kontrol, memungkinkan respons tepat waktu terhadap semua kejadian, dan mengoptimalkan aliran transaksi dan proses. Oleh karena itu, teknologi ini menggabungkan kontrol rantai pasokan dengan dokumentasi yang transparan.

Tabel 6.1. Implementasi solusi blockchain di perusahaan – isu-isu terpilih

Perusahaan	Tujuan penerapan teknologi blockchain	Tindakan/dampak	Hambatan
Carrefour (Polandia + Eropa)	Konsumen ingin mengetahui dari mana makanan mereka berasal (peternakan, pakan, transportasi, pendinginan), tetapi sistem tradisional sulit disinkronkan dan rentan terhadap kesalahan.	Carrefour menerapkan blockchain (IBM Food Trust) untuk melacak batch produk. Setiap tahap rantai menambahkan catatan dengan nomor batch, pertanian, tanggal panen, kondisi pertumbuhan, transportasi (ID kendaraan, sensor suhu) dan sertifikat. Pelanggan memindai kode QR untuk melihat riwayat produk. Paspur kentang diluncurkan di Polandia pada tahun 2021; entitas yang berpartisipasi termasuk petani, pabrik pengolahan, dan toko; rantai tersebut menerima, antara lain, sertifikat kualitas, data transportasi, dan hasil uji.	Integrasi pemasok, biaya implementasi, dan penyatuan format (GS1/EPCIS).
Walmart + IBM Food Trust	Dalam insiden keamanan pangan, mengidentifikasi sumber kontaminasi membutuhkan waktu sehari-hari. Dokumen-dokumen tersebar.	Hyperledger Fabric diimplementasikan. Setiap peserta (pertanian, rumah pengemasan, pengirim, DC, toko) menambahkan blok dengan informasi batch. Kontrak pintar memvalidasi kelengkapan langkah-langkah; waktu pelacakan	Standardisasi label, integrasi sistem ERP/WMS, dan kualitas data (masukan data buruk/keluaran data buruk).

		untuk mangga dikurangi dari 7 hari menjadi 2,2 detik.	
Mesir (pemerintah) + CargoX/NAF EZA	Surat muatan kertas** menyebabkan keterlambatan, risiko pemalsuan, dan biaya kurir. Surat muatan (Bill of Landing) adalah surat jalan laut yang mengkonfirmasi penerimaan kargo oleh pengangkut, yang merupakan bukti kontrak pengangkutan. Dokumen ini membuktikan kepemilikan barang. Ini adalah dokumen kunci dalam perdagangan internasional karena pemegangnya di pelabuhan tujuan dapat menerima pengiriman. Dokumen ini juga dapat diperdagangkan, memungkinkan penjualan barang selama pengangkutan.	Mesir telah memperkenalkan sistem NAFEZA, yang terintegrasi dengan CargoX (Transfer Dokumen Blockchain). Eksportir membuat amplop ACI yang berisi dokumen (eBL, faktur, sertifikat). Metadata dan hash dicatat dalam blockchain. Otoritas bea cukai memiliki akses waktu nyata ke lebih dari 10 juta dokumen, dengan lebih dari 150.000 perusahaan yang menggunakan sistem ini. Proses bea cukai menjadi lebih cepat dan hemat biaya.	Pendaftaran UKM, kepatuhan hukum eBL terhadap konvensi, dan integrasi API.
Renault – XCEED* (kepatuhan otomotif)	Melacak kepatuhan suku cadang otomotif membutuhkan penanganan ribuan dokumen dan ratusan pemasok. Proses audit dan potensi penarikan kembali produk berjalan lambat.	Renault dan para mitranya telah meluncurkan XCEED (Hyperledger Fabric). Pemasok dan perakitan menyimpan catatan bukti kepatuhan suku cadang sambil mempertahankan kemampuan otorisasi. XCEED memastikan responsivitas dan efisiensi yang lebih besar di era persyaratan peraturan yang semakin ketat. Peraturan pengawasan pasar baru mulai berlaku pada September 2020. Inspeksi	Privasi data antar vendor yang bersaing, integrasi dengan ERP/PLM dan Tata Kelola Jaringan**, yang mendefinisikan bagaimana hubungan antara berbagai organisasi/perusahaan yang beroperasi dalam jaringan yang lebih luas dikelola dan dikoordinasikan untuk mencapai tujuan tertentu, mengelola saling ketergantungan,

		yang lebih ketat telah diperkenalkan untuk kendaraan yang sudah ada di pasaran. Seluruh rantai produksi harus menyesuaikan organisasinya untuk mematuhi peraturan yang telah ditetapkan dalam jangka waktu yang lebih singkat.	sumber daya, dan informasi secara terdesentralisasi. Tidak seperti tata kelola hierarkis tradisional, tata kelola jaringan melibatkan kolaborasi antara aktor independen, mengembangkan aturan, proses, dan struktur tata kelola umum yang mendukung pengoperasian seluruh jaringan secara efektif dan efisien.
--	--	--	---

Akses real-time ke informasi produk meningkatkan kontrol, memungkinkan respons tepat waktu terhadap semua kejadian, dan mengoptimalkan alur transaksi dan proses. Oleh karena itu, teknologi ini menggabungkan kontrol rantai pasokan dengan dokumentasi yang transparan.

Namun, teknologi ini tidak tanpa kekurangan, keterbatasan, dan ancaman. Hal-hal tersebut meliputi:

- kurangnya regulasi hukum yang memadai, yang membatasi penggunaan praktisnya;
- ketergantungan pada infrastruktur internet, khususnya pada kebijakan penyedia layanan internet;
- ketergantungan pada infrastruktur internet, khususnya pada kebijakan penyedia layanan internet;
- skalabilitas, atau kemampuan untuk mempertahankan kinerja yang dapat diterima dalam menghadapi peningkatan beban, berarti bahwa seiring bertambahnya jumlah pengunjung situs web atau jumlah data yang diproses, kinerja akan menurun;
- biaya energi yang sangat tinggi untuk setiap transaksi (konsumsi listrik per transaksi setara dengan kebutuhan energi harian rumah tangga Amerika pada umumnya).

Riset tentang subjek ini berupaya untuk mengorganisir hambatan-hambatan terhadap penggunaan teknologi blockchain dalam rantai pasokan. Terdapat empat kelompok hambatan dasar di bidang ini:

- organisasi;
- teknologi;
- terkait rantai pasokan;
- eksternal.

Hambatan organisasi meliputi kurangnya pengetahuan khusus tentang teknologi, kurangnya alat untuk mengimplementasikan teknologi, dan kurangnya data komparatif untuk mengimplementasikan teknologi. Hambatan teknologi berasal dari kematangan teknologi yang belum sempurna, infrastruktur TI yang terbatas, dan masalah keamanan.

Hambatan rantai pasokan meliputi:

- kurangnya kesadaran pelanggan tentang teknologi blockchain;
- kurangnya kolaborasi antar mitra rantai pasokan;
- kurangnya koordinasi antar mitra rantai pasokan.

Hambatan eksternal meliputi:

- ketidakpastian pasar terkait penggunaan teknologi blockchain;
- kurangnya komitmen industri untuk mengimplementasikan teknologi blockchain;
- kurangnya keterlibatan masyarakat dalam mengadopsi teknologi blockchain (IBM).

Masalah utama yang dihadapi teknologi ini adalah kompleksitasnya dan terbatasnya jumlah spesialis TI dengan keterampilan untuk menciptakan solusi bisnis menggunakan teknologi ini. Menurut *International Data Corporation* (IDC), logistik dan transportasi termasuk di antara industri yang akan paling diuntungkan dari solusi blockchain dalam waktu dekat. Pengeluaran global untuk aplikasi blockchain pada tahun 2023 mencapai Rp31 Triliun, lebih dari dua kali lipat angka tahun 2021.

Pembahasan Indikator

Implementasi teknologi blockchain dalam rantai pasokan membutuhkan pengukuran kinerja di bidang ini. Manajemen kinerja adalah fondasi untuk mengendalikan operasi perusahaan. Riset menyajikan kinerja dalam empat dimensi kinerja. Tahap pertama melibatkan pendefinisian kinerja yang diharapkan. Pada tahap ini, manajer menjelaskan hasil yang diharapkan dari tindakan yang harus dilakukan oleh karyawan. Ini membutuhkan komunikasi antara manajer dan karyawan. Tahap kedua melibatkan klarifikasi harapan bagi karyawan. Manajer mendefinisikan apa yang dianggap sebagai kinerja yang baik dan memberikan panduan tentang cara menyelesaikan masalah yang ada. Jika tindakan karyawan memenuhi persyaratan, tingkat kinerja mereka diharapkan dan karenanya standar. Jika mereka membiarkan masalah muncul, tingkat kinerja mereka rendah dan membutuhkan intervensi manajerial. Jika tingkat kinerja di bawah standar tetapi belum bermasalah, manajer harus memberi tahu karyawan keterampilan baru apa yang perlu mereka peroleh untuk meningkatkan kinerja mereka hingga standar. Hal ini memberikan ruang untuk peningkatan kinerja. Tahap terakhir adalah ketika kinerja melebihi standar. Situasi ini memungkinkan identifikasi pola perilaku utama. Manajer kemudian dapat mendorong pencapaian yang lebih besar melalui sistem insentif. Pembahasan yang disajikan menunjukkan bahwa kinerja dapat dikuantifikasi. Kinerja merupakan hasil dari tindakan yang dilakukan oleh karyawan, tetapi dari perspektif manajer, kinerja sangat bergantung pada komunikasi.

Tujuan pembelajaran ini adalah untuk mengidentifikasi faktor-faktor keberhasilan perusahaan di bidang ini. Untuk menentukan faktor-faktor ini, kami menggunakan hasil survei tentang bagaimana perusahaan non-keuangan yang beroperasi di pasar internasional mengukur kinerja. Kelompok studi mencakup perusahaan yang menggunakan teknologi

blockchain. Responden terutama adalah pemilik, manajer, dan anggota dewan direksi. Pertama, indikator keuangan dan non-keuangan yang digunakan untuk mengukur tujuan perusahaan diverifikasi. Pada tahap selanjutnya, jenis indikator yang digunakan di masing-masing kelompok ini ditentukan. Selanjutnya, peserta diminta untuk memberikan bobot dan kepentingan pada setiap indikator.

Hasil yang diperoleh memungkinkan kami untuk menghasilkan indikator inti dan utama, yang menurut responden, menerima respons terbanyak dan yang paling penting dalam menilai dampak teknologi blockchain yang diterapkan. Opini responden memungkinkan kami untuk mengidentifikasi empat kelompok indikator yang memverifikasi tujuan perusahaan yang disurvei. Ini termasuk indikator keuangan, indikator pelanggan, indikator operasional termasuk inovasi dan layanan, serta indikator karyawan (pembelajaran dan pengembangan). Respons yang dihasilkan dan diukur disajikan dalam Tabel 6.2.

Tabel 6.2. Indikator kinerja perusahaan yang menggunakan teknologi blockchain – pentingnya indikator tersebut

Variabel	% indikator	Indikator upah dalam skala 1–5
I. Keuangan	100	
Laba bersih	81,3	4,55
Pendapatan penjualan	82,5C	4,87
Profitabilitas penjualan	92,3	4,99
II. Pelanggan	77,2	
Kepuasan pelanggan	84,1	4,77
Akuisisi pelanggan	83,1	4,59
Loyalitas pelanggan	70,1	4,44
Pangsa pasar	58,4	4,38
Profitabilitas pelanggan	53,7	4,38
III. Aktivitas operasional termasuk inovasi dan layanan	78,9	
Biaya produk dan proses	77,4	4,78
Keluhan yang diajukan dan diterima	77,1	4,50
Jumlah produk baru	66,1	4,74
Perputaran persediaan	77,3	4,78
Efisiensi mesin dan peralatan	56,8	4,69
Waktu pelaksanaan proyek	40,3	4,37
Pengeluaran R&D	61,7	4,79
IV. Karyawan, pembelajaran dan pengembangan	77,2	
Kualifikasi karyawan	93,1	4,57
Indikator pelatihan	81,2	4,38
Produktivitas karyawan	80,5	4,75
Gaji rata-rata	80,4	4,47
Kepuasan karyawan	90,8	4,66

Hasil survei menyajikan opini responden tentang indikator yang digunakan untuk menilai kinerja perusahaan yang menggunakan teknologi blockchain. Indikator keuangan menerima

100% tanggapan. Dalam kelompok evaluasi kinerja ini, prioritas diberikan pada pengembalian atas penjualan, yang bergantung pada laba bersih dan pendapatan penjualan. Indikator keuangan lain yang tidak termasuk dalam Tabel 6.2 meliputi laba kotor, pertumbuhan pendapatan, perputaran piutang, perputaran aset, dan Tingkat Pengembalian Internal (IRR).

Dalam dimensi pelanggan, kepuasan dan akuisisi pelanggan paling sering disebutkan. Pangsa pasar dan profitabilitas pelanggan menerima peringkat yang sama. Frekuensi penggunaan indikator sesuai dengan bobot yang ditetapkan. Profitabilitas pelanggan menerima tanggapan paling sedikit. Frekuensi penggunaan indikator umumnya sesuai dengan bobot yang ditetapkan.

Dalam dimensi proses internal, indikator yang paling sering disebutkan adalah biaya produk, perputaran persediaan, dan keluhan yang diajukan dan disetujui. Ketika mempertimbangkan bobot yang ditetapkan untuk masing-masing indikator sebagai dasar penilaian, biaya produk dan proses, perputaran persediaan, dan jumlah produk baru adalah penting. Tabel 6.2 menunjukkan bahwa bobot terbesar diberikan kepada karyawan, pembelajaran dan pengembangan, kualifikasi karyawan, kepuasan karyawan, indikator pelatihan, produktivitas tenaga kerja, dan upah rata-rata. Tingkat indikator kualifikasi pelatihan yang tinggi sesuai dengan era ekonomi pengetahuan. Dalam hal bobot indikator, produktivitas tenaga kerja adalah yang paling signifikan, diikuti oleh kepuasan karyawan.

Menggeneralisasi hasil pembelajaran, dapat disimpulkan bahwa perusahaan yang menerapkan solusi blockchain mengukur kinerja tradisional mereka menggunakan laba bersih dan pendapatan penjualan, yang merupakan dasar untuk menghitung profitabilitas penjualan. Hasil keuangan yang positif terutama berasal dari kepuasan pelanggan dan akuisisi pelanggan baru. Kepuasan pelanggan dan pertumbuhan pelanggan dipengaruhi oleh proses peningkatan bisnis, terutama melalui keunggulan biaya dalam proses dan produk, peningkatan kualitas, dan inovasi. Pembelajaran menunjukkan bahwa pengeluaran pembelajaran dan pengembangan sangat penting bagi perusahaan besar, sedangkan jumlah produk baru lebih penting bagi perusahaan menengah. Kemampuan untuk berubah dan meningkatkan efisiensi terutama terletak pada kualifikasi, peningkatan berkelanjutan, dan kepuasan karyawan.

Kesimpulannya, perlu dicatat bahwa perusahaan yang disurvei yang menerapkan teknologi blockchain beroperasi dalam kondisi baru dan menyesuaikan operasi mereka sesuai dengan kondisi tersebut. Mereka mengukur tujuan mereka menggunakan indikator keuangan tradisional, seperti laba bersih, pendapatan penjualan, dan profitabilitas penjualan. Mereka memberikan penekanan terbesar pada pengalaman pelanggan. Mereka berupaya menjangkau kelompok pelanggan baru dengan penawaran mereka. Mereka bersaing di pasar dengan mengadopsi strategi keunggulan biaya.

Perlu ditekankan bahwa mereka memprioritaskan kualitas dan menyadari perlunya implementasi produk baru. Mereka memberikan penekanan signifikan pada pengeluaran pembelajaran dan pengembangan, yang terkait dengan kebijakan pengurangan biaya proses internal. Kualifikasi, produktivitas, dan kepuasan karyawan sangat dihargai. Terlepas dari posisi mereka, mereka mengharapkan kreativitas. Saran untuk pengurangan biaya, peningkatan

kualitas, dan arahan untuk meningkatkan efisiensi kerja sangat dihargai. Manajer menyadari hubungan antara keterlibatan dan kepuasan karyawan.

Pendekatan untuk mengukur kinerja dalam implementasi solusi blockchain mencakup seluruh operasi perusahaan, semua area, dan mempertahankan pengukuran kinerja sesuai dengan indikator yang dipembahasan di atas. Pembelajaran yang dilakukan dan sistem indikator evaluasi kinerja menggambarkan tujuan pemilik dan jalur untuk mencapainya. Mereka juga menunjukkan bagaimana menyelaraskan tujuan perusahaan dengan tujuan para pemangku kepentingannya.

Teknologi blockchain dapat mahal, tidak efisien, dan secara teknologi menantang bagi bisnis untuk diimplementasikan. Selain itu, meskipun blockchain menawarkan transparansi dengan memungkinkan peninjauan publik atas transaksi, kurangnya badan pengawas pusat dapat menjadi pedang bermata dua. Kurangnya identifikasi pengguna dapat menarik aktivitas kriminal ke transaksi blockchain. Ini adalah salah satu alasan mengapa beberapa penjahat siber menggunakan mata uang kripto untuk transaksi ilegal. Selain itu, penggunaan blockchain untuk cadangan yang aman memiliki jebakan tersendiri. Misalnya, jika seseorang menemukan cara untuk menyediakan lebih dari setengah daya komputasi aktif jaringan, mereka dapat membuat fork palsu dan merebut kendali, karena teknologi blockchain dirancang untuk memungkinkan kendali mayoritas. Namun, skenario ini tidak mungkin terjadi pada blockchain yang sudah matang.

6.4 TANTANGAN SKALABILITAS BLOCKCHAIN

Implementasi teknologi blockchain menghadirkan beberapa tantangan. Tantangan utama adalah skalabilitas, regulasi dan standar, serta biaya implementasi. Teknologi blockchain saat ini memiliki skalabilitas yang terbatas, yang dapat menjadi masalah bagi rantai pasokan besar dengan volume transaksi yang masif. Implementasi standar dan regulasi blockchain global dapat menjadi sulit karena perbedaan hukum dan regulasi antar negara. Studi empiris menunjukkan bahwa blockchain dapat memberikan penghematan yang signifikan dalam jangka panjang; biaya implementasi awal dapat tinggi, yang dapat menjadi penghalang bagi perusahaan kecil.

Terlepas dari tantangan-tantangan ini, masa depan blockchain dalam manajemen rantai pasokan tampak menjanjikan. Teknologi ini berpotensi merevolusi banyak sektor, membawa manfaat berupa peningkatan transparansi, keamanan, dan efisiensi, sambil mempertahankan pengukuran kinerja untuk keberhasilan pasar. Dalam konteks pembelajaran masa depan, akan menarik untuk memeriksa, mengukur, dan mempublikasikan tingkat indikator setelah pengenalan blockchain, karena teknologi ini akan memengaruhi pemilihan mitra dagang di masa mendatang. Meningkatnya pemahaman tentang potensi inovatif blockchain berarti bahwa aplikasi praktis dari alat ini akan meningkat. Namun, hal ini membutuhkan perubahan signifikan dalam fungsi entitas individual yang beroperasi dalam jaringan, mengingat keterbatasan implementasi teknologi blockchain. Nilai tambah penggunaan alat ini dalam manajemen rantai pasokan terutama terletak pada peningkatan transparansi operasional secara signifikan. Pencatatan transaksi dalam basis data terdistribusi

dan tahan perubahan memperkuat kredibilitas informasi yang mengalir antar tautan individual dalam rantai dan di seluruh rantai. Blockchain juga memiliki potensi signifikan untuk menyimpan dan mencatat data rantai pasokan. Teknologi ini dapat mencatat setiap tahap siklus hidup produk, mulai dari produksi pabrik, pengiriman dan pengantaran ke toko, hingga saat pembelian oleh konsumen.

Pembelajaran lebih lanjut harus fokus pada pemosisian perusahaan berdasarkan indikator yang digunakan untuk menilai bagaimana mereka mengatasi tantangan teknologi masa depan dan peluang yang muncul dalam upaya memaksimalkan kesuksesan. Hasil pembelajaran dapat berfungsi sebagai sumber informasi yang inspiratif untuk mendukung keputusan mengenai dampak teknologi terapan dan blockchain. Implementasi teknologi ini merupakan respons terhadap kebutuhan pasar yang terus meningkat, tuntutan pelanggan yang lebih besar, dan peningkatan daya saing di industri logistik. Penerapannya dalam bidang logistik meningkatkan harapan terkait peningkatan daya saing dan efisiensi, pengurangan biaya, keamanan transaksi dan produk, peningkatan kualitas data, peningkatan kepuasan pelanggan, dan peningkatan kepercayaan merek. Namun, pemanfaatan kemampuan dan potensi blockchain secara komprehensif akan bergantung pada kemampuan untuk menghilangkan hambatan yang ada, seperti perhitungan ekonomi berdasarkan indikator kuantitatif dan kualitatif yang tepat, keterbatasan teknologi, dan peraturan hukum.

BAB 7

SISTEM OTONOM DALAM OPERASI RANTAI PASOKAN

7.1 DEFINISI DAN KONSEP SISTEM OTONOM DALAM LOGISTIK

Tujuan bab ini adalah untuk pembelajaran sistem otonom dalam operasi rantai pasokan dengan fokus pada aplikasi, tantangan, dan prospek masa depannya. Pemantauan riset sistematis (SLR) dilakukan yang mencakup periode 2015–2025, menggunakan basis data seperti Scopus, Web of Science, ScienceDirect, dan Google Scholar. Pembahasan menunjukkan bahwa penerapan sistem otonom mencakup transportasi, pergudangan, dan distribusi, sementara integrasinya dengan teknologi digital – seperti kecerdasan buatan (AI), Internet of Things, dan blockchain – merupakan fondasi logistik masa depan.

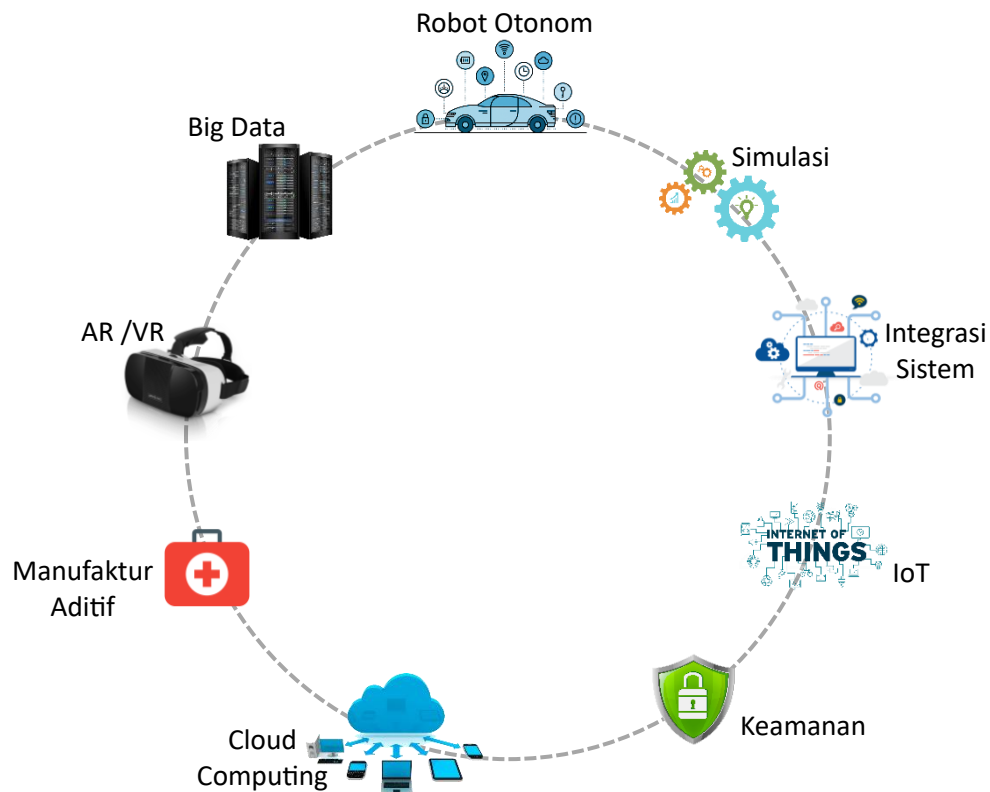
Temuan menunjukkan bahwa sistem ini memungkinkan pengurangan biaya operasional sebesar 20–40%, peningkatan efisiensi ruang gudang sebesar 30–50%, dan peningkatan keselamatan proses. Pada saat yang sama, hambatan implementasi yang signifikan diidentifikasi, termasuk biaya investasi yang tinggi, kurangnya kerangka hukum yang harmonis, dan tantangan sosial terkait penerimaan teknologi. Bab ini juga menyoroti perbedaan regional dalam implementasi: Amerika Utara berfokus pada skalabilitas, Eropa pada pembangunan berkelanjutan, dan Asia pada penerapan skala besar. Kesimpulan menekankan perlunya mengintegrasikan keberlanjutan dan manajemen risiko dengan teknologi otonom, serta pentingnya implementasi bertahap.

Perusahaan saat ini beroperasi dalam paradigma Industri 4.0, menghadapi tekanan yang meningkat untuk mengurangi biaya, mempersingkat waktu pengiriman, dan meningkatkan fleksibilitas proses, yang semuanya mempercepat adopsi inovasi teknologi. Dalam logistik, otonomi dipahami sebagai kemampuan sistem transportasi, pergudangan, dan distribusi untuk membuat keputusan operasional berdasarkan data sensor, algoritma pembelajaran mesin, dan aturan yang telah ditentukan sebelumnya.

Organisasi Internasional untuk Standardisasi (ISO) dan *Society of Automotive Engineers* (SAE) telah mengembangkan model tingkat otonomi. Yang paling banyak dikutip adalah skala SAE enam tingkat (tingkat 0–5), yang telah menjadi titik referensi utama dalam pembelajaran dan implementasi. Meskipun awalnya dibuat untuk transportasi jalan raya, skala ini semakin banyak diadaptasi untuk logistik dan distribusi gudang.

Dalam pembelajaran logistik, konsep rantai pasokan otonom (ASC) telah mendapatkan perhatian. Konsep ini mengacu pada sistem yang mampu mengatur diri sendiri dan mengambil keputusan secara independen dalam perencanaan, transportasi, pengadaan, dan distribusi. Beberapa penulis juga menyoroti perlunya membedakan antara otomatisasi dan otonomi. Sementara otomatisasi mengacu pada tugas-tugas berulang yang dilakukan oleh mesin berdasarkan instruksi yang diprogram, otonomi mengasumsikan kemampuan untuk memahami lingkungan, menafsirkan data, dan mengambil keputusan dalam kondisi ketidakpastian. Cobot memberikan dukungan operasional kepada pekerja manusia di gudang dan pusat distribusi, meningkatkan ergonomi dan keselamatan.

Mereka mengambil alih tugas-tugas berat dan berulang sambil menawarkan fleksibilitas yang lebih besar daripada robot industri tradisional, karena mereka dapat dengan mudah diprogram ulang dan diposisikan ulang. Dengan cara ini, mereka berfungsi sebagai tahap perantara antara kerja manual dan otomatisasi penuh, menggabungkan ketelitian mesin dengan intuisi dan kemampuan adaptasi manusia.



Gambar 7.1. Representasi skematis peran sistem otonom dalam konsep Industri 4.0

Salah satu solusi paling inovatif yang baru-baru ini diterapkan dalam praktik logistik adalah penggunaan sistem otonom. Ini termasuk kendaraan otonom (AV), robot bergerak otonom (AMR), drone, dan sistem gudang canggih. Pengembangan mereka didorong oleh kemajuan di bidang-bidang seperti pembelajaran mesin, pengenalan gambar, pemrosesan sinyal, dan teknologi komunikasi nirkabel generasi berikutnya (5G, komputasi tepi).

Sistem logistik otonom merupakan bagian dari tren Industri 4.0 yang lebih luas, di mana otomatisasi, digitalisasi, dan interkonektivitas antara mesin cerdas, sensor, dan platform analitik memainkan peran sentral. Penerapan solusi otonom menjadi sangat penting dalam menghadapi gangguan rantai pasokan global, seperti yang terungkap selama pandemi Covid-19. Meskipun demikian, kemajuan pesat teknologi otonom menimbulkan sejumlah pertanyaan dan tantangan terkait implementasinya. Isu-isu utama meliputi integrasi dengan infrastruktur logistik yang ada, standardisasi proses, keamanan siber, dan penerimaan sosial. Selain itu, adopsi solusi otonom membutuhkan persiapan organisasi dan investasi yang memadai untuk memanfaatkan potensinya.

Tabel 7.1. Perbandingan fitur utama AMR dan AGV

Fitur	AMR (Robot Bergerak Otonom)	AGV (Automated Guided Vehicle)
Navigasi	Navigasi bebas (pemetaan waktu nyata)	Rute tetap, dipandu oleh penanda
Fleksibilitas	Sangat tinggi	Terbatas
Biaya pemasangan	Lebih rendah (tidak memerlukan infrastruktur rute khusus)	Lebih tinggi (membutuhkan rel/panduan)
Aplikasi	Gudang, pusat distribusi	Produksi massal, jalur perakitan

Seperti yang disoroti oleh banyak cendekiawan, sistem ini merupakan bagian dari tren yang lebih luas menuju pembangunan rantai pasokan yang tangguh, di mana fleksibilitas dan kemampuan beradaptasi terhadap gangguan memainkan peran sentral.

Sistem otonom dalam logistik dapat didefinisikan sebagai unit teknis otomatis yang mampu secara mandiri mengambil keputusan operasional berdasarkan data sensor dan algoritma pembelajaran mesin. Fitur utamanya adalah kemampuan untuk bereaksi secara otonom terhadap perubahan kondisi lingkungan tanpa intervensi manusia yang konstan.

7.2 TUJUAN DAN RUANG LINGKUP BAB INI

Tujuan bab ini adalah untuk menyajikan keadaan pengetahuan saat ini dan aplikasi praktis sistem otonom dalam rantai pasokan, berdasarkan riset ilmiah yang diterbitkan selama dekade terakhir. Pembahasan ini berfokus pada tiga area implementasi utama: transportasi, pergudangan dan distribusi, serta integrasi sistem-sistem ini dengan teknologi digital lainnya seperti kecerdasan buatan (AI), *Internet of Things* (IoT) dan kembar digital. Bab ini mengikuti struktur klasik: setelah bagian 7.1 “Pendahuluan”, bab ini menyajikan bagian 7.2 “Tujuan dan ruang lingkup artikel”, bagian 7.3 “Prosedur pembelajaran”, bagian 7.4 “Pembahasan dan diskusi hasil” dan bagian 7.5 “Kesimpulan”. Ringkasan akhir menyoroti rekomendasi utama bagi praktisi dan peneliti.

7.3 PEMANTAUAN RISET SISTEMATIS (SLR)

Bab ini menggunakan metodologi Pemantauan *Riset Sistematis* (SLR). Pencarian riset dilakukan di basis data berikut: *Scopus*, *Web of Science*, *Science Direct* dan *Google Scholar*, yang mencakup periode 2015–2025.

Tabel 7.2. Contoh basis data dan jumlah publikasi yang disertakan dalam pembahasan.

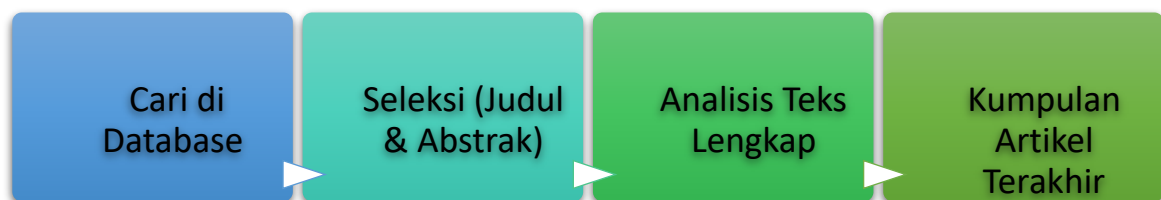
Database	Hasil Awal	Setelah Seleksi
Scopus	312	22
Web of Science	280	18
Science Direct	154	10

Google Scholar	950	7
----------------	-----	---

Tabel 7.3. Jumlah publikasi yang disertakan pada setiap tahap seleksi.

Database	Hasil Awal	Setelah Menghapus Duplikasi	Setelah Skrining Abstrak	Termasuk dalam Set Akhir
Scopus	312	290	75	22
Web of Science	280	260	65	18
Science Direct	154	150	45	10
Google Scholar	950	870	40	7
Total	1.696	1.570	225	57

Kriteria inklusi meliputi publikasi dalam bahasa Inggris dan artikel yang ditinjau oleh rekan sejawat yang membahas logistik, transportasi, sistem otonom dan aplikasinya dalam rantai pasokan. Kriteria eksklusi meliputi publikasi sebelum tahun 2015, karya yang tidak terkait dengan logistik, dan teks yang tidak melalui peninjauan sejawat. Sebanyak 57 studi yang memenuhi kriteria ini dimasukkan dalam pembahasan.



Gambar 7.2. Representasi skematis prosedur SLR.

7.4 EVOLUSI DAN KLASIFIKASI SISTEM OTONOM DALAM LOGISTIK

Sebagian besar publikasi berfokus pada integrasi sistem otonom dengan IoT dan AI, yang tercermin dalam banyak artikel tentang kembaran digital, perencanaan rute dinamis, dan penjadwalan tugas armada otomatis. Studi empiris mencakup proyek percontohan (misalnya, penggunaan drone untuk pengiriman obat di Afrika Sub-Sahara) dan implementasi skala penuh di pusat distribusi. Banyak pembelajaran melaporkan pengurangan biaya operasional yang signifikan, rata-rata sebesar 20–40%, dan peningkatan pemanfaatan ruang gudang sebesar 30–50%, tergantung pada jenis implementasi. Pada saat yang sama, riset mengungkapkan keterbatasan yang jelas, seperti kurangnya peraturan hukum yang koheren, kesulitan dalam mengintegrasikan dengan infrastruktur yang ada, dan biaya awal yang tinggi.

Laporan menunjukkan bahwa hingga 30% posisi yang melibatkan tugas-tugas gudang sederhana mungkin akan diotomatisasi pada tahun 2030. Di satu sisi, hal ini menimbulkan kekhawatiran tentang pengurangan pekerjaan skala besar di bidang logistik; di sisi lain, hal ini menciptakan peluang untuk kompetensi baru seperti manajemen armada robot, pembahasan data, dan pemeliharaan sistem otonom. Studi menunjukkan bahwa pengenalan AMR dan AGV

mengubah struktur ketenagakerjaan – mengurangi permintaan tenaga kerja manual sekaligus meningkatkan permintaan spesialis teknis.

Perkembangan pertama dalam AV untuk logistik dimulai pada tahun 1950-an, ketika *Automated Guided Vehicles* (AGV) awal diperkenalkan di pabrik-pabrik untuk menyederhanakan pengangkutan komponen di sepanjang jalur perakitan. Fleksibilitasnya yang terbatas membatasi operasi pada lingkungan produksi yang didefinisikan secara ketat. Hanya pengembangan teknologi *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) dan AI pada awal abad ke-21 yang membuka jalan bagi AMR, yang mampu menavigasi lingkungan dinamis dan menyesuaikan rute mereka secara real-time.

Dalam dekade terakhir, terobosan telah tiba dengan implementasi robot Kiva Systems di pusat distribusi Amazon. Keberhasilan mereka menunjukkan bahwa sistem otonom tidak hanya menyederhanakan intralogistik tetapi juga merevolusi seluruh model bisnis. Saat ini, solusi serupa digunakan oleh pemain global lainnya seperti Alibaba, Ocado, dan Zalando. AGV adalah kendaraan yang bergerak di sepanjang jalur yang telah ditentukan secara ketat, biasanya dipandu oleh pita magnetik, kabel induktif, atau penanda optik yang tertanam di lantai gudang. Dikembangkan sejak tahun 1960-an, teknologi ini dicirikan oleh pengulangan dan prediktabilitas yang tinggi, sehingga dapat diandalkan dalam lingkungan produksi dan logistik yang stabil.

Sebaliknya, AMR mewakili pendekatan yang lebih baru untuk otomatisasi intralogistik. Tidak seperti AGV, AMR tidak memerlukan infrastruktur pemandu fisik, melainkan mengandalkan algoritma persepsi dan navigasi berdasarkan teknologi SLAM, kamera 3D, radar, dan sensor ultrasonik. Hal ini memungkinkan AMR untuk secara dinamis menyesuaikan rute dengan kondisi gudang saat ini, menghindari rintangan, dan mengoptimalkan jalur perjalanan. Mereka dapat beroperasi di lingkungan yang digunakan bersama dengan manusia dan mesin lain, sehingga meningkatkan kesesuaiannya untuk konsep gudang yang fleksibel dan cerdas. Riset menekankan bahwa AMR mendukung gagasan logistik adaptif, yang merespons permintaan yang bervariasi dan gangguan yang tidak terduga.

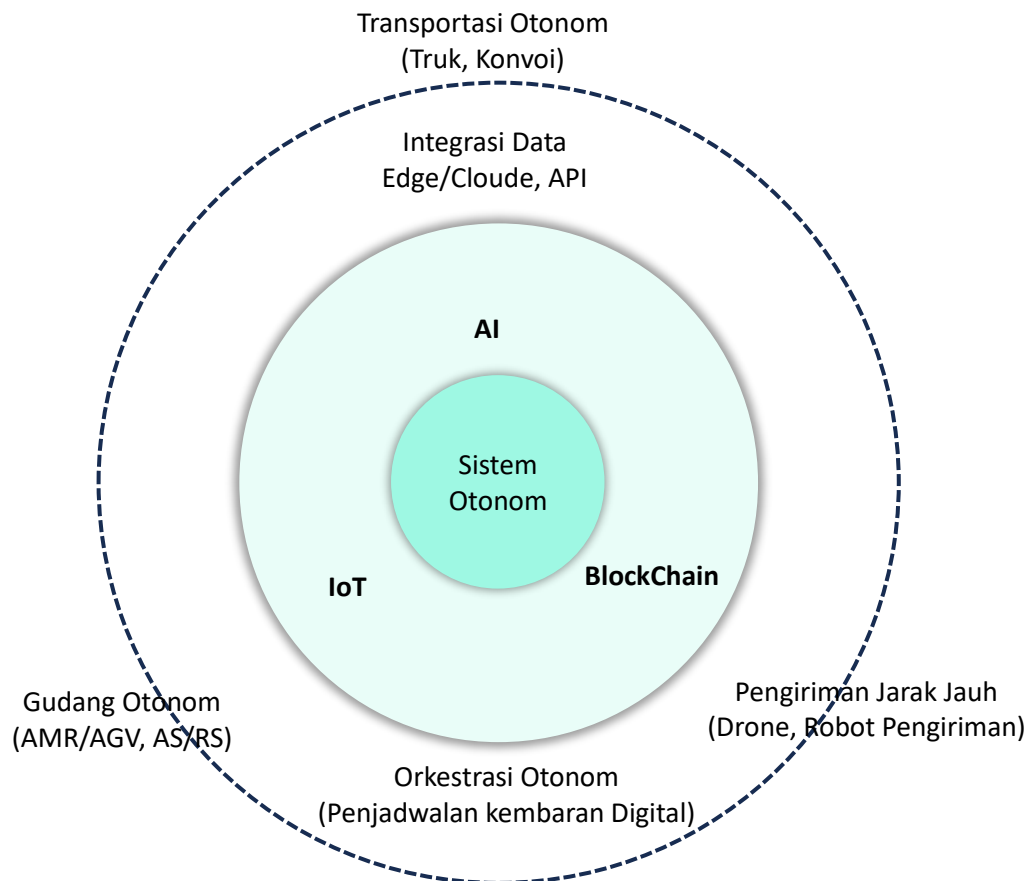
Perusahaan seperti Tesla, Waymo, dan Einride telah mengembangkan kendaraan yang mampu beroperasi di jalan raya dengan aman dan intervensi pengemudi minimal. Perkiraan menunjukkan bahwa otomatisasi penuh transportasi jarak jauh dapat mengurangi biaya operasional hingga 30%. Namun, keselamatan, tanggung jawab, dan penerimaan publik tetap menjadi tantangan utama. Studi perbandingan menunjukkan bahwa AMR menunjukkan fleksibilitas operasional 30–40% lebih tinggi dibandingkan dengan AGV, meskipun hal ini disertai dengan biaya awal yang lebih tinggi dan integrasi yang lebih kompleks. Sebaliknya, AGV lebih hemat biaya di lingkungan yang sangat stabil dan berulang.

Implementasi sistem otonom yang sukses membutuhkan perancangan ulang proses gudang untuk memanfaatkan sepenuhnya potensinya. Robot pengiriman otonom yang bergerak di sepanjang trotoar sedang dikembangkan untuk pengiriman perkotaan lokal. Solusi ini membantu mengurangi biaya pengiriman jarak terakhir, yang secara tradisional mencapai hingga 53% dari total biaya logistik. Meskipun demikian, tantangan regulasi dan teknis tetap

ada, khususnya mengenai keselamatan penerbangan drone dan integrasi dengan manajemen lalu lintas udara.

Tabel 7.4. Contoh aplikasi sistem otonom dalam pergudangan.

Jenis Sistem	Fungsi Utama	Contoh Implementasi	Dampak Bisnis
AMR	Transportasi barang	Amazon (Robot Kiva)	Peningkatan efisiensi sebesar 40%
AGV	Transportasi lini produksi	BMW	Pengurangan kesalahan sebesar 20%
Pesawat Nirawak	Inventaris gudang	Walmart	Pengurangan waktu inventaris sebesar 70%



Gambar 7.3. Model integrasi sistem otonom dengan AI, IoT, dan blockchain dalam logistik.

Sistem otonom dalam rantai pasokan beroperasi secara sinergis dengan teknologi Industri 4.0 lainnya. AI menyediakan kemampuan pembelajaran dan pengambilan keputusan secara real-time, sementara IoT memastikan aliran data berkelanjutan dari lingkungan. Blockchain meningkatkan transparansi dan keamanan data dalam transaksi rantai pasokan. Dalam praktiknya, integrasi memungkinkan terciptanya ekosistem di mana sistem transportasi

dan gudang otonom bekerja sama dengan sensor IoT dan platform analitik, menghasilkan data waktu nyata untuk mengoptimalkan proses.

Tabel 7.5. Ringkasan manfaat dari implementasi sistem otonom

Luas Area	Manfaat	Contoh implementasi
Efisiensi	Waktu pemenuhan pesanan lebih singkat, lebih sedikit kesalahan	Amazon Robotics, Ocado
Biaya	Biaya tenaga kerja dan operasional lebih rendah, ruang gudang dioptimalkan	DHL Supply Chain
Keamanan	Pengurangan kecelakaan dalam transportasi dan pergudangan	Waymo Freight, AMR di gudang
Fleksibilitas	Adaptasi rute dinamis, skalabilitas sistem	AMR, kendaraan otonom dalam distribusi
Keberlanjutan	Emisi CO ₂ lebih rendah, pengurangan limbah	Yara Birkeland, drone Zipline

Tantangan finansial, teknologi, dan regulasi harus dipertimbangkan untuk memaksimalkan efisiensi investasi dan meminimalkan risiko. Tidak seperti robot industri tradisional, yang memerlukan pemisahan dari pekerja karena alasan keselamatan, cobot dilengkapi dengan sensor canggih, sistem penglihatan, dan algoritma yang mendeteksi keberadaan manusia dan merespons bahaya dengan tepat. Dalam jangka panjang, cobot dapat bertindak sebagai jembatan antara otomatisasi penuh dan pekerjaan manual, memungkinkan transisi yang lebih lancar menuju sistem logistik yang cerdas dan fleksibel.

Terlepas dari keuntungan yang signifikan, implementasi sistem otonom juga harus mengatasi tantangan teknis, organisasi, dan sosial. Isu-isu utama meliputi keandalan sistem, ketahanan terhadap serangan siber, dan kemampuan untuk beroperasi di lingkungan yang kompleks dan dinamis. Sama pentingnya adalah aspek organisasi dan sosial seperti adaptasi proses, pelatihan tenaga kerja, dan penerimaan pelanggan dan pemangku kepentingan. Dalam jangka panjang, sistem otonom berpotensi menghasilkan penghematan yang substansial dan keunggulan kompetitif.

Masa depan sistem otonom dalam rantai pasokan terkait erat dengan miniaturisasi teknologi lebih lanjut, kemajuan dalam AI, dan peningkatan integrasi dengan sistem digital. Pentingnya kembaran digital juga akan semakin meningkat, memungkinkan pemodelan waktu nyata dan optimasi proses. Selain itu, tekanan yang meningkat untuk keberlanjutan akan mendorong desain sistem otonom yang mengurangi emisi CO₂ dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya. Dalam jangka panjang, integrasi sistem otonom dengan platform logistik global dapat secara signifikan meningkatkan fleksibilitas dan ketahanan rantai pasokan terhadap gangguan.

Di Amerika Utara, fokusnya adalah pada pengembangan truk otonom dan robot gudang, yang dicontohkan oleh proyek-proyek dari Waymo dan Tesla dalam transportasi jalan raya, serta Amazon Robotics dalam pergudangan. Basis teknologi yang kuat dikombinasikan

dengan akses ke modal memungkinkan transisi cepat dari pengujian percontohan ke penerapan komersial skala penuh.

Tabel 7.6. Perbedaan regional dalam implementasi sistem otonom di bidang logistik

Wilayah	Area Implementasi Utama	Contoh Proyek / Perusahaan	Karakteristik Penerapan	Faktor Penggerak Utama Pengembangan
Amerika Utara	Truk otonom, robot gudang	Waymo, Tesla, Amazon Robotics	Transisi yang cepat dari pengujian percontohan (<i>pilot testing</i>) ke implementasi komersial skala penuh	Basis teknologi yang kuat, akses ke modal investasi
Eropa	Kapal otonom, pesawat nirawak (<i>drones</i>), sistem logistik berkelanjutan	Yara Birkeland (Norwegia), proyek pesawat nirawak EASA	Integrasi inovasi teknologi dengan kebijakan iklim dan ekonomi rendah karbon	Regulasi hukum Uni Eropa (UE), prioritas pada pengurangan jejak karbon
Asia (Tiongkok)	AMR (Robot Mobil Otonom) skala besar, pengiriman perkotaan dengan pesawat nirawak dan robot	Alibaba, JD.com	Penerapan dengan skala global terbesar dan kecepatan paling dinamis	Dukungan pemerintah yang kuat, tekanan perdagangan elektronik (<i>e-commerce</i>), adopsi AI dan robotika yang cepat

Di Eropa, area kunci tetaplah integrasi sistem otonom dengan konsep pembangunan berkelanjutan dan ekonomi rendah karbon. Proyek-proyek seperti *Yara Birkeland* – kapal kargo otonom tanpa emisi di Norwegia – menunjukkan bahwa prioritasnya adalah menggabungkan inovasi teknologi dengan pengurangan jejak karbon. Selain itu, kerangka hukum Eropa, seperti pedoman EASA untuk drone, mendukung penerapan teknologi ini dengan cara yang aman dan konsisten dengan kebijakan iklim Uni Eropa.

Di Asia, khususnya di Tiongkok, penerapannya ditandai dengan skala terbesar dan laju perkembangan tercepat. Perusahaan seperti Alibaba dan JD.com menggunakan ratusan ribu AMR di pusat distribusi mereka dan sedang mengembangkan sistem pengiriman otonom di daerah perkotaan. Pembelajaran menunjukkan bahwa adopsi yang cepat ini didorong oleh tekanan intens dari pasar e-commerce dan dukungan pemerintah yang kuat untuk pengembangan AI dan robotika. Tabel 7.6 menyoroti perbedaan utama dalam pendekatan implementasi sistem otonom di bidang logistik di tiga wilayah utama dunia. Amerika Utara terutama berfokus pada peningkatan efisiensi dan penskalaan aplikasi, dengan penerapan truk otonom dan robot gudang dalam skala besar.

7.5 PERAN SISTEM OTONOM DALAM OPERASI RANTAI PASOKAN

Pembahasan yang dilakukan dalam bab ini menunjukkan bahwa sistem otonom memainkan peran yang semakin penting dalam operasi rantai pasokan. Implementasinya mencakup transportasi, pergudangan, dan distribusi, serta integrasi dengan teknologi digital seperti AI, IoT, dan blockchain. Aplikasi ini memungkinkan peningkatan signifikan dalam efisiensi logistik, pengurangan biaya, dan peningkatan keamanan serta transparansi operasi. Manfaat terbesar berasal dari otomatisasi tugas-tugas berulang, yang secara tradisional menghasilkan biaya operasional yang tinggi. Studi kasus menunjukkan bahwa melalui penggunaan AMR dan kendaraan swakemudi, perusahaan dapat mencapai penghematan 20–40% tergantung pada area operasional. Pada saat yang sama, teknologi ini memungkinkan proses untuk beradaptasi lebih efektif terhadap perubahan kondisi pasar, sehingga meningkatkan ketahanan rantai pasokan terhadap gangguan.

Integrasi sistem otonom dengan teknologi canggih lainnya membentuk dasar bagi rantai pasokan yang efisien, fleksibel, dan aman di masa depan. Kombinasi AI, IoT, blockchain, dan analitik prediktif memungkinkan otomatisasi penuh proses logistik, optimalisasi biaya, dan peningkatan kualitas layanan. Namun, hal ini juga membutuhkan pertimbangan cermat terhadap tantangan teknologi, keuangan, dan organisasi, yang masih menjadi subjek pembelajaran lebih lanjut dan implementasi praktis.

Terlepas dari manfaatnya yang jelas, penerapan sistem otonom terus menghadapi hambatan yang signifikan. Ini termasuk biaya investasi awal yang tinggi serta kendala hukum dan sosial. Tidak adanya kerangka hukum yang terpadu, bersama dengan kekhawatiran masyarakat mengenai keselamatan dan dampak pasar tenaga kerja, dapat secara signifikan memperlambat adopsi. Implementasi sistem otonom membutuhkan kerangka peraturan yang koheren. Dalam transportasi jalan raya, klasifikasi otonomi SAE International dan peraturan UNECE R157 tentang Sistem Penjaga Jalur Otomatis (ALKS) memainkan peran sentral. Untuk intralogistik, standar keselamatan seperti ISO 3691-4 menetapkan persyaratan untuk truk tanpa pengemudi, sementara masalah keamanan siber diatur oleh IEC 62443 dan ISO/IEC 27001.

Aspek teknis seperti keandalan sistem, ketahanan terhadap serangan siber, dan kemampuan untuk beroperasi di lingkungan yang kompleks juga memerlukan pembelajaran dan pengembangan lebih lanjut. Temuan lebih lanjut menunjukkan bahwa sistem otonom memiliki potensi besar dalam memajukan pembangunan berkelanjutan. Otomatisasi transportasi dan pergudangan dapat mengurangi emisi CO₂, menurunkan konsumsi energi, dan meningkatkan penggunaan ruang dan sumber daya. Yang sangat penting adalah pengembangan solusi yang mendukung ekonomi sirkular dan logistik hijau. Sebaliknya, produksi dan pembuangan baterai dan komponen elektronik menimbulkan kekhawatiran mengenai penilaian siklus hidup (LCA) penuh dari teknologi ini. Dalam kerangka kebijakan Uni Eropa dan Kesepakatan Hijau Eropa, sistem otonom dapat menjadi landasan logistik hijau, asalkan prinsip-prinsip ekonomi sirkular diimplementasikan secara efektif.

Sistem otonom dalam operasi rantai pasokan menawarkan potensi besar untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi biaya, dan meningkatkan keamanan, sekaligus

menimbulkan tantangan teknologi, keuangan, dan sosial yang baru. Implementasi yang sukses membutuhkan strategi yang dirancang dengan baik, integrasi dengan teknologi lain, dan manajemen risiko yang efektif. Perusahaan yang berhasil mengadopsi dan mengintegrasikan sistem otonom dapat mencapai keunggulan kompetitif, memperkuat fleksibilitas operasional, dan berkontribusi pada realisasi tujuan keberlanjutan. Disarankan agar perusahaan mendekati penerapan sistem otonom secara bertahap, dimulai dengan proyek percontohan di area operasional terpilih. Implementasi bertahap tersebut mengurangi risiko dan membantu organisasi lebih siap untuk transformasi proses. Dalam jangka panjang, akan sangat penting untuk mengembangkan ekosistem logistik di mana beragam teknologi otonom dan digital berinteraksi secara mulus dan kohesif.

Kesimpulannya, sistem otonom merupakan landasan rantai pasokan generasi berikutnya. Potensinya untuk optimasi, pengurangan biaya, peningkatan fleksibilitas, dan dukungan untuk pembangunan berkelanjutan tidak dapat disangkal. Namun, tantangan utamanya terletak pada keseimbangan antara penerapan yang cepat dan pengelolaan risiko teknologi, hukum, dan sosial yang bertanggung jawab. Perusahaan yang berinvestasi dalam teknologi ini saat ini dan belajar untuk mengintegrasikannya secara efektif akan mengamankan keunggulan kompetitif yang berkelanjutan dalam lingkungan pasar global yang bergejolak. Pembahasan studi kasus dan perbedaan regional menunjukkan bahwa pengembangan sistem otonom bersifat beragam; namun, secara global, hal ini bergerak menuju otomatisasi yang lebih besar, pengurangan biaya, dan peningkatan fleksibilitas proses. Sementara Amerika Utara berfokus pada efisiensi dan skala, Eropa menekankan keberlanjutan, dan Asia memprioritaskan penerapan skala besar yang cepat. Keragaman ini mewakili potensi untuk pembelajaran lebih lanjut tentang transfer praktik terbaik antar wilayah.

BAB 8

OPTIMASI DATA UNTUK KETAHANAN RANTAI PASOK GENERASI BARU

8.1 PERAN DATA DALAM OPTIMASI RANTAI PASOKAN

Di era yang ditandai dengan volatilitas dan transformasi digital, manajemen rantai pasokan yang efektif telah menjadi penentu penting keunggulan kompetitif. Bab ini mengeksplorasi peran sentral data sebagai fondasi untuk mengoptimalkan rantai pasokan kompleks dan multi-tahap. Bab ini mengkaji tantangan yang dihadapi logistik modern, mulai dari kekurangan material hingga gangguan geopolitik, dan menggarisbawahi bagaimana strategi berbasis data memungkinkan ketahanan, efisiensi, dan visibilitas yang lebih besar. Diskusi mencakup teknologi utama termasuk sistem perencanaan sumber daya perusahaan (ERP), *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan (AI), dan analitik canggih yang memfasilitasi pengumpulan, pemrosesan, dan pengambilan keputusan data secara real-time. Lebih lanjut, bab ini membahas metode analitik dan model optimasi, mulai dari desain jaringan hingga manajemen inventaris, yang membantu manajer mengurangi risiko, menurunkan biaya, dan meningkatkan kinerja operasional. Dengan memanfaatkan data yang akurat dan tepat waktu, organisasi dapat mengubah rantai pasokan mereka menjadi sistem yang gesit dan cerdas yang mampu menavigasi lanskap global yang terganggu.

Keberhasilan bentuk kerja fleksibel dalam rantai pasokan ditentukan oleh keuntungan yang dapat diperoleh, termasuk mobilitas karyawan yang tinggi dan pengurangan biaya.

Tabel 8.1. Logistik yang terikat oleh rantai pasokan

1.	Rantai Pasokan (<i>Supply Chain/SC</i>) – proses yang terjadi dari saat memperoleh bahan pasokan awal hingga konsumsi produk akhir, menghubungkan pemasok dan penerima serta fungsi di dalam dan di luar perusahaan, yang memungkinkan pembuatan produk dan penyediaan layanan kepada pelanggan.
2.	Rantai Pasokan SC – rangkaian proses yang menambah nilai pada suatu produk selama aliran dan pemrosesannya, dari bahan baku, melalui semua bentuk antara, hingga bentuk yang memenuhi persyaratan pelanggan akhir.
3.	Rantai Pasokan SC – jaringan organisasi yang saling terhubung dan saling bergantung yang, bertindak berdasarkan prinsip kerja sama timbal balik, mengendalikan dan menyederhanakan aliran barang dan informasi dari pemasok ke pengguna akhir.
4.	Rantai Pasokan SC – perusahaan pertambangan, manufaktur, komersial, dan jasa yang bekerja sama di berbagai bidang, serta pelanggan mereka, di antara siapa aliran produk, informasi, dan sumber daya keuangan beredar.
5.	Rantai Pasokan (SC) – sebuah proses logistik yang dirancang berdasarkan model (proses aliran sumber daya) yang terintegrasi dalam hal waktu, biaya, jarak spasial, dan tingkat layanan pelanggan, dengan menggunakan faktor infrastruktur dan kemampuan organisasi dari saluran logistik tertentu.

6.	Rantai Pasokan (SC) – jaringan produsen dan penyedia jasa yang bekerja sama satu sama lain untuk memproses dan memindahkan barang dari tahap bahan baku ke pengguna akhir.
7.	Rantai Pasokan (SC) – aliran barang dan informasi melalui jaringan perusahaan.
8.	Rantai Pasokan (SC) – sebuah sistem untuk mengatur orang, teknologi, sumber daya, informasi, dan proses yang terlibat dalam pembuatan suatu produk dan pengirimannya kepada pelanggan akhir, serta pembuangan produk yang telah kehilangan nilai guna.
9.	Rantai Pasokan (SC) – sebagai suatu proses, urutan peristiwa dalam pergerakan barang, yang meningkatkan nilainya.
10.	Rantai Distribusi (LD) – sebagai suatu struktur (organisasi) – sekelompok perusahaan yang melakukan aktivitas bersama yang diperlukan untuk memenuhi permintaan produk tertentu di seluruh rantai aliran barang – dari pengadaan bahan baku hingga pengiriman kepada pelanggan akhir. Aktivitas ini dapat mencakup pengembangan, produksi, penjualan, layanan, pengadaan, distribusi, manajemen sumber daya, dan aktivitas pendukung.

Perlu dicatat bahwa definisi pertama rantai pasokan dirumuskan oleh Keith Oliver pada tahun 1982, bersama dengan definisi klasiknya yang mencakup semua tahapan dari bahan baku hingga konsumen. Sebaliknya, Wolfgang Partsch dianggap sebagai pelopor praktis, ia menjelaskan konsep tersebut lebih awal, dan salah satu implementasi pertama SCM dilakukan dan dipublikasikan olehnya pada tahun 1982 di Jerman.

8.2 TEKNOLOGI INFORMASI DALAM MANAJEMEN LOGISTIK MODERN

Mengingat peran strategis rantai pasokan dalam memastikan daya saing perusahaan, setiap langkah yang mengurangi risiko dan meningkatkan keamanan adalah tepat dan dapat dibenarkan. Teknologi informasi merupakan elemen yang sangat diperlukan dalam membangun keunggulan kompetitif perusahaan. Hal ini menyederhanakan operasinya dan memungkinkan penerapan metode dan tren baru dalam manajemen yang berkontribusi pada peningkatan efisiensi entitas bisnis.

Teknologi informasi merupakan elemen penting dari arsitektur perusahaan, dan implementasinya yang tepat dalam suatu organisasi secara signifikan meningkatkan efisiensi dan efektivitas proses bisnis. Rantai pasokan elektronik memiliki kemampuan untuk beradaptasi dan terlibat dalam hubungan jangka pendek dan jangka panjang dalam rantai pasokan. Rantai pasokan virtual dibentuk sebagai respons terhadap kebutuhan pelanggan tertentu, yang juga dapat berpartisipasi aktif di dalamnya dan mengambil bagian dalam pelaksanaan kegiatan secara berkelanjutan.

Efektivitas kegiatan sangat bergantung pada penggunaan alat TI. Oleh karena itu, serta mengingat kerja sama yang dibangun oleh perusahaan dalam proses logistik, sistem TI harus memenuhi sejumlah persyaratan. Berkat penggunaan sistem komputer dan perangkat lunak pendukung yang sesuai, operasi logistik yang melibatkan banyak tugas kompleks, seperti perencanaan pengiriman dan manajemen persediaan, sebagian besar telah menjadi tugas rutin.

8.3 PERAN DATA SEBAGAI DASAR OPTIMASI

Persaingan yang semakin ketat dalam lingkungan globalisasi meningkatkan kompleksitas rantai pasokan dan dengan demikian meningkatkan kebutuhan akan pengolahan dan pertukaran informasi antar peserta untuk meningkatkan kinerja rantai pasokan. Dalam kaitannya dengan manajemen rantai pasokan, analitik dapat didefinisikan sebagai metode kuantitatif dan kualitatif untuk meningkatkan struktur dan daya saing rantai pasokan. Topik penting yang dapat dibahas menggunakan data yang dikumpulkan adalah indikator kinerja utama (KPI). KPI dapat didefinisikan sebagai indikator kinerja utama, pembawa informasi dalam bentuk indikator, ukuran absolut atau statistik dari proses tertentu, yang digunakan untuk mengukur pencapaian (teknis, organisasi, dan ekonomi), mengidentifikasi proses, operasi, aktivitas, dan nilai-nilai prioritas yang memotivasi karyawan untuk mencapai tujuan dan strategi perusahaan.

8.4 PENTINGNYA DATA DALAM MANAJEMEN RANTAI PASOKAN

Sejak awal, harus dibedakan antara data dan informasi: “data hanyalah fakta – pengukuran yang tercatat dari suatu fenomena tertentu – sedangkan informasi adalah struktur yang terdiri dari fakta dalam bentuk yang sesuai untuk pengambilan keputusan”. Pembahasan data yang tepat memungkinkan para manajer untuk memilih solusi terbaik bagi perusahaan mereka dengan cara yang modern, sadar, dan sepenuhnya bertanggung jawab. Pentingnya data dalam proses pengambilan keputusan:

1. Keputusan berbasis data – ini adalah metode pengambilan keputusan berdasarkan data statistik yang dikumpulkan dan dipembahas secara andal di dalam perusahaan, sementara intuisi dan firasat sepenuhnya diabaikan. Untuk mempersiapkan data dengan benar sesuai dengan teknik di atas (keputusan berbasis data), data tersebut harus terlebih dahulu dikumpulkan, diurutkan, dikelompokkan, dan dipembahas (metode statistik atau pembahasan bisnis paling baik digunakan untuk tujuan ini).
2. Meningkatkan efisiensi dalam aktivitas operasional – pembahasan data yang sadar memungkinkan para manajer untuk mengidentifikasi hambatan dan menghilangkan inefisiensi. Hal ini meningkatkan kinerja, misalnya, departemen logistik dan dengan demikian meningkatkan ketepatan waktu pengiriman dan mengurangi waktu tunggu pengiriman.
3. Ketertelusuran dan visibilitas – data yang diperbarui secara berkelanjutan memungkinkan: respons cepat terhadap perubahan tingkat bahan baku untuk produksi atau, misalnya, memungkinkan pengiriman untuk dilacak, yaitu sistem GPS dan RFID, yang sekarang menjadi standar. Sangat penting untuk memantau tingkat stok di gudang secara real-time, karena informasi ini sangat penting untuk merespons dengan cepat dan mencegah gangguan produksi.
4. Kerja sama dan integrasi dengan mitra – perlu dicatat bahwa kompilasi data yang andal memungkinkan kerja sama dengan pemasok, mitra, dan pelanggan. Contohnya adalah platform yang mengintegrasikan data dari berbagai sumber ERP, SAP, atau SCM. Data yang disinkronkan dengan cara ini membantu meningkatkan manajemen bisnis.

5. Manajemen risiko – data statistik dari periode waktu tertentu dan data terkini memungkinkan untuk menghilangkan atau meminimalkan risiko yang terkait dengan perubahan harga bahan baku atau gangguan pasokan, yang pada gilirannya dapat disebabkan oleh perubahan geopolitik atau iklim.
6. Lingkungan, sosial, dan tata kelola – selain dampaknya pada citra perusahaan, pembahasan data lingkungan memungkinkan kita untuk menentukan jumlah emisi CO₂ di seluruh rantai pasokan dan apakah perusahaan berada dalam norma atau perlu mengambil tindakan karena norma telah dilampaui.

8.5 TEKNOLOGI PENDUKUNG PENGUMPULAN DAN PEMBAHASAN DATA

Dalam realitas saat ini, perusahaan menggunakan teknologi yang sangat khusus yang didedikasikan untuk pengumpulan dan pembahasan data yang efektif. Beberapa yang paling populer adalah sebagai berikut:

1. Sistem Perencanaan Sumber Daya Perusahaan (ERP) – platform TI yang dibangun dan dirancang khusus untuk mendukung fungsi perusahaan di masing-masing departemennya.
2. Sistem Perencanaan dan Penjadwalan Lanjutan (APS) – ini adalah alat modern yang digunakan untuk proses perencanaan produksi. Sistem APS memungkinkan pengelolaan proses perencanaan produksi dan biayanya secara efisien. Merancang sistem perencanaan produksi untuk setiap perusahaan merupakan tantangan serius. Sayangnya, tidak ada model ideal; tidak ada yang menggambarkan semua fitur penting dari proses tersebut, dan algoritma yang dikenal bekerja lebih baik atau lebih buruk dalam keadaan yang berbeda. Pemodelan proses produksi yang sangat akurat dan perencanaan yang sangat detail tidak selalu diperlukan. Oleh karena itu, membuat pilihan membutuhkan pengetahuan tentang karakteristik model dan efektivitas algoritma, serta pengetahuan mendalam tentang proses produksi.
3. Sistem Business Intelligence (BI) – dapat didefinisikan sebagai solusi komprehensif yang terutama digunakan untuk penyajian hasil secara grafis.
4. Platform Big Data dan Analitik Data – dengan kata lain, ini adalah kumpulan data besar yang tidak dapat diolah dengan metode persiapan data dasar, seperti Excel. Platform di atas adalah alat analitik yang sangat khusus yang digunakan untuk menyimpan, pembelajaran, dan kemudian menyajikan data, paling sering menggunakan grafik, untuk mendapatkan keputusan manajemen terbaik. Alat-alat ini biasanya beroperasi di cloud, karena ukuran file yang besar memudahkan pencapaian kelancaran operasional di cloud.

Tabel 8.2. Manfaat dan hambatan penggunaan Big Data dalam manajemen rantai pasokan.

Manfaat	Hambatan
Dukungan untuk pengambilan keputusan Peningkatan transparansi	Keterbatasan ketersediaan data Ketidakmampuan untuk mengidentifikasi informasi yang paling dibutuhkan

Manajemen risiko yang lebih baik dalam rantai pasokan Peningkatan manajemen biaya rantai pasokan Penguatan posisi tawar dalam negosiasi dengan pemasok Peningkatan efisiensi rantai pasokan Peningkatan kemampuan perencanaan permintaan Perluasan kemampuan perencanaan penjualan dan operasi Posisi tawar yang lebih kuat dalam negosiasi dengan pelanggan Kemampuan untuk merespons perubahan kondisi dengan lebih cepat Kemampuan untuk mengambil keputusan dengan lebih cepat Kemampuan yang lebih besar untuk membentuk hubungan dengan pemasok Kemampuan yang lebih besar untuk membentuk hubungan dengan pelanggan	Risiko keamanan Kurangnya dukungan dari manajemen Nilai data yang tidak relevan Masalah privasi/kerahasiaan Kurangnya kebijakan dan struktur pengawasan Kurangnya keterampilan untuk menggunakan data yang tersedia Kurangnya permintaan/kurangnya manfaat Kesulitan manajemen Biaya solusi yang tersedia saat ini Kurangnya integrasi dengan sistem yang ada Kurangnya staf yang berkualitas Keengganan untuk berubah Kurangnya solusi SCM yang sesuai Kendala waktu
---	---

Singkatnya, platform analitik dirancang untuk mengumpulkan, menyusun, dan mengelompokkan data dari berbagai sumber, seperti sistem ERP, sistem *Customer Relationship Management* (CRM), dan media sosial. Big Data dan Platform Analitik Data paling efektif untuk segala hal mulai dari statistik sederhana hingga pembahasan ekstensif, di mana data berasal dari berbagai sumber dan dipembahasan menggunakan model prediktif canggih.

Beberapa contoh pembahasan di mana Big Data dan Platform Analitik Data digunakan adalah: pembahasan deskriptif, pembahasan prediktif, pembahasan diagnostik, pembahasan preskriptif, pembahasan waktu nyata, dan pembahasan eksploratif.

5. Pembelajaran Mesin dan AI – ini adalah algoritma matematika yang dibangun berdasarkan kecerdasan buatan:

- Pemodelan Prediktif, digunakan untuk memprediksi peristiwa berdasarkan data historis, diterapkan dalam: peramalan penjualan atau permintaan, prediksi pelanggan yang berhenti berlangganan, penilaian risiko kredit, dan prediksi kegagalan mesin.
- Klasifikasi dan Segmentasi, digunakan untuk mengklasifikasikan, mengurutkan, dan memilah data, diterapkan dalam deteksi spam, segmentasi pelanggan, dan klasifikasi gambar.
- Pembelajaran Tanpa Pengawasan, diterapkan dalam: pengelompokan pelanggan (misalnya untuk pemasaran) dan pengurangan dimensi data (pembahasan komponen utama (PCA), *t-distributed stochastic neighbor embedding* (t-SNE)).
- Deteksi Anomali, digunakan untuk mengidentifikasi kesalahan dalam data, diterapkan dalam deteksi penipuan keuangan.

- Pemrosesan Bahasa Alami (NLP), diterapkan dalam: chatbot dan asisten suara serta pembahasan sentimen.
 - Visi Komputer, digunakan untuk pengenalan objek dan wajah, diterapkan dalam: diagnostik medis berdasarkan gambar dan inspeksi visual dalam produksi.
 - AI Generatif digunakan untuk menghasilkan teks, gambar, dan kode serta diterapkan dalam pembuatan data sintetis dan rekomendasi produk.
6. IoT – ini adalah koneksi sadar berbagai perangkat ke internet, yang dirancang untuk mengklasifikasikan data, mengumpulkannya, dan menyiapkan laporan sederhana darinya, yang dimaksudkan untuk membantu pengambilan keputusan atau mendukung manajer dari jarak jauh. Contoh IoT dalam manufaktur adalah sensor yang terhubung ke mesin produksi yang memantau semua penyimpangan dari norma dan, sebagai hasilnya, mencegah kerusakan atau produk yang tidak sesuai. Berbagai fungsi IoT memungkinkan fleksibilitas, konsistensi, dan pengambilan keputusan yang efisien. Namun, platform IoT tidak hanya membawa peluang baru tetapi juga dapat menimbulkan ancaman baru, yang dapat menimbulkan masalah tambahan dalam implementasi berbagai jenis sistem berbasis perangkat IoT.
7. Perangkat lunak SCM dengan analitik bawaan – dapat disajikan sebagai sistem TI yang dirancang untuk mengelola seluruh rantai pasokan menggunakan alat analitik terintegrasi. Perangkat lunak SCM dengan analitik bawaan memungkinkan aktivitas berikut, yang berlangsung secara real-time atau di masa lalu:
- Pemantauan – otomatis, cerdas, dan berdasarkan angka-angka spesifik. Data dikumpulkan, diurutkan, dan dipembahasan secara berkelanjutan. Hal ini memungkinkan respons yang lebih cepat terhadap kegagalan, waktu henti, atau penundaan. Contoh penggunaan pemantauan dalam bisnis adalah proses pengiriman atau distribusi, di mana sistem segera memberi tahu penerima dan pemasok tentang status pengiriman.
 - Peramalan – dengan mengumpulkan data terkini dan historis, di mana peramalan dibuat menggunakan teknologi canggih. Perangkat lunak SCM dengan analitik bawaan memungkinkan peramalan melalui: pengembangan dan penggunaan algoritma yang sangat khusus, pencarian berbagai peramalan, persiapan berbagai skenario, dan konsolidasi data dari berbagai sumber. Tujuan pengumpulan data adalah untuk membangun gambaran lengkap tentang realitas.

Tabel 8.3. Peran dan manfaat peramalan

Peran peramalan	Manfaat peramalan
1. Prediksi permintaan	Tingkat persediaan yang memadai
2. Peramalan biaya dan pendapatan	Bantuan dalam perencanaan anggaran
3. Membangun berbagai skenario	Pengambilan keputusan yang tepat mengenai “langkah selanjutnya”
4. Peramalan gangguan	Manajemen risiko yang efektif dan berdasarkan informasi

Singkatnya, perangkat lunak SCM dengan analitik bawaan memungkinkan peramalan data melalui penggunaan algoritma, persiapan berbagai perkiraan, persiapan berbagai skenario, dan integrasi data yang beragam.

- Pembahasan – memungkinkan pertimbangan semua aspek manajemen rantai pasokan. Proses ini melibatkan semua departemen di dalam perusahaan, mulai dari pembelian, produksi, pemeliharaan, akuntansi, pengendalian mutu, logistik, dukungan penjualan, dan departemen penjualan. Hasil pembahasan menggunakan metode analitik cepat saat ini memberikan jawaban dalam hitungan detik tentang keputusan optimal dan apa yang perlu dilakukan untuk memperbaikinya. Jenis pembahasan ini membuat manajer lebih berdaya. Metode untuk pembelajaran data secara efektif meliputi:
 - i. Pengumpulan dan integrasi data rantai pasokan – sistem mengumpulkan data eksternal (misalnya CRM, WMS, TMS, dan ERP), data sensor, data operasional, dan data transaksional. Manfaat pengumpulan dan konsolidasi data meliputi gambaran umum terkini tentang proses perusahaan.
 - ii. Pembahasan akar penyebab (RCA) – ini adalah pembahasan yang digunakan untuk mengidentifikasi kesulitan, bukan hanya gejalanya. Tujuan utamanya adalah untuk menghilangkan masalah dan menemukan akar penyebabnya. Metode ini biasanya digunakan di industri seperti industri otomotif, di mana menjawab pertanyaan tentang apa yang menyebabkan masalah tersebut sangat penting. Metode RCA yang paling populer meliputi: 5 Whys, Diagram Ishikawa, Pembahasan Pareto, dan FTA. Manfaat menggunakan metode ini meliputi peningkatan proses dan mengurangi kemungkinan terulangnya masalah.
 - iii. Pembahasan prediktif dan preskriptif – ini adalah metode analitik yang sangat canggih yang membantu perusahaan memperkirakan prakiraan untuk mencapai keputusan yang paling tepat. Pembahasan prediktif – memungkinkan untuk memperkirakan apa yang mungkin terjadi di masa depan, tetapi perhitungannya didasarkan pada data historis. Model statistik dan pembelajaran mesin cocok untuk pembahasan ini. Misalnya, di sektor perbankan, metode ini digunakan untuk menilai kelayakan kredit, dan di departemen penjualan, metode ini digunakan untuk memperkirakan permintaan barang. Pembahasan preskriptif – tugasnya adalah untuk menemukan solusi yang akan meningkatkan hasil. Metode operasinya terutama melibatkan simulasi dan algoritma. Metode ini digunakan dalam proses optimasi logistik dan aktivitas pemasaran tingkat lanjut, yang bertujuan untuk mencocokkan penawaran dengan harapan pelanggan sebaik mungkin.
 - iv. Pembahasan operasional – metode ini, pada gilirannya, dirancang untuk mengoptimalkan, misalnya, tingkat persediaan dan visualisasi proses. Data dipembahasan secara real-time, memungkinkan respons yang cepat.
 - v. Benchmarking – ini adalah metode komparatif yang membandingkan suatu produk dengan para pesaingnya dan mengidentifikasi perbedaan dan area untuk optimasi.

Benchmarking melibatkan perbandingan diri dengan organisasi terbaik – yang terbaik di kelas tertentu – belajar dari mereka prinsip, metode, dan pendekatan yang baik untuk manajemen bisnis, dan kemudian menerapkan perbaikan dan menyempurnakan pola-pola ini dalam operasi sendiri.

- vi. Pembahasan historis – pembahasan rantai pasokan didasarkan pada data historis. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi hambatan dalam rantai pasokan, mengidentifikasi tren, dan menarik kesimpulan tentang cara meningkatkan dan menyempurnakan SCM. Pembahasan di atas terutama mencakup permintaan, penjualan, kolaborasi pemasok, pembahasan persediaan, dan biaya logistik. Spreadsheet Excel, CRM, dan ERP dapat diklasifikasikan sebagai alat untuk melakukan operasi.
- vii. Representasi data grafis dan dasbor – ini adalah komponen utama pembahasan, yang memungkinkan penjelasan tren atau anomali yang ada. Tujuan utama visualisasi adalah untuk menyajikan data dalam bentuk bagan, grafik, dan diagram. Manfaat utamanya adalah untuk memvisualisasikan tren dan anomali serta mengkonfirmasi hipotesis. Metode ini, melalui penyajian hasil secara bergambar, memfasilitasi pengambilan keputusan.
- Optimasi, yaitu manajemen rantai pasokan global di semua tingkatan dan dimensi. SCM dengan analitik terintegrasi mendukung proses optimasi pada Tabel 8.4.

Tabel 8.4. Metode SCM

SCM – Metode	Optimasi	Contoh
Peramalan	Metode statistik dan kecerdasan buatan	Memprediksi produk tertentu dan permintaannya dari waktu ke waktu atau musim
Pembahasan data historis	Mengenali pola dan tren terkini	Pembelajaran data dari departemen penjualan untuk merencanakan produksi dengan lebih baik
Mendeteksi anomali dan risiko	Algoritma tidak konvensional	Mengidentifikasi penundaan untuk pelanggan tertentu untuk mencegah gangguan kerja sama
Pembahasan skenario	Membahas berbagai perubahan	Konsistensi, pengambilan keputusan yang lebih baik
Optimalisasi biaya logistik	Algoritma GPS	Mengurangi biaya bahan bakar, menghemat waktu

8.6 APLIKASI MODEL OPTIMASI DAN RISET OPERASI LOGISTIK

Pengambilan keputusan dalam bisnis harus didasarkan pada kriteria yang jelas, sebaiknya kriteria ekonomi, seperti biaya. Proses manajemen rantai pasokan sangat kompleks. Proses ini terdiri dari banyak aktivitas pendukung yang bertujuan untuk meningkatkan logistik

dalam arti luas. Pertama dan terpenting, seperti yang telah disebutkan, metode analitis dan optimasi banyak digunakan dalam proses logistik, termasuk mengelola jaringan logistik, membangun jadwal pengiriman, mengoptimalkan persediaan dan produksi. Terakhir, aspek penting yang menjadi fokus penerapan metode ini adalah optimasi rute transportasi.

Singkatnya, metode analitis menunjukkan posisi perusahaan saat ini, sementara model optimasi menunjukkan bagaimana mempertimbangkan dan apa yang perlu diperhatikan untuk mendapatkan keputusan terbaik. Seperti yang telah disebutkan, metode analitis yang paling penting dan paling sering digunakan dalam manajemen rantai pasokan meliputi pembahasan data, BI, pembahasan prediktif, dan simulasi. Sebaliknya, model optimasi dirancang untuk menemukan solusi yang paling menguntungkan dan akurat, yang pada gilirannya mengoptimalkan biaya atau efisiensi produksi. Biasanya, ini adalah model matematika atau algoritma matematika yang memainkan peran utama dalam tugas-tugas yang kemudian digunakan dalam riset operasi, terutama di bidang logistik, manajemen bisnis, atau TI. Model yang paling populer meliputi:

- Model jaringan – dirancang, misalnya, untuk mengoptimalkan transportasi pasokan ke pelanggan. Model jaringan terutama merupakan model transportasi yang menyederhanakan operasi departemen logistik. Model ini dapat dicirikan sebagai sangat efisien dan cepat secara komputasi, itulah sebabnya manajer sering memilih solusi ini. Contoh model yang paling populer meliputi:
 - i. Alur penugasan – model jaringan yang dirancang untuk menugaskan karyawan ke tugas-tugas.
 - ii. Alur biaya minimum – pengiriman barang ke toko atau gudang dengan harga terendah.
 - iii. Masalah rute terpendek – sebuah usulan, misalnya, untuk rute terpendek dari fasilitas manufaktur A ke gudang B.
 - iv. Aliran maksimum (max-flow) – dengan kata lain, kuantitas maksimum bahan baku atau barang jadi yang dapat dikirim melalui jaringan logistik.
 - v. Masalah pekerjaan pengirim (TSL) – rute terpendek dari titik A ke titik B.

Manajer terutama menggunakan algoritma grafik, seperti Bellman-Ford atau Dijkstra, serta pustaka Google OR-Tools dan Gurobi, untuk mengimplementasikan model jaringan ini.

- Model lokasi – dirancang untuk memilih lokasi yang paling sesuai dengan situasi saat ini, misalnya, lokasi optimal untuk membangun pabrik, sehingga biaya di masa depan juga seoptimal mungkin bagi pelanggan, kontraktor, dan pemasok bahan baku. Contoh model lokasi yang umum meliputi model biaya (Weber) – dirancang untuk mengoptimalkan dan meminimalkan biaya yang terkait dengan transportasi yang didefinisikan secara luas; model p-center – mengoptimalkan rute transportasi dari pelanggan ke lokasi terdekat yang diinginkan; model hierarkis – membedakan antara berbagai tingkat lokasi layanan yang dipertimbangkan, misalnya, lokal atau regional; model p-median – meminimalkan jumlah jarak antara titik layanan dan pelanggan; dan model cakupan – jumlah maksimum pelanggan yang terletak dalam jarak kilometer tertentu. Model lokasi sangat berguna saat merancang pusat logistik baru, misalnya,

- saat memilih lokasi baru untuk rumah sakit atau SPBU. Manajer yang merencanakan pusat perbelanjaan atau lokasi gudang juga dengan mudah menggunakan model ini.
- Model manajemen persediaan – dalam hal model optimasi, ini terutama melibatkan pengembangan model matematika dari proses pengambilan keputusan, yang tujuan utamanya adalah meminimalkan biaya persediaan. Secara spesifik, tingkat persediaan harus dipertahankan pada tingkat yang cukup untuk produksi. Model manajemen persediaan didasarkan pada fungsi tujuan dan variabel keputusan:
 - i. Model optimasi deterministik – yang mengasumsikan bahwa semua data (permintaan, biaya, dan waktu pengiriman) diketahui atau tidak diketahui.
 - Model Kuantitas Pesanan Ekonomis (*Economic Order Quantity/EOO*) – tujuan model EOO adalah untuk merencanakan pembelian barang yang cukup untuk secara sadar menetralkan persediaan.
 - Model Wagner-Whitin (multi-periode, deterministik) – ini adalah salah satu model yang berkinerja terbaik dan paling akurat untuk manajemen persediaan. Model ini memungkinkan manajemen persediaan yang efisien selama periode waktu yang ditentukan. Namun, prasyarat untuk penggunaannya adalah pengetahuan tentang permintaan. Tujuan utama model ini adalah untuk mengoptimalkan persediaan di dalam perusahaan, sehingga mengoptimalkan biaya pemesanan dan meminimalkan biaya penyimpanan persediaan. Model Wagner-Whitin adalah model dinamis, dan tugas utamanya adalah untuk mencari melalui semua metode pemesanan alternatif dan, akibatnya, memilih skenario yang paling menguntungkan.
 - Model optimasi stokastik – sebagian besar metode optimasi stokastik bersifat heuristik: intuisi kita, yang seringkali didasarkan pada pengalaman yang luas, biasanya menunjukkan bahwa metode tersebut akan efektif dalam praktik, dan memang, ini sering terjadi. Model stokastik menggabungkan ketidakpastian dalam data input ke dalam desainnya. Ini merupakan perbedaan signifikan dibandingkan dengan model deterministik, di mana semua data diketahui dan pasti. Model stokastik biasanya mencakup variabel seperti biaya, permintaan, dan waktu pengiriman. Perlu disebutkan bahwa metode stokastik mengandung elemen acak, misalnya, variabel dengan distribusi yang diketahui. Tugas utama mereka adalah menemukan solusi yang paling akurat, dengan mempertimbangkan ketidakpastian. Model-model yang disebutkan di atas didasarkan pada metode statistik dan probabilistik. Penerapannya di perusahaan sangat beragam. Departemen logistik terutama menggunakan model-model ini untuk optimasi, seperti optimasi rute atau untuk rute pengiriman yang tidak pasti. Departemen lain yang secara teratur menggunakan model optimasi di atas adalah produksi (misalnya untuk perencanaan produksi dengan permintaan yang tidak diketahui) dan keuangan (manajemen keuangan selama masa ekonomi yang bergejolak). Model stokastik yang paling penting meliputi:
 - Pemrograman stokastik – model ini biasanya digunakan untuk mempersiapkan skenario sebelum faktor ketidakpastian diperkenalkan. Contoh utama di perusahaan adalah perencanaan produksi, sebelum perusahaan mengetahui permintaan aktual.

Dalam hal ini, berbagai skenario dimodelkan, dan fungsi tujuannya adalah biaya atau keuntungan yang diharapkan.

- Pemrograman dengan batasan peluang – dalam metode ini, asumsi tertentu harus dipenuhi saat melakukan peramalan, yaitu tingkat persediaan harus 95% untuk perencanaan produksi bulanan.
- Pemrograman stokastik dua tahap – metode ini memberikan jawaban atas masalah dalam dua tahap: tahap 1 memberikan jawaban atas pertanyaan "di sini dan sekarang" tetapi tidak memperhitungkan ketidakpastian, sedangkan tahap 2 melibatkan penggabungan faktor ketidakpastian ke dalam proses.
- Pemrograman dinamis stokastik – metode ini biasanya digunakan dalam situasi di mana keputusan dibuat berulang kali dan keadaan sistem adalah variabel acak.
- Model optimasi stokastik memiliki kelebihan dan kekurangan. Kekurangan utama dari metode ini adalah memakan waktu dan intensif secara komputasi. Data probabilistik (distribusi, skenario) diperlukan untuk memastikan hasil yang lengkap, yang sayangnya juga melibatkan sejumlah besar pekerjaan. Keuntungan signifikan dari metode yang disebutkan di atas adalah pembahasan risiko yang lebih baik, yang pada gilirannya memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih akurat, sehingga menghasilkan keputusan yang tepat.
- Pemrograman linier (LP) dan pemrograman bilangan bulat (PC) – ini adalah teknik optimasi yang digunakan untuk menemukan solusi terbaik dan paling akurat untuk masalah tertentu dalam kondisi spesifik:
 - i. LP – asumsi dasar dari solusi adalah untuk menemukan nilai maksimum atau minimum yang diberikan kendala linier. Metodologi ini paling baik digunakan ketika ada kebutuhan untuk memaksimalkan atau meminimalkan kuantitas seperti keuntungan atau konsumsi material. Contoh aplikasi saat ini meliputi perencanaan produksi (PL – memungkinkan untuk menjawab pertanyaan tentang bagaimana mengelola sumber daya, seperti bahan dan bahan baku, untuk mengoptimalkan keuntungan), logistik dan transportasi (bagaimana mengoptimalkan biaya transportasi, misalnya, dengan biaya satuan yang diketahui), dan masalah pencampuran (bagaimana menyiapkan campuran yang tepat, misalnya, premix vitamin, untuk mencapai kualitas produk yang tepat dengan harga yang tepat).
 - ii. PC – ini adalah jenis LP di mana beberapa variabel harus berupa bilangan bulat.

Ada dua pendekatan yang perlu dipertimbangkan di sini:

- Pemrograman Linier Bilangan Bulat (ILP) – ketika semua variabel adalah bilangan bulat, PC diperlukan.
- Namun, jika beberapa variabel adalah bilangan bulat, kita mempertimbangkan Pemrograman Linier Bilangan Bulat Campuran (MILP).

Metode ini bekerja dengan baik ketika nilai yang dimasukkan ke dalam algoritma tidak boleh berupa pecahan, seperti jumlah mesin yang dibutuhkan untuk produksi atau jumlah karyawan yang dijadwalkan untuk bekerja. Aplikasi sehari-hari yang umum meliputi penjadwalan

karyawan dalam proses produksi di suatu perusahaan, pengemasan bin dan knapsack – bagaimana cara mengemas produk jadi secara optimal.

- Heuristik dan metaheuristik – ini adalah teknik optimasi tingkat lanjut.

Metode heuristik tidak tepat dan tidak memberikan solusi optimal, tetapi seringkali memberikan solusi yang cukup baik dalam waktu tertentu. Keuntungan utama dari metode ini adalah: kesederhanaan, kecepatan, dan aritmatika yang relatif rendah. Metodologi yang sesuai adalah algoritma tetangga terdekat, yang bekerja dengan baik untuk TSP.

Metode metaheuristik adalah metode yang bertujuan untuk menemukan solusi yang lebih baik menggunakan teknik optimasi tingkat lanjut. Karena kompleksitas algoritma, aplikasi yang direkomendasikan adalah masalah yang berbasis pada optimasi kombinatorial. Keuntungan dari metodologi ini adalah menemukan solusi yang paling optimal, tetapi kekurangannya adalah sifat multi-shift dan, akibatnya, waktu komputasi yang terlibat. Contoh alat termasuk algoritma koloni semut dan algoritma genetika.

8.7 FUNGSI DEPARTEMEN DALAM MANAJEMEN RANTAI PASOKAN

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, manajemen rantai pasokan mencakup departemen-departemen berikut dalam suatu perusahaan: perencanaan, produksi, pembelian, logistik pasokan, manajemen gudang dan logistik distribusi, manajemen permintaan dan peramalan, serta layanan pelanggan. Manajemen rantai pasokan juga mengkoordinasikan aliran barang dan jasa. Proses ini dirancang untuk memastikan kontinuitas pasokan dan produksi dari pemasok hingga pelanggan akhir.

Diskusi di atas telah menunjukkan bahwa proses rantai pasokan berfungsi lebih baik ketika didukung oleh berbagai alat TI yang dirancang untuk meningkatkan efisiensinya. Alat TI, mulai dari yang paling sederhana (lembar kerja Excel) hingga algoritma kompleks, dirancang untuk membantu menentukan proses pengambilan keputusan dan pada akhirnya menemukan keputusan yang paling akurat. Pilihan metodologi terutama didasarkan pada jenis masalah, kompleksitasnya, dan data yang tersedia. Tujuan yang diinginkan sangat penting ketika memilih alat optimasi, dan akibatnya, preferensi manajer, metode mana yang lebih dekat dengan mereka, dan pengalaman mereka.

Pada akhirnya, diinginkan untuk mendapatkan keputusan yang mengoptimalkan biaya, waktu, tingkat persediaan, dan memastikan kepuasan pelanggan. Manajemen rantai pasokan menggabungkan manajemen strategis dan operasional. Untuk mencapai hasil yang memuaskan, pelanggan, pemasok, dan operator logistik juga harus dilibatkan, sehingga menghasilkan manajemen perusahaan yang efektif. Rantai pasokan adalah proses kompleks yang bergantung pada banyak faktor eksternal dan internal dalam perusahaan.

Hal ini membutuhkan peningkatan berkelanjutan dan dukungan dari teknologi informasi baru. Teknologi informasi baru dirancang untuk mengoptimalkan proses guna mencapai hasil terbaik. Di era digitalisasi, di mana kecepatan, kualitas, dan kuantitas produk akhir sangat penting, para manajer dipaksa untuk mencari solusi yang semakin canggih yang dilengkapi dengan algoritma matematika kompleks yang dirancang untuk menyederhanakan proses rantai pasokan.

BAB 9

OPTIMASI RANTAI PASOKAN BERBASIS DATA

9.1 PERAN DATA DAN OPTIMASI BERBASIS AI DALAM SCM

Setelah pandemi COVID-19, optimasi berbasis data telah menjadi keharusan strategis bagi rantai pasokan modern, yang – mengandalkan data yang dapat dipercaya dan algoritma pembelajaran mesin – harus merespons lebih cepat dan lebih fleksibel dari sebelumnya. Dengan menempatkan optimasi yang didukung AI sebagai inti strategi rantai pasokan, bab ini mengejar dua tujuan: (1) memberikan gambaran umum tentang aplikasi analitik big data, kembaran digital, dan kecerdasan buatan di seluruh rantai pasokan dan (2) mengilustrasikan penggunaan praktis H2O AutoML berdasarkan studi kasus empiris.

Bab ini merangkum publikasi akademis dari tahun 2015 hingga 2025, menyajikan kasus penggunaan AI yang terdokumentasi dalam proses rantai pasokan dan mengidentifikasi tugas analitik utama – klasifikasi, regresi, dan peramalan deret waktu – beserta manfaat bisnis yang dihasilkan. Perspektif terstruktur ini juga mengungkapkan kesenjangan pembelajaran, khususnya mengenai kembaran digital generatif dan kemampuan menjelaskan model pembelajaran mesin. Komponen empiris bab ini didasarkan pada dataset yang tersedia untuk umum berjudul “Peramalan Pesanan Permintaan Harian”, yang berisi pengamatan selama 60 hari berturut-turut dari sebuah perusahaan logistik besar di Brasil.

Studi ini menyelidiki apakah H2O AutoML dapat menghasilkan peramalan pesanan harian dengan akurasi yang lebih tinggi daripada jaringan MLP (*Multi-Layer Perceptron*) yang dipilih dengan cermat. Tiga model dibandingkan: MLP BASELINE yang disetel secara manual, AUTOML NN (jaringan saraf), dan AUTOML ALL (kumpulan algoritma lengkap). Model dengan kinerja terbaik, AUTOML NN, mengurangi kesalahan kuadrat rata-rata (RMSE) dari sekitar 14.400 pesanan menjadi sekitar 2.230 pesanan, secara signifikan mengungguli baik MLP BASELINE maupun varian AUTOML ALL.

Manajemen rantai pasokan (SCM) dalam dimensi global menjadi isu penting bagi banyak perusahaan. Hal ini mencakup kepentingan pemasok di seluruh dunia serta fokus pada konsumen lokal, domestik, dan internasional. Pandemi COVID-19 mengungkap kerapuhan rantai pasokan global dan mempercepat pergeseran dari manajemen berbasis intuisi menuju strategi yang didasarkan pada pembahasan data sistematis. Integrasi teknologi kecerdasan buatan (AI) ke dalam SCM telah muncul sebagai pendorong utama peningkatan efisiensi, kelincahan, dan daya tanggap dalam operasi bisnis kontemporer. Konsep optimasi rantai pasokan berbasis data mengasumsikan bahwa keputusan yang menghasilkan nilai muncul dari integrasi empat aliran SCM - material, keuangan, proses bisnis, dan informasi - dengan kualitas dan kecepatan pemrosesan informasi bertindak sebagai faktor penentu keunggulan kompetitif.

Perlu dicatat bahwa tugas paling penting dalam AutoML adalah penyetelan otomatis hyperparameter untuk mencapai kinerja optimal. Modul AutoML – seperti H2O AutoML,

bagian dari kerangka kerja H2O.ai – menawarkan antarmuka parameter minimalis, pilihan algoritma yang luas, dan mekanisme penggabungan bawaan.

Bab ini bertujuan untuk menjawab dua tujuan pembelajaran. Pertama, bab ini menyajikan pemantauan literatur tentang penerapan big data (BD), kembaran digital (DT), AI, dan ML dalam mengoptimalkan proses di seluruh rantai pasokan. Pemantauan ini bertujuan untuk menyoroti tren perkembangan utama dan mengidentifikasi kesenjangan pembelajaran yang ada. Kedua, disajikan studi kasus di mana H2O AutoML digunakan untuk memprediksi volume pesanan harian berdasarkan dataset yang tersedia untuk umum. Hal ini memungkinkan penilaian empiris tentang efektivitas pendekatan low-code dalam konteks optimasi rantai pasokan. Struktur bab ini adalah sebagai berikut: bagian 9.2 memberikan pemantauan literatur tentang SCM berbasis data; bagian 9.3 menjelaskan peran AutoML dalam meningkatkan operasi rantai pasokan dan menyajikan hasil eksperimen yang dilakukan; dan bagian 9.4 menawarkan kesimpulan, implikasi manajerial, dan arahan untuk pembelajaran masa depan.

9.2 PEMBAHASAN BIG DATA (BDA) DALAM PRAKTIK EKONOMI

Big Data

Meningkatnya pentingnya analisis big data (BDA) dalam praktik ekonomi telah menyebabkan proses pengambilan keputusan dalam SCM semakin bergantung pada analisis data daripada intuisi manajerial. Namun, model SCM tradisional membatasi pemanfaatan penuh potensi informasi, sehingga memerlukan redefinisi metode dan alat yang ada. BDA sudah banyak diterapkan di berbagai area fungsional rantai pasokan - mulai dari peramalan permintaan dan perencanaan persediaan hingga manajemen transportasi - asalkan praktik manajerial dan solusi infrastruktur teknis yang tepat tersedia.

Pemantauan pustaka sistematis yang mencakup tahun 2015–2023 mengidentifikasi kesenjangan pembelajaran yang signifikan: kurangnya studi kasus yang mendokumentasikan implementasi BDA di dunia nyata dalam SCM. Hambatan implementasi yang paling kritis adalah optimalisasi konfigurasi perangkat keras dan perangkat lunak untuk menyeimbangkan biaya dan kinerja. Tantangan tambahan meliputi memastikan akuisisi data yang berkelanjutan, pembersihan dan standardisasi data, serta masalah yang berkaitan dengan keamanan dan kualitas informasi. Faktor-faktor ini mempersulit implementasi solusi BD dan menuntut pengembangan strategi manajemen data yang koheren.

Riset literatur yang dilakukan oleh Nguyen dan rekan-rekan menunjukkan bahwa BDA paling sering mendukung pengambilan keputusan dalam logistik dan transportasi, diikuti oleh produksi, pergudangan, manajemen permintaan, dan pengadaan. Hanya sebagian kecil publikasi akademis yang mengadopsi perspektif holistik pada rantai pasokan misalnya, dalam hal ketahanan atau keberlanjutan. Wang dan rekan-rekan mengusulkan paradigma *Big Data Business Analytics* (BDBA) yang luas dan terintegrasi yang menggabungkan dua komponen komplementer: Big Data (BD) dan *Business Analytics* (BA). Komponen pertama mengacu pada kemampuan infrastruktur organisasi dalam memperoleh dan memproses aliran data yang dicirikan oleh kecepatan tinggi, variasi yang signifikan, dan volume yang besar. Komponen

kedua mencakup serangkaian metode analitis mulai dari statistik dan ekonometrika hingga pemodelan simulasi dan algoritma optimasi yang bertujuan untuk mengekstrak pengetahuan dari data dan mentransfernya ke dalam proses pengambilan keputusan, khususnya dalam konteks SCM.

Pentingnya analitik berbasis data juga ditekankan oleh karya Li dan rekan-rekan, yang mengembangkan kerangka kerja diagnostik tiga tahap (pemetaan struktural, pemodelan dinamis, dan analisis kausal) untuk rantai multi-node produk berbasis platform. Studi kasus mereka mengungkapkan bahwa pengurangan variasi produk meningkatkan akurasi perencanaan dan memperpendek Waktu Siklus Pemenuhan Pesanan (OFCT). Lebih lanjut, penempatan inventaris yang efisien bergantung pada hubungan antara akurasi perkiraan dan durasi siklus produksi dan transportasi. Ketika waktu tunggu panjang, menempatkan inventaris lebih dekat ke pelanggan membantu mengurangi OFCT. Namun, dalam situasi akurasi perkiraan yang rendah, hasil yang lebih baik dicapai melalui penempatan persediaan di hulu, berkat efek penggabungan persediaan – yaitu, mengkonsolidasikan stok ke dalam satu penyangga pengaman pusat daripada mempertahankan beberapa penyangga yang lebih kecil di dekat pelanggan. Dengan menggabungkan permintaan dari berbagai saluran, pendekatan ini memperlancar variabilitas dan memungkinkan tingkat stok total yang lebih rendah sambil mempertahankan (atau bahkan meningkatkan) ketersediaan produk. Temuan ini menegaskan peran penting data dalam mengelola variabilitas dan gangguan dalam jaringan pasokan.

Kemajuan terbaru dalam pembelajaran mesin (ML) dan teknologi komputasi semakin memperkuat relevansi BDA dalam SCM. Gangguan internal – seperti kemacetan pelabuhan atau kekurangan kontainer – dan faktor eksternal, termasuk kelangkaan komponen atau lonjakan permintaan yang tiba-tiba, telah menyoroti tingkat ketidakpastian dalam rantai pasokan. Perkembangan ini menggarisbawahi nilai BDA dalam beradaptasi dengan perubahan preferensi pelanggan dan meningkatkan ketahanan rantai pasokan. Oleh karena alasan-alasan tersebut, minat terhadap BDA dalam SCM terus tumbuh di kalangan praktisi dan akademisi.

DT

DT didefinisikan sebagai representasi digital dari objek fisik, produk, perangkat, orang, proses, fasilitas produksi, atau bahkan seluruh ekosistem bisnis. Model ini dibangun berdasarkan aliran data yang diperoleh dari sensor *Internet of Things* (IoT) yang dipasang pada atau diintegrasikan ke dalam objek referensi fisik. Integrasi tersebut memungkinkan para insinyur untuk terus memantau parameter operasional dan mensimulasikan dinamika sistem, memberikan wawasan struktural dan operasional tentang kondisi objek secara real-time. Modifikasi yang direncanakan dapat diimplementasikan dan divalidasi terlebih dahulu di lingkungan DT, memungkinkan evaluasi prediktif terhadap konsekuensi perubahan yang diusulkan sambil meminimalkan risiko gangguan pada sistem fisik.

Teknologi DT semakin populer karena kemampuannya untuk meningkatkan manajemen sumber daya dan proses dalam logistik. Meningkatnya kompleksitas jaringan pasokan global, yang diperkuat oleh frekuensi gangguan, menggarisbawahi kebutuhan akan alat digital pendukung, termasuk DT. Ivanov membedakan antara dua pendekatan utama untuk membangun DT: pendekatan *top-down* (berbasis objek), berdasarkan model struktural

rantai pasokan yang telah ditentukan sebelumnya, dan pendekatan *bottom-up* (berbasis data), di mana model muncul dari aliran data real-time multidimensi. Varian berbasis data mengasumsikan pengamatan yang tidak lengkap dan variabilitas sistem yang berkelanjutan, sehingga membutuhkan adaptasi otomatis dan terdesentralisasi dari kembaran tersebut terhadap kondisi pasar saat ini, menjadikannya sangat cocok di lingkungan yang ditandai dengan gangguan yang sering terjadi. Pada saat yang sama, Ivanov menyoroti risiko halusinasi dalam algoritma generatif dan menekankan perlunya menggabungkan model AI dengan pengetahuan ahli dan validasi akhir manusia terhadap wawasan yang dihasilkan.

Menurut Abouzid dan Saidi, teknologi DT, dalam konteks rantai pasokan, merupakan alat canggih untuk pemantauan jaringan logistik secara real-time. Solusi ini menggunakan algoritma AI untuk menghasilkan perkiraan dan memprediksi potensi gangguan dalam operasi rantai pasokan. Solusi ini didasarkan pada data real-time dari sensor IoT, sistem *pelacakan* produk, teknologi identifikasi frekuensi radio (RFID), sumber eksternal yang melaporkan risiko alam, keuangan, atau politik, serta data historis tentang gangguan sebelumnya. Ketika anomali terdeteksi, dimungkinkan untuk mensimulasikan dinamika gangguan ini dan mengevaluasi konfigurasi topologi alternatif dari jaringan pasokan.

Perspektif tentang aplikasi DT dalam logistik diperluas lebih lanjut oleh temuan Khan dan Tabasum, yang berfokus pada rantai pasokan di sektor perawatan kesehatan. Para peneliti berpendapat bahwa implementasi DT – memanfaatkan pemantauan berkelanjutan, analitik prediktif, dan simulasi berbasis skenario – menghasilkan peningkatan yang terukur dalam indikator kinerja utama. Hal ini mencakup peningkatan akurasi inventaris, pengurangan waktu tunggu pemenuhan pesanan, pemeliharaan kontinuitas rantai dingin, dan biaya operasional yang lebih rendah. Hasilnya adalah jaringan pasokan yang lebih fleksibel dan tangguh yang memastikan akses tepat waktu dan adil terhadap perlengkapan medis baik di lingkungan perkotaan maupun pedesaan.

AI dalam Rantai Pasokan

Pengembangan AI memberikan kontribusi signifikan terhadap kemajuan SCM, yang mencakup domain operasional dan strategis. Pemantauan literatur yang dilakukan oleh Atwani dan kawan-kawan mensistematisasikan aplikasi AI di empat proses SCM utama: (1) peramalan dan perencanaan permintaan, (2) pengadaan dan sumber, (3) manajemen produksi dan inventaris, dan (4) transportasi dan distribusi. Para penulis menyoroti peran dominan ML di semua bidang ini, bersamaan dengan penggunaan algoritma genetik yang luas. Jaringan saraf tiruan (ANN) khususnya diterapkan dalam manajemen hubungan pemasok, pemilihan pemasok, dan optimasi proses produksi. AI meningkatkan efisiensi biaya, kelincahan, dan keberlanjutan operasi logistik sekaligus memperkuat ketahanan terhadap gangguan.

Analisis empiris yang dilakukan oleh Lin dan kawan-kawan menegaskan bahwa integrasi AI dengan sistem SCM memungkinkan visualisasi, otomatisasi, dan kontrol cerdas aliran di seluruh rantai pasokan. Integrasi ini menghasilkan pengurangan biaya operasional dan peningkatan respons terhadap fluktuasi permintaan. Demikian pula, laporan Deloitte berjudul *Managing a Modern Supply Chain: Utilizing AI to Combat Complexity* menunjukkan bahwa model AI generatif dan prediktif mempercepat aktivitas perencanaan, pengadaan, produksi,

dan pemeliharaan, memberikan manfaat finansial yang terdokumentasi dan menghasilkan penghematan biaya yang substansial bagi perusahaan.

Perusahaan dapat mengintegrasikan alat AI dengan berbagai teknologi canggih yang beroperasi dalam jaringan pasokan, memungkinkan transparansi proses penuh dan aliran informasi yang efisien di seluruh rantai logistik. Misalnya, sistem AI menganalisis aliran data dari perangkat IoT – seperti sensor yang dipasang pada kendaraan pengangkut atau palet – yang memantau kerusakan mekanis atau penyimpangan suhu pada material sensitif. Pengumpulan dan pemrosesan informasi ini secara otomatis memungkinkan tindakan segera, seperti pengalihan rute pengiriman atau pemesanan pengganti, yang pada gilirannya meminimalkan waktu henti dan mengurangi biaya operasional.

Dalam konteks meningkatnya ketidakpastian makroekonomi dan seringnya gangguan logistik, kemampuan rantai pasokan untuk beradaptasi dan pulih dengan cepat menjadi sangat penting. Riad dan kawan-kawan berpendapat bahwa integrasi ML, analitik prediktif, dan pemrosesan data waktu nyata memperkuat komponen preventif (resistensi) dan regeneratif (pemulihan) dari ketahanan rantai pasokan. Hasil praktisnya meliputi peningkatan akurasi perkiraan permintaan, pengurangan kekurangan stok, dan penurunan tingkat kelebihan persediaan. Studi komplementer oleh Elufioye dan Silva menegaskan bahwa analitik AI prediktif meningkatkan ketepatan waktu pengiriman, meningkatkan produktivitas tenaga kerja, dan mengurangi jejak karbon per unit produksi. Sementara itu, Singh dan kawan-kawan menyoroti peran AI yang semakin meningkat dalam pemilihan dan evaluasi pemasok, yang berkontribusi pada peningkatan kualitas dan keandalan pengiriman.

Namun, implementasi penuh AI dalam SCM menghadapi tantangan signifikan: rendahnya kemampuan menjelaskan keputusan algoritmik. Kosasih dan kawan-kawan mengidentifikasi AI neurosimbolik yang menggabungkan jaringan saraf dalam (DNN) dengan representasi simbolik dari fakta dan aturan sebagai arah pembelajaran yang menjanjikan. Arsitektur hibrida ini memungkinkan pemrosesan data tidak terstruktur melalui model saraf sambil memberikan justifikasi yang transparan, sehingga memfasilitasi penerimaan model di antara para pemangku kepentingan.

Masalah keberlanjutan menjadi prioritas yang sama pentingnya dalam implementasi AI. Seperti yang dicatat dalam laporan State of Supply Chain Sustainability 2024, pemantauan dan pengurangan emisi Scope 3 merupakan salah satu tantangan tersulit yang dihadapi perusahaan. Mengurangi emisi Scope 3 dalam rantai pasokan melibatkan pembatasan emisi gas rumah kaca tidak langsung yang dihasilkan oleh pemasok (hulu) serta oleh penggunaan produk dan proses akhir masa pakai (hilir). Hal ini mencakup, antara lain, berkolaborasi dengan pemasok dalam hal efisiensi energi, memilih bahan baku dan metode transportasi rendah emisi, serta merancang produk dengan mempertimbangkan sirkularitas. Pembelajaran yang dilakukan oleh MIT Sustainable Supply Chain Lab berfokus pada penggunaan Green AI dan ML untuk meningkatkan pelacakan emisi tersebut dan merancang jalur dekarbonisasi – upaya yang membutuhkan kolaborasi luas di antara para pemangku kepentingan rantai pasokan.

Studi empiris dan rekomendasi konsultasi secara konsisten menunjukkan bahwa aplikasi AI – mulai dari ML tingkat lanjut hingga model neurosimbolik yang dapat dijelaskan –

merupakan kunci untuk meningkatkan efisiensi, ketahanan, dan keberlanjutan rantai pasokan global. Namun, keberhasilan penskalaan solusi ini bergantung pada pendekatan terintegrasi yang menggabungkan strategi bisnis, kesiapan data, transparansi model, dan keterlibatan aktif pengguna akhir.

ML dalam Optimasi Rantai Pasokan

Kemajuan dalam analitik data dan ML mentransformasi SCM modern dengan menyediakan alat yang memungkinkan respons yang lebih efektif terhadap ketidakpastian dan mendukung tujuan keberlanjutan. Namun, pemantauan terhadap 286 publikasi dari tahun 2006 hingga 2016 oleh Mishra dan kawan-kawan mengungkapkan kesenjangan pembelajaran yang signifikan dalam penerapan ML untuk keputusan operasional utama dalam SCM. Sejak saat itu, ruang lingkup aplikasi ML terus diperluas. Iseri dan kawan-kawan berpendapat bahwa analitik prediktif menjadi fondasi alat pendukung keputusan generasi berikutnya, karena memungkinkan peramalan permintaan yang andal, mendukung manajemen persediaan, dan meningkatkan alokasi sumber daya.

Klaim ini didukung oleh temuan Islam dan Amin, yang menggunakan dua teknik ML (*Random Forest* (RF) dan *Gradient Boosted Machine* (GBM)) untuk mengidentifikasi produk yang berisiko mengalami penundaan pengiriman dengan sukses. Demikian pula, Wang menunjukkan bahwa *Long Short-Term Memory* (LSTM) NN mencapai akurasi peramalan 91% dalam prediksi permintaan, secara signifikan mengurangi biaya penyimpanan persediaan. Hasil yang sebanding diperoleh oleh Zhang dan kawan-kawan, yang menunjukkan bahwa tiga model ML (RF, *Recurrent Neural Networks* (RNN), dan *Reinforcement Learning* (RL)) mengungguli model ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*) konvensional di semua metrik kinerja. Dengan memanfaatkan ML, *deep learning* (DL), dan NN, analitik prediktif dapat secara signifikan meningkatkan peramalan permintaan, manajemen persediaan, pemilihan pemasok, dan manajemen risiko. Sattar dan kawan-kawan juga mengakui potensi besar teknik ML – khususnya XGBoost (*Extreme Gradient Boosting*) dan RNN – dalam meningkatkan SCM melalui prediksi permintaan, optimasi persediaan, dan mitigasi risiko.

Studi lebih lanjut menunjukkan bahwa mengintegrasikan algoritma canggih seperti *Deep Reinforcement Learning* (DRL) memperkuat fleksibilitas dan ketahanan jaringan pasokan. Park dan kawan-kawan menunjukkan bahwa DRL mengungguli heuristik dan metode optimasi linier dalam mengurangi kekurangan stok dan biaya pemenuhan pesanan sambil mempertahankan ketahanan dalam menghadapi pergeseran permintaan yang tiba-tiba. Demikian pula, Ghodake dan kawan-kawan menunjukkan bahwa algoritma Deep Q-Learning meningkatkan akurasi peramalan permintaan sambil mengurangi biaya operasional, sehingga meningkatkan fleksibilitas sistem secara keseluruhan.

Pada saat yang sama, perusahaan menghadapi tantangan untuk menyeimbangkan tujuan ekonomi, logistik, dan lingkungan dalam struktur pasokan yang semakin berlapis dan terputus-putus. Abushaega dan kawan-kawan menekankan bahwa pendekatan tradisional tidak cukup untuk menganalisis data heterogen dan terdesentralisasi secara efektif. Sebaliknya, arsitektur ML hibrida, yang menggabungkan gradient boosting, model regresi, dan

RNN, berkinerja lebih baik dalam mengoptimalkan indikator keberlanjutan. Dalam konteks yang sama, Baj Rogowska dan Nozari dan Nozari dan kawan-kawan menggambarkan ML sebagai penggerak utama rantai pasokan yang cerdas dan berkelanjutan.

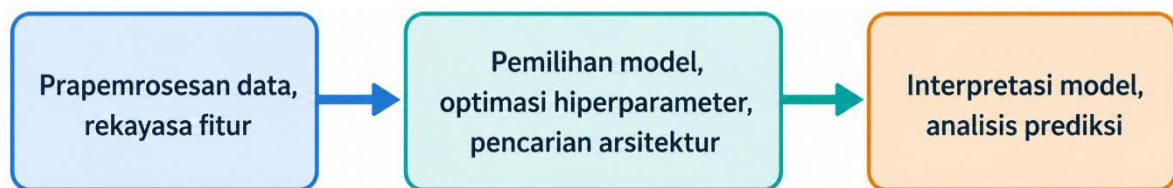
Meskipun akurasi model prediktif semakin meningkat, implementasi ML yang efektif tetap bergantung pada kualitas data real-time dan kemampuan model untuk beradaptasi dengan lingkungan yang dinamis. Kemampuan menjelaskan model merupakan perhatian utama: Khedr dan Rani menyoroti tantangan dalam menafsirkan keputusan yang dibuat oleh model DL dalam konteks evaluasi pemasok. Meskipun solusi AI berpotensi merevolusi rantai pasokan, penerapannya terus menghadapi hambatan seperti kualitas data yang buruk, kekurangan tenaga profesional terampil, dan resistensi organisasi.

9.3 ML OTOMATIS DALAM OPTIMASI RANTAI PASOKAN

AutoML

Kekurangan tenaga profesional terampil memperburuk hambatan ini, menjadikan proyek ML berisiko secara ekonomi. Pembelajaran Mesin Otomatis (AutoML) mengatasi tantangan ini dengan mengotomatiskan tahapan-tahapan kunci dari siklus hidup pengembangan model – pemilihan algoritma, penyetelan hyperparameter, dan evaluasi (Gambar 9.1), sehingga menurunkan ambang batas masuk bagi pengguna di luar lingkaran sempit para ahli.

Dengan demikian, AutoML mendemokratisasi akses ke ML, memungkinkan pengembangan model berkinerja tinggi bahkan oleh individu tanpa latar belakang teknis tingkat lanjut. Akibatnya, hal ini mengurangi biaya dan risiko inisiatif analitis. Seperti yang dicatat oleh Paweloszek dan rekan-rekan, banyak usaha kecil menghadapi kendala signifikan dalam kompetensi digital dan sumber daya staf TI. Dalam konteks seperti itu, alat AutoML menawarkan solusi praktis, memungkinkan pelatihan dan evaluasi model dengan keahlian teknis minimal.



Gambar 9.1 Alur kerja AutoML Tipikal

Kramer dan kawan-kawan menunjukkan bahwa platform AutoML berbasis cloud (Microsoft Azure ML, Dataiku DSS, Google AutoML Tables) mengungguli model ARIMA dan perataan eksponensial dalam perencanaan pengadaan dan produksi jangka pendek. Namun, dalam jangka waktu satu tahun, model tradisional mungkin masih mempertahankan keunggulan, menyoroti perlunya kalibrasi sistematis dan pengayaan alur kerja otomatis dengan pengetahuan bisnis. Temuan pelengkap oleh SPS2 menunjukkan bahwa menggabungkan AutoML dengan teknik ensemble meningkatkan akurasi dan ketahanan peramalan, memungkinkan optimalisasi tingkat persediaan, alokasi sumber daya, dan

perencanaan rantai pasokan. Upaya manual yang diperlukan untuk membangun model peramalan berkurang secara signifikan, mempercepat implementasi.

Meskipun ada kemajuan substansial, tidak satu pun dari platform AutoML saat ini yang sepenuhnya menghilangkan kebutuhan intervensi manusia selama tahap pra-pemrosesan data, yang tetap menjadi penentu penting kualitas prediksi. Meskipun demikian, AutoML memberikan dukungan berharga tidak hanya bagi pengguna pemula tetapi juga bagi analis berpengalaman, menawarkan fungsionalitas yang mengurangi jumlah kode yang dibutuhkan. Hal ini memungkinkan para ahli untuk fokus pada rekayasa fitur, interpretasi model, dan penerapan. Akibatnya, solusi AutoML berkontribusi pada demokratisasi ML dengan mempersempit kesenjangan keterampilan dan mempercepat pengembangan aplikasi prediktif inovatif dalam SCM. Salah satu alat AutoML yang banyak digunakan adalah H2O AutoML – fitur dari pustaka H2O-3 yang memungkinkan pelatihan dan penyetelan otomatis beberapa model, serta pembuatan papan peringkat untuk aplikasi akademis dan bisnis.

H2O AutoML

Dalam literatur akademis, H2O AutoML diakui sebagai salah satu solusi AutoML yang paling matang dan berperingkat tinggi, khususnya efektif dalam tugas klasifikasi biner. Kerangka kerja ini mengotomatiskan seluruh alur kerja ML, termasuk pelatihan dan penyetelan beberapa model serta pembangunan ensemble model (Stacked Ensembles), semuanya dalam batasan yang ditentukan pengguna seperti waktu eksekusi maksimum (*max_runtime_secs*) atau jumlah model tertentu (*max_models*). Antarmuka sengaja disederhanakan: pengguna diharuskan untuk menentukan kerangka data, kolom respons, dan secara opsional batas waktu atau model. Semua pengaturan lainnya termasuk pemilihan prediktor, kerangka validasi, dan kriteria penghentian bersifat opsional. Akibatnya, H2O AutoML menurunkan hambatan keterampilan bagi pengguna di luar komunitas ilmu data inti, sekaligus menawarkan fungsionalitas "paket" yang menghemat waktu bagi pengguna tingkat lanjut, memungkinkan mereka untuk fokus pada rekayasa fitur, interpretasi model, dan penerapan (H2O.ai).

Kumpulan algoritma yang tertanam dalam H2O AutoML terdiri dari lima keluarga model inti dengan karakteristik yang beragam, beserta ensemble-nya (Stacked Ensembles). Hal ini memungkinkan kerangka kerja untuk beradaptasi secara efektif dengan berbagai tugas analitis. Keluarga model tersebut meliputi yang berikut:

- GLM (*Generalized Linear Model*) adalah keluarga model regresi yang disesuaikan dengan distribusi probabilitas data tertentu. Dalam H2O AutoML, GLM mewakili generalisasi regresi linier klasik, memungkinkan pemodelan berbagai jenis data (misalnya biner, hitungan, atau kontinu). Dari perspektif teknis, semua model regresi tradisional termasuk dalam keluarga GLM, termasuk model linier standar. H2O AutoML secara otomatis memilih varian model GLM yang sesuai tergantung pada fungsi distribusi probabilitas dan sifat tugas (regresi atau klasifikasi).
- DRF (*Distributed Random Forest*) adalah keluarga model pembelajaran terawasi berdasarkan hutan keputusan acak, yang umum digunakan untuk tugas klasifikasi dan regresi. Model ini dibangun di atas pohon keputusan: sejumlah besar pohon yang dibangun secara acak dihasilkan untuk tujuan prediksi, dan outputnya kemudian

digabungkan untuk menghasilkan perkiraan akhir. Keacakan yang diperkenalkan selama konstruksi pohon membantu mengurangi kesalahan sistematis (bias) dan varians model individual, sehingga meningkatkan akurasi dan ketahanan model secara keseluruhan.

- GBM adalah keluarga model ensemble berdasarkan ML sekuensial, yang digunakan untuk tugas klasifikasi dan regresi. Seperti DRF, GBM termasuk dalam kelas metode ensemble, yang berarti terdiri dari banyak pembelajar lemah yang prediksinya digabungkan untuk menghasilkan output akhir. Model GBM bergantung pada pohon keputusan yang dibangun secara bertahap, dengan masing-masing berusaha untuk memperbaiki kesalahan yang dibuat oleh yang sebelumnya, yang memungkinkan minimisasi kesalahan prediksi secara bertahap. GBM dapat digunakan untuk memprediksi nilai numerik kontinu (regresi) serta untuk mengklasifikasikan data.
- XGBoost adalah serangkaian model yang digunakan oleh H2O AutoML, berdasarkan konsep gradient boosting. Model ini melibatkan pembangunan pohon keputusan secara berurutan sedemikian rupa sehingga setiap pohon baru mengoreksi kesalahan yang dibuat oleh model sebelumnya, yang mengarah pada peningkatan sistematis dalam akurasi prediksi. Model XGBoost dianggap sebagai solusi yang sangat efisien dan banyak diterapkan baik dalam tugas klasifikasi maupun regresi.
- DL adalah keluarga model ML yang dibangun menggunakan ANN. DL termasuk di antara teknik ML yang paling ampuh, digunakan untuk melatih model yang sangat fleksibel yang mampu memproses dataset besar dan kompleks. Dalam H2O, DL didasarkan pada NN feed-forward multi-layer yang dilatih menggunakan *stochastic gradient descent* (SGD) dan backpropagation. H2O dapat melatih berbagai jenis DNN, seperti *Multi-Layer Perceptron* (MLP), yang berkinerja terbaik pada data tabular; *Convolutional Neural Networks* (CNN), yang dirancang untuk pemrosesan gambar; dan RNN, yang digunakan untuk menganalisis data sekuensial seperti ucapan atau deret waktu.

Stacked Ensemble dalam H2O adalah algoritma ensemble terawasi yang menggunakan teknik stacking untuk menggabungkan prediksi dari model dasar yang telah dilatih sebelumnya. AutoML pertama-tama membangun serangkaian model dari berbagai keluarga (misalnya GBM, XGBoost, DRF, GLM, DL). Kemudian, Stacked Ensemble melatih apa yang disebut *metalearner* (secara default GLM atau GBM), yang menetapkan bobot optimal untuk setiap model dasar untuk meminimalkan kesalahan prediksi secara keseluruhan. Pendekatan ini meningkatkan akurasi dan stabilitas prediksi. Seperti algoritma supervised lainnya di H2O, Stacked Ensemble mendukung regresi, klasifikasi biner, dan klasifikasi multikelas.

Dalam studi perbandingan oleh Truong dan kawan-kawan, kerangka kerja H2O AutoML sedikit mengungguli alat alternatif dalam klasifikasi biner dan regresi, konvergen lebih cepat ke hasil optimal. Namun, ia kalah dalam tugas klasifikasi multikelas. H2O AutoML juga menawarkan berbagai opsi lanjutan. Pengguna dapat menyertakan atau mengecualikan algoritma tertentu (*include_algos/exclude_algos*), menentukan strategi validasi (*nfolds*, *blending_frame*) atau mengontrol penghentian dini melalui parameter seperti

stopping_rounds, stopping_metric, dan stopping_tolerance. Hasil dari semua eksperimen dirangkum dalam Papan Peringkat, di mana metrik evaluasi default adalah AUC (Area Under the Curve) untuk klasifikasi biner, mean_per_class_error untuk klasifikasi multikelas, dan deviance untuk tugas regresi (H2O.ai n.d.).

Penerapan H2O AutoML untuk Peramalan Permintaan Logistik Harian: Studi Kasus

Ferreira dan kawan-kawan menyajikan studi kasus yang melibatkan penggunaan ANN untuk meramalkan permintaan paket harian di *Centro de Tratamento de Encomendas* (CTE) selama 15 hari. Dataset eksperimental mencakup periode 60 hari: 45 hari pertama digunakan untuk melatih model MLP, sedangkan 15 hari sisanya digunakan untuk pengujian. Studi ini mengeksplorasi 10 varian MLP yang dilatih menggunakan algoritma backpropagation error, dengan memvariasikan jumlah lapisan tersembunyi, jumlah neuron, laju pembelajaran, laju momentum, dan kriteria penghentian. Konfigurasi terbaik dipilih berdasarkan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) terendah yang diperoleh pada set data uji 15 hari.

Pengaturan eksperimental yang dijelaskan memenuhi persyaratan inti dari paradigma optimasi rantai pasokan berbasis data. Pertama, penggunaan data historis yang andal membantu mengurangi ketidakpastian permintaan di semua modul perencanaan selanjutnya, mulai dari manajemen inventaris hingga penjadwalan transportasi. Kedua, model peramalan yang dihasilkan berfungsi sebagai komponen masukan untuk sistem APS (*Advanced Planning and Scheduling*) dan IBP (*Integrated Business Planning*) terintegrasi, di mana metrik kesalahan (misalnya MAPE) dapat bertindak sebagai fungsi tujuan untuk algoritma optimasi. Ketiga, dokumentasi lengkap dari dataset dan spesifikasi rinci dari hyperparameter memfasilitasi replikasi dan transfer hasil ke lingkungan pembelajaran lain.

Berdasarkan studi kasus yang dijelaskan di atas, upaya dilakukan untuk memverifikasi apakah H2O AutoML mampu menghasilkan perkiraan pesanan harian dengan akurasi yang lebih tinggi daripada jaringan MLP yang disetel dengan cermat yang disajikan oleh Ferreira dan kawan-kawan. Untuk tujuan ini, sebuah eksperimen dirancang untuk mengembangkan tiga konfigurasi model dalam kerangka kerja H2O AutoML:

- MLP BASELINE – model DL tunggal yang disetel secara manual.
- AUTOML NN – serangkaian jaringan saraf yang disetel secara optimal, terbatas secara eksklusif pada keluarga algoritma ini.
- AUTOML ALL – eksekusi H2O AutoML default dengan seluruh rangkaian algoritma yang tersedia.

Kumpulan Data

Eksperimen yang direncanakan dilakukan menggunakan kumpulan data publik *Daily Demand Forecasting Orders*. Data tersebut mencakup periode 60 hari pengamatan berturut-turut yang dikumpulkan dari sebuah perusahaan logistik besar di Brasil. Setiap catatan mencerminkan volume pesanan paket harian, dengan kolom C3–C12 (Tabel 9.1) yang memecah angka ini berdasarkan urgensi pengiriman (mendesak/tidak mendesak), jenis paket (A–C) dan penugasan paket ke salah satu dari lima sektor (fiskal, kontrol lalu lintas, bank 1–3). Variabel output (Target, C13) didefinisikan sebagai jumlah total pesanan yang dilakukan pada hari tertentu. Secara total, kumpulan data tersebut mencakup 12 variabel input dan satu

variabel dependen. Variabel C1–C2 bersifat kategorikal (minggu dalam bulan dan hari dalam minggu), memungkinkan model untuk menangkap fluktuasi ritmis dalam permintaan. Kolom yang tersisa (C3–C12) adalah variabel kontinu yang mencerminkan struktur rinci pesanan paket. Variabel C13 (Target) berfungsi sebagai variabel dependen dalam model regresi.

Data mentah dalam file yang tersedia untuk umum `Daily_Demand_Forecasting_Orders_test.csv` diformat sesuai dengan konvensi numerik Brasil – menggunakan koma sebagai pemisah desimal dan titik untuk menandai ribuan. Untuk konsistensi dengan notasi bahasa Inggris, format ini dikonversi sehingga titik memisahkan bagian desimal dan ribuan ditandai dengan koma. Untuk memastikan perbandingan penuh dengan studi yang dilakukan oleh Ferreira dan kawan-kawan, data dibagi secara berurutan (tanpa pengacakan) menjadi dua subset: pelatihan (hari 1–45) dan pengujian (hari 46–60). Data tersebut disimpan sebagai file CSV terpisah (`Daily_Demand_Forecasting_Orders_train.csv` dan `Daily_Demand_Forecasting_Orders_test.csv`) dan diimpor ke H2O AutoML sebagai dua objek `H2OFrame` independen.

Tabel 9.1 Karakteristik Dataset – 12 Input Ke Jaringan MLP

Kode variabel	Nama variabel
C1	Minggu dalam bulan (minggu pertama, kedua, ketiga, keempat, atau kelima) ¹
C2	Hari dalam seminggu (Senin sampai Jumat) ²
C3	Pesanan tidak mendesak
C4	Pesanan mendesak
C5	Jenis Pesanan A
C6	Jenis Pesanan B
C7	Jenis Pesanan C
C8	Pesanan sektor fiskal
C9	Pesanan dari sektor pengatur lalu lintas
C10	Pesanan perbankan (1)
C11	Pesanan perbankan (2)
C12	Pesanan perbankan (3)
C13	Target (total pesanan)

¹Nomor minggu (1–4/5).

²Nomor hari kerja (1–5), dari Senin hingga Jumat.

Konfigurasi Model

Pengaturan eksperimental melibatkan evaluasi tiga model: MLP BASELINE, AUTOML NN, dan AUTOML ALL. Model pertama – MLP BASELINE – dirancang untuk mereplikasi sedekat mungkin, dalam H2O AutoML, model MLP berkinerja terbaik yang dikembangkan oleh Ferreira dan rekan-rekan. Model kedua – AUTOML NN – bertujuan untuk memanfaatkan sepenuhnya kemampuan H2O AutoML untuk memilih model terbaik yang dilatih secara eksklusif dengan algoritma DL. Model ketiga – AUTOML ALL – juga bertujuan untuk memanfaatkan potensi penuh H2O AutoML, tetapi dengan memilih model terbaik dari semua algoritma ML yang

tersedia, termasuk tidak hanya DL, tetapi juga GLM, DRF, GBM, XGBoost, dan Stacked Ensemble. Detail konfigurasi setiap model disajikan dalam Tabel 9.2.

Tabel 9.2 Parameter Konfigurasi Model Yang Digunakan Dalam Eksperimen.

Nama Model	DASAR MLP	AUTOML NN	OTOMATIS SEMUA
Parameter konfigurasi	– <i>aktivasi = Tanh</i> – <i>tersembunyi = 15, 15</i> – <i>epoch = 200</i> – <i>putaran_penghentian = 0</i> – <i>laju = 0,95</i> – <i>seed = 1.234</i> – <i>momentum_awal = 0,99</i> – <i>momentum_stabil = 0,99</i>	– <i>include_algos = ["DeepLearning"]</i> – <i>max_runtime_secs = 3.600</i> – <i>seed = 1.234</i> – <i>nfolds = 5</i>	– <i>max_runtime_secs = 3.600</i> – <i>seed = 1.234</i> – <i>nfolds = 5</i>

Dalam eksperimen MLP BASELINE, tujuannya adalah untuk mereproduksi arsitektur dan serangkaian hyperparameter yang sedekat mungkin dengan model MLP asli: dua lapisan tersembunyi dengan masing-masing 15 neuron, *learning_rate* = 0,95, *momentum* = 0,99, maksimum 200 epoch, dan fungsi aktivasi sigmoid (karena sigmoid tidak tersedia di H2O AutoML, fungsi aktivasi Tanh dipilih sebagai gantinya). Model dihasilkan menggunakan H2O AutoML yang dibatasi pada algoritma DL. Dalam semua eksperimen, parameter *seed* diatur ke 1.234. Dalam eksperimen kedua (AUTOML NN) dan ketiga (AUTOML ALL), batas waktu untuk mencari model berkinerja terbaik diatur ke 3.600 detik.

Pelatihan Dan Analisis Model

Semua model dilatih pada set pelatihan *Daily_Demand_Forecasting_Orders_train.hex*. Validasi silang dengan *nfolds* = 5 dilakukan secara internal selama proses pelatihan menggunakan pembagian berbasis modulo (tanpa pengacakan temporal). Setelah pelatihan, setiap model menghasilkan prediksi pada set pengujian *Daily_Demand_Forecasting_Orders_test.hex*. Metrik kinerja utama yang digunakan untuk mengevaluasi akurasi prediksi adalah *Root Mean Square Error* (RMSE).

Setelah menyelesaikan proses pelatihan, H2O AutoML menghasilkan, di antara output lainnya, tabel kepentingan variabel, yang menunjukkan sejauh mana setiap variabel berkontribusi pada prediksi model. Variabel dengan skor kepentingan tertinggi adalah variabel yang paling diandalkan oleh model ML saat menghasilkan perkiraan. Perubahan nilai variabel yang sangat penting dapat secara signifikan mengubah output model. Tabel 9.3 menyajikan peringkat kepentingan variabel untuk setiap model yang digunakan dalam percobaan.

Tabel 9.3 Pentingnya Variabel.

BASELINE MLP		AUTOML JST		AUTOML SEMUA	
<i>Variabel</i>	<i>Kepentingan terskala</i>	<i>Variabel</i>	<i>Kepentingan terskala</i>	<i>Variabel</i>	<i>Kepentingan terskala</i>
C8	1.0	C6	1.0	C6	1.0
C5	0.9339	C7	0.7401	C7	0.7951
C6	0.9165	C5	0.4619	C5	0.3393
C2	0.9147	C3	0.3641	C3	0.2722
C7	0.9099	C4	0.3378	C10	0.1748
C11	0.8461	C10	0.3308	C4	0.1737
C3	0.8450	C11	0.2390	C11	0.1442
C12	0.8295	C2	0.2253	C1	0.0620
C1	0.7795	C1	0.1973	C9	0.0607
C4	0.6920	C12	0.1687	C8	0.1629
C10	0.6362	C8	0.1629	C2	0.0491
C9	0.6044	C9	0.1155	C12	0.0458

Dalam model AUTOML NN dan AUTOML ALL, empat variabel terpentingnya identik. Variabel tersebut adalah: Tipe Pesanan B, Tipe Pesanan C, Tipe Pesanan A, dan Pesanan Tidak Mendesak. Sebaliknya, dalam model MLP BASELINE, variabel terpentingnya adalah C8 (pesanan sektor fiskal).

Hasil Prediksi

Untuk mengevaluasi kinerja prediksi model regresi dalam setiap percobaan, dua metrik dasar utama digunakan: RMSE3 dan MAE (*Mean Absolute Error*). Set data uji yang digunakan untuk memprediksi permintaan harian pesanan paket adalah file *Daily_Demand_Forecasting_Orders_test.hex*.

Hasil yang dilaporkan oleh Ferreira dan rekan-rekan tidak menyertakan nilai RMSE atau MAE untuk model MLP di seluruh 15 hari pengujian ($t = 1...15$). Oleh karena itu, untuk membandingkan akurasi perkiraan yang diperoleh dari model MLP dengan perkiraan yang dihasilkan oleh model MLP BASELINE, AUTOML NN, dan AUTOML ALL, RMSE dan MAE untuk model MLP dihitung ulang. Notasi yang digunakan untuk perhitungan ini disajikan dalam Tabel 9.4.

Tabel 9.4 Simbol Dan Definisi Yang Digunakan Untuk Evaluasi Model.

Simbol	Definisi
y_t	Jumlah pesanan aktual pada hari ke- t – kolom Target (Total pesanan) pada baris 46–60 dari file <i>Daily_Demand_Forecasting_Orders.csv</i>
ε_t	Persentase kesalahan dari Eksperimen 5 yang disajikan dalam studi oleh Ferreira dan kawan-kawan pada hari ke- t (dari <i>Tabel IV</i>)
e_t	e_t adalah selisih jumlah pesanan, dihitung berdasarkan persamaan (2): $e_t = \hat{y}_t - y_t = y_t \cdot \frac{\varepsilon_t}{100}$
$\hat{y}_t$	Peramalan MLP pada hari ke- t , dihitung berdasarkan persamaan [9.1]:

	$\hat{y}_t = y_t \left(1 + \frac{\varepsilon_t}{100}\right)$
--	--

Pada Tabel 9.4, dua kesalahan persentase terbesar dalam setiap eksperimen ditandai dengan huruf tebal. *Eksperimen 5* – yang melibatkan MLP dengan dua lapisan tersembunyi, laju pembelajaran 0,95, koefisien momentum 0,99 dan jumlah epoch maksimum sama dengan 200 – menghasilkan hasil terbaik. Dapat disimpulkan bahwa topologi yang diadopsi dalam Eksperimen 5 paling sesuai dengan dataset, menghasilkan perkiraan yang paling akurat. Cuplikan data yang digunakan dalam perhitungan disajikan pada Tabel 9.5. Pada Tabel 9.4 Ferreira dan rekan-rekan memberikan kesalahan persentase ε_t . Mengonversi ini menjadi kesalahan e_t yang dihitung sebagai jumlah pesanan menggunakan persamaan [9.2] menghasilkan, untuk hari ke-4 dari set pengujian (yang memiliki nilai ε_t tertinggi): $y_4 = 402.607$; $\varepsilon_4 = 8,60$; $e_4 = 402.607 \times 0,086 = 34.624$ pesanan.

MAE adalah ukuran akurasi model regresi yang menunjukkan, rata-rata (dalam satuan variabel yang diprediksi), seberapa besar prediksi menyimpang dari pengamatan aktual. RMSE, pada gilirannya, adalah salah satu metrik yang paling umum digunakan untuk mengevaluasi model regresi. Ini menunjukkan, dalam satuan yang sama dengan nilai yang diamati, besarnya rata-rata penyimpangan antara nilai yang diprediksi dan nilai aktual.

Tabel 9.5 Pratinjau Data Yang Digunakan Dalam Perhitungan.

Hari pengujian	y_t (pesanan)	ε_t (%)	e_t (pesanan)
1	357,394	-2.40	-8,577
2	259,246	-3.30	-8,555
3	244,235	-1.20	-2,930
4	402,607	8.60	34,624
5	255,061	4.80	12,242
6	342,606	0.00	0,000
7	268,640	-1.60	-4,298
8	188,601	-5.70	-10,750
9	202,022	-0.01	0,020
10	213,509	0.80	1,708
11	316,849	-2.50	7,921
12	286,412	-1.00	2,864
13	303,447	6.70	20,330
14	304,950	5.00	15,247
15	331,900	8.20	27,221

Kesalahan ini dihitung menggunakan persamaan [9.1] dan [9.2]:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t| \quad [9.1]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad [9.2]$$

Untuk hari ke-4 dari set pengujian (lihat Tabel 9.5), nilai MAE dan RMSE berikut diperoleh:

$$MAE = \frac{1}{15} \sum_{t=1}^{15} |e_t| = 10,485.800 \quad \text{orders}; \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{t=1}^{15} e_t^2} =$$

14,372.859 orders.

Hasil eksperimen yang dilakukan dirangkum dalam Tabel 9.6. Nilai numerik mencerminkan hasil yang diperoleh di lingkungan pengujian penulis dan mungkin sedikit berbeda saat replikasi. Dalam eksperimen AUTOML NN dan AUTOML ALL, Papan Peringkat menampilkan semua model yang dilatih oleh H2O AutoML, yang diurutkan dari terbaik hingga terburuk berdasarkan metrik RMSE. Tabel 9.6 hanya mencakup model dengan kinerja terbaik (yaitu, model dengan nilai RMSE terendah). Berikut adalah tabel dari gambar tersebut yang telah diubah ke dalam format Markdown:

Model/metric	MLP	MLP BASELINE*	AUTOML NN** (t=3,600s)	AUTOML ALL*** (t=3,600s)
MSE		196,865.391	4,959.943	7,851.827
RMSE	14,372.859	14,030.873	2,227.093	2,802.111
r2		942.237	998.545	997.696
mean_residual_deviance		196,865.391	4,959.943	7,851.827
mae	10,485.800	11,278.363	1,478.000	1,746.815
rmsle		43.725	0,007.314	8.091

* Model dilatih menggunakan algoritma Deep Learning dengan konfigurasi manual.

** Model dilatih menggunakan algoritma Deep Learning – paling akurat di antara 402 model di Papan Peringkat.

*** Model dilatih menggunakan algoritma Deep Learning – paling akurat di antara 1.896 model di Papan Peringkat.

Peningkatan RMSE untuk model MLP BASELINE, AUTOML NN, dan AUTOML ALL relatif terhadap nilai RMSE sebesar 14.372,859 yang dilaporkan oleh Ferreira dan kawan-kawan disajikan pada Tabel 9.7. Indikator Δ_{RMSE} (“peningkatan RMSE vs. MLP”) dihitung menggunakan persamaan [9.3].

$$\Delta_{RMSE} = \frac{RMSE_{MLP} - RMSE_{model}}{RMSE_{MLP}} \cdot 100\% \quad [9.3]$$

Tabel 9.7 Perbandingan Akurasi Model Pada Set Pengujian (Hari: 46–60) Relatif Terhadap Model MLP.

Model	RMSE	Δ RMSE (Peningkatan RMSE vs. MLP)
MLP	14,372.859	-
MLP BASELINE	14,030.873	2.6%
AUTOML NN	2,227.093	84.5%
AUTOML ALL	2,802.111	80.6%

Hasil eksperimen mengkonfirmasi bahwa jaringan MLP yang dikonfigurasi secara manual – direkonstruksi sesuai dengan Eksperimen 5 oleh Ferreira dan kawan-kawan – mencapai akurasi yang hampir identik dengan yang dilaporkan dalam publikasi asli (RMSE = 14.030,873 vs. 14.372,859; MAE = 11.278,363 vs. 10.485,800). Hal ini memvalidasi kebenaran replikasi dan memungkinkan perbandingan lebih lanjut yang andal. Penerapan prosedur H2O AutoML yang dibatasi hanya untuk NN (AUTOML NN) menghasilkan peningkatan signifikan dalam kualitas prediksi: root mean square error (RMSE) turun menjadi 2.227,093 (peningkatan 84,5% relatif terhadap aslinya), dan MAE menurun menjadi 1.478,000 (peningkatan 85,9%). Dengan kata lain, deviasi prediksi rata-rata menurun dari lebih dari 10.000 (10.485,800) menjadi sekitar 1.500 (1.478,000) pesanan per hari.

Konfigurasi model AUTOML ALL, yang juga menguji gradient-boosted trees, RFs, regresi linier, dan metode ensemble, mencapai peningkatan yang sebanding dengan MLP (RMSE = 2.802,111; MAE = 1.746,815), tetapi pada akhirnya berkinerja lebih buruk daripada model NN terbaik (AUTOML NN). Hasil ini dengan jelas menunjukkan bahwa NN yang disetel dengan baik, yang secara otomatis diidentifikasi oleh prosedur H2O AutoML yang dibatasi pada algoritma DL, menawarkan peningkatan terbesar dalam akurasi prediksi sambil mempertahankan kompleksitas model yang relatif rendah.

9.4 OPTIMASI SCM DI PERSIMPANGAN BIG DATA, AI, DAN AUTOML

Analisis yang dilakukan menunjukkan bahwa konsep optimasi rantai pasokan berbasis data muncul di persimpangan antara kumpulan BD multi-sumber, algoritma AI, dan alat AutoML yang mampu secara otomatis melatih dan menyetel berbagai macam model. Pemantauan literatur dan laporan dari tahun 2015 hingga 2025 menunjukkan bahwa penggunaan data real-time – mulai dari peramalan permintaan, melalui manajemen persediaan, hingga pengurangan emisi Scope 3 – menjadi keharusan utama untuk meningkatkan efisiensi biaya, kelincahan, dan keberlanjutan dalam rantai pasokan. Pada saat yang sama, beberapa kesenjangan pembelajaran tetap terlihat, termasuk keterbatasan kemampuan menjelaskan model ML mendalam dan relatif sedikitnya studi tentang DT generatif di bidang SCM.

Nilai praktis bab ini diperkuat oleh studi kasus berdasarkan dataset publik Daily Demand Forecasting Orders. Penerapan H2O AutoML memungkinkan pelatihan otomatis berbagai model di berbagai algoritma pembelajaran dalam jangka waktu satu jam, menghasilkan pengurangan RMSE dari hampir 14.400 pesanan untuk model MLP yang disetel

secara manual menjadi sekitar 2.230 pesanan, dan penurunan MAE dari sekitar 10.500 menjadi sekitar 1.480 pesanan. RMSE sebesar 14.000–15.000 pesanan pada model yang dikonfigurasi secara manual (MLP/MLP BASELINE) relatif kecil dari perspektif operasional dan dapat dianggap dapat diterima. Namun, dalam kasus model AUTO NN, kesalahan sekitar 2.230 pesanan berarti bahwa perkiraan tersebut sesuai dengan permintaan aktual dengan presisi yang mencapai ribuan pesanan individual, melampaui ambang batas akurasi perencanaan yang dibutuhkan untuk sebagian besar pusat logistik besar (seperti yang diteliti di sini, yang menangani sekitar 400.000 paket per hari).

Temuan ini menegaskan bahwa solusi low-code/AutoML dapat menghasilkan model yang sangat akurat dalam jangka waktu singkat, bahkan di organisasi dengan kapasitas ilmu data yang terbatas, asalkan kualitas data masukan dikontrol dengan baik. Singkatnya, pemilihan model otomatis terbukti lebih efektif daripada MLP yang disetel secara manual. Studi ini didasarkan pada data dari satu pusat logistik, menggunakan deret waktu 60 hari dan terbatas pada fase peramalan. Oleh karena itu, generalisasi hasil harus didekati dengan hati-hati. Pembelajaran selanjutnya harus memperluas analisis ke kumpulan data multi-sektor yang lebih panjang dan mengeksplorasi arsitektur neuro-simbolik yang dapat dijelaskan yang dapat mendukung interpretasi manajerial terhadap hasil dan memungkinkan pemantauan tujuan pembangunan berkelanjutan yang lebih komprehensif.

BAB 10

PETA JALAN TRANSFORMASI KEBERLANJUTAN

10.1 KEBERLANJUTAN DAN METODOLOGI ROADMAP

Bab ini mengeksplorasi konsep peta jalan sebagai alat strategis yang mendukung proses transformasi organisasi menuju keberlanjutan. Bab ini dimulai dengan pengantar singkat tentang keberlanjutan dan metodologi peta jalan. Keberlanjutan dipandang sebagai proses dinamis jangka panjang yang membutuhkan perubahan sistemik dan integrasi dimensi lingkungan, sosial, dan tata kelola (ESG). Peta jalan disajikan sebagai alat yang terstruktur, fleksibel, dan berorientasi pada tujuan yang membantu organisasi mendefinisikan visi, memprioritaskan aktivitas, mengalokasikan sumber daya, mengelola risiko, dan memantau kemajuan.

Bab ini kemudian membandingkan berbagai kerangka kerja peta jalan yang diidentifikasi melalui pemantauan literatur tentang topik tersebut. Perhatian khusus diberikan pada proses pembuatan peta jalan transformasi keberlanjutan, menyoroti langkah-langkah kunci seperti penetapan visi, keterlibatan pemangku kepentingan, alokasi sumber daya, integrasi teknologi, manajemen perubahan, dan peningkatan berkelanjutan. Bab ini diakhiri dengan menekankan bahwa peta jalan bukan hanya instrumen perencanaan tetapi juga faktor penting untuk meningkatkan ketahanan dan keunggulan kompetitif, mendukung organisasi dalam bergerak menuju keberlanjutan sebagai elemen kunci dari strategi dan penciptaan nilai mereka.

Bab ini membahas isu “peta jalan transformasi keberlanjutan”, yang saat ini memainkan peran penting dalam mencapai tujuan yang dihasilkan dari kebijakan lingkungan yang diadopsi, tujuan pembangunan berkelanjutan (SD), tekanan ESG, atau akuntabilitas perusahaan. Keberlanjutan mengacu pada kualitas yang memungkinkan suatu tindakan untuk berlanjut dalam jangka waktu tertentu. Selain itu, terkait isu lingkungan, “keberlanjutan” berarti karakteristik yang menyebabkan aktivitas manusia menimbulkan sedikit atau tidak ada kerusakan pada lingkungan alam. Namun, hal ini juga didefinisikan sebagai tujuan jangka panjang, dengan asumsi pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan dengan dampak serendah mungkin terhadap lingkungan, atau memastikan pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan, dengan mempertimbangkan kerja sama yang harmonis antar masyarakat, dan sedemikian rupa sehingga generasi mendatang juga dapat menggunakan sumber daya alam yang diperlukan untuk bertahan hidup. Definisi yang disebutkan di atas menunjukkan bahwa ini adalah konsep yang sangat kompleks dan memakan waktu, karena implementasinya membutuhkan pengambilan keputusan yang akan mempertimbangkan kebutuhan generasi mendatang. Garis waktu ini berarti bahwa keberlanjutan harus dipandang sebagai transformasi berkelanjutan – memiliki tujuan yang jelas dan berupaya untuk mencapainya, dengan kesadaran bahwa banyak kejutan mungkin ditemui di sepanjang jalan, sehingga memengaruhi tingkat pencapaiannya. Masyarakat dan ekonomi harus bertransformasi dari keadaan mereka saat ini yang tidak berkelanjutan menuju jalur pembangunan berkelanjutan

dan ketahanan (Gambar 10.1), melalui pendekatan terintegrasi yang mempertimbangkan semua tujuan keberlanjutan, memanfaatkan sinergi dan manfaatnya sambil mengurangi dampak negatifnya.



Gambar 10.1 Proses Transformasi Keberlanjutan

Tantangan keberlanjutan dapat didefinisikan sebagai kesenjangan antara keadaan tidak berkelanjutan saat ini dan keadaan berkelanjutan yang diinginkan, memungkinkan pemahaman yang lebih baik dari perspektif sistem secara keseluruhan. Transformasi itu sendiri adalah proses perpindahan dari keadaan tidak berkelanjutan saat ini ke keadaan yang diinginkan, selaras dengan visi kolektif tentang keadaan sistem masa depan yang akan menjadi berkelanjutan. Oleh karena itu, transformasi keberlanjutan adalah proses yang berevolusi, beradaptasi dengan keadaan dan tantangan yang muncul tetapi berupaya untuk satu hal: mencapai tujuan utama.

Sejak tahun 1970-an, pembuatan peta jalan telah banyak digunakan untuk mendukung perencanaan teknologi dan produk karena fleksibilitas dan kemampuan adaptasinya. Peta jalan didefinisikan sebagai rencana terperinci yang bertujuan untuk memandu kemajuan menuju suatu tujuan. Tujuan dari roadmap adalah untuk memandu perusahaan dalam mencapai tujuan mereka dengan mendefinisikan serangkaian langkah yang harus diambil. Roadmap memandu perusahaan menuju tujuan dan mengidentifikasi pilihan yang mungkin. Dalam hal ini, roadmap adalah alat yang menyederhanakan dan memberikan arahan untuk proses pengambilan keputusan, sekaligus memungkinkan identifikasi potensi risiko, menunjukkan peluang untuk meminimalkannya, menerapkan perbaikan, dan pelaporan dari waktu ke waktu. Roadmap keberlanjutan adalah visi dan strategi praktis untuk mencapai tujuan jangka panjang. Roadmap adalah alat yang berguna yang digunakan oleh manajer untuk menetapkan prioritas utama, menetapkan tujuan yang jelas, dan mendefinisikan rencana tindakan untuk membantu organisasi menerapkan strategi mereka. Dalam literatur, terdapat banyak jenis peta jalan yang, dengan mempertimbangkan Pembangunan Berkelanjutan (SDG), disajikan sebagai metode untuk mendukung pengambilan keputusan dalam mencapai keberlanjutan yang lebih besar dengan mendefinisikan langkah-langkah transformasi organisasi menuju keberlanjutan.

Peta jalan kini menjadi alat utama, menawarkan cara yang terstruktur dan transparan untuk beradaptasi dengan perubahan dari waktu ke waktu. Peta jalan juga memungkinkan antisipasi tantangan di masa depan, koordinasi proses individual, dan manajemen risiko proaktif. Dengan mengintegrasikan strategi, tantangan saat ini, dan perencanaan sumber daya, peta jalan membantu mereka yang bertanggung jawab untuk mencapai Tujuan Pembangunan

Berkelanjutan (SDG) untuk menciptakan rencana yang koheren dan dapat dicapai. Peta jalan juga menyediakan alat untuk mendukung komunikasi dan koherensi antara berbagai pemangku kepentingan, secara visual menguraikan jalur dari peluang saat ini ke tujuan masa depan. Dalam menghadapi tekanan yang meningkat untuk mencapai tujuan SDG, peta jalan tidak hanya berfungsi sebagai alat perencanaan tetapi juga sebagai instrumen strategis untuk menghadapi kompleksitas dan ketidakpastian.

10.2 TRANSFORMASI KEBERLANJUTAN

Agar organisasi berhasil menerapkan proses transformasi keberlanjutan, mereka harus secara bersamaan memasukkan aspek lingkungan, sosial, dan tata kelola perusahaan (ESG) ke dalam operasi mereka. Hal ini saja akan menjamin keberhasilan penuh dari proses yang diimplementasikan, yang akan berbentuk tindakan berikut:

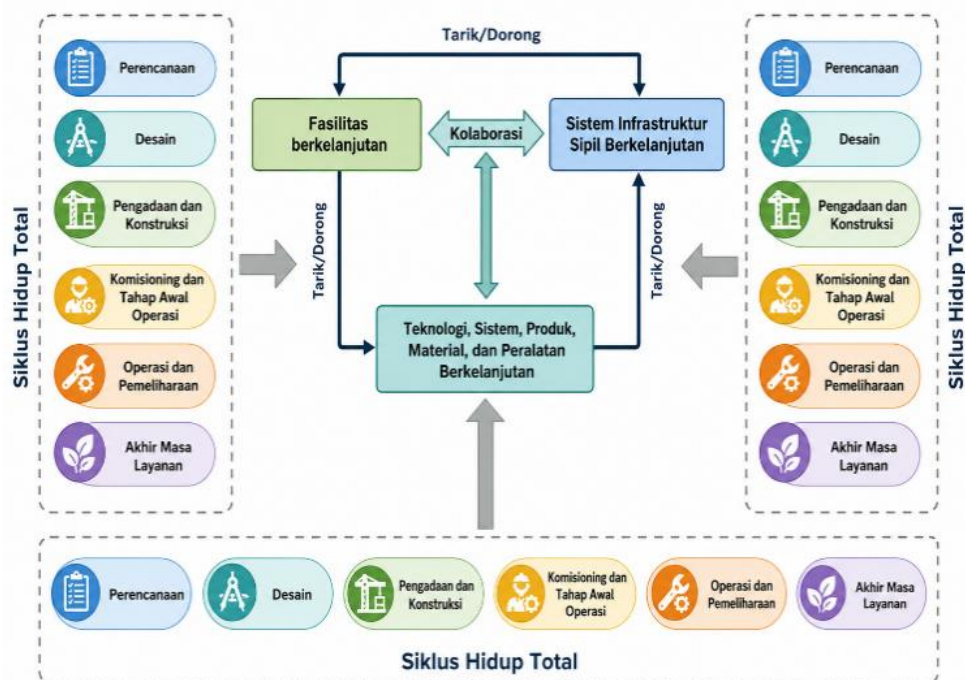
1. Mengembangkan strategi keberlanjutan tujuan tunggal: aktivitas ini harus melibatkan organisasi yang mengembangkan strategi berdasarkan asumsi bahwa keberlanjutan adalah sumber keunggulan kompetitif berkelanjutan. Strategi ini harus selaras dengan tujuan organisasi, berfokus pada penciptaan nilai jangka panjang dan didukung oleh manajemen.
2. Menangkap nilai bisnis: organisasi yang mencapai skor ESG yang kuat seringkali mengungguli pesaing mereka secara finansial. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengembangkan rencana bisnis yang solid yang mempertimbangkan berbagai sumber nilai, seperti peningkatan loyalitas pelanggan, premi harga, ekspansi pasar, penghematan operasional, peningkatan akses ke bahan baku dan modal, serta pengurangan risiko.
3. Menciptakan perusahaan yang berkelanjutan: organisasi saat ini mendapat manfaat dari investasi publik dan swasta besar-besaran yang memungkinkan transformasi yang berfokus pada penciptaan ekonomi tanpa emisi.
4. Mengadopsi keberlanjutan sebagai aktivitas bisnis inti merupakan syarat mutlak bagi suatu organisasi untuk berupaya menjadi pemimpin dalam pembangunan berkelanjutan. Hal ini mengharuskan organisasi untuk menilai portofolio dan operasinya secara sistematis. Mereka dapat berupaya untuk mencapai transparansi penuh dalam rantai pasokan mereka dan menggunakan teknologi modern (misalnya, AI) untuk memantau dan mengurangi emisi CO₂.
5. Membangun kapasitas untuk bertindak: untuk memastikan efektivitas proses transformasi keberlanjutan, organisasi harus menyediakan kompetensi dan fondasi yang sesuai.
6. Mengambil kendali atas narasi organisasi dan melibatkan investor dan pemangku kepentingan: organisasi yang menjadi pemimpin dalam pembangunan berkelanjutan harus menciptakan narasi ESG yang koheren dan khas, yang selaras dengan misi dan strategi mereka. Mereka harus terus mengkomunikasikan narasi ini kepada para pemangku kepentingan mereka, termasuk prioritas utama, tujuan dan inisiatif, keselarasan dengan strategi, dan sistem yang kredibel untuk mengukur dan

mengungkapkan kinerja ESG. Hal ini mendorong dialog berkelanjutan dengan para pemangku kepentingan – terutama pemangku kepentingan aktif – dan melibatkan pelanggan, karyawan, dan komunitas, karena merekalah yang mendorong penciptaan nilai.

10.3 STRUKTUR PETA JALAN KEBERLANJUTAN

Popularitas pendekatan ini telah mendorong para ilmuwan yang bekerja pada isu ini untuk mengusulkan berbagai struktur. Vanegas mengusulkan peta jalan enam langkah untuk lingkungan binaan yang berkelanjutan, termasuk langkah-langkah berikut: (1) Perencanaan; (2) Desain; (3) Pengadaan dan konstruksi; (4) Komisioning dan pengoperasian awal; (5) Operasi dan pemeliharaan; dan (6) Akhir masa pakai (Gambar 10.2). Gould dan Wallbank mengusulkan model 13 langkah untuk mengintegrasikan keberlanjutan ke dalam proses real estat: (1) Menetapkan tujuan; (2) Memeriksa bangunan dan mengumpulkan data; (3) Menetapkan kinerja dasar dan menetapkan target; (4) Mengidentifikasi peluang dan solusi; (5) Mengamankan ruang dan menyepakati persyaratan; (6) Menetapkan proses pengukuran dan peninjauan; (7) Menerapkan inisiatif; (8) Mengelola perubahan budaya; (9) Manajemen kinerja berkelanjutan; (10) Mengukur dan memantau kinerja; (11) Meninjau kinerja setiap tahun; (12) Melaporkan hasil; dan (13) Meninjau dan memberikan umpan balik dengan tahapan yang diulang.

Waage mengembangkan peta jalan empat langkah untuk pengembangan produk: (1) Memahami dan menetapkan konteks keberlanjutan; (2) Menjelajahi dan mendefinisikan isu-isu keberlanjutan; (3) Mendefinisikan, menyempurnakan, dan menilai; dan (4) Menerapkan dan menerima umpan balik (Gambar 10.3).



Gambar 10.2 Peta Jalan Lingkungan Berkelanjutan Yang Dibangun

Fase pertama dimulai dengan pertanyaan, “Apa masalah atau kebutuhannya?” Desain yang berfokus pada keberlanjutan dimulai dengan mundur selangkah dan bertanya, “Apa itu keberlanjutan?” Berdasarkan definisi keberlanjutan ekologis dan sosial yang ada, pertanyaan selanjutnya muncul: “Apa visi untuk produk, material, atau perusahaan yang berkelanjutan?” Dalam hal ini, mendefinisikan keberlanjutan memandu tindakan selanjutnya dan menentukan pengambilan keputusan.

Fase kedua melibatkan brainstorming cara-cara potensial untuk mencapai fungsi produk yang diinginkan dalam parameter keberlanjutan. Setelah menetapkan perspektif jangka panjang dan menghubungkannya dengan visi menyeluruh, langkah-langkah diambil untuk mendefinisikan kriteria evaluasi produk, ruang lingkup, dan alat analisis.

Fase ketiga mempertimbangkan solusi spesifik, memungkinkan fokus pada dampak keberlanjutan yang kritis sambil mempertimbangkan berbagai implikasi sistemik yang berjenjang dari perspektif sistem yang lengkap dan siklus hidup material dan proses dalam sistem ekologis dan sosial.

Pada fase keempat, metode untuk memantau, mengevaluasi, dan mengadaptasi produk dari waktu ke waktu didefinisikan untuk menilai apakah produk tersebut benar-benar menjadi lebih berkelanjutan sesuai dengan kriteria dan parameter yang telah ditentukan. Pemantauan dapat terjadi pada setiap tahap, mulai dari dampak langsung (positif dan negatif), melalui keberhasilan penyelesaian tindakan strategis, hingga penilaian kepatuhan terhadap prinsip-prinsip keberlanjutan dan visi.

Semua fase ini juga melibatkan pengambilan tindakan konkret yang pada akhirnya akan mengarah pada pengembangan peta jalan keberlanjutan untuk pengembangan produk atau layanan yang selaras dengan pembangunan berkelanjutan (Tabel 10.1).



Gambar 10.3 Peta Jalan Untuk Proses Keberlanjutan

Tabel 10.1 Tindakan Yang Diambil Pada Setiap Fase Pengembangan Peta Jalan Keberlanjutan

Fase	Tindakan
Pemahaman	- Melakukan penilaian terhadap kebijakan tanggung jawab lingkungan dan sosial perusahaan dan para pesaing; - Meninjau peraturan dan risiko yang berlaku terkait dengan produk dan proses tertentu; - Mengkarakterisasi budaya organisasi dan posisinya dalam konteks perubahan; - Mengidentifikasi bagaimana produk atau layanan bergantung pada praktik yang tidak berkelanjutan yang berdampak pada kesehatan manusia dan ekosistem; - Mengidentifikasi bagaimana produksi dan pengiriman produk atau layanan bergantung pada praktik yang tidak berkelanjutan yang berdampak pada kesehatan manusia dan ekosistem, dengan menggunakan empat kondisi sistemik.
Menjelajahi	- Mengidentifikasi keterkaitan antara kesehatan manusia, produk/fasilitas, dan dampak lingkungan; - mempertimbangkan dampak produk dalam konteks sistem sosial dan ekologis yang lebih luas di mana produk tersebut digunakan; - mengembangkan penilaian keberlanjutan produk saat ini dengan memetakan sistem dan alur produk serta mempertimbangkan semua masukan dan proses produk untuk faktor keberlanjutan.
Mendefinisikan	- Melakukan penilaian awal berbasis kriteria terhadap berbagai solusi desain potensial berdasarkan kriteria yang disarankan; - Melakukan analisis strategis terhadap berbagai pilihan material dan desain, menggunakan alat yang sesuai; - Menggunakan berbagai sumber dan alat informasi, termasuk informasi dan data kualitatif dan kuantitatif yang relevan dengan keberlanjutan; - Mempertimbangkan temuan dalam konteks keberlanjutan yang lebih luas yang dikembangkan pada fase sebelumnya.

Mengimplementasikan	- Memantau dampak aktual dari produk; - Mengidentifikasi aktivitas yang perlu diubah; - Menciptakan mekanisme pembelajaran organisasi untuk memanfaatkan pengetahuan baru dalam proyek-proyek mendatang.
---------------------	--

Duarte dan rekan-rekan menyajikan proses tujuh langkah yang disesuaikan dengan kebutuhan UKM:

(1) Perencanaan dan pengorganisasian; (2) Penilaian lingkungan; (3) Curah pendapat; (4) Evaluasi kelayakan opsi CP; (5) Pengembangan rencana aksi; (6) Implementasi; dan (7) Evaluasi hasil, dengan tahapan yang diulang (Gambar 10.4).



Gambar 10.4 Fase-Fase Roadmap

Roadmap keberlanjutan yang mereka kembangkan ditujukan untuk usaha kecil dan menengah (UKM), memberikan mereka pengetahuan tentang cara mengimplementasikan keberlanjutan ke dalam operasi mereka. Salah satu pendekatan tersebut adalah memperkenalkan pengetahuan baru dan meningkatkan potensi inovasi dengan mengembangkan keterampilan baru, kemampuan pembelajaran dan pengembangan, serta berpartisipasi dalam kemitraan dengan lembaga ilmiah dan teknologi.

Nidumolu dan rekan-rekan menjelaskan lima tahapan di mana perusahaan memperoleh keunggulan kompetitif melalui keberlanjutan:

1. Memandang kepatuhan sebagai peluang: meskipun tergoda untuk mematuhi standar lingkungan terendah selama mungkin, lebih bijaksana untuk mematuhi peraturan yang paling ketat sebelum peraturan tersebut diperkenalkan, karena ini akan memberi organisasi Anda keunggulan sebagai pelopor yang signifikan dalam memenuhi standar yang ketat.

2. Membuat rantai nilai berkelanjutan: seiring perusahaan belajar untuk mengikuti peraturan, mereka juga menjadi lebih proaktif dalam masalah lingkungan. Banyak yang berfokus pada pengurangan penggunaan sumber daya tak terbarukan, seperti batu bara, minyak, dan gas alam, serta sumber daya terbarukan, seperti air dan kayu. Selain itu, dorongan untuk efisiensi meluas dari pabrik produksi dan kantor hingga seluruh rantai nilai. Meskipun tujuan awalnya biasanya untuk meningkatkan citra, sebagian besar perusahaan pada akhirnya mengurangi biaya atau menciptakan bisnis baru.
3. Merancang produk dan layanan berkelanjutan: pada tahap ini, perusahaan menyadari bahwa sejumlah besar konsumen memilih produk ramah lingkungan, yang memungkinkan perusahaan untuk unggul dari pesaing dengan menjadi pemimpin dalam desain produk yang ada atau mengembangkan produk baru.
4. Mengembangkan model bisnis baru: mengembangkan model bisnis baru membutuhkan eksplorasi alternatif terhadap cara berbisnis saat ini dan memahami bagaimana memenuhi kebutuhan dan harapan pelanggan secara berbeda. Pada titik ini, para eksekutif harus belajar untuk mempertanyakan model yang ada dan bertindak secara kewirausahaan untuk mengembangkan mekanisme baru. Seiring perusahaan menjadi lebih mahir dalam mengembangkan model bisnis baru, pengalaman yang diperolehnya akan membawanya ke tahap akhir inovasi berkelanjutan, di mana dampak produk atau proses baru meluas melampaui satu pasar.
5. Pengembangan rencana aksi: implementasi model bisnis baru juga memerlukan pengembangan rencana aksi yang, berdasarkan pengalaman yang diperoleh, akan mempertimbangkan aspek keberlanjutan.
6. Implementasi: pada tahap ini, implementasi praktis dari tujuan dan asumsi yang diadopsi dilakukan.
7. Evaluasi dan pemantauan hasil: pada fase ini, hasil yang diperoleh dipantau, potensi gangguan diidentifikasi, dan solusi diperkenalkan untuk meminimalkan dan meningkatkan implementasi kegiatan.

Lubin dan Esty menggarisbawahi pentingnya transformasi melalui model bisnis baru:

1. Melakukan hal-hal lama dengan cara baru: tidak seperti yang lain, organisasi ini berfokus pada mengungguli para pesaingnya dalam kepatuhan terhadap peraturan dan manajemen biaya dan risiko lingkungan. Ini menunjukkan komitmennya terhadap nilai-nilai lingkungan.
2. Melakukan hal-hal baru dengan cara baru: pada tahap ini, organisasi secara ekstensif mendesain ulang produk, proses, dan seluruh sistemnya untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya alam dan manajemen risiko dalam rantai nilainya.
3. Transformasi bisnis inti: seiring dengan implementasi kegiatan, inovasi keberlanjutan menjadi sumber pendapatan dan pertumbuhan baru bagi seluruh organisasi.
4. Penciptaan dan diferensiasi model bisnis baru: sumber ini pada akhirnya merupakan diferensiasi dalam model bisnis, merek, keterlibatan karyawan, dan faktor-faktor tak berwujud lainnya yang secara fundamental mengubah posisi perusahaan di pasar dan dalam kaitannya dengan persaingan.

Memperoleh keunggulan bukan hanya soal visi tetapi juga eksekusi di lima area kunci: kepemimpinan, metode, strategi, manajemen, dan pelaporan. Di setiap area ini, sebuah organisasi harus beralih dari pendekatan taktis, ad hoc, dan terkotak-kotak ke pendekatan strategis, sistematis, dan terintegrasi. Terakhir, Ahmed dan Sundaram mengusulkan peta jalan lima langkah yang menghubungkan strategi pelaporan bisnis, TI, dan keberlanjutan: (1) Temukan dan pelajari; (2) Susun strategi; (3) Rancang; (4) Transformasi; dan (5) Pantau dan Kendalikan, dengan tahapan yang diulang (Gambar 10.5).



Gambar 10.5 Peta Jalan Transformasi Bisnis Berkelanjutan

Peta jalan di atas terutama berfungsi sebagai panduan prosedural untuk membantu pengambil keputusan mengimplementasikan konsep keberlanjutan ke dalam bisnis tradisional dan mengembangkan model bisnis baru yang berkelanjutan. Peta jalan ini mempertimbangkan interaksi strategi bisnis, strategi TI, infrastruktur organisasi, dan sistem TI, yang dipandang sebagai pedoman untuk mengusulkan peta jalan keberlanjutan di atas. Seperti yang ditunjukkan Gambar 10.5, terdapat serangkaian tahapan yang telah ditentukan. Tahap pertama melibatkan identifikasi perkembangan yang tidak berkelanjutan dalam organisasi, yang memungkinkan pengembangan visi untuk mencapai pembangunan berkelanjutan. Visi ini harus diwujudkan melalui satu atau lebih strategi, dengan memeriksa berbagai skenario keberlanjutan dan memutuskan strategi yang paling sesuai dengan organisasi. Langkah selanjutnya melibatkan perancangan proses, elemen organisasi, dan teknologi yang akan memungkinkan organisasi untuk mengimplementasikan strategi yang diadopsi. Proses tersebut kemudian diimplementasikan melalui transformasi organisasi, yang mencakup proses, struktur organisasi, dan sistem TI. Transformasi bukanlah peristiwa sekali waktu, melainkan proses peningkatan berkelanjutan yang memungkinkan organisasi untuk menjadi semakin berkelanjutan. Hal ini menyiratkan perlunya pemantauan dan pengendalian berkelanjutan terhadap organisasi secara keseluruhan. Pemantauan dan pengendalian memungkinkan penemuan dan pembelajaran berkelanjutan tentang organisasi, yang pada gilirannya dapat mengarah pada perumusan ulang strategi keberlanjutan, perancangan ulang, dan transformasi berkelanjutan organisasi menjadi organisasi yang berkelanjutan.

Tentu saja, contoh-contoh struktur peta jalan keberlanjutan di atas tidak sepenuhnya mencakup topik ini, karena literatur memuat banyak proposal untuk peta jalan keberlanjutan, misalnya, yang dikembangkan untuk industri makanan atau mode. Namun, peta jalan keberlanjutan adalah alat yang banyak digunakan oleh organisasi yang ingin beroperasi sesuai dengan prinsip-prinsip pembangunan berkelanjutan.

10.4 PRINSIP DASAR PETA JALAN KEBERLANJUTAN

Agar proses transformasi berkelanjutan berhasil, sangat penting untuk mengembangkan peta jalan yang terstruktur dan seimbang yang selaras dengan tujuan strategis jangka panjang organisasi. Peta jalan tersebut menyediakan kerangka kerja yang jelas untuk perencanaan, implementasi, dan pemantauan, memastikan bahwa aktivitas transformasi bersifat sistematis, terukur, dan dapat beradaptasi dengan kondisi pasar yang terus berubah. Proses pembuatan peta jalan transformasi keberlanjutan itu kompleks dan melibatkan banyak tahapan. Beberapa pendekatan yang mengidentifikasi tahapan-tahapan pengembangannya dapat ditemukan dalam literatur. Dalam pendekatan yang dijelaskan di bawah ini, proses pembuatan peta jalan transformasi keberlanjutan mencakup delapan tahapan, termasuk:

1. Mendefinisikan visi dan tujuan organisasi: meskipun visi harus sepenuhnya selaras dengan tujuan strategis organisasi, hal ini juga memerlukan identifikasi area-area kunci bisnis yang membutuhkan transformasi, seperti inovasi digital, efisiensi operasional, dan pengalaman pelanggan. Pada tahap ini, sangat penting juga untuk memastikan keselarasan penuh antara manajemen dan pemangku kepentingan dengan prioritas transformasi.
2. Melakukan penilaian komprehensif untuk menganalisis kondisi organisasi saat ini, termasuk kekuatan, kelemahan, dan area yang perlu ditingkatkan. Analisis kesenjangan akan sangat membantu pada tahap ini untuk mengidentifikasi perubahan yang dibutuhkan dalam teknologi, proses, keterampilan, dan kompetensi. Pada tahap ini, organisasi juga harus mengumpulkan semua masukan mengenai kebutuhan transformasi dari karyawan, pelanggan, dan mitra.
3. Mengembangkan rencana implementasi untuk seluruh proses: tahap ini harus dimulai dengan membagi seluruh proses menjadi fase-fase yang dapat dikelola dengan tonggak pencapaian yang jelas. Tujuan jangka pendek, menengah, dan panjang harus ditentukan pada tahap ini untuk memastikan kemajuan yang berkelanjutan. Selain itu, strategi harus dikembangkan untuk mengurangi risiko yang timbul dari potensi tantangan.
4. Alokasi sumber daya dan keuangan yang efektif: pertama-tama, sumber daya keuangan, teknologi, dan manusia yang dibutuhkan untuk setiap tahap transformasi harus diidentifikasi. Alokasi anggaran juga harus dioptimalkan untuk memprioritaskan inisiatif yang berdampak tinggi. Kemitraan dan keahlian eksternal sangat berharga di sini, karena dapat berkontribusi pada peningkatan efektivitas kegiatan yang sedang berlangsung.

5. Berinvestasi pada teknologi dan alat yang tepat, termasuk menerapkan solusi digital yang meningkatkan efisiensi operasional dan keterlibatan pelanggan, juga sangat penting. Penting juga untuk memastikan integrasi yang mulus dari teknologi baru dengan proses bisnis yang ada dan untuk memastikan sumber daya keamanan siber dan perlindungan data yang memadai untuk melindungi aset digital organisasi.
 6. Fokus pada manajemen perubahan dan keterlibatan karyawan dengan menerapkan program pelatihan untuk meningkatkan keterampilan karyawan dan mempersiapkan mereka untuk transformasi. Penting juga untuk menumbuhkan budaya inovasi, adaptabilitas, dan pembelajaran berkelanjutan serta mengkomunikasikan tujuan transformasi secara jelas untuk meminimalkan resistensi karyawan dan mendorong partisipasi mereka dalam seluruh proses.
 7. Tetapkan indikator kinerja utama (KPI) dan mekanisme pemantauan, dimulai dengan mendefinisikan kriteria keberhasilan yang terukur untuk melacak kemajuan transformasi. Hal ini harus memanfaatkan analitik data untuk menghasilkan wawasan secara real-time, mengoptimalkan proses pengambilan keputusan, dan melakukan pemantauan serta penyesuaian secara berkala, memastikan peta jalan selaras dengan kebutuhan bisnis organisasi saat ini.
 8. Memastikan peningkatan berkelanjutan dan keberlanjutan dengan memfokuskan organisasi pada inovasi berkelanjutan untuk mempertahankan kelincahan dan daya saingnya. Berdasarkan umpan balik dan tren pasar, menilai kembali operasi dan menerapkan perubahan untuk menyempurnakan strategi organisasi. Mengembangkan rencana kontingensi untuk mengatasi gangguan yang tidak terduga dan memastikan ketahanan jangka panjang terhadap lingkungan yang selalu berubah.
- Dalam pendekatan lain, proses pembuatan peta jalan transformasi keberlanjutan melibatkan enam tahapan, dimulai dengan:
1. Melibatkan manajemen, karena pengembangan peta jalan transformasi keberlanjutan harus dimulai dengan mengamankan dukungan manajemen puncak. Seperti yang ditunjukkan oleh pengalaman perusahaan, keterlibatan dan dukungan merekalah yang menentukan efektivitas seluruh proses. Selain itu, manajemen menetapkan arah dan kecepatan perubahan, jadi sebelum memulai, penting untuk memastikan mereka secara aktif mendukung seluruh proses.
 2. Tetapkan tujuan jangka pendek dan jangka panjang, pastikan tujuan tersebut selaras dengan misi dan visi organisasi. Pada tahap ini, sangat penting untuk melibatkan semua pemangku kepentingan karyawan, pelanggan, dan investor. Ada baiknya juga melakukan audit atau analisis kekuatan, kelemahan, peluang, dan ancaman (SWOT) untuk mengidentifikasi area yang perlu diperbaiki.
 3. Tetapkan KPI yang secara terukur melacak kemajuan. Selanjutnya, menganalisis hasilnya akan memungkinkan penetapan tolok ukur dan pelacakan perubahan dari waktu ke waktu.
 4. Kembangkan rencana aksi yang mencakup program dan inisiatif yang akan mengurangi dampak negatif operasi organisasi terhadap lingkungan misalnya, investasi dalam

sumber energi terbarukan, pengurangan limbah, atau rantai pasokan yang lebih berkelanjutan. Prioritaskan tindakan yang akan menghasilkan hasil yang paling luar biasa, dan draf rencana itu sendiri harus dikonsultasikan dengan pemangku kepentingan utama dan diperbarui secara berkala.

5. Komunikasikan dan laksanakan peta jalan yang telah dikembangkan: implementasi strategi membutuhkan pengembangan jadwal implementasi, pelaporan kemajuan, dan komunikasi berkelanjutan dengan pemangku kepentingan. Mengkomunikasikan tujuan, aktivitas, dan hasil meningkatkan transparansi dan membangun kepercayaan mereka terhadap aktivitas organisasi.
6. Memantau dan menilai kemajuan: penilaian berkala memungkinkan organisasi untuk memenuhi komitmen ESG-nya dan mengidentifikasi peluang lebih lanjut untuk perbaikan.

Untuk mencapai keberhasilan dalam mengimplementasikan peta jalan transformasi keberlanjutan, ada baiknya mengingat beberapa hal: perlu untuk memastikan keterlibatan penuh staf manajemen untuk mendapatkan dukungan mereka dan rasa tanggung jawab atas tindakan yang diimplementasikan; Mendorong kerja sama antar departemen atau divisi dalam organisasi; menetapkan tujuan SMART (spesifik, terukur, dapat dicapai, realistis, dan berbasis waktu) dan secara teratur memantau kemajuan implementasinya; menggunakan data real-time yang tersedia untuk melakukan analisis yang memungkinkan pengambilan keputusan yang tepat; memprioritaskan tindakan berdasarkan kelayakan dan potensi dampaknya; menekankan hasil yang dicapai dan tonggak pencapaian yang telah diselesaikan, yang berarti mempertahankan komitmen dan membangun kesadaran; dan tetap fleksibel dan mudah beradaptasi, yaitu terbuka terhadap kebutuhan untuk memperbarui peta jalan yang telah dikembangkan agar sesuai dengan perubahan keadaan internal dan eksternal.

10.5 ROADMAP SEBAGAI PILAR TRANSFORMASI BERKELANJUTAN

Saat ini, pengembangan peta jalan transformasi keberlanjutan merupakan tonggak penting dalam proses transformasi bisnis seluruh organisasi. Pengembangan dan implementasinya merupakan langkah kunci bagi setiap organisasi yang berupaya mengurangi dampak lingkungan dan membangun masa depan yang lebih berkelanjutan. Hanya dengan mendefinisikan tujuan secara jelas, mengembangkan rencana implementasi bertahap, mengalokasikan sumber daya secara efektif, dan memastikan peningkatan berkelanjutan, transformasi bisnis yang sukses dapat dicapai sejalan dengan keberlanjutan. Penting juga untuk diingat bahwa keberlanjutan bukanlah upaya sekali saja, ini adalah perjalanan berkelanjutan yang membutuhkan komitmen, kolaborasi, dan akuntabilitas.

Roadmap yang dikembangkan, diimplementasikan, dan dieksekusi dengan baik tidak hanya akan meningkatkan efisiensi operasional organisasi tetapi juga memungkinkan pertumbuhan berkelanjutannya dalam lingkungan di mana keberlanjutan memainkan peran yang semakin penting. Perlu juga dicatat bahwa roadmap transformasi keberlanjutan akan berkontribusi pada transformasi organisasi menjadi perusahaan yang sepenuhnya

berkelanjutan, yang mampu memainkan peran kunci dalam membangun masa depan yang lebih berkelanjutan bagi semua.

BAB 11

REDESAIN RANTAI PASOKAN CERDAS & BERKELANJUTAN

11.1 KETAHANAN RANTAI PASOKAN DI ERA GEJOLAK GLOBAL

Rantai pasokan yang tangguh sangat penting di tengah gejolak global, termasuk pandemi dan konflik geopolitik. Desain ulang jaringan dan nearshoring telah menjadi taktik kunci dalam pergeseran yang lebih besar menuju rantai pasokan generasi berikutnya, terutama mengingat persyaratan otomatisasi, kecerdasan buatan (AI), dan keberlanjutan. Produksi dan pengadaan semakin mendekati pasar akhir melalui proses yang dikenal sebagai "*nearshoring*", yang mengurangi ketergantungan pada rantai pasokan internasional yang panjang dan tidak stabil serta mendorong fleksibilitas dan waktu reaksi yang lebih besar. Mengonfigurasi ulang simpul dan aliran rantai pasokan secara strategis untuk memaksimalkan efisiensi, mengurangi risiko, dan mencapai tujuan keberlanjutan merupakan aspek bersamaan dari desain ulang jaringan. Untuk memfasilitasi pengambilan keputusan dinamis dalam desain jaringan, visibilitas waktu nyata dan kemampuan prediktif dimungkinkan oleh integrasi AI dan analitik canggih. Meskipun langkah-langkah berkelanjutan, seperti mengurangi emisi karbon dan menerapkan logistik sirkular, semakin penting bagi harapan pemangku kepentingan dan kepatuhan regulasi, otomatisasi menyederhanakan proses, menurunkan biaya, dan meningkatkan konsistensi. Teknologi dan geografi strategis bekerja sama untuk membantu organisasi menyeimbangkan kembali ketahanan dan efisiensi.

Bab ini menyelidiki bagaimana desain ulang jaringan dan nearshoring menjadi fasilitator proaktif untuk operasi yang fleksibel, cerdas, dan berkelanjutan, serta solusi untuk kerentanan rantai pasokan. Kami menganalisis bagaimana perusahaan menggunakan kembaran digital, simulasi berbasis AI, dan pembelajaran mesin untuk mengoptimalkan rantai pasokan mereka sambil mematuhi prinsip-prinsip tata kelola lingkungan dan sosial (ESG) melalui studi kasus dan wawasan berbasis data. Masa depan rantai pasokan pada akhirnya bergantung pada jaringan yang berakar lokal, didukung secara digital, dan mudah beradaptasi yang mendorong daya saing jangka panjang di dunia yang berubah.

Perancangan ulang jaringan, yang mencakup reorganisasi simpul, rute, dan mitra rantai pasokan secara strategis, dan nearshoring, yang mencakup memindahkan manufaktur atau pengadaan lebih dekat ke pasar penting, adalah dua taktik yang semakin populer. Otomatisasi, kembaran digital, dan AI telah memungkinkan bisnis untuk menggabungkan efisiensi dan ketahanan, sementara tujuan keberlanjutan menyerukan penurunan limbah, emisi, dan intensitas sumber daya. Dampak nearshoring dan perancangan ulang jaringan pada rantai pasokan generasi berikutnya, yang dibantu oleh otomatisasi dan AI, diperiksa dalam bab ini. Untuk menilai dampaknya terhadap keberlanjutan, biaya, dan ketahanan, kami menggunakan pendekatan metode campuran, dengan melihat studi kasus, data industri, dan kerangka kerja simulasi.

11.2 METODE DAN BAHAN EKSPERIMENTAL

Pendekatan Pembelajaran

1. Pemantauan literatur: artikel akademis, dokumen pemerintah tentang ketahanan rantai pasokan dan nearshoring, dan laporan konsultasi dari perusahaan seperti McKinsey, Deloitte, dan BCG.
2. Analisis studi kasus: analisis tentang bagaimana perusahaan multinasional (termasuk Apple, Tesla, Unilever, dan Zara) memanfaatkan otomatisasi, konfigurasi ulang jaringan, dan nearshoring.
3. Pengumpulan data: statistik rantai pasokan Statista, Indeks Kinerja Logistik Bank Dunia, dan kumpulan data sekunder UNCTAD.
4. Pemodelan simulasi: untuk mengevaluasi arsitektur rantai pasokan offshore dan nearshore konvensional, skenario kembaran digital dikembangkan (fiktif untuk pekerjaan ini).

11.3 NEARSHORING SEBAGAI STRATEGI KETAHANAN

Di masa lalu, globalisasi rantai pasokan telah memberikan penekanan kuat pada outsourcing ke area berbiaya rendah, terutama Asia, untuk mengoptimalkan skala ekonomi dan efektivitas biaya. Namun, kerentanan paradigma ini telah terungkap oleh gangguan global seperti pandemi Covid-19, konflik antara Rusia dan Ukraina, dan meningkatnya bahaya terkait iklim. Sebagai reaksi, bisnis menggunakan nearshoring memindahkan sumber atau produksi lebih dekat ke pasar permintaan sebagai cara untuk meningkatkan ketahanan. Studi literatur ini merangkum pembelajaran ilmiah, laporan konsultan, dan contoh bisnis mengenai bagaimana nearshoring dapat meningkatkan ketahanan rantai pasokan.

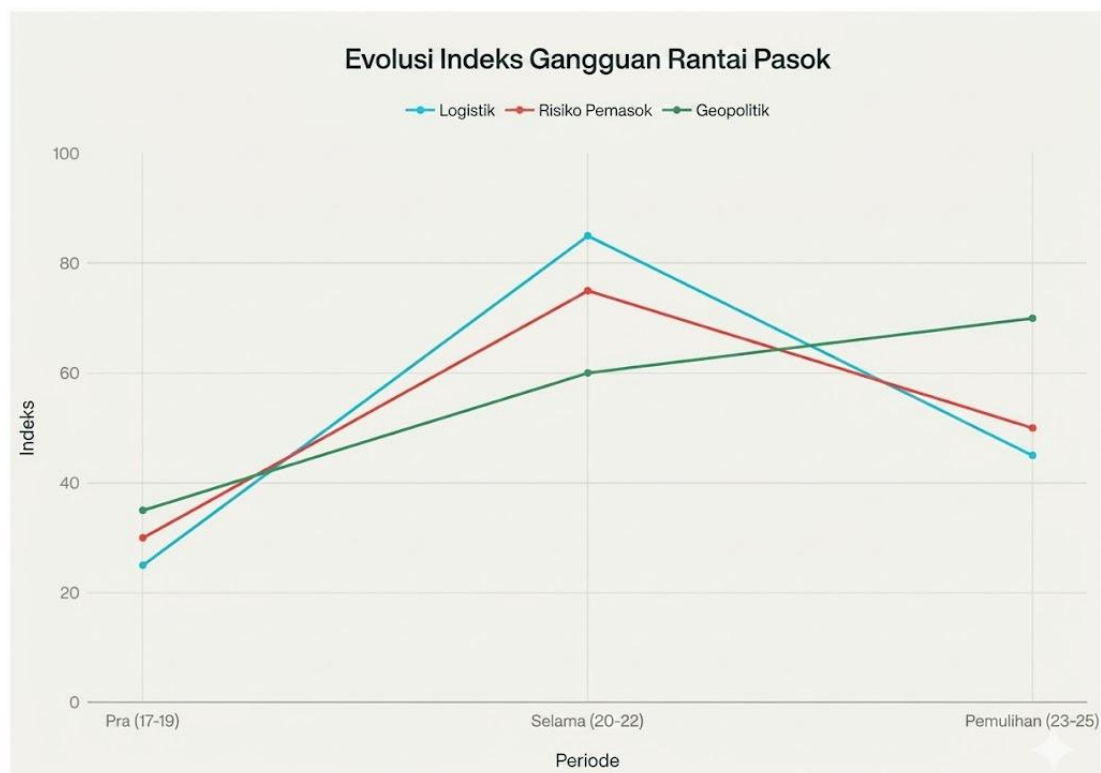
11.4 LANDASAN KONSEPTUAL NEARSHORING

Menurut Ellram dan kawan-kawan, nearshoring adalah praktik memindahkan operasi produksi atau pengadaan ke dekat lokasi, biasanya di dalam blok perdagangan yang sama. Berbeda dengan reshoring, yang melibatkan relokasi produksi kembali ke negara asal, nearshoring mempertahankan komponen produksi global sambil mengurangi jarak geografis dan sosio-politik antar simpul. Teori ini sejalan dengan ketahanan rantai pasokan, yang menyoroti kapasitas jaringan untuk bertahan, menyesuaikan diri, dan pulih dari guncangan. Baik ketahanan proaktif maupun reaktif ditawarkan oleh nearshoring, yang menurunkan paparan risiko dan mempercepat pemulihan dari gangguan.

11.5 FAKTOR PENDORONG ADOPSI NEARSHORING

1. Risiko Gangguan dan Geopolitik: pandemi telah menyoroti kerentanan rantai pasokan yang panjang yang bergantung pada penyedia lepas pantai yang merupakan sumber tunggal. Selain itu, permintaan akan keragaman regional telah meningkat karena Brexit, krisis Ukraina, dan kekhawatiran perdagangan antara Amerika Serikat dan Tiongkok.

2. Perkembangan Teknologi: perbedaan biaya tenaga kerja antara daerah dengan upah tinggi dan rendah semakin menyempit karena otomatisasi, robot, dan AI. Oleh karena itu, kedekatan dengan klien menjadi keunggulan kompetitif yang lebih penting daripada memiliki tenaga kerja murah.
3. Keberlanjutan dan Kepatuhan ESG: dengan menurunkan emisi terkait transportasi, nearshoring membantu bisnis memenuhi tujuan netralitas karbon mereka dan mematuhi hukum seperti Kesepakatan Hijau Uni Eropa.
4. Rantai Pasokan yang Berpusat pada Pelanggan: bisnis menggunakan nearshoring untuk mengurangi waktu tunggu dan meningkatkan fleksibilitas karena kebutuhan akan kustomisasi massal dan respons cepat di sektor-sektor termasuk mode, elektronik, dan farmasi.



Gambar 11.1 Evolusi Indeks Gangguan Rantai Pasokan Di Tiga Periode Waktu.

11.6 MANFAAT NEARSHORING

1. Pengurangan Waktu Tunggu: pembelajaran menunjukkan bahwa kedekatan lokasi dapat mengurangi waktu tunggu hingga 50–70%, meningkatkan daya tanggap. Misalnya, waktu pengiriman ke Amerika Serikat dipersingkat dari 30 hingga 45 hari menjadi kurang dari sepuluh hari ketika produksi pakaian dipindahkan dari Asia ke Meksiko.
2. Diversifikasi Risiko: dengan mendistribusikan kapasitas produksi di beberapa wilayah, nearshoring mengurangi hambatan pasokan dan risiko konsentrasi.

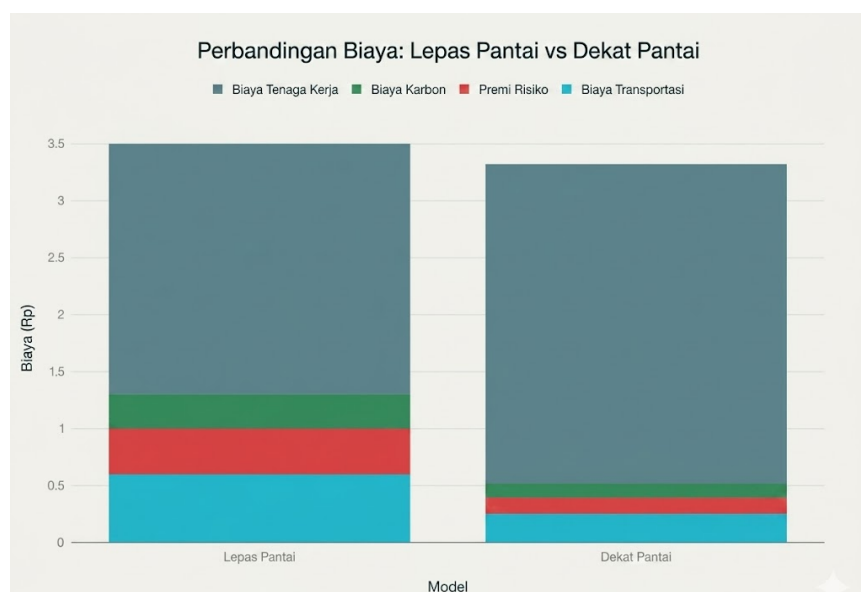
3. Pengurangan Jejak Karbon: menurut UNCTAD, nearshoring dapat menghemat emisi CO₂ per unit yang dikirim hingga 60%. Hal ini menyelaraskan rantai pasokan dengan harapan pemangku kepentingan dan tujuan lingkungan, sosial, dan tata kelola (ESG).
4. Penyelarasan Politik dan Ekonomi: dengan menurunkan risiko tarif dan menggunakan perjanjian perdagangan bebas regional, nearshoring meningkatkan perdagangan di dalam blok regional seperti Perjanjian Amerika Serikat–Meksiko–Kanada (USMCA) dan Uni Eropa (UE).

11.7 TANTANGAN DAN RISIKO NEARSHORING

1. Kompromi Biaya: nearshoring seringkali menghasilkan biaya produksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan pusat manufaktur di luar negeri, meskipun otomatisasi menurunkan arbitrase tenaga kerja. Bisnis harus menyeimbangkan antara profitabilitas dan ketahanan.
2. Keterbatasan Kapasitas: Daerah yang lebih dekat dengan pasar konsumsi mungkin tidak memiliki tingkat industri, jaringan pemasok, atau tenaga kerja berkualitas tinggi yang sama seperti di Asia.
3. Kompleksitas Transisi: Nearshoring adalah pendekatan jangka panjang dan bukan solusi sementara karena perancangan ulang jaringan dan penataan ulang pemasok memerlukan investasi besar, peningkatan infrastruktur, dan koordinasi regulasi.

Tabel 11.1 Metrik Perbandingan Model Lepas Pantai Versus Model Dekat Pantai

Parameter	Offshore (Asia ke AS)	Nearshore (Meksiko ke AS)
Waktu tunggu	30–45 hari	7–10 hari
Biaya transportasi/unit	Rp.5.000–Rp.7.000	Rp.2.000–Rp.3.500
Emisi CO ₂ /unit	3,8 kg	1,2 kg
Indeks paparan risiko	Tinggi	Sedang



Gambar 11.2 Analisis Biaya Total: Model Rantai Pasokan Lepas Pantai Versus Dekat Pantai.

11.8 STUDI KASUS INDUSTRI

1. Zara milik Inditex: berbeda dengan siklus 3–6 bulan pesaingnya di luar negeri, Zara dapat memperbarui koleksi di toko dalam 2–3 minggu berkat model nearshoring-nya di Spanyol, Portugal, dan Maroko.
2. GM atau General Motors: untuk melindungi manufaktur Amerika Utara selama pandemi, GM meningkatkan sumber nearshore-nya dari Meksiko. Terlepas dari penundaan pengiriman di seluruh dunia, ini menstabilkan produksi dan mengurangi ketergantungan pada komponen yang bersumber dari Tiongkok.
3. Grup Unilever: dengan menggunakan fasilitas manufaktur nearshore di Eropa, Unilever mampu menurunkan emisi logistik dan CO₂ rantai pasokan sebesar 33% sambil mempertahankan standar layanan.
4. Apfel: sebuah gaya hibrida antara nearshoring dan “*friend-shoring*” ke negara-negara yang memiliki hubungan politik, Apple semakin mendiversifikasi produksinya ke India dan Vietnam, meskipun masih bergantung pada China.

11.9 KONSEP VIABILITAS KEBERLANJUTAN DAN ADAPTABILITAS JANGKA PANJANG

Pandangan Berbasis Sumber Daya (*Resource-Based View/RBV*): dengan meningkatkan kelincahan dan daya tanggap rantai pasokan, yang dianggap sebagai aset tak berwujud dalam teori RBV, nearshoring membantu sumber daya strategis bisnis. Ekonomi Biaya Transaksi (*Transaction Cost Economics/TCE*): pendekatan ini membantu bisnis membuat keputusan yang lebih seimbang dengan menyeimbangkan biaya risiko offshore (seperti tarif, penundaan, dan gangguan) terhadap biaya produksi nearshore yang lebih tinggi. Ivanov memperkenalkan gagasan viabilitas, atau keberlanjutan dan adaptabilitas jangka panjang rantai pasokan, sebagai perluasan dari teori ketahanan. Dengan memasukkan keberlanjutan dan redundansi ke dalam arsitektur jaringan, nearshoring meningkatkan viabilitas.

11.10 MASA DEPAN PEMBELAJARAN NEARSHORING

Para peneliti menekankan pentingnya penggunaan kembar digital dan simulasi berbasis AI untuk menganalisis secara kuantitatif trade-off yang terkait dengan nearshoring (biaya, risiko, dan emisi). Fungsi nearshoring dalam rantai pasokan sirkular harus diteliti dalam studi masa depan, terutama di sektor yang menggunakan logistik terbalik untuk keberlanjutan. Nearshoring menjadi taktik ketahanan yang vital dalam rantai pasokan global, menyeimbangkan antara kekokohan, keberlanjutan, respons pelanggan, dan efisiensi. Meskipun masih ada hambatan yang harus diatasi, terutama di bidang biaya dan kapasitas, nearshoring menjadi semakin layak karena kemajuan teknologi dalam otomatisasi dan AI serta persyaratan peraturan untuk keberlanjutan. Bisnis berada pada posisi yang lebih baik untuk berkembang di masa inovasi yang konstan jika mereka menggabungkan nearshoring dengan kembar digital, desain ulang jaringan, dan kerangka kerja ESG.

11.11 REDESAIN JARINGAN & KEMBARAN DIGITAL

Pandemi, gangguan yang disebabkan oleh perubahan iklim, konflik geopolitik, dan pergeseran permintaan konsumen semuanya meningkatkan volatilitas jaringan pasokan global. Variabel-variabel ini sulit ditangani oleh model rantai pasokan linier tradisional, yang terutama dioptimalkan untuk biaya dan efisiensi. Untuk mencapai ketahanan, kelincahan, dan keberlanjutan, bisnis mengadopsi perancangan ulang jaringan yang dibantu oleh teknologi kembaran digital.

Perancangan Ulang Jaringan dalam Rantai Pasokan

Untuk menyeimbangkan ketahanan dan efisiensi, perancangan ulang jaringan mencakup penataan ulang aliran dan struktur simpul rantai pasokan, termasuk produsen, pemasok, gudang, pusat distribusi, dan koridor transportasi. Jaringan modern, berbeda dengan desain statis yang dioptimalkan biaya, bersifat dinamis, peka terhadap risiko, dan didorong oleh keberlanjutan. Berikut adalah kekuatan penting di balik perancangan ulang jaringan:

- Geopolitik dan Penataan Ulang: bisnis mendiversifikasi rantai pasokan mereka untuk menghindari ketergantungan semata-mata pada satu negara; misalnya, mereka dapat meninggalkan Tiongkok dan berekspansi ke Asia Tenggara, Eropa Timur, dan Amerika Latin.
- Volatilitas Permintaan: untuk merespons lebih cepat, perancangan ulang menggabungkan beberapa pusat distribusi regional.
- Keharusan keberlanjutan: bisnis didorong untuk mengoptimalkan jejak karbon daripada hanya biaya oleh pajak karbon dan aturan ESG.
- Pemberdayaan Teknologi: model prediktif dan analitik yang didukung oleh AI menentukan tempat terbaik untuk menempatkan fasilitas. Nike, misalnya, merestrukturisasi logistiknya di Eropa dengan menggabungkan fasilitas yang lebih kecil menjadi dua pusat yang sangat otomatis, yang mengurangi emisi CO₂ dan waktu tunggu pengiriman hingga 50%.

Kembaran Digital dalam Perancangan Ulang Rantai Pasokan

Rantai pasokan virtual yang diperbarui secara real-time disebut kembaran digital. Rantai pasokan menjadi lebih prediktif dan adaptif dengan mengintegrasikan data *Internet of Things* (IoT), simulasi berbasis AI, dan analitik canggih untuk mengevaluasi berbagai skenario "bagaimana jika". Fitur utama kembaran digital untuk rantai pasokan:

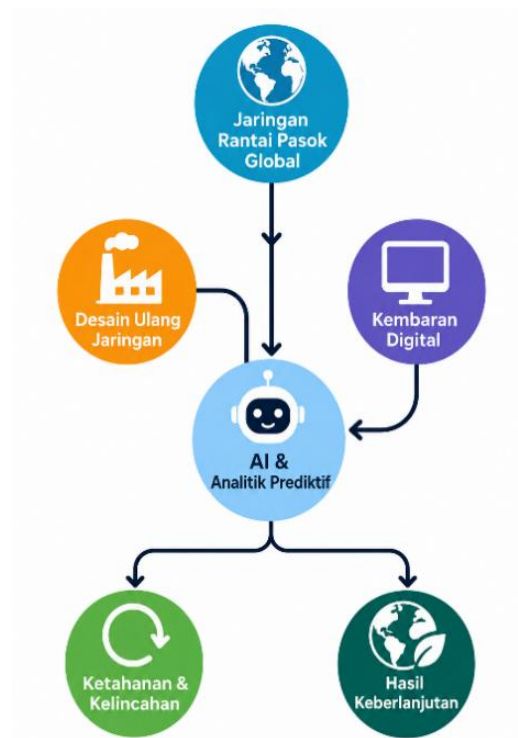
- Perusahaan menggunakan pengujian skenario untuk memodelkan efek gangguan, seperti penutupan pelabuhan, lonjakan permintaan, atau kekurangan bahan baku.
- Optimasi prediktif: algoritma pembelajaran mesin mengoptimalkan taktik pengadaan, rute transportasi, dan alokasi inventaris.
- Pemantauan real-time: sensor IoT menyediakan data real-time (suhu, tingkat inventaris, dan penundaan) kepada kembaran digital sehingga dapat disesuaikan secara terus menerus.
- Pemodelan Keberlanjutan: Pertukaran CO₂ antar moda transportasi (udara, laut, dan kereta api) dihitung menggunakan kembaran digital.

- Unilever sebagai Contoh Kasus: Perusahaan ini mensimulasikan skenario pengadaan dan transportasi menggunakan kembaran digital untuk mengoptimalkan rantai pasokan makanan di Eropa. Hal ini menghasilkan pengurangan biaya logistik sebesar 15% dan peningkatan efisiensi karbon sebesar 20%.

Sinergi: Kembaran Digital Mendorong Perancangan Ulang Jaringan

Jaringan pasokan yang digerakkan oleh data, fleksibel, dan tahan guncangan dihasilkan dengan menggabungkan kembaran digital dengan perancangan ulang jaringan.

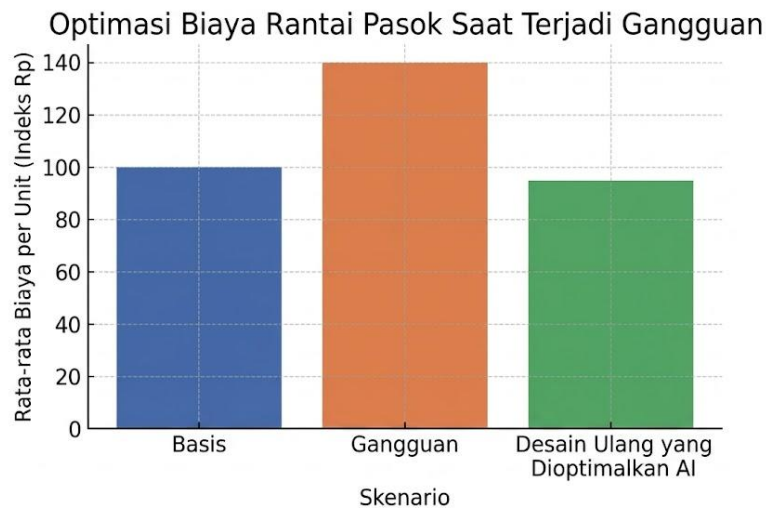
- Ketahanan Strategis: jika terjadi gangguan, bisnis dapat dengan cepat memindahkan produksi ke pemasok atau lokasi yang berbeda. Kustomisasi massal dan logistik responsif dimungkinkan oleh kelincuhan.
- Keberlanjutan: menentukan strategi distribusi dan desain fasilitas mana yang paling ramah lingkungan.



Gambar 11.3 AI & Kembaran Digital Untuk Keberlanjutan Rantai Pasok

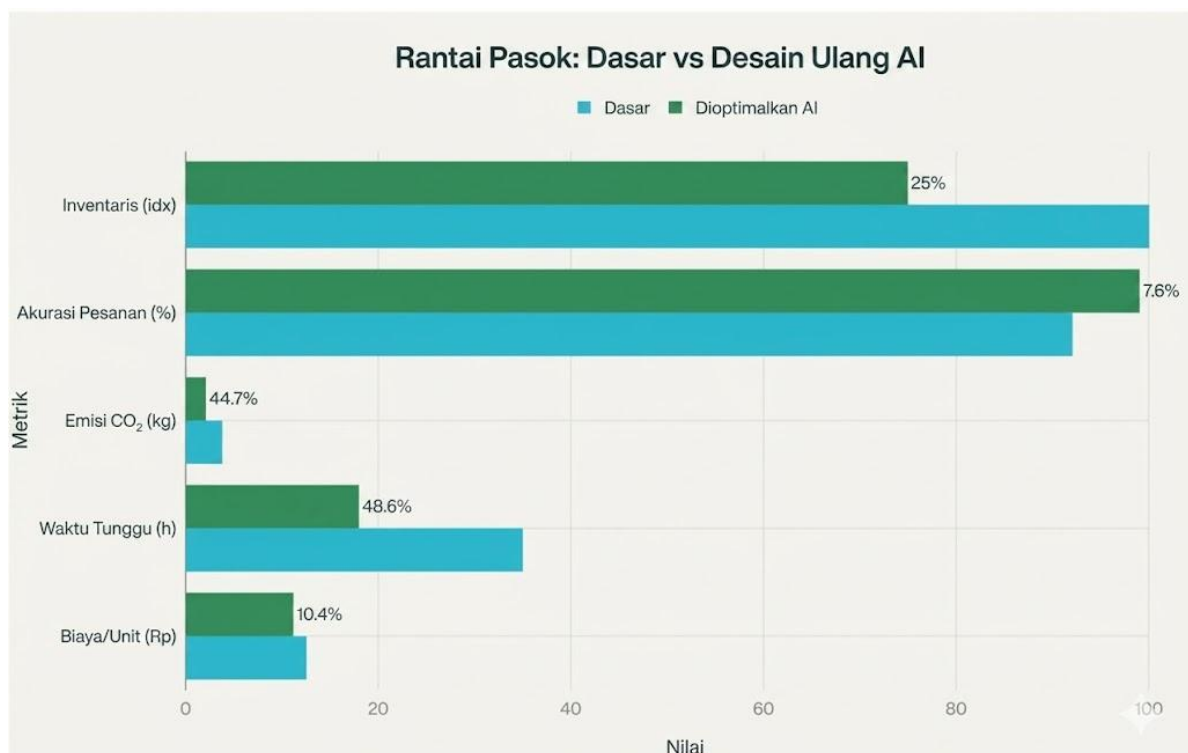
Gambar 11.4 (deskripsi):

- Sumbu X = Skenario (garis dasar, gangguan, desain ulang yang dioptimalkan AI).
- Sumbu Y = Biaya rantai pasokan rata-rata per unit (Rp).
- Grafik menunjukkan lonjakan biaya selama gangguan tetapi pengurangan biaya (5–10% lebih rendah dari garis dasar) di bawah desain ulang yang dioptimalkan AI.



Gambar 11.4. Optimalisasi Biaya Rantai Pasokan Di Bawah Gangguan.

Deskripsi: Sumbu X = Skenario (Dasar, Gangguan, Desain Ulang yang Dioptimalkan AI). Sumbu Y = Biaya rantai pasokan rata-rata per unit (Rp). Ini menunjukkan stabilitas dasar, lonjakan biaya selama gangguan, dan pengurangan biaya (5–10% di bawah dasar) setelah desain ulang yang didorong.



Gambar 11.5 Metrik Ketahanan: Baseline VS Optimasi AI

11.12 TANTANGAN IMPLEMENTASI KEMBARAN DIGITAL

Integrasi lintas perusahaan dan infrastruktur TI yang canggih diperlukan untuk pembuatan kembaran digital, tetapi mahal. Kesenjangan data menyoroti kebutuhan akan

pemodelan yang akurat, di mana banyak rantai pasokan kekurangan data real-time yang dapat diandalkan. Selain itu, ada kesenjangan keterampilan, di mana bisnis membutuhkan orang yang tahu cara menggunakan AI, analitik, dan infrastruktur digital. Mengenai keamanan siber, penggunaan kembaran digital mengekspos orang pada lebih banyak risiko keamanan. Integrasi blockchain untuk transparansi, AI generatif untuk optimasi desain, dan kembaran digital kolaboratif berbasis cloud yang mencakup seluruh ekosistem daripada hanya satu perusahaan adalah beberapa tren masa depan.

Otomasi dan AI dalam Optimasi Rantai Pasokan

Otomasi mencakup robot yang menurunkan biaya tenaga kerja dan tingkat kesalahan di gudang. AI mencakup optimasi rute yang menghemat bahan bakar, pemeliharaan prediktif yang meminimalkan waktu henti, dan pembelajaran mesin yang memprediksi permintaan. Sebagai ilustrasi, perutean AI DHL menurunkan penggunaan bahan bakar sebesar 8–10%, sementara robotika Amazon menurunkan biaya gudang sekitar 20%. Operasi rantai pasokan berkembang dari model linier yang berorientasi biaya menjadi ekosistem cerdas dan adaptif karena adopsi otomatisasi dan AI yang cepat. Terutama dalam menghadapi gangguan global, teknologi ini membantu bisnis memenuhi tujuan lingkungan, meningkatkan ketahanan, dan meningkatkan efisiensi.

Peran Otomatisasi dalam Rantai Pasokan

Mengotomatiskan tugas-tugas berulang dan rawan kesalahan menggantikannya dengan sistem yang akurat, terukur, dan cepat. Pengambilan, pengemasan, dan penyortiran dipermudah oleh lengan robot dan kendaraan berpemandu otonom (AGV) di gudang. Transportasi dan logistik otonom mencakup drone dan truk swakemudi yang mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manusia dan mengatasi kekurangan pengemudi. Pengadaan, penagihan, dan pelaporan kepatuhan semuanya ditangani melalui Otomatisasi Proses Terperinci (RPA). Dampaknya meliputi peningkatan produktivitas pekerja sekaligus pengurangan biaya dan peningkatan keselamatan. Amazon, misalnya, telah mengerahkan lebih dari 750.000 robot gudang, menurunkan biaya operasional dan memungkinkan model pengiriman di hari yang sama.

Aplikasi AI

Dengan wawasan berbasis data dan analitik prediktif, AI meningkatkan pengambilan keputusan di seluruh rantai pasokan. Dengan memprediksi permintaan secara akurat (peramalan permintaan) pada tingkat SKU, model pembelajaran mesin mengurangi kelebihan stok dan kekurangan stok. Pemeliharaan prediktif meminimalkan waktu henti dalam produksi dan armada logistik dengan menggunakan sensor AI untuk memprediksi kerusakan peralatan. Optimalisasi inventaris mencakup penyesuaian waktu nyata terhadap tingkat stok pengaman dan titik pemesanan ulang yang dilakukan oleh algoritma dinamis. Manajemen risiko pasokan mencakup mengantisipasi gangguan, dan AI menganalisis data geopolitik, berita, dan meteorologi. Misalnya, DHL menggunakan algoritma perutean berbasis AI untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi biaya pengiriman jarak terakhir sebesar 15%.

Dampak Gabungan Otomatisasi + AI

Bisnis dapat beralih dari manajemen rantai pasokan reaktif ke proaktif melalui kombinasi otomatisasi dan AI. Dengan mengintegrasikan data IoT, AI memberikan manajer visibilitas pengiriman yang komprehensif (visibilitas waktu nyata). Selama gangguan, pengambilan keputusan otomatis mendistribusikan inventaris di antara berbagai area, sehingga menyoroti jaringan adaptif. Keberlanjutan mencakup otomatisasi yang mengurangi limbah material, sementara AI memilih opsi transportasi yang menggunakan lebih sedikit karbon. Lihat Tabel 11.2 (Dampak Otomatisasi dan AI pada KPI), yang membandingkan peningkatan waktu tunggu, penghematan biaya, dan metrik keberlanjutan.

Tabel 11.2 Dampak Otomasi Dan AI pada KPI

KPI	Sebelum otomatisasi	Setelah otomatisasi/AI
Akurasi pesanan	92%	99%
Kecepatan pemenuhan pesanan	24 jam	6–8 jam
Biaya persediaan	Dasar 100%	80%
Penggunaan bahan bakar per unit	100%	88–90%

Tantangan dan Keterbatasan

Pengeluaran modal yang tinggi mencakup sistem AI dan robotika yang membutuhkan pengeluaran dana awal yang besar. Silo data menyoroti pelatihan dan integrasi model AI yang terhambat oleh sistem TI yang terfragmentasi. Otomatisasi memerlukan program pelatihan ulang karena menimbulkan kekhawatiran tentang kehilangan pekerjaan (perpindahan kerja). Rantai pasokan rentan terhadap serangan siber sebagai akibat dari peningkatan interkoneksi (risiko keamanan siber).

Arah Masa Depan

Penggunaan AI untuk memodelkan berbagai konfigurasi rantai pasokan dikenal sebagai “AI generatif dalam perencanaan skenario”. Gudang hiper-otomatis adalah “gudang gelap” dengan sedikit interaksi manusia yang menggabungkan robotika, AI, dan IoT. Integrasi AI-blockchain mencakup jaminan pelacakan produk yang aman dan transparan, dan kolaborasi manusia-mesin meningkatkan, bukan menggantikan, penilaian manusia.

11.13 KEBERLANJUTAN & ESG RANTAI PASOK

Agenda keberlanjutan global berpusat pada rantai pasokan. Bagi banyak industri, rantai pasokan bertanggung jawab atas lebih dari 90% kerusakan lingkungan dan lebih dari 80% emisi gas rumah kaca (GRK). Sebagai tanggapan, pemerintah, investor, konsumen, dan organisasi internasional semakin menekan bisnis untuk memasukkan prinsip-prinsip ESG dalam rencana rantai pasokan mereka. Karena itu, keberlanjutan kini menjadi kebutuhan strategis untuk ketahanan dan daya saing, bukan hanya upaya "tanggung jawab perusahaan".

Keberlanjutan Lingkungan dalam Rantai Pasokan

Pengurangan karbon mencakup pengurangan jarak transportasi, nearshoring, dan logistik multimodal yang menurunkan emisi angkutan barang. Penggunaan kembali, daur

ulang, dan logistik terbalik mengurangi limbah dan membangun sistem tertutup (rantai pasokan sirkular). Energi terbarukan dalam operasi mencakup energi angin dan matahari yang semakin banyak digunakan untuk menggerakkan fasilitas manufaktur dan gudang; Selain itu, pengadaan hijau mencakup evaluasi jejak karbon pemasok oleh bisnis dan menuntut kepatuhan terhadap tujuan berdasarkan pembelajaran ilmiah. Misalnya, pada tahun 2030, IKEA ingin memiliki rantai pasokan yang sepenuhnya sirkular yang hanya menggunakan bahan daur ulang atau terbarukan dan mendekarbonisasi logistik dengan menggunakan biofuel dan truk listrik.

Dimensi Sosial ESG dalam Rantai Pasokan

Standar ketenagakerjaan mencakup memastikan bahwa aturan yang ditetapkan oleh Organisasi Buruh Internasional (ILO) dipatuhi untuk menghentikan pekerja anak dan kerja paksa. Sementara pemantauan digital dan otomatisasi meningkatkan keselamatan kerja, bisnis juga perlu berinvestasi dalam pelatihan ulang karyawan untuk meningkatkan kesejahteraan karyawan. Upah yang adil dan pengadaan lokal mencakup program nearshoring yang mendukung standar perdagangan yang adil dan penciptaan lapangan kerja di daerah tersebut. Misalnya, Patagonia menggunakan pemeriksaan pemasok yang ketat untuk menjamin kondisi kerja yang bermoral di seluruh jaringan pengadaan internasionalnya.

Tata Kelola dan Transparansi

Perusahaan diwajibkan oleh undang-undang seperti Undang-Undang Uji Tuntas Rantai Pasokan Jerman dan Arahan Uji Tuntas Keberlanjutan Perusahaan Uni Eropa (CSDDD) untuk mengawasi ancaman lingkungan dan hak asasi manusia di antara pemasok mereka, dan oleh karena itu harus memenuhi kepatuhan peraturan. Harapan dari investor termasuk transparansi rantai pasokan sebagai perhatian utama bagi pasar modal karena kerangka pelaporan ESG seperti Dewan Standar Akuntansi Keberlanjutan (SASB) dan Inisiatif Pelaporan Global (GRI). Sistem buku besar terdistribusi menjamin pelacakan bahan baku yang tidak dapat diubah, seperti kobalt dalam baterai kendaraan listrik (blockchain untuk ketertelusuran).

Studi Kasus Bisnis untuk Rantai Pasokan yang Selaras dengan ESG

- *Mitigasi Risiko*: Kepatuhan ESG menurunkan risiko denda, kerusakan reputasi, dan gangguan operasional.
- *Akses Pasar*: Banyak kontrak pengadaan dan kemitraan perdagangan sekarang mewajibkan pengungkapan ESG.
- *Loyalitas Konsumen*: Rantai pasokan yang sadar lingkungan dan etis mendorong diferensiasi merek.
- *Kinerja Keuangan*: Studi menunjukkan bahwa perusahaan yang patuh ESG mengungguli perusahaan sejenis dalam valuasi saham dan ketahanan jangka panjang.

Lihat Tabel 11.1 (Metrik Komparatif Model Offshore versus Nearshore), yang menunjukkan bagaimana nearshoring berkontribusi pada manfaat karbon dan kepatuhan.

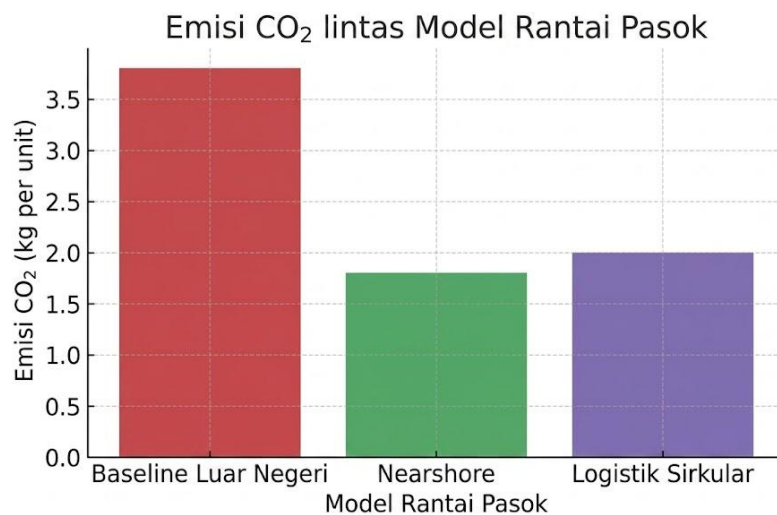
Tantangan dalam Kepatuhan ESG

- *Pengumpulan Data*: Dalam banyak kasus, pemasok kecil tidak dapat melaporkan.
- *Tekanan Biaya*: Kepatuhan ESG memerlukan sertifikasi awal dan investasi teknologi.

- Fragmentasi Standar: Banyak standar ESG, termasuk TCFD, SASB, ISSB, dan GRI, membuat pelaporan lebih sulit.
- Risiko greenwashing: bisnis mungkin melebih-lebihkan pencapaian ESG mereka tanpa konfirmasi independen.

Arah Masa Depan

Dasbor ESG digital harus digunakan, yang melacak kepatuhan pemasok menggunakan AI. Emisi pemasok tidak langsung akan dimasukkan dalam pelaporan karbon oleh lebih banyak bisnis di bawah Akuntansi Emisi Lingkup 3. Platform untuk kolaborasi mencakup aliansi industri, seperti Sustainable Apparel Coalition dan Clean Cargo, yang akan menstandarisasi standar. AI dan kembar digital untuk keberlanjutan mencakup simulasi yang mengoptimalkan transportasi, sumber daya, dan desain fasilitas untuk mengurangi emisi karbon.



Gambar 11.6. Emisi CO₂ di seluruh model rantai pasokan.

Gambar 11.6 (deskripsi):

- Sumbu Y = Emisi CO₂ per unit yang dikirim.
- Sumbu X = Model rantai pasokan (dasar lepas pantai, dekat pantai, logistik sirkular yang dirancang ulang).
- Hasil: logistik sirkular mencapai emisi 45–50% lebih rendah daripada dasar lepas pantai.

Deskripsi: Sumbu Y = Emisi CO₂ per unit yang dikirim. Sumbu X = Model (Baseline Lepas Pantai, Dekat Pantai, Logistik Sirkular yang Didesain Ulang). Logistik sirkular menunjukkan emisi 45–50% lebih rendah daripada baseline.

11.14 EVALUASI EMPIRIS KINERJA DAN METRIK RANTAI PASOKAN

Grafik 1: Kinerja Rantai Pasokan – Baseline Versus Desain Ulang yang Dioptimalkan AI

Kesimpulan Penting

Terdapat peningkatan kinerja yang signifikan pada semua metrik penting ketika membandingkan operasi baseline dengan desain ulang jaringan yang dioptimalkan AI:

- Pengurangan waktu tunggu: peningkatan terbesar menunjukkan penurunan 48,6% dari 35 hari menjadi 18 hari, menunjukkan kemampuan AI untuk mengoptimalkan inventaris dan perutean prediktif untuk meminimalkan hambatan dan menyederhanakan proses logistik.
- Efektivitas biaya: bertentangan dengan pertukaran konvensional antara ketahanan dan efisiensi, penurunan biaya per unit sebesar 10,4% (dari Rp.125.000 menjadi Rp. 112.000) menunjukkan bahwa optimasi AI dapat meningkatkan indikator kinerja lainnya sekaligus mencapai penghematan biaya.
- Pengurangan emisi CO₂ sebesar 44,7% (dari 3,8 kg menjadi 2,1 kg per unit) menunjukkan dampak lingkungan dari optimasi rute dan pemilihan moda transportasi berbasis AI, yang sangat memajukan tujuan keberlanjutan tanpa mengorbankan efektivitas operasional.
- Keunggulan operasional: akurasi pesanan meningkat dari 92% menjadi 99%, peningkatan 7,6% yang menghasilkan kepuasan pelanggan yang signifikan dan biaya pengembalian yang lebih rendah.
- Efisiensi modal: biaya persediaan turun sebesar 25%, menunjukkan peningkatan kemampuan sistem AI dalam peramalan permintaan dan optimasi just-in-time.

Implikasi strategis: data ini menunjukkan bagaimana analitik canggih dapat secara bersamaan meningkatkan parameter biaya, kecepatan, akurasi, dan keberlanjutan, memperkuat alasan komersial untuk investasi AI dalam transformasi rantai pasokan.

Grafik 2: Evolusi Indeks Gangguan Rantai Pasokan

Analisis Temporal

Evolusi gangguan rantai pasokan mengungkapkan tiga fase berbeda dengan perubahan struktural yang berkelanjutan:

- Stabilitas pra-pandemi (2017–2019): semua bentuk gangguan tetap dalam batas yang wajar, dengan dampak geopolitik menempati peringkat tertinggi pada 35 poin, menunjukkan ketegangan perdagangan yang berkelanjutan. Selama pandemi 2020–2022, gangguan logistik melonjak menjadi 85 poin, peningkatan 240% dan menjadi isu utama. Karena ketegangan geopolitik meningkat menjadi 60 poin dan risiko pemasok mencapai 75 poin, jelas bahwa kerentanan rantai pasokan global saling terkait. Gangguan logistik turun menjadi 45 poin selama pemulihan pasca-pandemi (2023–2025), meskipun masih 80% lebih besar daripada sebelum pandemi. Sementara efek geopolitik terus meningkat menjadi 70 poin, risiko pemasok stabil di 50 poin, menunjukkan "normal baru" dengan risiko yang meningkat.
- Kesimpulan penting: daripada mengantisipasi kembalinya kondisi sebelum tahun 2020, manajer rantai pasokan harus merencanakan peningkatan volatilitas permanen

mengingat peningkatan berkelanjutan dari semua kategori risiko, terutama implikasi geopolitik.

Bagan 3: Analisis Biaya Total – Model Lepas Pantai Versus Dekat Pantai

Rincian Struktur Biaya

Perbandingan biaya terperinci mengungkapkan ekonomi tersembunyi dari keputusan lokasi rantai pasokan:

- Interpretasi strategis: analisis ini memvalidasi kasus bisnis untuk nearshoring dengan mengkuantifikasi biaya risiko dan paparan karbon yang sebelumnya tersembunyi yang biasanya tidak termasuk dalam model rantai pasokan tradisional yang hanya berbasis biaya.

Bagan 4: Emisi CO₂ Di Berbagai Model Rantai Pasokan

Analisis Kinerja Lingkungan

Perbandingan jejak karbon di tiga arsitektur rantai pasokan mengungkapkan hierarki lingkungan dari berbagai pendekatan:

- Basis lepas pantai: pada 3,8 kg CO₂ per unit, rantai pasokan jarak jauh tradisional mewakili intensitas karbon tertinggi, terutama karena pengiriman laut dan banyak titik penanganan.
- Keunggulan dekat pantai: dengan 1,2 kg CO₂ per unit (pengurangan 68%), nearshoring memberikan manfaat lingkungan yang paling signifikan dengan meminimalkan jarak transportasi dan memungkinkan moda logistik yang lebih berkelanjutan.
- Logistik sirkular: pada 2,0 kg CO₂ per unit (pengurangan 47% dari basis), model sirkular menunjukkan peningkatan substansial melalui pengurangan limbah dan logistik terbalik, meskipun masih lebih tinggi daripada nearshoring murni karena aktivitas pemrosesan dan pengumpulan tambahan.

Wawasan keberlanjutan: data menunjukkan bahwa kedekatan geografis (nearshoring) memberikan manfaat karbon langsung yang lebih besar daripada pendekatan ekonomi sirkular, meskipun kombinasi kedua strategi tersebut kemungkinan akan mencapai kinerja lingkungan yang optimal.

Analisis Strategis Terintegrasi

Sintesis Lintas Bagan

Keempat bagan ini secara kolektif menunjukkan bahwa transformasi rantai pasokan modern bukanlah tentang memilih antara efisiensi, ketahanan, dan keberlanjutan nearshoring yang didukung AI dan desain ulang jaringan dapat mencapai peningkatan di semua dimensi secara bersamaan:

1. Teknologi sebagai pendukung: optimasi AI menciptakan fondasi analitis untuk membuat pertimbangan yang kompleks sekaligus meningkatkan kinerja keseluruhan.
2. Geografi penting: nearshoring memberikan manfaat terukur dalam hal biaya, risiko, kecepatan, dan keberlanjutan yang mengimbangi keunggulan biaya tenaga kerja tradisional.
3. Peningkatan risiko permanen: strategi rantai pasokan harus dirancang untuk lingkungan operasi yang lebih fluktuatif secara permanen.

4. Kinerja lingkungan: pengurangan karbon melalui optimasi geografis menawarkan manfaat keberlanjutan langsung dan terukur yang selaras dengan persyaratan peraturan dan harapan pemangku kepentingan.

Kesimpulan: data tersebut sangat mendukung pergeseran strategis menuju jaringan rantai pasokan berkelanjutan yang didukung AI dan berlokasi di dekat pantai sebagai konfigurasi optimal untuk menyeimbangkan persyaratan bisnis abad ke-21 berupa ketahanan, efisiensi, dan tanggung jawab lingkungan.

11.15 REKOMENDASI STRATEGIS TRANSFORMASI RANTAI PASOKAN

Berdasarkan analisis nearshoring, desain ulang jaringan, otomatisasi, AI, dan kepatuhan ESG, berikut adalah rekomendasi yang diajukan untuk membangun rantai pasokan yang tangguh, berkelanjutan, dan cerdas.

Mengadopsi Model Pengadaan Hibrida

Organisasi harus menyeimbangkan pengadaan di luar negeri untuk efisiensi biaya dengan produksi di dekat pantai untuk kelincuhan dan ketahanan. Model hibrida ini mengurangi ketergantungan pada satu wilayah geografis, mengurangi risiko dari gangguan geopolitik, dan memastikan harga yang kompetitif.

Memanfaatkan Simulasi Berbasis AI dan Kembaran Digital

Perusahaan harus mengintegrasikan teknologi kembaran digital untuk mensimulasikan skenario desain ulang jaringan sebelum implementasi. Simulasi berbasis AI memungkinkan pengujian risiko secara real-time seperti penutupan pelabuhan, kekurangan bahan baku, atau lonjakan permintaan, sehingga memungkinkan pengambilan keputusan yang proaktif.

Berinvestasi dalam Logistik Hijau

Transisi menuju logistik berkelanjutan sangat penting. Perusahaan harus mengadopsi armada kendaraan listrik (EV), menggunakan energi terbarukan di gudang, mengoptimalkan pengemasan untuk mengurangi limbah, dan mengembangkan sistem logistik terbalik untuk rantai pasokan sirkular. Hal ini menyelaraskan operasi dengan komitmen ESG dan persyaratan peraturan.

Mengembangkan Redundansi Multi-Node

Jaringan pasokan yang terlalu terpusat menciptakan kerentanan. Perusahaan harus mendiversifikasi pemasok dan pusat produksi di berbagai wilayah, menciptakan redundansi tanpa inefisiensi yang signifikan. Hal ini meningkatkan ketahanan terhadap guncangan lokal seperti bencana alam atau pembatasan perdagangan.

Berkolaborasi dalam Penyelarasan Kebijakan dan Infrastruktur

Bisnis harus aktif berkolaborasi dengan pemerintah dan asosiasi industri untuk membentuk kebijakan yang memberikan insentif bagi praktik berkelanjutan. Ini termasuk keringanan pajak untuk infrastruktur hijau, harmonisasi bea cukai untuk perdagangan regional, dan kemitraan publik-swasta untuk mempercepat digitalisasi rantai pasokan.

11.16 PERUBAHAN PARADIGMA RANTAI PASOKAN GLOBAL

Ekosistem yang tangguh, didukung teknologi, dan berkelanjutan menggantikan jaringan global lama yang berorientasi biaya dan terbebani dalam rantai pasokan global, yang sedang mengalami perubahan paradigma. Pergeseran ini dimotivasi oleh kebutuhan untuk memenuhi tuntutan investor, konsumen, dan regulator yang terus meningkat, sekaligus beradaptasi dengan guncangan seperti pandemi, konflik geopolitik, dan masalah iklim. Nearshoring telah menjadi taktik untuk mengurangi emisi karbon, mempersingkat waktu tunggu, dan mengurangi ketergantungan pada pemasok yang jauh. Bisnis dapat mengantisipasi bahaya dan secara dinamis mengoptimalkan aliran rantai pasokan melalui desain ulang jaringan, yang dibantu oleh kembar digital berbasis AI. Otomatisasi meningkatkan ketelitian dan efisiensi operasional, sementara keberlanjutan dan kepatuhan ESG meletakkan dasar bagi kepercayaan pemangku kepentingan dan legitimasi jangka panjang. Masa depan rantai pasokan bergantung pada kemampuannya untuk sangat adaptif, berakar lokal, dan mahir secara teknologi. Selain mengurangi risiko, perusahaan yang secara bersamaan mengadopsi otomatisasi, nearshoring, dan keberlanjutan akan memastikan daya saing jangka panjang dalam ekonomi dunia yang semakin tidak stabil dan saling terkait.

BAB 12

PENGEMBANGAN TALENTA RANTAI PASOK DIGITAL

12.1 PERGESERAN PARADIGMA RANTAI PASOKAN 4.0

Integrasi cepat kecerdasan buatan (AI), otomatisasi, dan analitik data secara fundamental membentuk kembali rantai pasokan global, menciptakan kesenjangan yang signifikan antara kemampuan tenaga kerja yang ada dan tuntutan operasi generasi berikutnya. Bab ini membahas keharusan penting untuk menutup kesenjangan bakat ini. Kami berpendapat bahwa keterampilan rantai pasokan tradisional tidak lagi memadai. Profesional modern harus mahir dalam literasi data, interpretasi AI, manajemen robotika, dan logistik berkelanjutan. Bab ini mengusulkan kerangka kerja komprehensif untuk pengembangan bakat, yang mencakup identifikasi profil keterampilan yang muncul, inisiatif peningkatan dan pelatihan ulang keterampilan strategis, dan evolusi kurikulum akademik untuk menjembatani kesenjangan teori-praktik. Lebih lanjut, kami mengeksplorasi pergeseran budaya dan organisasi yang diperlukan untuk menumbuhkan lingkungan pembelajaran berkelanjutan dan merangkul kolaborasi manusia-AI. Dengan merangkum tren industri dan praktik SDM strategis, bab ini memberikan peta jalan bagi organisasi untuk mengembangkan tenaga kerja rantai pasokan yang siap menghadapi masa depan yang mampu mendorong ketahanan, efisiensi, dan keberlanjutan di dunia yang semakin terdisrupsi dan digital.

Premis dasar bab ini adalah bagaimana rantai pasokan global mengalami pergeseran paradigma yang signifikan seperti munculnya kontainerisasi. Transformasi ini, yang sering disebut "Rantai Pasokan 4.0", didorong oleh konvergensi teknologi digital canggih, yang membuat model operasional tradisional semakin usang. Meskipun teknologi ini menjanjikan tingkat efisiensi, ketahanan, dan visibilitas yang belum pernah terjadi sebelumnya, keberhasilan implementasinya sepenuhnya bergantung pada tenaga kerja yang mumpuni.

Di sinilah letak tantangan utamanya: krisis talenta yang mendalam dan semakin meluas. Teknologi yang dirancang untuk memperkuat rantai pasokan justru mengeksplorasi kerentanan kritis: kurangnya tenaga kerja yang mahir secara digital dan mampu memanfaatkan kekuatannya. Bab ini berpendapat bahwa tanpa fokus strategis dan mendesak pada pengembangan talenta, organisasi tidak akan mampu memanfaatkan investasi teknologi mereka, sehingga rentan terhadap persaingan dan gangguan.

Gambar 12.1 secara visual mewakili argumen inti dari pendahuluan ini. "Kondisi Saat Ini" dari angkatan kerja, dengan keterampilan tradisional dan pendekatan reaktifnya, semakin menjauh dari "Kebutuhan Masa Depan" akan kecerdasan digital dan proses strategis akibat "Jurang yang Semakin Lebar". Jurang ini dipicu oleh laju perubahan teknologi yang cepat melampaui perkembangan keterampilan. Satu-satunya cara untuk menyeberangi jurang ini dan menyelaraskan kondisi saat ini dengan kebutuhan masa depan adalah melalui investasi yang disengaja dan terfokus pada "Pengembangan Bakat Strategis", yang bertindak sebagai jembatan penting.



Gambar 12.1 Kesenjangan Talenta Rantai Pasokan Digital

Dampak Transformatif AI, Otomatisasi, dan Disrupsi Global

Kekuatan yang membentuk kembali lanskap rantai pasokan bersifat multifaset dan sinergis. Kecerdasan buatan (AI) dan pembelajaran mesin (ML) beralih dari keunggulan kompetitif menjadi kebutuhan operasional inti. Mereka memungkinkan analitik prediktif untuk peramalan permintaan, mengoptimalkan tingkat persediaan secara real-time, mengotomatiskan keputusan pengadaan yang kompleks, dan meningkatkan manajemen risiko dengan mensimulasikan skenario disrupsi. Otomatisasi proses robotik (RPA) menyederhanakan tugas-tugas administratif, sementara robot seluler otonom (AMR) dan kendaraan berpemandu otomatis (AGV) mentransformasi operasi gudang. Di luar gudang, *Internet of Things* (IoT) menyediakan rangkaian informasi digital real-time, mulai dari lokasi dan kondisi barang dalam perjalanan hingga kinerja mesin pabrik.

Revolusi teknologi ini terjadi di tengah latar belakang disrupsi global yang terus-menerus, termasuk ketegangan geopolitik, peristiwa yang disebabkan oleh perubahan iklim, dan dampak lanjutan terkait pandemi. Gangguan-gangguan ini telah menggarisbawahi keterbatasan model lean dan just-in-time serta menyoroti kebutuhan akan rantai pasokan yang lincah, berbasis data, dan tangguh. Efek gabungan dari teknologi dan tekanan ini bukan hanya untuk meningkatkan proses yang ada, tetapi juga untuk merekayasa ulang secara fundamental. Hal ini menciptakan lingkungan operasional baru di mana data adalah aset yang paling berharga dan kemampuan untuk menafsirkan dan bertindak berdasarkan data tersebut adalah keterampilan yang paling penting.

Menjembatani Jurang: Keterampilan Tenaga Kerja Saat Ini Versus Kebutuhan Masa Depan

Jurang yang tajam dan berpotensi melemahkan telah muncul antara kompetensi tenaga kerja rantai pasokan saat ini dan keterampilan yang dibutuhkan untuk mengelola sistem generasi berikutnya ini. Profesional rantai pasokan tradisional dihargai karena keahlian mereka dalam logistik, manajemen persediaan, dan pengadaan, seringkali mengandalkan pengalaman dan data historis. Namun, profesional rantai pasokan masa depan harus menjadi ahli hibrida: seorang pemimpin "bilingual" yang memiliki pengetahuan domain yang mendalam dan kecerdasan teknis yang kuat.

Tenaga kerja yang ada saat ini seringkali kurang memiliki literasi digital, termasuk kemampuan untuk bekerja dengan platform analitik data, memahami prinsip-prinsip AI (bahkan pada tingkat konseptual) atau mengelola sistem otomatis. Keterampilan lunak juga terus berkembang. Di luar kerja tim dan komunikasi, para profesional kini membutuhkan fleksibilitas kognitif untuk beradaptasi dengan skenario yang berubah dengan cepat, pemikiran kritis untuk menantang rekomendasi berbasis AI, dan kolaborasi lintas fungsi untuk bekerja dengan tim TI dan ilmu data. Kesenjangan keterampilan ini bukanlah masalah di masa depan; ini adalah risiko operasional saat ini. Organisasi mendapati diri mereka memiliki investasi teknologi bernilai puluhan miliar rupiah dalam platform AI dan otomatisasi, yang kurang dimanfaatkan atau dioperasikan hanya sebagian kecil dari potensinya karena kurangnya talenta manusia untuk memanfaatkannya. Menjembatani kesenjangan ini adalah prasyarat terpenting untuk membangun rantai pasokan yang tidak hanya lebih cerdas dan lebih cepat, tetapi juga lebih tangguh dan berkelanjutan.

12.2 PROFESIONAL RANTAI PASOK MASA DEPAN

Manajer rantai pasokan tradisional, yang terutama berfokus pada logistik, inventaris, dan pengadaan, sedang berevolusi menjadi profesional baru yang lebih dinamis. Profesional rantai pasokan generasi berikutnya adalah pemecah masalah yang melek teknologi, lincah, dan strategis yang memanfaatkan alat digital untuk mendorong efisiensi, ketahanan, dan keberlanjutan. Transformasi ini membutuhkan pergeseran mendasar dalam keterampilan keras dan lunak, memadukan ketajaman teknis dengan wawasan manusia yang mendalam.

Kompetensi Teknis Inti: Analitik Data, Literasi AI, dan Manajemen Iot

Data merupakan inti dari rantai pasokan modern. Oleh karena itu, kompetensi teknis inti telah bergeser dari mengoperasikan perangkat lunak lama ke secara aktif menafsirkan dan memanipulasi data. Analitik data adalah keterampilan dasar. Para profesional harus mahir dalam menggunakan platform analitik (seperti Tableau atau Power BI) dan metode statistik untuk mendapatkan wawasan dari kumpulan data yang luas terkait pola permintaan, biaya transportasi, dan kinerja pemasok. Ini bukan tentang menjadi seorang ilmuwan data, tetapi tentang memiliki kemampuan untuk mengajukan pertanyaan yang tepat, menafsirkan hasil analisis, dan membuat keputusan berdasarkan data.

Di luar analitik, literasi AI sangat penting. Ini melibatkan pemahaman tentang kemampuan dan keterbatasan AI dan ML. Para profesional perlu mengetahui bagaimana model AI memprediksi permintaan, mengoptimalkan rute, dan mengotomatiskan operasi gudang. Lebih penting lagi, mereka harus mampu mengelola sistem ini, menafsirkan

rekomendasinya (terutama ketika AI memberikan saran yang tidak intuitif), dan mengawasi implementasi etisnya.

Manajemen IoT melibatkan pemanfaatan jaringan objek fisik yang tertanam dengan sensor dan perangkat lunak. Para profesional harus memahami cara menggunakan data waktu nyata dari perangkat IoT – seperti pelacak GPS, drone gudang, dan palet pintar – untuk memantau kondisi pengiriman, melacak aset, memprediksi kebutuhan pemeliharaan, dan menciptakan rantai pasokan yang terhubung dan sepenuhnya terlihat dari ujung ke ujung.

Keterampilan Lunak Esensial: Fleksibilitas Kognitif, Kolaborasi Lintas Fungsi, dan Pemecahan Masalah

Meskipun teknologi menyediakan alat, keterampilan manusia menentukan penerapannya yang efektif. Fleksibilitas kognitif adalah kemampuan untuk menyesuaikan pemikiran dan strategi sebagai respons terhadap gangguan yang tidak terduga dan mudah berubah, seperti penutupan pelabuhan atau lonjakan permintaan yang tiba-tiba. Ini adalah ketangkasan mental untuk beralih dari rencana yang telah ditentukan dan mengembangkan solusi baru di bawah tekanan. Hal ini dilengkapi dengan kolaborasi lintas fungsi. Departemen rantai pasokan yang terisolasi sudah usang. Para profesional modern harus berkomunikasi secara efektif dengan berbagai tim, termasuk TI (untuk mengimplementasikan sistem baru), pemasaran (untuk memahami dampak promosi terhadap permintaan), keuangan (untuk analisis biaya-manfaat teknologi baru), dan petugas keberlanjutan. Mereka bertindak sebagai penghubung yang menyelaraskan berbagai fungsi bisnis menuju tujuan rantai pasokan yang sama.

Yang mendasari semua ini adalah pemecahan masalah tingkat lanjut. Masalah yang dihadapi saat ini semakin kompleks dan multifaset. Misalnya, memecahkan masalah "opsi pengiriman berkelanjutan dan berbiaya terendah" membutuhkan keseimbangan antara data lingkungan, variabel biaya, dan harapan pelanggan. Para profesional generasi berikutnya harus menerapkan pemikiran sistem untuk memahami saling ketergantungan dan konsekuensi yang tidak diinginkan dari keputusan mereka, bergerak melampaui solusi linier sederhana menuju resolusi strategis yang holistik.

Munculnya Peran Hibrida: Ilmuwan Data Rantai Pasokan dan Ahli Strategi Otomatisasi

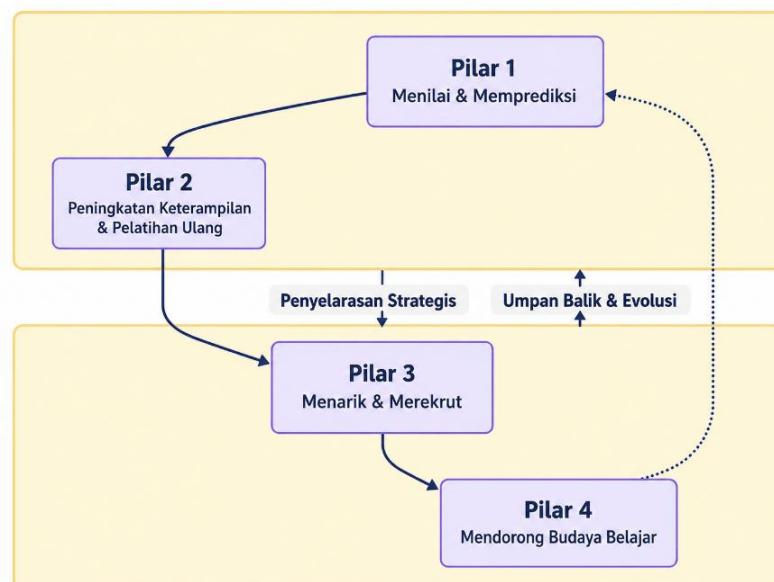
Konvergensi keterampilan teknis dan tradisional mengkristal menjadi peran hibrida baru yang tidak ada satu dekade lalu. Ilmuwan data rantai pasokan adalah contoh utamanya. Profesional ini memiliki pemahaman mendalam tentang dasar-dasar rantai pasokan tetapi juga ahli dalam pemodelan statistik, pemrograman (misalnya Python, R) dan ML. Mereka tidak hanya melaporkan apa yang terjadi; mereka membangun model prediktif untuk memperkirakan apa yang akan terjadi dan menentukan tindakan optimal, menggeser fungsi dari reaktif menjadi proaktif dan preskriptif.

Demikian pula, ahli strategi otomatisasi beroperasi di persimpangan operasi, robotika, dan manajemen perubahan. Peran ini mencakup mengevaluasi dan memilih teknologi otomatisasi (dari robot gudang hingga kendaraan otonom), merancang proses otomatisasi di masa depan, dan mengelola integrasi sistem ini ke dalam tenaga kerja dan alur kerja yang ada. Mereka bukan hanya insinyur; mereka adalah ahli strategi yang memahami dampak

operasional dan manusiawi dari otomatisasi, memastikan bahwa investasi teknologi memberikan Pengembalian Investasi (ROI) yang nyata dan meningkatkan, bukan sekadar menggantikan, kemampuan manusia.

12.3 STRATEGI SDM UNTUK RANTAI PASOKAN GENERASI BERIKUTNYA

Transisi menuju rantai pasokan generasi berikutnya tidak dapat dicapai hanya melalui teknologi; hal ini membutuhkan strategi sumber daya manusia yang sama canggih dan berwawasan ke depan. Kerangka strategis ini menyediakan pendekatan terstruktur dan siklik untuk membangun tenaga kerja yang mampu memanfaatkan AI, otomatisasi, dan pengambilan keputusan berbasis data. Kerangka ini dibangun di atas empat pilar yang saling terkait yang memastikan pengembangan bakat bersifat proaktif, komprehensif, dan berkelanjutan.



Gambar 12.2 Kerangka Kerja Siklus Untuk Pengembangan Talenta Rantai Pasokan Digital

Gambar 12.2 secara visual merangkum kerangka kerja strategis untuk pengembangan talenta sebagai siklus dinamis yang saling memperkuat, menekankan bahwa membangun tenaga kerja yang siap menghadapi masa depan adalah proses berkelanjutan, bukan inisiatif sekali waktu. Intinya terletak pada tujuan utama: membina tenaga kerja rantai pasokan yang digital dan lincah. Tujuan ini dicapai melalui empat pilar yang saling terhubung yang membentuk lingkaran tak berujung: siklus dimulai dengan Pilar 1 (menilai dan memprediksi), yang mendiagnosis kesenjangan keterampilan saat ini dan masa depan, menyediakan data yang dibutuhkan untuk mendorong Pilar 2 (meningkatkan dan memperbarui keterampilan), yaitu tenaga kerja yang ada. Setelah kemampuan internal dibangun, Pilar 3 (menarik dan merekrut) berfokus pada memasukkan talenta digital eksternal baru untuk mengisi kesenjangan kritis dan membawa perspektif baru. Pilar 4 yang terakhir dan krusial (menumbuhkan budaya belajar) menciptakan lingkungan yang mendukung yang menanamkan pembelajaran berkelanjutan dan kemampuan beradaptasi ke dalam DNA organisasi. Panah di

sekelilingnya, yang diberi label “adaptasi dan peningkatan berkelanjutan”, menandakan bahwa wawasan dan pola pikir tangkas yang dikembangkan dalam Pilar 4 secara alami memberikan umpan balik ke dalam putaran penilaian baru yang lebih informatif, memastikan seluruh kerangka kerja berkembang seiring dengan perubahan teknologi dan pasar, sehingga menciptakan jalur bakat yang berkelanjutan untuk jangka panjang.

Pilar 1: Menilai Kesenjangan Keterampilan Saat Ini dan Memperkirakan Kebutuhan di Masa Depan

Langkah dasar dalam strategi pengembangan bakat apa pun adalah penilaian yang ketat dan jujur terhadap situasi saat ini yang disandingkan dengan pandangan yang jernih tentang masa depan. Ini dimulai dengan melakukan inventarisasi keterampilan terperinci dari tenaga kerja rantai pasokan saat ini. Ini melibatkan pemetaan kompetensi yang ada terhadap peran, menggunakan alat seperti matriks keterampilan dan kerangka kerja kompetensi untuk mengidentifikasi kemampuan di bidang seperti manajemen inventaris, perencanaan transportasi, dan penggunaan sistem ERP. Bersamaan dengan itu, organisasi harus terlibat dalam peramalan strategis. Hal ini memerlukan analisis peta jalan digital perusahaan – seperti rencana implementasi peramalan permintaan berbasis AI, gudang otonom, atau blockchain untuk ketertelusuran – untuk memprediksi keterampilan teknis spesifik (misalnya Python untuk analisis data, interpretasi model ML) dan keterampilan lunak (misalnya mengelola tim manusia-robot) yang akan sangat penting dalam 3–5 tahun ke depan. Kesenjangan antara inventaris saat ini dan kebutuhan masa depan mengungkapkan defisit talenta yang tepat, memungkinkan investasi yang terarah daripada upaya pelatihan yang tersebar. Fase diagnostik ini sangat penting untuk membangun studi kelayakan bisnis untuk investasi dalam pengembangan talenta dan untuk menetapkan tujuan yang jelas dan terukur untuk seluruh program.

Pilar 2: Peningkatan dan Pelatihan Ulang Tenaga Kerja yang Ada

Dengan kesenjangan keterampilan yang telah didefinisikan dengan jelas, fokus bergeser ke aset yang paling berharga: karyawan yang ada. Pilar ini melibatkan pembuatan jalur pembelajaran terstruktur untuk menutup kesenjangan yang telah diidentifikasi. Peningkatan keterampilan (upskilling) melibatkan peningkatan kemampuan karyawan saat ini untuk unggul dalam peran mereka yang terus berkembang (misalnya, melatih perencana permintaan tradisional untuk menggunakan alat analitik prediktif tingkat lanjut). Pelatihan ulang (reskilling) lebih transformatif, mempersiapkan karyawan untuk peran yang sepenuhnya baru dalam ekosistem rantai pasokan, seperti melatih ulang manajer gudang untuk menjadi koordinator robotika atau analis logistik untuk menjadi ilmuwan data. Pelaksanaan yang efektif melibatkan perpaduan metodologi pembelajaran: bermitra dengan platform teknologi pendidikan untuk kursus daring tentang dasar-dasar AI, membangun "akademi" internal untuk pelatihan langsung dengan perangkat lunak baru, dan menerapkan program pendampingan yang memasang karyawan berpengalaman dengan generasi digital. Investasi ini tidak hanya membangun keterampilan yang dibutuhkan tetapi juga meningkatkan moral dan retensi karyawan dengan menunjukkan komitmen terhadap pertumbuhan karier jangka panjang mereka.

Pilar 3: Menarik dan Merekrut Talenta Digital Baru

Meskipun pengembangan talenta internal sangat penting, laju perubahan teknologi seringkali mengharuskan masuknya kemampuan baru dari pasar eksternal. Pilar ini berfokus pada menjadikan organisasi sebagai magnet bagi para profesional hibrida yang memiliki keterampilan digital yang dibutuhkan rantai pasokan saat ini. Hal ini membutuhkan pergeseran mendasar dalam branding perusahaan, secara aktif mempromosikan perusahaan sebagai tempat kerja yang berorientasi teknologi dan inovatif, bukan sekadar operasi logistik tradisional. Deskripsi pekerjaan dan strategi perekrutan harus dirombak agar menarik bagi ilmuwan data, spesialis AI, dan insinyur otomatisasi, dengan menyoroti proyek-proyek yang menantang dan dampak strategis dari pekerjaan mereka. Organisasi harus melihat melampaui kumpulan talenta tradisional, membangun hubungan dengan universitas Stekom yang menawarkan program analitik rantai pasokan khusus, berpartisipasi dalam hackathon teknologi, dan menciptakan jalur magang-ke-perekrutan yang menarik bagi lulusan dengan kemampuan digital. Keberhasilan dalam pilar ini memastikan masuknya ide dan keahlian baru yang dapat mempercepat transformasi digital.

Pilar 4: Memupuk Budaya Pembelajaran Berkelanjutan dan Adaptabilitas

Pilar terakhir adalah perekat budaya yang menopang seluruh kerangka kerja. Teknologi dan dinamika pasar akan terus berkembang, membuat keterampilan statis apa pun menjadi usang. Oleh karena itu, tujuan utamanya adalah menanamkan budaya pembelajaran berkelanjutan dan ketangkasan ke dalam DNA organisasi. Hal ini didorong oleh kepemimpinan yang secara aktif mendukung pembelajaran, menghargai rasa ingin tahu, dan mengalokasikan waktu dan sumber daya khusus (misalnya, "Jumat Belajar" atau tunjangan belajar tahunan). Ini melibatkan pembuatan platform berbagi pengetahuan di mana karyawan dapat berbagi wawasan dari kursus atau proyek. Budaya ini mengubah pembelajaran dari acara formal berkala menjadi praktik harian yang terintegrasi. Ini menumbuhkan keamanan psikologis, memungkinkan karyawan untuk bereksperimen dan belajar dari kegagalan tanpa hukuman. Dengan memprioritaskan adaptabilitas, organisasi membangun ketahanan yang melekat, memastikan tenaga kerjanya tidak hanya dapat menanggapi gangguan berikutnya tetapi juga mengantisipasi dan memimpin gelombang inovasi berikutnya, sehingga menutup lingkaran dan menjadikan kerangka pengembangan bakat sebagai siklus yang terus-menerus dan memperbarui diri.

12.4 KESENJANGAN TEORI PRAKTIK DALAM PENDIDIKAN RANTAI PASOKAN

Digitalisasi rantai pasokan yang cepat telah menciptakan ketidaksesuaian mendasar antara pengetahuan teoretis yang diberikan oleh program akademik tradisional dan keterampilan praktis berbasis teknologi yang dibutuhkan oleh industri. Menutup kesenjangan ini membutuhkan kemitraan sinergis antara akademisi dan industri, memastikan bahwa lembaga pendidikan tidak beroperasi di menara gading tetapi secara aktif menciptakan jalur bakat. Kolaborasi ini sangat penting untuk mengubah lulusan mentah menjadi profesional siap kerja yang dapat segera berkontribusi pada fungsi rantai pasokan generasi berikutnya. Tanpa aliansi yang erat ini, perusahaan akan terus menghadapi periode orientasi dan pelatihan yang

berkepanjangan dan mahal, sementara lulusan akan kesulitan menemukan pekerjaan yang relevan di bidang yang sangat membutuhkan talenta terampil.

Modernisasi Kurikulum Akademik untuk Rantai Pasokan Digital

Kurikulum rantai pasokan tradisional, yang sangat berfokus pada logistik, pengadaan, dan teori inventaris dasar, tidak lagi memadai. Modernisasi kurikulum ini membutuhkan perancangan ulang mendasar yang menanamkan literasi digital di seluruh inti kurikulum. Ini melibatkan pergeseran dari mata kuliah TI yang terisolasi ke integrasi konsep-konsep seperti analitik dan visualisasi data sebagai keterampilan dasar, mengajarkan mahasiswa untuk memanipulasi dan memperoleh wawasan dari kumpulan data besar menggunakan alat-alat seperti SQL, Python, dan Tableau. Mata kuliah harus dikembangkan di sekitar aplikasi AI dan ML, menjelaskan tidak hanya teori tetapi juga bagaimana teknologi ini digunakan untuk peramalan permintaan prediktif, pengadaan otonom, dan pemeliharaan prediktif. Kurikulum perlu memasukkan modul tentang IoT dan manajemen data sensor, blockchain untuk asal usul dan transparansi, dan prinsip-prinsip desain rantai pasokan berkelanjutan dan sirkular.

Modernisasi ini tidak dapat dicapai hanya oleh akademisi saja. Hal ini membutuhkan masukan langsung dari mitra industri melalui dewan penasihat, kuliah tamu, dan proyek pembelajaran bersama. Praktisi industri dapat memberikan studi kasus dunia nyata, pernyataan masalah saat ini, dan wawasan tentang teknologi baru yang mengganggu bidang ini. Dengan berkolaborasi, dunia akademis dapat memastikan bahwa silabus mereka dinamis dan relevan, menghasilkan lulusan yang tidak hanya memahami "apa" dan "mengapa" manajemen rantai pasokan, tetapi juga "bagaimana" pelaksanaannya secara digital. Tujuannya adalah untuk menciptakan generasi baru lulusan rantai pasokan yang sama nyamannya membahas jaringan saraf dan integrasi API seperti halnya membahas kuantitas pesanan ekonomis.

Memanfaatkan Program Magang, Praktik Kerja Lapangan, dan Akademi Perusahaan

Meskipun kurikulum yang dimodernisasi menyediakan fondasi pengetahuan yang penting, pengalaman praktis dan langsunglah yang benar-benar memperkuat pembelajaran dan membangun kompetensi. Program magang, praktik kerja lapangan, dan akademi perusahaan berfungsi sebagai jembatan penting antara pemahaman teoritis dan penerapan praktis. Program magang dan kerja sama yang terstruktur memungkinkan mahasiswa untuk terjun langsung ke lingkungan perusahaan, menerapkan pengetahuan akademis mereka pada tantangan dunia nyata, seperti mengoptimalkan sistem manajemen gudang, menganalisis data logistik untuk mengurangi emisi karbon, atau mendukung implementasi skrip RPA. Pengalaman ini sangat berharga, mengubah konsep abstrak menjadi keterampilan nyata dan menumbuhkan keterampilan lunak profesional seperti komunikasi, manajemen proyek, dan pemecahan masalah dalam lingkungan nyata.

Di luar magang sementara, akademi perusahaan dan program magang mewakili investasi jangka panjang yang lebih dalam dalam pengembangan bakat. Perusahaan dapat mendirikan akademi khusus untuk menciptakan jalur bakat yang stabil yang disesuaikan dengan ekosistem teknologi dan kebutuhan operasional spesifik mereka. Program-program ini sering menggabungkan pelatihan formal tentang sistem dan perangkat lunak milik perusahaan

dengan penugasan rotasi di berbagai fungsi rantai pasokan, seperti perencanaan, logistik, dan pengadaan. Pendekatan ini tidak hanya mempercepat kemampuan karyawan baru tetapi juga secara signifikan meningkatkan retensi dan loyalitas karyawan dengan menunjukkan komitmen perusahaan terhadap pertumbuhan tenaga kerjanya. Bagi individu, ini memberikan jalur yang jelas dan didukung menuju karier yang sukses, menggabungkan kredensial yang diperoleh dengan penguasaan praktis.

12.5 STUDI KASUS MAERSK: TRANSFORMASI KE LOGISTIK BERBASIS TEKNOLOGI

Contoh utama dari inisiatif perusahaan skala besar yang sukses untuk membangun tenaga kerja rantai pasokan yang siap menghadapi masa depan adalah perjalanan transformasi yang dilakukan oleh A.P. Moller: Maersk. Sebagai perusahaan pengiriman dan logistik kontainer terbesar di dunia, Maersk menghadapi kebutuhan eksistensial untuk berevolusi dari operator berbasis aset tradisional menjadi penggerak logistik terintegrasi yang digerakkan oleh teknologi. Pergeseran strategis ini, yang sangat bergantung pada AI, otomatisasi, dan analitik data, memerlukan perombakan radikal strategi talenta untuk mengatasi kesenjangan keterampilan yang signifikan dalam tenaga kerja operasionalnya yang luas.

Pendekatan Maersk bersifat multifaset, berpusat pada program peningkatan keterampilan dan penempatan kembali karyawan secara besar-besaran. Menyadari bahwa mereka tidak dapat menyelesaikan masalah hanya dengan merekrut karyawan baru, perusahaan meluncurkan inisiatif "Operasi Generasi Berikutnya". Program ini menargetkan ribuan karyawan dalam peran operasional, seperti perencana kapal dan spesialis dokumentasi, yang pekerjaannya sedang diubah atau diotomatisasi oleh platform digital baru. Inisiatif ini menggabungkan pelatihan komprehensif dalam analisis data, pemanfaatan alat digital, dan cara kerja baru. Yang terpenting, ini bukan hanya tentang mengajarkan keterampilan teknis tetapi juga tentang menumbuhkan pola pikir peningkatan berkelanjutan dan pemecahan masalah. Karyawan dialihkan dari melakukan tugas manual dan berulang ke peran yang melibatkan pengelolaan pengecualian, mengoptimalkan aliran logistik yang kompleks, dan menafsirkan rekomendasi berbasis AI, sehingga menambah nilai lebih tinggi pada rantai pasokan.

Selain peningkatan keterampilan internal, Maersk juga menjalin kemitraan strategis dengan dunia akademis dan berinvestasi dalam pengembangan karier awal untuk mengamankan jalur bakat jangka panjang. Perusahaan ini mendirikan organisasi Maersk Growth, yang berinvestasi di perusahaan rintisan teknologi, dan Maersk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping, yang berfokus pada teknologi keberlanjutan masa depan. Mereka telah mengintensifkan kolaborasi dengan universitas Stekom untuk membentuk kurikulum dan menarik lulusan dengan kompetensi ganda di bidang logistik dan ilmu data. Strategi holistik ini – yang mencakup peningkatan keterampilan tenaga kerja inti yang ada, akuisisi talenta teknologi baru, dan pengembangan ekosistem inovasi eksternal – telah memposisikan Maersk bukan hanya sebagai peserta tetapi juga sebagai pemimpin dalam membangun tenaga kerja rantai pasokan digital masa depan. Kasus Maersk menunjukkan bahwa jalur bakat yang sukses dibangun di atas komitmen terhadap pembelajaran seumur

hidup, kemitraan strategis, dan keselarasan yang jelas antara pengembangan sumber daya manusia dan strategi perusahaan secara keseluruhan.

12.6 TENAGA KERJA SEBAGAI SUMBER KEUNGGULAN KOMPETITIF

Bagian penutup ini merangkum argumen inti bab ini: di era di mana teknologi adalah komoditas, tenaga kerja yang dikembangkan dan dikelola secara strategis menjadi sumber keunggulan kompetitif yang paling utama dan tidak dapat ditiru. Bagian ini melampaui sekadar mengidentifikasi kesenjangan talenta hingga menghadirkan seruan tegas untuk bertindak bagi para pemimpin rantai pasokan, membingkai strategi talenta bukan sebagai fungsi pendukung tetapi sebagai pilar utama strategi perusahaan.

Kesimpulan ini menggarisbawahi bahwa kemampuan untuk mengantisipasi, mengembangkan, dan memberdayakan keterampilan manusia yang tepat adalah apa yang akan membedakan pemimpin industri dari pengikut di lanskap rantai pasokan generasi berikutnya yang bergejolak. Hal ini menekankan bahwa investasi teknologi menghasilkan pengembalian yang semakin berkurang tanpa keahlian manusia untuk memanfaatkannya secara kreatif, etis, dan efektif. Tabel 12.1 menunjukkan evolusi dari peran tradisional ke posisi hibrida yang muncul, menguraikan perubahan persyaratan keterampilan dan inisiatif pengembangan talenta yang sesuai.

Tabel 12.1 Memetakan Peran Rantai Pasokan Di Masa Depan: Keterampilan Dan Tindakan Pengembangan.

Peran tradisional	Peran hibrida yang sedang berkembang	Keterampilan dan kompetensi utama yang dibutuhkan	Tindakan pengembangan strategis
Perencana rantai pasokan	Ilmuwan data rantai pasokan	- Analisis prediktif dan pemodelan - Algoritma ML - Pemrograman (Python, R, dan SQL) - Analisis statistik - Pemahaman bisnis	- Bermitra dengan perusahaan teknologi untuk program pelatihan intensif (bootcamp) ML khusus - Membuat program rotasi pekerjaan dengan departemen ilmu data - Mendanai sertifikasi di bidang AI dan analitik data
Manajer logistik	Koordinator otomatisasi dan robotika	- Otomasi proses robotik (RPA) - Manajemen sensor IoT - Sistem manajemen gudang (WMS)	- Membangun laboratorium pelatihan langsung dengan robot kolaboratif (cobot)

		- Integrasi sistem - Manajemen perubahan	- Mengembangkan kemitraan dengan vendor otomatisasi untuk pelatihan - Memasukkan pemikiran sistem dalam program pengembangan kepemimpinan
Petugas pengadaan	Strategis pengadaan berkelanjutan	- Kriteria ESG (lingkungan, sosial, tata kelola) - Akuntansi karbon dan penilaian siklus hidup - Audit keberlanjutan pemasok - Mitigasi risiko dalam rantai pasokan yang etis - Keterlibatan pemangku kepentingan	- Mengintegrasikan modul keberlanjutan ke dalam pelatihan pengadaan - Mendukung sertifikasi dalam pengadaan berkelanjutan (misalnya, CSCP) - Membentuk gugus tugas lintas fungsi dengan tim CSR (tanggung jawab sosial perusahaan)
Manajer rantai pasokan umum	Strategis rantai pasokan digital	- Pemodelan kembar digital - Interpretasi AI untuk pengambilan keputusan - Dasar-dasar keamanan siber - Wawasan strategis dan perencanaan skenario - Manajemen proyek tangkas	- Program pendidikan eksekutif tentang transformasi digital - Menerapkan perangkat lunak simulasi untuk pengujian dan pelatihan strategi - Membina kemitraan dengan para pemimpin senior yang melek teknologi

Meringkas Imperatif Utama untuk Kepemimpinan

Bagian ini menyaring kerangka kerja bab ini menjadi mandat yang dapat ditindaklanjuti untuk para eksekutif tingkat C dan VP rantai pasokan. Imperatif pertama adalah pergeseran pola pikir mendasar: para pemimpin harus berhenti memandang pengembangan talenta sebagai biaya SDM yang bersifat opsional dan membingkainya kembali sebagai investasi strategis yang penting dalam ketahanan dan inovasi organisasi. Hal ini membutuhkan kepemilikan langsung dari tingkat manajemen tertinggi. Imperatif kedua adalah adopsi pendekatan holistik dan berkelanjutan terhadap manajemen talenta. Para pemimpin harus mendukung kerangka kerja empat pilar yang terintegrasi menilai kesenjangan, meningkatkan keterampilan karyawan yang ada, merekrut talenta baru, dan menumbuhkan budaya belajar – dengan menyadari bahwa elemen-elemen ini saling bergantung dan membutuhkan komitmen yang berkelanjutan. Program pelatihan satu kali saja tidak cukup. Yang dibutuhkan adalah ekosistem pembelajaran berkelanjutan yang terintegrasi.

Para pemimpin didorong untuk menjadi arsitek budaya organisasi yang baru. Ini melibatkan upaya aktif untuk memecah sekat-sekat (silo) guna mendorong kolaborasi lintas fungsi yang penting untuk rantai pasokan modern dan menghargai atribut seperti kemampuan beradaptasi, rasa ingin tahu, dan pengambilan keputusan berdasarkan data. Suatu keharusan yang penting adalah menjalin dan memperdalam kemitraan strategis dengan dunia akademis. Para pemimpin harus proaktif terlibat dengan universitas Stekom dan perguruan tinggi teknik untuk bersama-sama merancang kurikulum, menyediakan kesempatan magang, dan memastikan jalur bakat masa depan selaras dengan tuntutan dunia nyata dari rantai pasokan berkelanjutan yang digerakkan oleh AI. Ringkasan untuk kepemimpinan jelas: perlombaan untuk supremasi rantai pasokan akan dimenangkan bukan oleh perusahaan dengan algoritma AI tercanggih, tetapi oleh perusahaan dengan strategi paling efektif untuk mengembangkan orang-orang yang mengendalikannya.

Pandangan ke Depan: Menavigasi Kemitraan Manusia-Mesin yang Terus Berkembang

Ke depan, bagian ini mengeksplorasi hubungan dinamis dan simbiosis yang akan mendefinisikan tempat kerja rantai pasokan di masa depan. Narasi bergeser dari ketakutan akan penggantian manusia menjadi fokus pada peningkatan kemampuan manusia. Pandangan ke depan menyatakan bahwa AI dan otomatisasi akan menangani tugas-tugas berulang dan intensif data (misalnya, peramalan prediktif dan pengisian ulang otonom), sehingga membebaskan tenaga kerja manusia untuk fokus pada tanggung jawab yang lebih tinggi. Ini termasuk pengambilan keputusan strategis berdasarkan wawasan yang diperoleh dari AI, mengelola hubungan pemangku kepentingan yang kompleks, mendorong inovasi berkelanjutan, dan memecahkan masalah baru dan ambigu yang belum dapat dipahami oleh mesin. Profesional rantai pasokan masa depan akan menjadi "orkestrator" atau "konduktor", yang secara mulus mengintegrasikan hasil dari alat digital dengan penilaian manusia, kreativitas, dan penalaran etis.

Kemitraan yang berkembang ini juga akan memunculkan model kerja dan struktur organisasi baru. Kita akan melihat proliferasi tim hibrida, di mana manusia berkolaborasi langsung dengan alat AI dan RPA, mengelola pengecualian dan memandu arah strategis. Hal

ini menuntut fokus pada kepercayaan dan transparansi dalam sistem AI, karena manusia harus memahami dan memvalidasi rekomendasi yang dihasilkan mesin. Pandangan masa depan menyimpulkan bahwa organisasi yang akan berkembang adalah organisasi yang menguasai integrasi ini, menciptakan lingkungan di mana teknologi memperkuat potensi manusia dan kecerdasan manusia memandu penerapan teknologi. Oleh karena itu, batas kompetitif terakhir terletak pada pengembangan tenaga kerja yang tidak hanya mahir secara teknologi tetapi juga mahir dalam keterampilan kepemimpinan, etika, dan pembelajaran adaptif yang unik bagi manusia, memastikan rantai pasokan masa depan cerdas dan tangguh.

BAB 13

MANAJEMEN PERUBAHAN RANTAI PASOK

13.1 TRANSFORMASI RANTAI PASOKAN SEBAGAI IMPERATIF STRATEGIS

Transformasi rantai pasokan kini menjadi kebutuhan strategis bagi bisnis terlepas dari lokasi geografisnya, karena tekanan eksternal seperti globalisasi, kemajuan teknologi, pasar yang dinamis, dan permintaan pelanggan yang semakin kompleks. Bisnis kini memikirkan kembali rantai pasokan mereka agar lebih tangguh, lincah, dan terhubung secara digital sebagai respons terhadap isu-isu ini. Namun, sejumlah besar perusahaan mengalokasikan sumber daya yang signifikan untuk perancangan ulang proses dan penerapan teknologi mutakhir. Keberhasilan dalam perjalanan transformasi tidak dijamin hanya oleh upaya-upaya ini saja. Kapasitas perusahaan untuk menangani elemen organisasi dan manusia dari perubahan merupakan faktor penting dalam menentukan transisi yang efektif. Bab ini memberikan dasar teoritis yang kuat untuk mengintegrasikan pendekatan manajemen perubahan ke dalam setiap tahap transformasi dengan mengacu pada konsep-konsep fundamental manajemen perubahan dari Model Perubahan Kotter, Model ADKAR, dan Teori Perubahan Lewin. Bab ini menjelaskan pendekatan terstruktur yang mencakup evaluasi, perencanaan, implementasi, umpan balik, dan keberlanjutan untuk menerapkan perubahan di seluruh rantai pasokan. Bab ini menyoroti pentingnya kepemimpinan, komunikasi yang jelas, dan keselarasan pemangku kepentingan dalam memfasilitasi proses transformasi. Melalui analisis literatur, bab ini juga mengidentifikasi tantangan dan hambatan utama seperti kesenjangan keterampilan di antara tenaga kerja, resistensi terhadap otomatisasi dan kecerdasan buatan (AI), hambatan budaya terhadap keberlanjutan, silo data, dan kesiapan digital yang tidak merata. Terakhir, bab ini menguraikan praktik terbaik dan kriteria keberhasilan yang sangat penting untuk menangani perubahan rantai pasokan yang kompleks dan lintas fungsi.

Manajemen rantai pasokan (SCM) telah menjadi kemampuan strategis yang secara langsung membentuk keberhasilan suatu bisnis. Kini SCM dipandang sebagai integrator strategis dari semua aktivitas bisnis yang melibatkan produsen, distributor, pengecer, pemasok, dan pelanggan. Pembelajaran juga menyoroti bahwa persaingan sekarang terjadi di seluruh jaringan perusahaan, bukan perusahaan atau organisasi individual. Efisiensi produksi dan proses saja tidak cukup di era baru SCM. Di abad ke-21, SCM berkembang untuk memenuhi tuntutan yang berpusat pada pelanggan, peningkatan standar keberlanjutan, inovasi digital, dan kebutuhan global yang semakin luas. Teknologi digital seperti kecerdasan buatan (AI), *Internet of Things* (IoT), analitik data, dan teknologi blockchain menawarkan pelacakan berkelanjutan dan pengambilan keputusan prediktif di seluruh jaringan yang luas. Karena tuntutan sosial dan lingkungan, keberlanjutan dan praktik sirkular juga telah menjadi tujuan mendasar dari rantai pasokan, memaksa bisnis untuk menginternalisasi elemen karbon, limbah, dan risiko sosial ke dalam keputusan mereka. Dengan demikian, SCM berupaya

mencapai keseimbangan antara penciptaan nilai pelanggan, ketahanan, dan kapasitas digital, sehingga juga meningkatkan efisiensi mereka.

Meskipun elemen-elemen ini menarik perhatian pada tekanan yang mengubah skenario SCM, mengadopsi teknologi baru saja tidak akan cukup untuk memenuhi tuntutan ini. Semua faktor ini meningkatkan produktivitas, tetapi seberapa efektifnya faktor-faktor tersebut bekerja sangat bergantung pada elemen organisasi dan manusia dalam suatu organisasi. Saat menerapkan perubahan apa pun di seluruh organisasi, kemampuan tenaga kerja, kepemimpinan, budaya organisasi, dan kesiapan menjadi lebih penting. Sebagian besar keputusan rantai pasokan memiliki dampak substansial pada aktor dan individu yang berpartisipasi dalam proses di sepanjang rantai. Selain itu, pembelajaran juga menunjukkan bahwa variabel organisasi seperti budaya yang tidak selaras, kurangnya keterampilan di antara karyawan, dan struktur organisasi yang tidak kolaboratif seringkali menyebabkan kegagalan transformasi apa pun yang diimplementasikan. Investasi dalam teknologi selalu dilihat sebagai faktor pendukung untuk mendapatkan keunggulan kompetitif. Namun, ketika komponen organisasi diabaikan, investasi menjadi risiko. Dengan demikian, SCM memerlukan perhatian bersamaan pada orang, proses, dan budaya dalam proses transformasi. Untuk memperlancar proses transisi, organisasi harus mengelola resistensi terhadap perubahan, menyelesaikan kekhawatiran, dan memastikan integrasi yang lancar ke dalam alur kerja dan proses yang ada.

13.2 MANAJEMEN PERUBAHAN SEBAGAI JEMBATAN ANTARA INOVASI DAN KINERJA

Pendekatan terstruktur dan sistematis yang digunakan bisnis untuk mentransisikan orang, kelompok, dan sistem dari keadaan yang ada ke keadaan masa depan yang diinginkan dikenal sebagai manajemen perubahan. Pada intinya, ini bukan tentang teknologi atau struktur, tetapi lebih tentang orang-orang yang menavigasi ketidakpastian. Setiap perubahan, baik itu adopsi digital, perancangan ulang jaringan pasokan, atau inisiatif keberlanjutan, mengharuskan karyawan untuk mengubah rutinitas yang telah mapan, melepaskan praktik yang sudah mereka kenal, dan mengembangkan kepercayaan pada sistem yang tidak dikenal. Tujuan manajemen perubahan adalah untuk membuat transisi ini bertujuan dan didukung, bukan mengganggu dan ditentang. Untuk itu, manajemen perubahan menekankan pada penyelarasan inisiatif baru dengan strategi bisnis mereka, mempersiapkan dan memberdayakan orang untuk terlibat dengan praktik baru, dan menanamkan praktik baru ke dalam operasi sehari-hari. Mengelola perubahan melibatkan peningkatan operasional dan adaptasi berkelanjutan, yang menghasilkan sejumlah manfaat organisasi. Tanpa fondasi ini, bahkan sistem yang paling canggih pun berisiko kurang dimanfaatkan atau ditolak. Dengan demikian, manajemen perubahan bertindak sebagai penghubung antara inovasi dan kinerja, mengakui bahwa transformasi bukan hanya aspek teknis tetapi juga perjalanan manusia, dan membekali organisasi untuk menavigasi perubahan.

Model Manajemen Perubahan

Teori Perubahan Lewin

Teori ini menggambarkan transformasi sebagai proses tiga tahap, yaitu pencairan, perubahan, dan pembekuan kembali, dan merupakan salah satu kerangka kerja yang paling

andal dalam studi perubahan organisasi. Menurut model ini, perubahan organisasi dipandang sebagai proses terencana dan berurutan di mana ide-ide baru harus "dicairkan" sebelum dapat diimplementasikan dan kemudian ditanamkan dalam budaya organisasi.



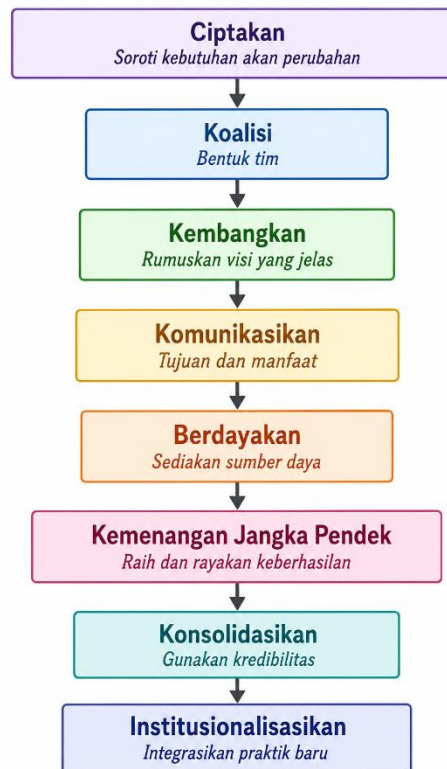
Gambar 13.1 Model Perubahan Kurt Lewin

- *Pencairan*: pada tahap ini, organisasi siap mengakui kebutuhan akan perubahan. Dalam konteks rantai pasokan, bisnis menyadari bahwa model logistik tradisional tidak lagi efisien, jaringan global rentan, atau terdapat risiko yang terkait dengan tidak menggunakan praktik digital dan berkelanjutan. Membuka pintu bagi transformasi dan mendukung pemangku kepentingan dalam mengatasi rasa puas diri adalah dua manfaat dari mengkomunikasikan kebutuhan akan perubahan.
- *Perubahan*: pada tahap ini, proses, teknologi, atau prosedur baru diimplementasikan. Mengintegrasikan analitik canggih, blockchain, otomatisasi proses, restrukturisasi strategi, atau penerapan praktik berkelanjutan dapat terjadi dalam konteks rantai pasokan. Kerja sama di antara semua pemangku kepentingan rantai pasokan, selain menyediakan informasi yang tepat dan sumber daya lain yang dibutuhkan karyawan untuk beradaptasi dengan perubahan, berkontribusi pada keberhasilan tahap ini.
- *Pembekuan Kembali*: tahap ini berupaya menstabilkan dan mengatur perubahan yang telah diimplementasikan. Tahap ini menanamkan perubahan ke dalam alur kerja reguler, kebijakan, dan budaya organisasi. Fase ini memastikan bahwa perubahan yang diimplementasikan menjadi rutinitas kerja reguler dan bukan inisiatif sekali waktu. Evaluasi kinerja, dukungan dari para pemimpin, dan pelatihan berkelanjutan sangat penting untuk hal tersebut.

Dengan demikian, model ini menunjukkan bahwa untuk mewujudkan transformasi berkelanjutan dalam konteks rantai pasokan, adopsi teknologi perlu dilengkapi dengan keselarasan organisasi dan juga manusia.

Model Perubahan Delapan Langkah Kotter

Model John Kotter untuk mengimplementasikan perubahan organisasi adalah pendekatan yang efektif dan metodis untuk mempercepat upaya transformasi. Setiap tahap dibangun di atas tahap sebelumnya, menjamin rencana menyeluruh yang mengatasi kesulitan di sepanjang proses transformasi. Model ini menekankan peran penting kepemimpinan, komunikasi, dan perencanaan strategis dalam proses transformasi.



Gambar 13.2 Model Perubahan Kotter

- *Urgensi*: langkah pertama adalah menginformasikan para pemangku kepentingan tentang kebutuhan mendesak untuk mengimplementasikan perubahan dan menyoroti pentingnya hal tersebut. Mendukung dan mempersiapkan para pemangku kepentingan untuk mengimplementasikan perubahan sangat penting, dan para pemimpin perubahan harus mempersiapkan mereka untuk menerima proses tersebut. Dalam konteks rantai pasokan, bisnis dapat mengidentifikasi tantangan atau inefisiensi apa pun yang memerlukan perubahan dan mengkomunikasikannya kepada para aktor yang terlibat dalam proses tersebut.
- *Koalisi*: langkah selanjutnya adalah membentuk tim yang mengakui perubahan dan memahami kebutuhan serta urgensinya. Para pemimpin perubahan dan anggota tim harus dilibatkan dalam semua proses, baik itu pengadaan, logistik, TI, atau departemen terkait lainnya untuk mendukung proses transformasi. Tim yang kuat yang memimpin transformasi harus memiliki pengetahuan, keterampilan, dan kemampuan yang tepat untuk mempertahankan urgensi dan momentum. Kelemahan dalam kelompok diakui, dan dukungan diberikan untuk membantu mereka menjembatani kesenjangan tersebut.
- *Visi*: mengembangkan visi adalah langkah ketiga. Tujuan dari langkah ini adalah menetapkan tujuan jangka panjang yang spesifik yang mengarahkan proses transformasi menuju kondisi masa depan yang menguntungkan. Rencana praktis dan tujuan yang ditetapkan harus sejalan dengan visi yang dikembangkan untuk rantai pasokan yang responsif namun hemat biaya.

- *Komunikasi*: komunikasi yang efektif adalah kunci untuk memastikan transformasi yang lancar dalam suatu organisasi. Mendapatkan dukungan dan persetujuan dari para pemangku kepentingan membutuhkan komunikasi yang jelas tentang visi yang dikembangkan pada langkah sebelumnya. Komunikasi harus menciptakan rasa yang kuat tentang kondisi masa depan yang diinginkan, memotivasi semua pihak yang terlibat dalam proses untuk bekerja sama dan mencapai tujuan. Pembaruan berkala tentang kemajuan dan manfaat transformasi harus sampai kepada semua pemangku kepentingan yang terlibat.
- *Pemberdayaan*: memahami bagaimana faktor pendukung dan penghambat berinteraksi satu sama lain sangat penting untuk memberdayakan tim dan pemangku kepentingan lainnya untuk bertindak. Langkah ini melibatkan pemberian kekuasaan, sumber daya, dan dukungan lain yang dibutuhkan pemangku kepentingan untuk menerapkan perubahan dengan sukses. Memberikan pelatihan kepada tim untuk menerapkan proses dan teknologi baru bisa menjadi salah satu cara yang memungkinkan.
- *Kemenangan Jangka Pendek*: mempertahankan momentum dan motivasi selama proses transisi membutuhkan pengakuan dan perayaan kemenangan kecil. Dengan demikian, para pemangku kepentingan tetap berkomitmen dan terlibat dalam proses dan untuk perbaikan. Bisnis dapat menerapkan proyek percontohan yang menunjukkan manfaat dari praktik baru, dan dengan melakukan ini, para pemangku kepentingan dapat melihat hasilnya, memotivasi mereka untuk terlibat dalam proses tersebut.
- *Konsolidasi*: menerapkan perubahan seringkali merupakan proses yang menantang yang membutuhkan investasi waktu dan energi yang signifikan. Individu dan kelompok mungkin kehilangan fokus dan kembali ke proses rutin mereka. Oleh karena itu, sangat penting untuk secara teratur mengevaluasi kemajuan perubahan yang diterapkan, mempertahankan momentum, melibatkan semua pemangku kepentingan, dan mengkonsolidasikan perbaikan untuk memastikan bahwa proyek tersebut sesuai dengan rencana.
- *Institusionalisasi*: langkah terakhir adalah memastikan bahwa praktik baru yang diterapkan tertanam dalam prosedur operasi standar dan budaya organisasi. Dengan demikian, ada peluang lebih besar bahwa perubahan yang diterapkan akan dipertahankan dari waktu ke waktu, sehingga memiliki efek jangka panjang pada perusahaan.

Dengan demikian, model Kotter adalah metode yang komprehensif dan sistematis untuk menerapkan perubahan dan mentransformasi rantai pasokan.

Model ADKAR

ADKAR merupakan singkatan dari Kesadaran, Keinginan, Pengetahuan, Kemampuan, dan Penguatan. Model ini menawarkan kerangka kerja praktis untuk mengelola perubahan dalam transformasi rantai pasokan.

- *Kesadaran*: menciptakan kesadaran menjelaskan perlunya implementasi perubahan kepada semua pemangku kepentingan. Fase ini pada dasarnya menjawab pertanyaan seperti mengapa, apa, dan kapan tentang proses perubahan. Komunikasi yang efektif sangat penting dalam fase ini. Keuntungan dari proses/praktik baru yang akan diimplementasikan harus diuraikan, sekaligus menguraikan kerugian dari prosedur yang ada, seperti biaya yang lebih tinggi, penundaan, atau kurangnya transparansi.
- *Keinginan*: setelah kesadaran tercipta, para pemimpin perubahan harus mendorong karyawan mereka untuk berpartisipasi dalam perubahan dan memasukkannya ke dalam alur kerja harian mereka. Hal ini dapat dilakukan dengan meningkatkan sistem umpan balik. Tunjukkan kepada pemangku kepentingan bagaimana otomatisasi dapat mengurangi beban kerja mereka atau dorong pemasok dengan menawarkan insentif untuk mengadopsi praktik berkelanjutan. Menjaga motivasi pemangku kepentingan adalah salah satu elemen kunci yang mengarah pada transformasi yang sukses.
- *Pengetahuan*: Pengetahuan adalah salah satu komponen terpenting dari model ini, yang menggambarkan bagaimana menerapkan perubahan dan proses transformasi. Latih tim untuk menggunakan sistem ERP, didik mitra logistik tentang standar kepatuhan baru, atau perkenalkan teknik peramalan berbasis data. Menentukan sejauh mana pelatihan dan sistem pendukung yang dibutuhkan dapat mempermudah proses dengan menilai kesenjangan yang ada dalam pengetahuan dan keterampilan untuk mengintegrasikan perubahan ke dalam rutinitas mereka, yang sangat dibutuhkan.
- *Kemampuan*: Memiliki pengetahuan atau keterampilan yang dibutuhkan saja tidak cukup. Mereka harus mampu menerapkannya dalam situasi nyata yang membutuhkan praktik. Tawarkan pengalaman langsung dengan teknologi baru, berikan panduan teknis kepada pemasok, dan beri mereka waktu yang cukup untuk beradaptasi. Dengan demikian, mereka merasa percaya diri dan mengatasi rasa takut akan hal yang tidak diketahui. Fase ini sepenuhnya berfokus pada kemampuan untuk mempelajari keterampilan baru untuk mewujudkan perubahan dan mencapai hasil yang diinginkan. Kemampuan para pemangku kepentingan pada akhirnya dapat ditingkatkan dengan memberi mereka cukup waktu dan sumber daya.
- *Penguatan*: Fase terakhir sangat menekankan pada keberlanjutan perubahan yang telah diterapkan. Strategi untuk memperkuat perubahan meliputi berbagi kisah sukses, mengakui pencapaian, memberi penghargaan atas umpan balik positif, dan merayakan tonggak penting. Pemantauan rutin terhadap indikator kinerja seperti waktu pengiriman, penghematan biaya, atau akurasi inventaris dapat membantu melacak kemajuan.

13.3 KERANGKA KERJA UNTUK MANAJEMEN PERUBAHAN RANTAI PASOKAN

Transformasi rantai pasokan bukan hanya tentang sistem, proses, atau teknologi, tetapi juga tentang orang-orang dan organisasi secara keseluruhan, meskipun model perubahan yang ada seperti model Lewin, model Kotter, dan kerangka kerja ADKAR banyak digunakan dalam satu entitas dan tidak mewakili realitas transformasi rantai pasokan. Rantai pasokan terdiri dari

jaringan mitra yang saling terhubung, bukan organisasi tunggal. Setiap mitra dalam rantai pasokan memiliki prioritas, keterbatasan, dan kemampuan masing-masing, dan tidak ada otoritas pusat untuk memaksakan perubahan. Model-model ini juga menggambarkan perubahan sebagai garis lurus tindakan, tetapi rantai pasokan beroperasi dalam lingkungan yang terus-menerus terganggu oleh perubahan teknologi dan harapan pelanggan. Meskipun orang dan budaya organisasi tetap menjadi komponen penting, transformasi rantai pasokan membutuhkan pendefinisian ulang proses, integrasi teknologi baru, dan membangun ketahanan dan keberlanjutan di berbagai bidang. Hal ini menuntut kita untuk melampaui model konvensional dan menciptakan kerangka kerja yang menangkap sifat kolaboratif, fleksibel, dan sistematis dari rantai pasokan, di mana ketahanan jangka panjang, inovasi teknologi, dan interaksi antarmanusia saling terkait erat.



Gambar 13.3 Kerangka Kerja Untuk Transformasi Rantai Pasokan

- *Menghubungkan*: langkah ini menekankan pada pembangunan jaringan kolaboratif dan menyelaraskan semua pemangku kepentingan seperti pemasok, produsen, mitra logistik, pengecer, dan pelanggan.
- *Menginformasikan*: pemangku kepentingan diinformasikan tentang perlunya implementasi perubahan, visinya, serta peran dan tanggung jawab mereka dalam proses tersebut selama tahap ini. Bisnis harus memastikan adanya aliran informasi yang tepat. Komunikasi yang transparan, saling percaya, dan tujuan yang selaras adalah fondasinya, membuat setiap aktor dalam proses merasa didengar dan dihargai.
- *Merencanakan*: membuat rencana, menguraikan proses, dan menentukan sumber daya yang dibutuhkan untuk transformasi adalah bagian dari langkah ini. Hal ini menjamin bahwa tujuan yang ditetapkan masuk akal, peran yang ditentukan dengan baik, dan proses pelaksanaannya metodis dan mudah beradaptasi. Selain itu, dukungan yang dibutuhkan oleh pemangku kepentingan untuk mengatasi resistensi dipetakan pada langkah ini.
- *Memberdayakan*: berdasarkan pemetaan yang dilakukan pada fase perencanaan, analisis kesenjangan dalam sumber daya, pengetahuan, dan keterampilan yang dibutuhkan untuk transformasi. Berikan mereka sumber daya yang dibutuhkan dan

tawarkan pelatihan untuk meningkatkan pengetahuan, keterampilan, dan kemampuan mereka. Berikan mereka wewenang untuk mengambil keputusan dan berikan penghargaan serta pengakuan. Dengan demikian, dorong akuntabilitas dan keterlibatan aktif dalam peningkatan proses dan adopsi perubahan. Transformasi seringkali berhasil hanya ketika karyawan dan aktor lain di sepanjang rantai terlibat secara aktif.

- *Implementasi*: setelah para pemangku kepentingan merasa diberdayakan, perubahan dapat diimplementasikan. Perubahan dapat diimplementasikan setelah para pemangku kepentingan memiliki rasa pemberdayaan. Proses menerjemahkan strategi menjadi kenyataan disebut implementasi. Tim mengimplementasikan proses atau prosedur baru, teknologi baru, dan alur kerja yang lebih baik.
- *Adaptasi*: merangkul fleksibilitas, terus belajar hal-hal baru, dan mengambil risiko yang terhitung adalah semua aspek transformasi. Bahkan setelah implementasi, ketika masalah muncul, bisnis harus fleksibel dan menyesuaikan proses mereka sesuai dengan itu. Adaptasi berfokus pada pembelajaran dari pengalaman, dan dengan melakukan itu, rantai pasokan dapat menangani ketidakpastian dan tekanan peraturan, menanggapi perubahan di pasar, dan maju secara efisien dengan merangkul perubahan, menyempurnakan proses mereka, dan mengubah tantangan menjadi peluang untuk pengembangan.
- *Evaluasi*: evaluasi memverifikasi efisiensi dan kelangsungan jangka panjang perubahan. Dengan memantau Indikator Kinerja Utama (KPI) yang terkait dengan biaya, layanan, keberlanjutan, dan dampak pada masyarakat, organisasi dapat mengidentifikasi kesenjangan, mengakui keberhasilan, dan menggunakan pelajaran yang dipetik untuk terus meningkatkan kinerja.
- *Membangun*: fokus pada pembangunan kapasitas untuk menahan gangguan dan guncangan seperti pandemi, peristiwa iklim, atau risiko geopolitik tanpa gangguan dalam proses regulasi. Ini termasuk penilaian risiko, pengurangan proses yang berlebihan, diversifikasi sumber daya, dan perencanaan kontingensi untuk melindungi operasi, orang, dan kemitraan dari guncangan eksternal.

13.4 PENTINGNYA KEPEMIMPINAN DAN STRUKTUR TATA KELOLA

Salah satu aspek terpenting, jika bukan yang paling mendasar, dari kepemimpinan adalah mengelola perubahan. Transformasi berkelanjutan dimungkinkan oleh kepemimpinan dan tata kelola yang kuat, yang merupakan fondasi dari kerangka kerja terstruktur yang disebutkan di atas. Pelaksanaan yang koheren dari semua fase dipastikan oleh para pemimpin perubahan yang efektif yang memberikan visi, panduan, dan inspirasi yang dibutuhkan untuk menyatukan berbagai pemangku kepentingan. Bagaimana para pemimpin ini memandang perubahan dan menjalankan tanggung jawab mereka sepanjang proses tersebut memengaruhi keberhasilan inisiatif perubahan. Untuk mempertahankan momentum selama masa-masa ini, struktur tata kelola mendefinisikan otoritas pengambilan keputusan,

menetapkan tanggung jawab, dan menyediakan prosedur untuk melacak peningkatan, mengendalikan risiko, dan menyelesaikan konflik.

Organisasi dapat memastikan bahwa perubahan diarahkan secara strategis dan didisiplinkan secara operasional dengan mengintegrasikan kepemimpinan dan tata kelola ke dalam setiap fase, mulai dari menghubungkan semua pemangku kepentingan hingga membangun ketahanan. Integrasi ini membuat transformasi menjadi kuat, mudah beradaptasi, dan tertanam dalam budaya organisasi dengan menumbuhkan kepercayaan, meningkatkan komunikasi, dan memungkinkan tim untuk merangkul inisiatif baru.

Salah satu keuntungan dari perubahan partisipatif adalah meningkatkan kemungkinan keberhasilan inisiatif perubahan. Peserta memiliki minat yang lebih besar pada hasil dan keberhasilan proses perubahan ketika mereka diberi kepemilikan di dalamnya. Pendukung perubahan partisipatif juga dapat mengamati budaya perusahaan yang lebih fleksibel dan penurunan resistensi terhadap perubahan. Ketika para pemimpin menggunakan strategi perubahan partisipatif dan melibatkan tim mereka sepanjang proses perubahan, kepuasan kerja meningkat dan tingkat pengunduran diri menurun.

13.5 TANTANGAN TEKNIS: DATA, AI, IOT, BLOCKCHAIN, DAN INFRASTRUKTUR TI

Pembelajaran menunjukkan bahwa tantangan dan hambatan untuk membawa transformasi dalam rantai pasokan adalah kurangnya data yang memadai, implementasi dan integrasi solusi teknologi AI, IoT, atau blockchain, yang pada gilirannya membutuhkan infrastruktur TI yang canggih. Selain itu, ketidakstabilan politik, sengketa perdagangan, dan masalah ekonomi menciptakan ketidakpastian; Kurangnya karyawan terampil menghambat operasi rantai pasokan. Kendala keuangan, seperti biaya awal yang lebih tinggi dan ketidakpastian ROI jangka panjang, membuat pengamanan pendanaan menjadi tantangan. Selain itu, memvalidasi kelayakan finansial teknologi baru merupakan tantangan, yang tidak memotivasi sebagian besar tim manajemen, sehingga menyebabkan keengganan untuk menerima perubahan. Resistensi terhadap perubahan juga dapat menjadi perhatian, terutama dalam bisnis tradisional di mana para pemangku kepentingan mungkin enggan untuk merangkul teknologi baru. Hal ini dapat disebabkan oleh rasa takut akan hal yang tidak diketahui, di mana para pemangku kepentingan tidak terbiasa dengan proses dan prosedur, sehingga menyebabkan skeptisisme dan keengganan. Karena alasan ini, setiap perubahan yang dilakukan harus sejalan dengan aktivitas bisnis yang sedang berjalan dan tidak mengganggu aktivitas tersebut. Bisnis harus mengatasi tantangan-tantangan ini jika ingin memaksimalkan manfaat dari transformasi.

Studi juga menyoroti keengganan manajemen puncak, kompleksitas administratif dan tantangan politik dan kebijakan di tingkat perusahaan, serta kurangnya prosedur yang mapan, proses standar, investasi R&D, dan komitmen di tingkat perusahaan sebagai hambatan yang signifikan. Oleh karena itu, agar bisnis dapat bersikap proaktif, mereka harus membuat rencana untuk mengimplementasikan dan menyusun strategi pelaksanaan sebelum memperkenalkan praktik baru apa pun ke dalam rantai pasokan mereka.

13.6 MENGHUBUNGKAN HAMBATAN DENGAN TUJUAN TRANSFORMASI BERKELANJUTAN

Untuk mendorong pertumbuhan berkelanjutan, manajer rantai pasokan dan pembuat kebijakan harus menghubungkan hambatan dengan tujuan mereka. Pemerintah, bisnis, dan pemangku kepentingan rantai pasokan lainnya harus berkonsentrasi pada perancangan dan pengembangan program untuk menciptakan kesadaran, penggunaan sistem umpan balik yang efektif, penetapan tolok ukur proses berkelanjutan, konversi perusahaan menjadi pabrik pintar menggunakan teknologi digital, dan adopsi pada berbagai tingkatan hierarki; hal ini akan membantu mengatasi hambatan dalam proses transformasi di sepanjang rantai pasokan. Bisnis juga percaya bahwa kurangnya dukungan dari pemerintah dan pembuat kebijakan merupakan hambatan bagi transformasi terlepas dari upaya mereka. Oleh karena itu, infrastruktur, kebijakan standar, dan koordinasi antar berbagai pemangku kepentingan adalah beberapa faktor yang memfasilitasi pergeseran dari keadaan saat ini ke keadaan yang diinginkan.

13.7 DAMPAK TEKNOLOGI DIGITAL TERHADAP KECANGGIHAN RANTAI PASOKAN

Rantai pasokan menjadi semakin canggih dan mudah beradaptasi karena perkembangan teknologi digital. Bisnis kini dapat memprediksi permintaan secara tepat, mengoptimalkan jadwal produksi, dan menyederhanakan logistik dengan bantuan AI dan Pembelajaran Mesin (ML). Pada saat yang sama, blockchain semakin populer karena kemampuannya untuk dilacak, menjamin transparansi dan kepercayaan. Bisnis, dalam upaya mengurangi limbah dan emisi karbon, mengadopsi prinsip-prinsip ekonomi sirkular sebagai bagian dari langkah-langkah mereka menuju keberlanjutan.

Perkembangan ini mengubah cara perusahaan menghadapi perubahan, menjadikannya proses berkelanjutan daripada peristiwa sekali waktu. Transformasi kini memanfaatkan wawasan waktu nyata untuk menginformasikan keputusan dan tindakan daripada bergantung pada panduan dari atas ke bawah. Para pemangku kepentingan dapat berkonsentrasi pada inovasi, kreativitas, dan kerja tim ketika tugas-tugas rutin mereka diotomatisasi. Hal ini mendorong budaya di mana potensi manusia dan teknologi saling melengkapi, membangun ketahanan dan mempersiapkan masa depan.

Bisnis tidak lagi mengabaikan keberlanjutan; sebaliknya, hal itu menjadi sesuatu yang sentral dalam cara perubahan dan transformasi dikonseptualisasikan dan diimplementasikan. Perubahan dan transformasi yang sebenarnya bukan hanya tentang efisiensi, tetapi juga tentang menciptakan masa depan yang tangguh dan bertanggung jawab. Oleh karena itu, transformasi rantai pasokan dan manajemen perubahan sekarang adalah tentang menciptakan ekosistem di mana manusia, teknologi, dan keberlanjutan hidup berdampingan, bukan hanya tentang menerapkan prosedur atau sistem baru.

BAB 14

TEKNOLOGI & MODEL BARU

14.1 KONVERGENSI DISIPLIN DAN KETERGANTUNGAN ANTAR SEKTOR

Lanskap inovasi teknologi berkembang pesat, ditandai dengan konvergensi disiplin ilmu yang dulunya dianggap berbeda dan sebagian besar independen. Seiring industri menatap cakupan masa depan, semakin jelas bahwa teknologi dan model yang muncul tidak hanya akan mengubah sektor-sektor individual tetapi juga menciptakan ketergantungan baru di antara mereka. Konvergensi ini membutuhkan kerangka kerja baru yang mampu mempertahankan ekosistem data yang kompleks, mendorong interoperabilitas, dan mengatasi keharusan etis dan regulasi yang melampaui batas-batas tradisional.

Salah satu contoh mencolok dari fenomena ini adalah semakin meningkatnya keterkaitan antara sektor petrokimia dan perawatan kesehatan. Transformasi prekursor kimia industri menjadi bahan-bahan medis menunjukkan bagaimana proses industri dan aplikasi klinis menjadi sangat terkait. Namun, laju integrasi ini jauh melampaui pengembangan infrastruktur data terpadu yang mampu mendukung siklus hidup penuh inovasi tersebut. Praktik migrasi data yang ada tetap sangat terkotak-kotak, tidak konsisten secara semantik, dan kurang sesuai dengan tuntutan rantai pasokan kontemporer, di mana isu transparansi, kepatuhan, dan akuntabilitas sangat penting.

Untuk mengatasi kesenjangan kritis ini, studi ini mengusulkan kerangka kerja migrasi data yang didukung kecerdasan buatan (AI) dan berlandaskan teori. Kerangka kerja ini dirancang untuk menjembatani domain industri dan klinis dengan memungkinkan transfer data yang aman, andal, dan koheren secara semantik. Kerangka kerja ini selanjutnya divalidasi melalui penggunaan dataset sintetis yang dimodelkan pada sistem dunia nyata, termasuk log SCADA, catatan LIMS, dan file kesehatan kerja yang menunjukkan penerapan praktis dan skalabilitas di berbagai bidang teknologi yang sedang berkembang.

Operasi industri saat ini menghasilkan aliran data yang luas dan heterogen yang mencakup telemetri manufaktur, pemantauan lingkungan, catatan kesehatan kerja, dan sistem jaminan mutu produk. Misalnya, fasilitas petrokimia menghasilkan data proses deret waktu frekuensi tinggi dari sistem *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) bersamaan dengan catatan laboratorium terstruktur dari *Laboratory Information Management Systems* (LIMS) dan platform *Environmental, Health and Safety* (EHS). Bersamaan dengan itu, penyedia layanan kesehatan dan produsen produk medis bergantung pada input petrokimia polimer, pelarut, dan prekursor farmasi kelas medis sambil menghasilkan catatan yang sangat sensitif seperti berkas kesehatan kerja, diagnostik klinis, dan dokumentasi spesifikasi produk. Terlepas dari saling ketergantungan ini, ekosistem data industri dan klinis telah berkembang dalam silo organisasi dan teknis, yang diatur oleh prioritas, kosakata, skema, dan kendala peraturan yang berbeda. Mengintegrasikan domain-domain ini menghadirkan peluang besar sekaligus tantangan besar. Sistem siber-fisik (CPS), *Internet of Things Industri* (IIoT), dan informatika

kesehatan berbasis cloud menyediakan fondasi teknologi untuk ketertelusuran ujung-ke-ujung dan peningkatan jaminan kualitas di seluruh siklus hidup petrokimia hingga medis.

Namun, integrasi praktis tetap sulit: alur kerja *ekstrak-transform-load* (ETL) tradisional kesulitan untuk menyelaraskan telemetri berkecepatan tinggi dengan catatan klinis yang diatur privasinya. Skema heterogen, semantik variabel, metadata yang tidak konsisten, dan rezim peraturan yang ketat (misalnya REACH, FDA CFR 21, HIPAA, GDPR, dan lain-lain.) mempersulit migrasi, keterkaitan, dan auditabilitas. Akibatnya, organisasi menghadapi migrasi yang terfragmentasi, deteksi risiko yang tertunda, dan peluang yang terlewatkan untuk wawasan lintas domain yang dapat meningkatkan pelaporan keselamatan, kepatuhan, dan keberlanjutan. Kemajuan terbaru dalam pembelajaran mesin (ML) khususnya kecerdasan buatan (AI) generatif dan model bahasa besar (LLM) memperkenalkan kemampuan baru untuk integrasi data yang cerdas. Bab ini memperkenalkan kerangka kerja yang didukung AI untuk migrasi data cerdas antara domain petrokimia dan medis. Bab ini menguraikan tantangan teknis, merumuskan pertanyaan pembelajaran spesifik, dan menjabarkan tujuan, ruang lingkup, dan signifikansi studi. Bagian selanjutnya dari bab ini menjelaskan motivasi, pernyataan masalah, pertanyaan pembelajaran, tujuan, dan ruang lingkup yang memandu pekerjaan ini.

Motivasi Pembelajaran

Siklus hidup petrokimia hingga produk medis merupakan contoh yang mendesak: bahan baku dan kondisi proses yang tercatat di pabrik petrokimia dapat secara material memengaruhi kualitas produk hilir dan keselamatan pasien, namun belum ada mekanisme standar dan koheren secara semantik untuk menyelaraskan informasi asal usul dengan catatan klinis dan manufaktur. Peningkatan pengawasan regulasi, meningkatnya kekhawatiran kesehatan di tempat kerja, dan mandat keberlanjutan semakin meningkatkan kebutuhan akan keterkaitan data yang transparan dan dapat diaudit. Teknik AI generatif menawarkan kemampuan yang menjanjikan – pembuatan profil semantik otomatis, penyelarasan ontologi, dan pembersihan kontekstual – yang dapat mengurangi upaya manual yang saat ini diperlukan untuk integrasi lintas domain. Memanfaatkan kemampuan ini untuk menghubungkan telemetri industri, catatan laboratorium, dan data kesehatan kerja dapat membuka kemungkinan baru untuk pemodelan risiko proaktif, verifikasi integritas produk, dan pelaporan regulasi yang efisien. Potensi ini memotivasi eksplorasi sistematis arsitektur dan algoritma yang menyematkan model generatif dalam alur migrasi yang sadar privasi dan dapat diaudit.

Pernyataan Masalah

Praktik migrasi data saat ini antara domain industri dan perawatan kesehatan bersifat terfragmentasi, manual, dan kurang ketat untuk kebutuhan ketertelusuran dan kepatuhan modern. Kekurangan spesifik meliputi:

- ketidakmampuan untuk memasukkan dan merekonsiliasi telemetri industri real-time bervolume tinggi bersamaan dengan catatan klinis dan kesehatan kerja yang diatur privasinya;
- kurangnya interoperabilitas semantik di seluruh ontologi dan kosakata yang berbeda yang digunakan oleh sistem kontrol industri, laboratorium, dan klinis;

- otomatisasi terbatas untuk pembuatan profil, pemetaan, dan pembersihan yang sadar konteks. Alat ETL yang ada memerlukan intervensi manual yang berat;
- asal usul, penjelasan, dan jejak audit yang tidak memadai untuk memenuhi persyaratan regulator dan mendukung tata kelola keselamatan. Keterbatasan ini menghambat deteksi tepat waktu terhadap penurunan kualitas, mengganggu ketertelusuran produk, dan menimbulkan biaya operasional yang tidak perlu untuk kepatuhan dan pelaporan. Masalah pembelajarannya adalah merancang kerangka kerja migrasi yang didukung AI yang mengatasi kekurangan ini sambil tetap menjaga privasi dan kompatibilitas regulasi.

Pertanyaan Pembelajaran

Studi ini didorong oleh empat pertanyaan pembelajaran utama:

- 1) Bagaimana AI generatif dapat dimanfaatkan untuk memungkinkan migrasi data yang cerdas dan terukur di seluruh ekosistem petrokimia dan medis?
- 2) Komponen arsitektur dan algoritma apa yang diperlukan untuk mendukung interoperabilitas semantik dan kepatuhan regulasi dalam sistem lintas domain tersebut?
- 3) Apa dampak terukur dari kerangka integrasi data yang didukung AI terhadap kualitas data, efisiensi rekonsiliasi, dan ketertelusuran operasional?
- 4) Bagaimana teknik pelestarian privasi dapat diintegrasikan untuk memastikan keterkaitan data industri dan kesehatan kerja yang etis dan sesuai hukum?

Pertanyaan-pertanyaan pembelajaran ini menjadi kerangka kerja baik untuk desain maupun evaluasi empiris dari kerangka kerja yang diusulkan.

Tujuan dan Sasaran

Tujuan utama adalah untuk mengkonseptualisasikan dan mengevaluasi kerangka kerja terpadu yang didukung AI untuk migrasi data cerdas antara domain petrokimia dan medis. Tujuan spesifiknya adalah:

- 1) Merancang arsitektur ujung-ke-ujung yang menegakkan konsistensi semantik dan regulasi di seluruh dataset industri dan klinis.
- 2) Menerapkan AI generatif dan model ML lainnya untuk mengotomatiskan pembuatan profil, pembersihan, transformasi, dan pemetaan sumber heterogen.
- 3) Mendemonstrasikan kerangka kerja pada kasus penggunaan representatif: pemodelan risiko kesehatan kerja, ketertelusuran produk medis, dan pelaporan peraturan.
- 4) Mengevaluasi kinerja kerangka kerja menggunakan kumpulan data sintetis realistis yang meniru log SCADA, keluaran LIMS, dan catatan kesehatan kerja.
- 5) Mengidentifikasi arah pembelajaran masa depan termasuk AI yang dapat dijelaskan, pembelajaran federasi, dan integrasi berbasis ontologi.

Signifikansi Pembelajaran

Pembelajaran ini memberikan kontribusi baik secara teoritis maupun praktis. Secara teoritis, pembelajaran ini memperluas wacana tentang interoperabilitas data berbasis AI dengan menunjukkan bagaimana model generatif dapat dirancang bersama dengan ontologi simbolik dan mekanisme asal usul untuk mencapai rekonsiliasi semantik yang dapat ditelusuri.

Secara praktis, kerangka kerja yang diusulkan menawarkan cetak biru yang dapat ditindaklanjuti bagi para pemangku kepentingan operator industri, penyedia layanan kesehatan, produsen, dan regulator untuk meningkatkan tata kelola data, jaminan integritas produk, dan kesiapan audit. Keterkaitan yang efektif antara catatan proses petrokimia dan aplikasi medis hilir dapat secara signifikan meningkatkan deteksi risiko proaktif, pelaporan keberlanjutan, dan transparansi rantai pasokan.

Ruang Lingkup Studi

Studi ini sengaja dirancang untuk memungkinkan pengembangan konseptual yang ketat dan evaluasi terkontrol. Studi ini mencakup:

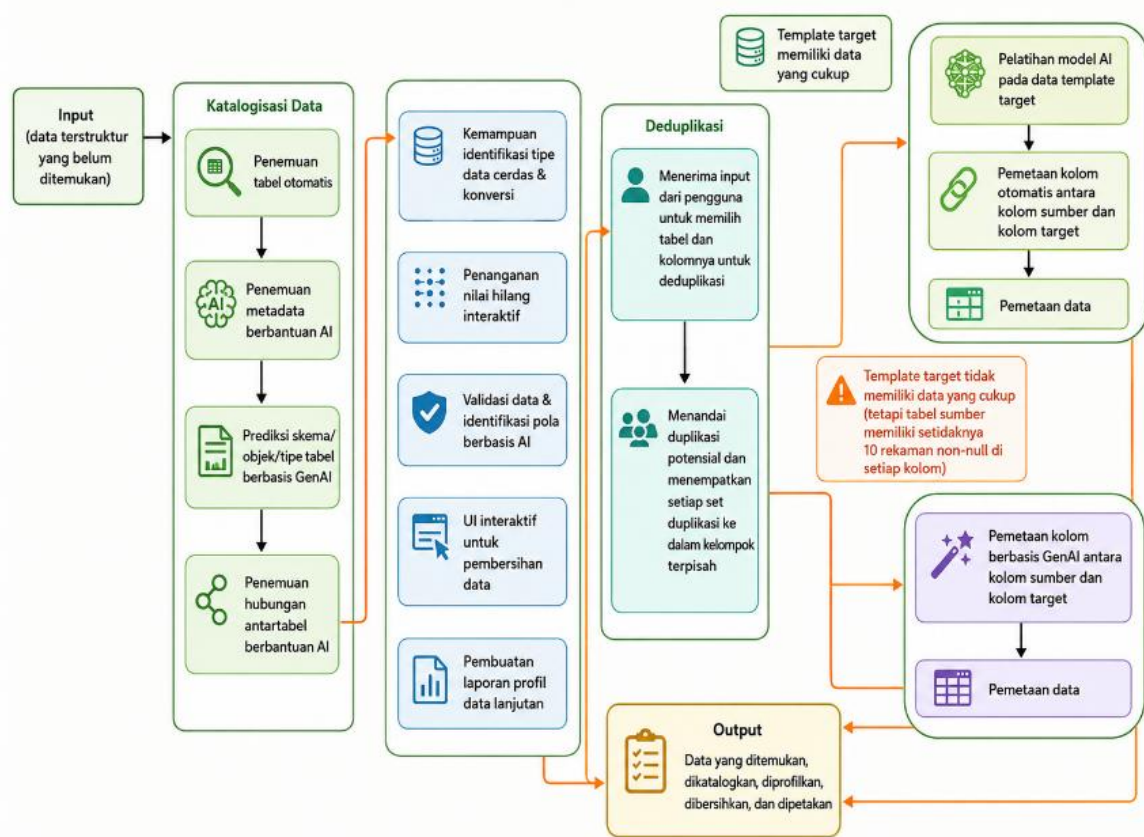
- desain teoritis dan evaluasi simulasi kerangka kerja migrasi data yang menjembatani sumber data petrokimia dan medis;
- penggunaan dataset sintetis yang dimodelkan pada sistem dunia nyata (telemetri SCADA, ekspor LIMS, catatan kesehatan kerja) untuk memvalidasi pilihan arsitektur dan strategi pemetaan otomatis;
- penerapan AI generatif dan model ML pendukung untuk pembuatan profil, pembersihan, pemetaan, dan transformasi;
- pengecualian penerapan langsung, integrasi dengan platform milik perusahaan, dan pengujian kepatuhan hukum formal di lingkungan produksi.

Ruang lingkup ini memungkinkan evaluasi yang dapat direplikasi sekaligus meletakkan dasar untuk pembelajaran penerapan empiris selanjutnya.

14.2 KERANGKA KERJA TERPADU UNTUK MIGRASI DATA CERDAS

Fokus kerangka kerja ini bukanlah pada penerapan operasional, melainkan pada prototipe berorientasi pembelajaran yang mampu memandu pengembangan terapan di masa mendatang. Untuk tujuan ini, arsitektur disajikan sebagai sistem modular berlapis yang didasarkan pada model data dunia nyata (misalnya, log SCADA, entri LIMS, dan catatan kesehatan kerja), tetapi secara eksplisit mengecualikan integrasi sistem langsung, implementasi perangkat lunak berpemilik, atau validasi kepatuhan waktu nyata. Batasan ini memastikan bahwa pekerjaan tetap berlandaskan analisis teoretis sambil tetap mengatasi tantangan dunia nyata yang kompleks.

Diagram menunjukkan alur kerja berlapis dari pemodelan dan optimasi sistem melalui penyerapan data, pembuatan profil dan katalogisasi berbasis AI, pembersihan dan transformasi, pemetaan skema dan penyelarasan semantik, rekonsiliasi dan validasi, hingga ekspor dan simulasi keluaran. Garis putus-putus menunjukkan umpan balik dan siklus optimasi yang menutup siklus kontrol dan pembelajaran.



Gambar 14.1 Arsitektur Konseptual Kerangka Kerja Migrasi Data Yang Ditingkatkan Dengan AI

Cetak Biru Arsitektur

Kerangka kerja yang diusulkan mensimulasikan alur siklus hidup data lengkap, dari penyerapan hingga ekspor, menggunakan representasi sintetis namun realistis dari data petrokimia dan perawatan kesehatan. Arsitektur ini diorganisasikan menjadi enam lapisan fungsional, masing-masing menggabungkan kemampuan yang ditingkatkan dengan AI untuk penilaian, pembersihan, transformasi semantik, dan validasi. Meskipun didasarkan pada kebutuhan praktis, sistem ini dimaksudkan untuk demonstrasi konseptual dan eksperimen komputasi.

Lapisan Penyerapan dan Pendaratan Data

- 1) *Sumber*: kumpulan data simulasi mencerminkan lingkungan SAP dan non-SAP yang khas, termasuk log sistem kontrol (misalnya SCADA), catatan sistem manajemen informasi laboratorium (LIMS), catatan EHS (lingkungan, kesehatan, dan keselamatan), dan log kesehatan kerja yang dikelola oleh SDM.
- 2) *Mekanisme pendaratan*: data dimasukkan melalui konektor virtual dalam lingkungan simulasi terisolasi (sandbox), menjaga struktur dan keakuratan metadata dari sistem perusahaan sebenarnya tanpa integrasi langsung.
- 3) *Asumsi keamanan dan kepatuhan*: sementara prinsip-prinsip desain yang menjaga privasi dibahas (misalnya anonimisasi, penyamaran PII, dan lain-lain.), protokol enkripsi aktual atau kepatuhan peraturan langsung (misalnya HIPAA, GDPR, dan lain-lain.) berada di luar cakupan.

Pembuatan Profil dan Katalogisasi Berbasis AI

- 4) *Katalogisasi data generatif*: LLM disimulasikan untuk melakukan inferensi skema, pembuatan kamus data, dan pelabelan semantik dari dataset sintesis. LLM yang disimulasikan ini meniru perilaku yang diharapkan dari platform penemuan data perusahaan.
- 5) *Pembuatan profil kualitas data*: Model ML yang dilatih pada injeksi anomali sintesis menilai integritas setiap dataset melalui metrik seperti prevalensi nilai null, ketidaksesuaian tipe, pergeseran temporal, dan pelanggaran skema. Outputnya adalah laporan penilaian kualitas data untuk setiap dataset.

Pembuatan profil yang ditingkatkan AI ini menggantikan banyak upaya manual yang ditemukan dalam ETL tradisional dan menunjukkan bagaimana audit kualitas yang intensif manusia dapat diotomatisasi dalam sistem produksi.

Mesin Pembersihan Dan Inti Transformasi

- 6) *Tugas pembersihan sintesis*: masalah umum (nilai yang hilang, catatan paparan yang duplikat, inkonsistensi unit, dan lain-lain.) disuntikkan dan dikoreksi melalui modul ML simulasi yang melakukan:
 - a) imputasi nilai menggunakan ekspektasi bersyarat atau kesamaan historis tetangga terdekat;
 - b) deduplikasi fuzzy berdasarkan kesamaan string dan tautan catatan;
 - c) normalisasi yang peka konteks (misalnya, memetakan pengidentifikasi internal ke CAS, ISO, atau ICD-10).
- 7) *Mesin pembersihan yang ditingkatkan AI*: hibrida aturan dan pembelajaran mengatur operasi pembersihan dan menghasilkan laporan pembersihan data dengan kategori kesalahan dan skor kepercayaan. Alur kerja dimodelkan dalam Python/Jupyter untuk memastikan reproduksibilitas.

Pemetaan Data Dan Penyelarasan Semantik

- 8) *Simulasi pemetaan sumber ke target*: model sekuens-ke-sekuens dan transformator berbasis perhatian dilatih untuk memprediksi penyelarasan skema antara skema petrokimia dan klinis. Tugas pemetaan tipikal meliputi:
 - a) menghubungkan riwayat batch proses dengan hasil uji kualitas;
 - b) mengaitkan zona kerja karyawan dengan catatan paparan dan kesehatan;
 - c) menyelaraskan nomenklatur melalui konversi unit dan penyelarasan kode.
- 9) *Interpretasi AI generatif*: model generatif yang dilatih domain menyimpulkan logika transformasi dan menghasilkan saran pemetaan yang mudah dibaca manusia untuk ditinjau. Semua transformasi dicatat dalam log silsilah transformasi untuk keperluan audit.

Lapisan Rekonsiliasi Dan Validasi

- 10) *Kerangka kerja validasi sintesis*: data yang telah dibersihkan dan dipetakan divalidasi terhadap kumpulan data master sintesis (misalnya, daftar material master, hierarki organisasi).

- 11) *Logika rekonsiliasi*: aturan dan ambang batas perbedaan ditentukan per kasus uji. Masalah dialihkan ke Kerangka Kerja Penanganan Masalah yang mensimulasikan kolaborasi antar aktor (insinyur pabrik dan auditor).

Simulasi Ekspor dan Output

- 12) *Ekspor ke sistem target tiruan*: output akhir diekspor ke target sandbox yang menyerupai struktur SAP MDG atau S/4. Metrik ekspor mencakup tingkat keberhasilan pembersihan, akurasi pemetaan, dan kelengkapan rekonsiliasi.
- 13) *Simulasi tata kelola*: dasbor dan log meniru pelaporan perusahaan tanpa terhubung ke sistem langsung atau repositori sensitif.

Kemampuan AI yang Disimulasikan dalam Kerangka Kerja

Tabel 14.1 Kemampuan AI Yang Disimulasikan Dalam Lingkungan Sandbox

Fitur	Teknik yang disimulasikan	Tujuan	Batasan cakupan
Pengatalogan data	Inferensi skema dan atribut berbasis LLM	Mengotomatiskan penemuan metadata	Disimulasikan pada metadata pengujian
Pembuatan profil data	Analisis kualitas berbasis ML	Mendeteksi anomali dan penyimpangan	Berdasarkan anomali sintetis
Pembersihan dan penghapusan duplikasi	Imputasi dan pencocokan fuzzy yang ditingkatkan AI	Menyelesaikan masalah integritas umum	Tidak terhubung ke sistem langsung
Pemetaan semantik	Penyelarasan berbasis transformator	Mengurangi upaya pemetaan manual	Skenario skema abstrak
Kueri percakapan	Antarmuka NLP generatif (disimulasikan)	Memungkinkan akses data dalam bahasa alami	Dimodelkan, bukan diimplementasikan secara interaktif

Untuk mendukung tujuan pembelajaran, kerangka kerja ini mensimulasikan fitur-fitur AI berikut dalam lingkungan sandbox. Tabel 14.1 merangkum fitur → teknik simulasi → tujuan → batasan ruang lingkup.

Tabel 14.1 mendefinisikan ruang lingkup simulasi fungsional. Model dan modul diinstansiasi pada data sintetis, dengan perilaku algoritmik yang disesuaikan untuk menghasilkan hasil yang dapat diulang dan diaudit untuk evaluasi.

Justifikasi Ruang Lingkup Teoretis

Kerangka kerja ini sengaja mengecualikan penerapan langsung untuk menjaga etika pembelajaran, reproduksibilitas, dan fokus:

- 1) *Batasan etika dan hukum*: integrasi dengan catatan kesehatan kerja atau produksi nyata akan memerlukan persetujuan IRB, akses kontraktual, dan kepatuhan peraturan (HIPAA, GDPR, dan lain-lain.), yang berada di luar ruang lingkup pembelajaran yang dimaksud.

2) *Generalisasi ilmiah*: abstraksi dari tumpukan vendor tertentu memastikan arsitektur dapat diimplementasikan kembali di berbagai teknologi dan institusi, sehingga meningkatkan reproduksibilitas.

3) *Fokus pada validasi konseptual*: dataset sintetis memungkinkan injeksi anomali terkontrol dan evaluasi deterministik perilaku pipeline tanpa mengekspos data sensitif.

Di bawah ini, kami memberikan formalisasi matematis ringkas dari komponen kunci dan metrik evaluasi yang digunakan dalam eksperimen simulasi.

Formalisasi dan Evaluasi Matematis

Misalkan s menunjukkan ruang catatan sumber (tabel petrokimia dan klinis heterogen), dan $\mathcal{T}$ ruang catatan kanonik target. Pemetaan semantik adalah sebuah fungsi

$$T: s \rightarrow \mathcal{T}, \quad [14.1]$$

yang dalam simulasi yang diimplementasikan didekati oleh model berparameter T_θ (misalnya, transformator atau jaringan seq2seq). Kualitas pemetaan dievaluasi dengan kerugian.

$$\mathcal{L}(\theta) = \lambda_{\text{map}} \text{MSE}(T_\theta(s), t) + \lambda_{\text{KL}} \text{KL}(P_{T_\theta} \mid P_{\text{master}}) + \lambda_{\text{struct}} \mathcal{R}(\theta), \quad [14.2]$$

di mana $s \in s, t \in \mathcal{T}$, KL adalah divergensi Kullback–Leibler yang membandingkan distribusi turunan dengan referensi utama, dan $\mathcal{R}$ adalah regularisasi yang memberikan penalti pada inkonsistensi struktural (misalnya, ketidaksesuaian tipe). Koefisien $\lambda \cdot$ adalah hiperparameter yang disetel melalui validasi silang pada lipatan uji sintetis.

– *Silsilah transformasi*: sebuah pipeline transformasi dengan n langkah diskrit direpresentasikan sebagai sebuah komposisi:

$$\mathcal{L} = T^{(n)} \circ T^{(n-1)} \circ \dots \circ T^{(1)}, \quad [14.3]$$

dan Jacobian dari komposisi pada sampel s memberikan sensitivitas orde pertama untuk perambatan kesalahan:

$$J_{\mathcal{L}}(s) = \prod_{i=1}^n J_{T^{(i)}}(s^{(i-1)}), \quad [14.4]$$

dengan $s^{(0)} = s \text{ dan } s^{(i)} = T^{(i)}(s^{(i-1)})$

– *Skor kualitas data (DQS)*: untuk suatu dataset D , definisikan vektor indikator kualitas yang dinormalisasi $q = (q_1, \dots, q_m)$ di mana setiap $q_i \in [0, 1]$ (misalnya kelengkapan, kebenaran, ketepatan waktu, konsistensi).

Kemudian,

$$DQS(D) = \sum_{i=1}^m w_i q_i, \text{ with } \sum_{i=1}^m w_i = 1, w_i \geq 0. \quad [14.5]$$

Bobot w_i mencerminkan prioritas pemangku kepentingan dan dipilih per kasus penggunaan (paparan kerja vs. ketertelusuran produk).

- *Imputasi melalui ekspektasi bersyarat*: untuk bidang x yang hilang dengan fitur konteks x , model imputasi mengembalikan

$$\hat{x} = E[X | Z = x] \approx f_{\phi}(x), \quad [14.6]$$

di mana f_{ϕ} adalah regressor terawasi yang dilatih pada data sintetis historis. Kepercayaan imputasi dapat diperkirakan dari varians ensemble:

$$\text{Conf}(\hat{x}) = 1 - \frac{\text{Var}\{f_{\phi h}(x)\}_{k=1}^n}{\text{Var}_{\text{ref}}} \quad [14.7]$$

dengan K sebagai anggota ensemble dan Var_{ref} sebagai varians referensi.

- *Metrik evaluasi*: untuk tugas pemetaan dan pembersihan, metrik evaluasi utama yang digunakan dalam simulasi adalah:

$$\text{Mapping accuracy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 1\{T(\theta_i) = t\}, \quad [14.8]$$

$$\text{Precision/Recall (for anomaly detection)} = \frac{\text{TP}}{\text{TP}+\text{FP}}, \frac{\text{TP}}{\text{TP}+\text{FN}}, \quad [14.9]$$

$$\text{F1 Score} = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}. \quad [14.10]$$

14.3 PERAN AI GENERATIF DALAM MIGRASI DATA LINTAS DOMAIN

AI generatif, khususnya yang diwujudkan sebagai LLM dan arsitektur berbasis transformer, sedang membentuk kembali praktik rekayasa data dengan memungkinkan interpretasi, generasi, dan penalaran semantik atas informasi terstruktur dan tidak terstruktur.

Pemprofilan Data Semantik Menggunakan AI Generatif

Pemprofilan semantik mencakup penentuan makna, hubungan, dan batasan kontekstual elemen data di berbagai sumber heterogen. Alat pemprofilan konvensional melaporkan ukuran statistik seperti jumlah nol dan histogram nilai, tetapi alat tersebut tidak menangkap semantik spesifik domain yang diperlukan untuk membedakan, misalnya, suhu reaktor dari suhu penyimpanan atau untuk mengaitkan pembacaan VOC dengan paparan spesies kimia tertentu. Dalam konteks kesehatan industri, perbedaan semantik tersebut sangat penting untuk pembersihan, pemetaan, dan penilaian risiko selanjutnya.

Desain Teoretis

Subsistem pembuatan profil diwujudkan sebagai fungsi yang memetakan representasi kolom ke label semantik dan tag sensitivitas. Misalkan $\mathcal{C}$ menunjukkan ruang deskriptor kolom (teks header, nilai sampel, metadata, dan lain-lain.) dan misalkan $\mathcal{L}$ menunjukkan himpunan label semantik dan kelas sensitivitas. Operator pembuatan profil π didefinisikan sebagai:

$$\pi: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{L} \times [0,1], \quad [14.11]$$

di mana komponen kedua adalah skor kepercayaan yang dikalibrasi. Dalam praktiknya, π didekati melalui model berparameter π_θ yang dilatih pada anotasi sintetis dengan tujuan tertentu.

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} M_{c \sim \mathcal{D}_{syn}} [\mathcal{L}_{CE}(\pi_\theta(c), l(c)) + \lambda \mathcal{R}(\theta)], \quad [14.12]$$

di mana $\mathcal{L}_{CE}$ adalah entropi silang ke label sintetis $l(c)$, $\mathcal{R}$ adalah regularisasi dan λ adalah hiperparameter. Deteksi inkonsistensi domain diperlakukan sebagai masalah penilaian outlier. Diberikan distribusi referensi P_{ref} untuk bidang numerik, nilai rekaman yang diberikan x ditandai jika probabilitas ekornya

$$p = 1 - \mathbf{F}_{ref}(x) \quad [14.13]$$

jatuh di bawah ambang batas τ . Untuk bidang kategorikal, inkonsistensi diukur dengan entropi kondisional relatif terhadap distribusi nilai yang diharapkan. Klasifikasi sensitivitas semantik dimodelkan sebagai keputusan biner dengan skor yang dikalibrasi. Ambang batas keputusan dapat diatur menggunakan karakteristik operasi penerima yang berasal dari injeksi PII/PHI sintetis.

Evaluasi Simulasi

Dataset sintetis diinstrumentasikan dengan header ambigu, ketidakcocokan tipe, dan PII yang disematkan dalam teks bebas. Proksi LLM yang disempurnakan yang diimplementasikan melalui mekanisme prediksi token bertopeng yang ditambah dengan aturan deterministik dievaluasi pada dataset ini. Misalkan N adalah jumlah kolom yang dianotasi dan misalkan k menunjukkan label yang disimpulkan dengan benar. Akurasi resolusi semantik adalah

$$\text{Accuracy} = \frac{k}{N}. \quad [14.14]$$

Dalam simulasi, model tersebut berhasil menyelesaikan 92% header kolom yang ambigu dengan benar dan mengidentifikasi 95% bidang PII yang diinisialisasi. Kalibrasi kepercayaan dievaluasi dengan kesalahan kalibrasi yang diharapkan (ECE).

$$ECE = \sum_{b=1}^B \frac{|S_b|}{N} |\text{acc}(S_b) - \text{conf}(S_b)|, \quad [14.15]$$

dihitung pada bin B kepercayaan S_b . Nilai ECE yang rendah menunjukkan bahwa kepercayaan model selaras dengan tingkat kebenaran empiris, yang mendukung penggunaan skor kepercayaan untuk menyaring pemantauan manusia.

Pemetaan Cerdas dari Sumber ke Target

Pemetaan skema sumber heterogen ke skema target terpadu sangat penting untuk migrasi lintas domain. Pemetaan manual membutuhkan banyak tenaga dan rentan terhadap pergeseran skema. Kerangka kerja ini memanfaatkan AI generatif bersama dengan arsitektur neural sekuens-ke-sekuens untuk menyimpulkan keselarasan skema dan untuk mensintesis aturan transformasi dengan pengkodean manual minimal.

Pendekatan Teoretis

Misalkan $s = s_1, \dots, s_m$ menunjukkan skema sumber dan $\mathcal{T} = t_1, \dots, t_n$ menunjukkan skema target. Masalah pemetaan adalah untuk menyimpulkan fungsi pemetaan M yang mengaitkan setiap atribut target t_j dengan ekspresi atas atribut sumber:

$$M: \mathcal{T} \rightarrow (s), \quad [14.16]$$

di mana $S(s)$ adalah ruang ekspresi transformasi (konkatenasi, kombinasi aritmatika, konversi satuan, pencarian kode, dan lain-lain.). Mesin pemetaan generatif M_ϕ yang diparameterisasi oleh ϕ menghasilkan ekspresi kandidat yang dikondisikan pada metadata skema dan baris contoh. Kualitas pemetaan yang dihasilkan dievaluasi dengan indikator kebenaran.

$$1\{(t_j) = M^*(t_j)\}, \quad [14.17]$$

di mana M^* menunjukkan pemetaan kebenaran dasar yang didefinisikan dalam skenario sintetis. Untuk rekonsiliasi berkelanjutan seperti konversi satuan, mesin ini mengusulkan fungsi konversi ($v_s \rightarrow v_t$) di mana kesalahan konversi untuk sampel x adalah

$$(x) = |(x) - x_{\text{true}}|, \quad [14.18]$$

dan pemetaan diterima jika kesalahan rata-rata berada di bawah toleransi yang telah ditentukan.

Pembuatan pemetaan diformalkan sebagai pembuatan urutan bersyarat. Dengan diberikan prompt p yang mengkodekan deskriptor sumber dan target, generator memaksimalkan probabilitas bersyarat.

$$\log P_{\phi}(e|p) = \sum_{t=1}^T \log P_{\phi}(e_t|e_{<t}, p), \quad [14.19]$$

dan beam search digunakan untuk menghasilkan ekspresi kandidat dengan kemungkinan tinggi yang kemudian divalidasi pada baris contoh sintetis.

Evaluasi Sintetis

Sebuah korpus yang terdiri dari 100 tugas pemetaan sintetis dibuat untuk meniru ketidaksesuaian skema petrokimia dan klinis yang realistis. Akurasi pemetaan diukur sebagai proporsi atribut target di mana ekspresi yang dihasilkan dengan peringkat teratas sesuai dengan kebenaran sebenarnya. Misalkan J adalah jumlah total atribut target di seluruh tugas dan misalkan j^* adalah atribut yang cocok dengan benar. Akurasi pemetaan keseluruhan adalah

$$\text{MapAcc} = \frac{j^*}{J}. \quad [14.20]$$

Mesin simulasi mencapai $\text{MapAcc} = 0.89$. Akurasi harmonisasi kode dan unit diukur secara terpisah pada subset tugas yang memerlukan kanonisasi ke standar (misalnya CAS, ICD, dll.). Akurasi harmonisasi adalah 0.93. Distribusi pola transformasi yang dihasilkan dianalisis untuk memperkirakan kompleksitas kombinatorial: jumlah templat transformasi berbeda T_{templ} yang diamati pada P pasangan sumber-target tumbuh kira-kira linier dalam rezim simulasi:

$$T_{\text{templ}} \approx \alpha P + \beta, \quad [14.21]$$

di mana α, β adalah konstanta yang diestimasi secara empiris. Pengamatan ini memberikan informasi tentang cakupan templat yang dibutuhkan untuk penerapan praktis.

Kueri dan Eksplorasi Data Percakapan

AI Generatif juga menyediakan antarmuka bahasa alami yang menjadi perantara antara pakar domain dan kumpulan data yang kompleks. Agen percakapan menerjemahkan maksud ke dalam rencana kueri yang dapat dieksekusi sambil mempertahankan metadata asal dan kepercayaan. Kemampuan ini sangat berguna bagi pemangku kepentingan non-teknis.

Implementasi Teoritis

Kueri bahasa alami q dipetakan ke rencana kueri (q) yang dapat dieksekusi terhadap kumpulan data terintegrasi. Alur penguraian dan perencanaan merupakan komposisi dari pengurai semantik dan perencanaan:

$$\pi: Q \xrightarrow{\text{parse}} P \xrightarrow{\text{plan}} S, \quad [14.22]$$

di mana Q adalah ruang kueri pengguna, P adalah representasi program perantara, dan S adalah rencana eksekusi. Parser diwujudkan oleh proksi LLM yang memetakan bahasa alami

ke representasi perantara terstruktur. Perencana mengubah representasi ini menjadi serangkaian operasi relasional. Untuk mengukur interpretasi dan keterlacakan, setiap rencana yang dihasilkan diberi anotasi dengan jalur asal L yang mencantumkan bidang sumber dan langkah-langkah transformasi. Keakuratan rencana dievaluasi berdasarkan proporsi baris hasil yang sesuai dengan jawaban sebenarnya:

$$\text{Fidelity} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 1\{result_i = gold_i\}. \quad [14.23]$$

Evaluasi Konseptual

Serangkaian kueri domain disintesis untuk evaluasi. Kemampuan agen untuk mengidentifikasi bidang yang relevan, menghasilkan kondisi gabungan yang benar, dan mengembalikan asal usul data dikuantifikasi. Akurasi identifikasi bidang adalah 0.94, kebenaran pemetaan dalam rencana yang dihasilkan adalah 0.88, dan fidelitas pembuatan rencana yang dapat dijelaskan adalah 0.90. Untuk kueri konjungtif kompleks yang menggabungkan predikat spasial-temporal dan kejadian klinis, agen menghasilkan rencana yang presisi dan recall yang diharapkan diperkirakan sebagai berikut.

14.4 INTEGRASI DATA PETROKIMIA–MEDIS: ENAM KASUS SIMULASI

Kerangka kerja konseptual yang dikembangkan dalam studi ini menawarkan dasar untuk mengintegrasikan sistem data heterogen yang mencakup sektor petrokimia dan medis. Meskipun industri ini beroperasi di bawah rezim yang berbeda, siklus hidup data mereka tumpang tindih dalam asal usul bahan medis, diagnostik, dan beberapa obat-obatan. Memastikan kontinuitas data dari produksi kimia hingga aplikasi klinis memerlukan penyelarasan semantik yang ketat, transformasi yang mempertimbangkan asal usul data, dan rekonsiliasi yang menjaga privasi. Bagian ini menyajikan enam kasus penggunaan yang berlandaskan teori, yang dieksekusi dalam simulasi dengan data sintetis, yang menunjukkan potensi kerangka kerja untuk memungkinkan konvergensi data yang bermakna.

Pemodelan Paparan Kerja dan Risiko Kesehatan

- *Tujuan dan konteks:* di fasilitas petrokimia, karyawan dapat terpapar senyawa organik volatil (VOC), logam berat, dan kondisi proses yang ekstrem. Kegagalan untuk menghubungkan paparan tersebut dengan data klinis hilir dapat menyebabkan diagnosis tertunda dan risiko kerja yang kurang dilaporkan.
- *Aplikasi kerangka kerja:* kerangka kerja ini mensimulasikan keterkaitan temporal dan spasial telemetri sensor dengan catatan tenaga kerja dan penilaian klinis. Pertimbangkan rangkaian waktu paparan $E_i(t)$ untuk karyawan i di zona pabrik x . Indikator kesehatan yang diselaraskan waktu $(t+\tau)$ (untuk lag prospektif τ) dimodelkan dalam bentuk proporsional hazard:

$$(t + \tau | E_i, X_i) = \lambda_0(t + \tau) \exp(\beta^T E_i + \gamma^T X_i), \quad [14.24]$$

di mana $\bar{E}_i$ menunjukkan ringkasan paparan agregat untuk karyawan i (misalnya, rata-rata tertimbang waktu), X_i adalah kovariat seperti usia dan peran pekerjaan, dan λ_0 adalah hazard dasar. Dalam pengaturan prediksi risiko diskrit, model logistik diterapkan:

$$\Pr(H_i = 1 \mid E_i, \bar{X}_i) = \sigma(\alpha + \beta^T E_i + \gamma^T \bar{X}_i), \quad [14.25]$$

dengan $\sigma(\cdot)$ sebagai fungsi logistik. Korelasi temporal dan spasial dikodekan dengan menambahkan efek acak spesifik zona v_x :

$$\Pr(H_i = 1) = \sigma(\alpha + \beta^T E_i + \gamma^T \bar{X}_i + v_{x(i)}). \quad [14.26]$$

Rekonsiliasi semantik memetakan kode paparan spesifik tanaman ke kode diagnosis klinis. Operator pemetaan M dievaluasi dengan metrik akurasi.

$$\text{MapAcc} = \frac{1}{|\mathcal{T}|} \sum_{t \in \mathcal{T}} 1 \{M(t) = M^*(t)\} \quad [14.27]$$

di mana $\mathcal{T}$ adalah himpunan pemetaan uji dan M^* adalah kebenaran dasar sintetis. Implikasi pembelajaran mencakup peningkatan sinyal risiko peringatan dini dan kebijakan intervensi yang ditargetkan yang berasal dari skor risiko probabilistik.

Ketertelusuran Produk Medis

- *Tujuan dan konteks:* banyak produk medis berasal dari bahan baku petrokimia. Ketertelusuran dari batch kimia mentah hingga penggunaan klinis sangat penting untuk jaminan kualitas dan penarikan kembali produk.
- *Aplikasi kerangka kerja:* model ketertelusuran direpresentasikan sebagai grafik asal usul asiklik terarah $G = (V, E)$, di mana simpul V mewakili batch produksi, transformasi perantara, dan item klinis yang diserialkan. Tepi terarah E mewakili langkah transformasi atau konsumsi. Jalur $p = (v_0, \dots, v_k)$ dari batch sumber v_0 ke item klinis v_k memberikan garis keturunan. Probabilitas bahwa kejadian buruk yang dilaporkan A disebabkan oleh batch v_0 dapat diperkirakan melalui fungsi path-scoring:

$$\Pr(A \mid v_0) a = \sum_{p: v_0 \rightsquigarrow v_k} w(p) \cdot \{v_k \text{ linked to } A\}, \quad [14.28]$$

di mana setiap bobot jalur $w(p) = \prod_{j=1}^k \phi(e_j)$ mengalikan reliabilitas tepi $\phi(e_j)$. Harmonisasi dan standardisasi satuan ditangani sebagai konversi aljabar. Untuk kuantitas skalar yang diukur dalam satuan sumber v_s yang dikonversi ke satuan target v_t , kita menerapkan fungsi konversi $g_{u_s \rightarrow u_t}$ sedemikian rupa sehingga kesalahan konversi untuk sampel x adalah $|g_{u_s \rightarrow u_t}(x) - x_{\text{true}}|$. Jejak audit transformasi dicatat sebagai tupel terurut $(v, t, op, aktor)$ untuk mendukung analisis akar penyebab retrospektif.

Investigasi Insiden dan Analisis Akar Penyebab

- *Tujuan dan konteks:* kegagalan produk medis atau insiden industri seringkali timbul dari penyimpangan hulu. Kemampuan forensik lintas domain membutuhkan stempel waktu yang selaras, satuan yang dinormalisasi, dan fusi multimodal.
- *Aplikasi kerangka kerja:* rekonstruksi peristiwa dirumuskan sebagai masalah inferensi: diberikan indikator insiden yang diamati Y (kegagalan uji kualitas, kejadian buruk klinis), temukan urutan penyimpangan parameter hulu penyebab yang paling mungkin Θ^* . Di bawah formulasi Bayesian,

$$\Theta^* = \arg \max_{\Theta} \Pr(\Theta | Y) = \arg \max_{\Theta} \Pr(Y | \Theta) \Pr(\Theta), \quad [14.29]$$

Kemungkinan ; $\Pr(Y | \Theta)$ dihitung oleh simulator generatif yang dilatih pada data produksi dan kualitas sintetis. Untuk deteksi kausalitas temporal, digunakan statistik tipe Granger: parameter (t) Granger-menyebabkan (t) jika penyertaan nilai x masa lalu mengurangi kesalahan prediksi untuk y :

$$F_{GC} = \frac{(RSS_{restricted} - RSS_{full})/p}{RSS_{full}/(T - 2p - 1)}, \quad [14.30]$$

di mana RSS menunjukkan jumlah kuadrat residual dan p adalah urutan lag. Atribusi multimodal menggabungkan bukti melalui agregasi log-odds dan menghasilkan kandidat penyebab yang diurutkan untuk penilaian manusia.

Pengawasan Kesehatan Tenaga Kerja dan Audit Kepatuhan

- *Tujuan dan konteks:* rezim peraturan memerlukan pemantauan bersama terhadap paparan dan kesehatan sambil menjaga privasi dan kepatuhan.
- *Aplikasi kerangka kerja:* profil kesehatan longitudinal dibangun dengan menghubungkan catatan paparan (t) dengan pertemuan kesehatan (t) . Transformasi yang menjaga privasi disimulasikan menggunakan metode klasik dan formal. Batasan k-anonimitas untuk dataset kohort yang telah disanitasi D' dinyatakan sebagai

$$\forall \tau \in D', |\{s \in D' : \text{quasi-id}(s) = \text{quasi-id}(\tau)\}| \geq k, \quad [14.31]$$

Privasi diferensial dimodelkan dengan menambahkan noise terkalibrasi ke output agregat: mekanisme kueri h mencapai privasi diferensial (ϵ, δ) jika

$$\Pr[h(D) \in S] \leq e^\epsilon \Pr[h(D') \in S] + \delta, \quad [14.32]$$

untuk semua kumpulan data tetangga D, D' dan himpunan terukur S . Laporan audit sintetis mencakup metrik kepatuhan yang dihitung atas data yang disamarkan dan menghasilkan bukti simulasi yang sesuai untuk pemantauan internal sambil menghindari pengungkapan PII/PHI.

Pemantauan Kualitas Data di Seluruh Jalur Industri-Klinis

- *Tujuan dan konteks*: kegagalan kualitas data satuan yang tidak cocok, stempel waktu yang tidak selaras, nomenklatur yang tidak konsisten merusak ketertelusuran dan pengambilan keputusan.
- *Penerapan kerangka kerja*: kualitas data dikuantifikasi oleh skor komposit (D) yang menggabungkan indikator yang dinormalisasi (D) di seluruh dimensi $j \in \{1, \dots, m\}$:

$$Q(D) = \sum_{j=1}^m w_j q_j(D), \quad \sum_{j=1}^m W_j = 1, W_j \geq 0, \quad [14.33]$$

Indikator meliputi kelengkapan, kebenaran sintaksis, konsistensi semantik, dan plausibilitas temporal. Saran perbaikan otomatis dihasilkan oleh model yang memprediksi transformasi korektif T^* yang meminimalkan kerugian hilir yang diharapkan:

$$T^* = \arg \min_T [\mathcal{L}_{\text{down}}(T(D)) + \eta \mathcal{C}(T)], \quad [14.34]$$

di mana $\mathcal{L}_{\text{down}}$ mengukur degradasi dalam utilitas analitik hilir dan $\mathcal{C}$ memberikan penalti pada transformasi yang berisiko atau berbiaya tinggi. Benchmarking berkelanjutan melacak (D) dari waktu ke waktu dan memberikan informasi untuk siklus perbaikan tata kelola.

Akses Percakapan ke Sistem Data Terintegrasi

- *Tujuan dan konteks*: pemangku kepentingan non-teknis memerlukan antarmuka yang mudah diakses untuk menginterogasi kumpulan data terintegrasi tanpa kemampuan bahasa kueri langsung.
- *Aplikasi kerangka kerja*: perencana bahasa alami ke kueri memetakan ucapan pengguna v ke rencana yang dapat dieksekusi p dengan anotasi asal usul (p). Ketepatan rencana diukur dengan kesetiaan pada maksud pengguna dan dengan cakupan asal usul hasil:

$$\text{Fidelity}(v) = \Pr(\text{result}(p) = \text{gold}(v)), \quad \text{ProvenanceCoverage} = \frac{|L(p)|}{L^*}, \quad [14.35]$$

di mana L^* adalah silsilah kebenaran dasar. Keluaran yang dapat dijelaskan mencakup riwayat transformasi dan skor kepercayaan, memungkinkan auditabilitas. Antarmuka percakapan dievaluasi pada kumpulan pertanyaan simulasi untuk mengukur pengenalan maksud dan pembangkitan respons yang dapat dilacak.

Kasus penggunaan	Input data petrokimia	Output domain medis	Peran kerangka kerja
Pemodelan risiko kesehatan kerja	Log sensor VOC, metadata zona kerja	Catatan penyakit pernapasan, rekam medis SDM	Pemprofilan semantik, keterkaitan temporal

Ketelusuran produk medis	Log sintesis batch, catatan LIMS	Catatan pelacakan perangkat, inventaris klinis	Pemetaan ujung-ke-ujung, harmonisasi standar
Investigasi insiden	Log anomali proses, laporan EHS	Laporan kegagalan kualitas, insiden klinis	Pemodelan akar penyebab, normalisasi stempel waktu
Pengawasan dan kepatuhan kesehatan	Data paparan, catatan SDM	Penilaian klinis sintetis, metrik audit	Keterkaitan yang memperhatikan privasi, simulasi kepatuhan
Pemantauan kualitas data	Metrik kualitas data SCADA + LIMS	Pemeriksaan validitas dokumentasi klinis	Pemprofilan otomatis, resolusi anomali
Akses data percakapan	Katalog dan skema data sintetis	Antarmuka kueri bahasa alami	Interaksi berbasis GenAI, jawaban yang dilacak silsilahnya

Tabel 14.2. Pemetaan antara input kasus penggunaan, output sintetis, dan peran kerangka kerja

Enam kasus penggunaan simulasi mengilustrasikan bagaimana kerangka kerja menghubungkan domain operasional dan klinis untuk menghasilkan jalur data yang dapat dijelaskan, diaudit, dan koheren secara semantik. Tabel 14.2 merangkum pemetaan antara input kasus penggunaan, output sintetis, dan peran utama kerangka kerja.

Secara kolektif, kasus penggunaan ini menunjukkan bahwa arsitektur berbasis simulasi dapat menyediakan landasan pengujian yang ketat untuk pembelajaran algoritmik tentang pemetaan lintas domain, keterkaitan yang memperhatikan privasi, dan keterlacakan berbasis asal usul. Ekspresi matematika yang disajikan di atas memformalkan metrik evaluasi utama dan pilihan pemodelan, memungkinkan tolok ukur yang dapat direproduksi dalam kondisi sintetis yang terkontrol. Dengan mengabstraksikan dari platform vendor tertentu dan catatan pasien nyata atau catatan produksi milik perusahaan, kerangka kerja memungkinkan investigasi yang berprinsip terhadap tantangan algoritmik dan tata kelola yang harus diselesaikan sebelum penerapan langsung yang aman dan sesuai.

14.5 EVALUASI SINTETIS KERANGKA MIGRASI DATA AI

Untuk mengevaluasi keabsahan teoritis dan kelayakan kerangka kerja migrasi data yang didukung AI yang diusulkan, lingkungan evaluasi sintetis dibangun sebagai tempat uji terkontrol. Tempat uji ini mensimulasikan aliran data lintas domain antara domain petrokimia dan medis, menawarkan platform yang dapat direproduksi untuk mempelajari heterogenitas dalam format data, semantik, dan kendala peraturan tanpa melibatkan sistem operasional langsung. Desain evaluasi berfokus pada validasi konseptual daripada penerapan empiris: desain ini menunjukkan bagaimana kerangka kerja menangani interoperabilitas semantik, keterlacakan, dan kualitas data melalui primitif algoritmik dan metrik kinerja yang dapat diukur dalam pengaturan sintetis.

Desain Evaluasi dan Strategi Simulasi Data

Korpus sintetis terdiri dari beberapa keluarga dataset: telemetri kontrol proses (deret waktu seperti SCADA), catatan analisis laboratorium (tabel seperti LIMS), catatan kesehatan kerja (OHR), tabel inventaris perangkat, dan log audit. Setiap keluarga data diinstansiasi dari templat skema yang diinformasikan domain dan diisi oleh sampler generatif yang diparameterisasi agar sesuai dengan karakteristik statistik yang masuk akal (misalnya, ekor tebal untuk konsentrasi polutan, pola musiman untuk jadwal shift).

Anomali disuntikkan secara deterministik dan stokastik: nilai yang hilang, nama header yang tidak konsisten, inkonsistensi unit, offset stempel waktu, dan ambiguitas semantik diperkenalkan pada tingkat yang dapat dikonfigurasi. Misalkan $D = \{D_1, \dots, D_n\}$ menunjukkan koleksi dataset sintetis. Untuk setiap dataset D_k , proses injeksi anomali (ρ) yang diparameterisasi oleh tingkat injeksi $\rho \in [0, 1]$ menentukan jumlah catatan yang rusak yang diharapkan:

$$[\#anomalies\ in\ D_k] = \rho |D_k|, \quad [14.36]$$

Skenario evaluasi bervariasi ρ di seluruh grid $\{0.01, 0.05, 0.1, 0.2\}$ untuk mempelajari ketahanan di bawah rezim korupsi rendah hingga tinggi. Ketidaksesuaian temporal disimulasikan dengan menerapkan offset seragam $\Delta t \sim (-\tau, \tau)$ ke stempel waktu kejadian di mana τ menunjukkan kemiringan jam maksimum yang masuk akal. Kebenaran dasar sintetis untuk pemetaan dan asal usul dihasilkan secara deterministik sehingga setiap atribut target dan jalur silsilah memiliki referensi kanonik. Ini memungkinkan perhitungan yang tepat dari akurasi pemetaan, penarikan silsilah, dan metrik deterministik lainnya yang didefinisikan di bawah ini.

Kemampuan Kerangka Kerja yang Dievaluasi dalam Simulasi

Dalam sandbox, kemampuan berikut diinstrumentasikan dan dievaluasi. Modul pembuatan profil dan katalogisasi data dinilai kemampuannya untuk menyimpulkan metadata skema, mendeteksi anomali, dan mengklasifikasikan sensitivitas menggunakan pola PII/PHI yang diinisiasi. Modul pemetaan dan transformasi semantik diuji pada tugas penyelarasan sumber-ke-target yang memerlukan penggabungan, komposisi aritmatika, dan harmonisasi kode.

Modul pembersihan dan harmonisasi data dievaluasi pada kegagalan integritas tipikal seperti ketidaksesuaian unit dan catatan paparan duplikat. Pencatatan silsilah dan auditabilitas divalidasi dengan membandingkan log transformasi yang dihasilkan dengan asal usul kebenaran dasar sintetis. Simulasi dijalankan untuk mengukur pengenalan maksud dan fidelitas rencana untuk permintaan bahasa alami yang dieksekusi terhadap korpus sintetis terintegrasi. Kinerja diukur menggunakan metrik kanonik. Untuk tugas pemetaan, akurasi pemetaan MapAcc didefinisikan sebagai

$$\text{MapAcc} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J 1_{\{\hat{m}_j(t) = m_j^*(t)\}}, \quad [14.37]$$

di mana J adalah jumlah total atribut target di seluruh tugas, $\hat{m}(t_j)$ adalah pemetaan yang diprediksi dan $m^*(t_j)$ adalah kebenaran sebenarnya. Untuk deteksi anomali, presisi, recall, dan F1 dihitung dengan cara biasa:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}, \quad [14.38]$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}, \quad [14.39]$$

$$F1 = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}, \quad [14.40]$$

Kualitas data diringkas oleh skor kualitas data komposit (DQS) untuk dataset D , yang dibangun dari indikator yang dinormalisasi $q_1, \dots, q_m$:

$$DQS(D) = \sum_{i=1}^m w_i q_i(D), \quad \sum_{i=1}^m w_i = 1, w_i \geq 0, \quad [14.41]$$

Kalibrasi ketidakpastian untuk keluaran probabilistik (misalnya, skor kepercayaan model) dievaluasi dengan kesalahan kalibrasi yang diharapkan (ECE), yang dihitung dengan mengelompokkan nilai kepercayaan ke dalam B bin:

$$ECE = \sum_{b=1}^B \frac{|S_b|}{N} |\text{acc}(S_b) - \text{conf}(S_b)| \quad [14.42]$$

di mana S_b adalah contoh dalam bin b , N adalah jumlah total contoh, acc adalah akurasi empiris dalam bin, dan conf adalah rata-rata kepercayaan prediksi dalam bin.

Hasil dan Pengamatan Teoritis

Evaluasi sintesis menghasilkan beberapa pengamatan yang dapat diulang. Pertama, koherensi semantik meningkat ketika beberapa sinyal lemah (statistik header, distribusi nilai sampel, dan metadata kontekstual) digabungkan: pengklasifikasi ensemble probabilistik yang menggabungkan sinyal-sinyal ini meningkatkan akurasi pelabelan kolom relatif terhadap sinyal tunggal mana pun. Jika $p_1(c)$, $p_2(c)$, $p_3(c)$ menunjukkan skor prediksi dari tiga saluran profil independen untuk kolom c , maka agregasi log-linier meningkatkan kinerja:

$$\log p_{\text{agg}}(c) = \alpha_1 \log p_1(c) + \alpha_2 \log p_2(c) + \alpha_3 \log p_3(c) \quad [14.43]$$

dengan α_1 dipasang pada partisi validasi.

Kedua, pembersihan mengurangi penyebaran kesalahan hilir yang diukur melalui analisis sensitivitas dari pipeline transformasi. Representasikan pipeline sebagai komposisi transformasi deterministik $T^{(1)}, \dots, T^{(n)}$. Untuk gangguan input δx , penyebaran kesalahan orde pertama ke output akhir y memenuhi

$$\delta y = J_T(x)\delta x, \quad J_T(x) = \prod_{i=1}^n J_{(i)}(x^{(i-1)}) \quad [14.44]$$

di mana $J_T(i)$ adalah Jacobian dari langkah i . Mengurangi besarnya δx melalui pembersihan (misalnya, konversi satuan yang benar, imputasi nilai yang hilang) menurunkan $\|\delta y\|$ yang diharapkan dalam percobaan simulasi.

Ketiga, kelengkapan garis keturunan dinilai dengan mengingat garis keturunan:

$$\text{Lineage Recall} = \frac{|L_{\text{produced}} \cap L_{\text{truth}}|}{|L_{\text{truth}}|} \quad [14.45]$$

di mana L_{produced} adalah himpunan tautan asal usul yang dicatat oleh sistem dan L_{truth} adalah kebenaran dasar sintetis. Di bawah tingkat injeksi nominal ($\rho \leq 0.05$), recall silsilah melebihi 0.92. Korupsi yang lebih tinggi mengurangi recall karena pemetaan yang ambigu.

Keempat, fidelitas antarmuka percakapan dievaluasi dengan proporsi kueri di mana rencana yang dihasilkan mengembalikan hasil yang benar secara semantik dengan asal usul yang dapat dilacak. Jika Q adalah himpunan kueri uji dan (q) adalah indikator eksekusi setia yang berhasil, maka fidelitas rencana adalah

$$\text{PlanFidelity} = \frac{1}{|Q|} \sum_{q \in Q} J(q) \quad [14.46]$$

Hasil simulasi menunjukkan fidelitas rencana dalam kisaran 0.85–0.92 untuk kueri yang dibatasi secara sintetis.

Kekuatan dan Keterbatasan Konseptual

Evaluasi sintetis menyoroti kekuatan konseptual dan keterbatasan yang diketahui. Kekuatan meliputi kemampuan untuk (i) mendemonstrasikan peningkatan keselarasan semantik melalui fusi sinyal heterogen, (ii) mengukur dampak pembersihan pada stabilitas analitik hilir melalui metrik sensitivitas berbasis Jacobian, (iii) mengukur penarikan silsilah terhadap kebenaran dasar deterministik, dan (iv) membuat prototipe antarmuka percakapan dengan fidelitas rencana yang dapat diverifikasi.

Keterbatasan berasal dari sifat simulasi lingkungan. Mengabstraksikan dari penerapan langsung mengecualikan mode kegagalan operasional seperti latensi API, pemadaman sistem parsial, dan input data yang merugikan. Simulasi juga menggunakan proksi yang diper augmented dengan aturan untuk model generatif daripada LLM yang diterapkan dalam skala

besar, sehingga latensi, perilaku halusinasi, dan artefak tokenisasi kosakata besar tidak sepenuhnya terwakili. Proses sertifikasi regulasi dan kepatuhan hukum dimodelkan secara konseptual tetapi tidak divalidasi terhadap otoritas yurisdiksi.

Sintesis Wawasan Teoretis

Evaluasi sintesis mendukung beberapa klaim teoretis: kerangka kerja dapat menjembatani kesenjangan semantik antara dataset petrokimia dan medis; transformasi otomatis dapat diaudit melalui konstruksi; peningkatan kualitas data menyebar ke inferensi hilir yang lebih stabil; dan antarmuka percakapan dapat secara material mengurangi hambatan teknis bagi para pemangku kepentingan. Secara kolektif, klaim-klaim ini dapat diungkapkan sebagai serangkaian hipotesis yang dapat diuji untuk pekerjaan empiris di masa mendatang. Misalnya, misalkan M menunjukkan pemetaan berbasis model dan H menunjukkan pemetaan dasar yang dikurasi secara manual. Hipotesis bahwa pemetaan berbasis model mengungguli pemetaan dasar dalam kondisi korupsi rendah hingga sedang adalah:

$$H_0: \text{MapAcc}(M) \leq \text{MapAcc}(H) \text{ versus } H_1: \text{MapAcc}(M) > \text{MapAcc}(H) \quad [14.47]$$

Pengujian statistik dapat dilakukan menggunakan uji perbedaan berpasangan di beberapa lipatan sintesis dengan koreksi yang sesuai untuk perbandingan berganda.

14.6 PENJELASAN UNTUK TRANSFORMASI SEMANTIK

Validasi simulasi yang dilaporkan di atas membuka beberapa jalan pembelajaran. Langkah penting selanjutnya adalah menyematkan mekanisme penjelasan ke dalam primitif transformasi semantik. Integrasi formal metode penjelasan yang tidak bergantung pada model memungkinkan narasi deterministik untuk keputusan transformasi dan memungkinkan validasi dengan campur tangan manusia. Jalan lain adalah benchmarking terfederasi: dengan mendistribusikan templat skema sintesis dan benih generatif ke lembaga yang berkolaborasi, kerangka kerja dapat diuji ketahanannya tanpa memusatkan data sensitif. Penyelarasan berbasis ontologi menggunakan grafik pengetahuan formal (ontologi kimia, kosakata klinis, dan taksonomi keselamatan) dapat meningkatkan ketepatan pemetaan deterministik. Terakhir, perlakuan yang ketat terhadap pertimbangan etika, peraturan, dan masyarakat akan diperlukan untuk menerjemahkan kerangka kerja konseptual ke dalam sistem yang siap produksi.

AI yang dapat Dijelaskan untuk Transformasi Semantik

Kemampuan menjelaskan dapat diformalkan dengan menambahkan operator transformasi T dengan peta penjelasan E yang memberikan justifikasi yang dapat dibaca manusia pada setiap output. Jika $y = T(x)$, maka pasangan (y, e) dihasilkan di mana

$$e = (x, y) \text{ and } E: \mathcal{X} \times \mathcal{Y} \rightarrow \mathcal{R} \quad [14.48]$$

dengan $\mathcal{R}$ sebagai ruang rasionalisasi terstruktur (misalnya, fragmen asal usul, pernyataan kontrafaktual, dll.). Metrik penjelasan dapat mencakup kelengkapan dan koherensi penjelasan relatif terhadap ontologi domain.

Benchmarking dan Simulasi Terfederasi Antar Institusi

Simulasi terfederasi memungkinkan evaluasi terdesentralisasi. Jika $S_1, \dots, S_N$ adalah simulator institusional yang menghasilkan dataset sintetis lokal, evaluasi terfederasi menggabungkan metrik lokal m_i melalui agregasi yang aman:

$$\bar{m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i \quad [14.49]$$

dihitung tanpa berbagi data mentah. Hal ini menjaga privasi sekaligus memungkinkan studi generalisasi lintas institusi.

Integrasi Berbasis Ontologi dan Penyelarasan Skema

Penyematan ontologi domain O ke dalam inferensi pemetaan memberikan batasan logis. Jika g adalah kandidat pemetaan dan $O \models g$ menunjukkan bahwa g konsisten dengan ontologi O , maka kriteria penerimaan untuk pemetaan dapat diperkuat menjadi:

$$\hat{m}(t) = g \text{ only if } O \models g \text{ and } \text{score}(g) \geq \tau \quad [14.50]$$

di mana skor (g) adalah metrik plausibilitas yang dipelajari dan τ adalah ambang batas.

Pertimbangan Etika, Regulasi, dan Sosial

Pekerjaan selanjutnya harus mengoperasionalkan jembatan sintetis-ke-nyata yang menjaga privasi sekaligus memungkinkan validasi, menentukan templat transformasi yang selaras dengan kepatuhan yang memenuhi persyaratan hukum yurisdiksi, dan menggabungkan desain partisipatif untuk memastikan kepercayaan pemangku kepentingan. Jaminan privasi formal (privasi diferensial) dan verifikasi formal logika transformasi merupakan arah yang menjanjikan.

14.7 ARSITEKTUR SIMULASI AI MIGRASI DATA LINTAS DOMAIN

Bab ini menyajikan arsitektur modular berbasis simulasi untuk migrasi data lintas domain yang ditingkatkan AI antara ekosistem petrokimia dan medis. Evaluasi sintetis menunjukkan kelayakan konseptual di seluruh profil semantik, pembersihan, pemetaan, dan akses percakapan, dan menyediakan serangkaian metrik terukur yang cocok untuk tolok ukur yang dapat direproduksi. Meskipun pembelajaran ini sengaja membatasi diri pada skenario simulasi dan proksi model yang diperkuat aturan, formalisasi matematis dan kerangka kerja eksperimental menetapkan peta jalan yang jelas untuk proyek percontohan empiris di masa mendatang yang harus membahas privasi, validasi peraturan, dan rekayasa produksi yang kuat.

BAB 15

KEAMANAN SIBER DAN ZERO TRUST DALAM RANTAI PASOKAN

15.1 ZERO TRUST UNTUK RANTAI PASOKAN

Revolusi digital rantai pasokan ini telah melahirkan ekosistem yang sangat terhubung dan multi-terhubung, yang sangat efisien tetapi juga memiliki permukaan serangan yang besar. Model keamanan berbasis perimeter tradisional didasarkan pada kepercayaan, tetapi verifikasi perangkat jelas tidak cukup dalam kasus lingkungan multi-vendor yang terdistribusi. Bab ini merupakan pemantauan teknis tentang bagaimana *arsitektur Zero Trust* (ZTA) sebagai konsep baru dalam domain keamanan siber dapat diterapkan untuk mengamankan rantai pasokan generasi berikutnya. Analisis mendalam tentang postulat fundamental ZTA (jangan pernah percaya, selalu verifikasi) menyusul, dan dilakukan dengan memecahnya menjadi pendekatan bisnis.

Lanskap ancaman selalu berubah sehingga bab ini menyajikan contoh vektor serangan seperti serangan pihak ketiga, kerentanan IoT, dan serangan rantai pasokan perangkat lunak. Selanjutnya, bab ini melakukan diskusi terperinci tentang pilar-pilar di depan Zero Trust seperti yang dikemukakan oleh standar industri paling terkenal. Pilar-pilar ini, yaitu identitas, perangkat, jaringan, aplikasi/beban kerja, dan data, diperiksa dalam konteks rantai pasokan terkait teknologi seperti manajemen identitas dan akses yang kuat, penilaian postur perangkat, mikro-segmentasi, dan kontrol keamanan berbasis data.

Rekomendasi dalam hal pendekatan arsitektur untuk menerapkan ZTA diuraikan dan dibandingkan dengan strategi implementasi keamanan tradisional. Bab ini juga membahas peran sinergis ZTA dalam memastikan keberadaan teknologi baru seperti model kecerdasan buatan/pembelajaran mesin dan sistem robot otomatis dalam logistik. Bab ini juga membahas hambatan teknis dan organisasi yang besar terhadap adopsi ZTA, termasuk integrasi sistem lama dan manajemen ekosistem mitra. Pada bagian terakhir, bab ini membahas arah yang menjanjikan di mana mesin kebijakan berbasis AI dan pemeriksaan identitas berbasis blockchain dapat memberikan tingkat ketahanan, keamanan, dan kepercayaan yang tinggi pada rantai pasokan di dunia yang mengalami disrupsi.

Bab ini memberikan pemantauan teknis mendalam tentang Zero Trust dan bagaimana penerapannya pada tantangan keamanan siber rantai pasokan yang unik. Kita akan melihat lebih dalam apa yang dimaksud dengan *arsitektur Zero Trust* (ZTA) dan apa pilar-pilar dasarnya, melampaui istilah yang sedang populer serta membahas lebih lanjut tentang teknologi spesifik dan perubahan arsitektur yang diperlukan untuk mengadopsi ZTA. Diskusi akan dibingkai dalam konteks rantai pasokan generasi berikutnya, menganalisis bagaimana ZTA menyediakan kerangka keamanan penting yang diperlukan untuk melindungi mesin AI dan otomatisasi yang mendorong metamorfosis ini. Bab ini juga akan berfungsi untuk memandu para profesional rantai pasokan dan pakar keamanan untuk mengetahui dan menilai bagaimana model Zero Trust dikombinasikan dengan persyaratan rantai pasokan mereka dan bergerak menuju jalur

implementasi model Zero Trust, sehingga membangun fondasi bisnis global yang lebih baik di masa depan.

15.2 ANCAMAN SIBER PADA RANTAI PASOKAN DAN KEBUTUHAN ZERO TRUST

Meningkatnya kompleksitas dan keterkaitan rantai pasokan global telah menjadikannya target utama ancaman siber yang canggih, sehingga memerlukan strategi keamanan siber yang kuat dan adopsi ZTA. Model keamanan berbasis perimeter tradisional terbukti tidak memadai karena pihak lawan mengeksploitasi kerentanan di seluruh mitra rantai pasokan, vendor pihak ketiga, dan antarmuka digital. Paradigma Zero Trust, yang mengasumsikan tidak ada kepercayaan implisit dan menerapkan verifikasi berkelanjutan, semakin populer sebagai pendekatan mendasar untuk mengurangi risiko ini.

Pembelajaran terbaru mengeksplorasi integrasi ZTA dengan teknologi baru seperti blockchain, kecerdasan buatan (AI), dan IoT untuk meningkatkan transparansi, ketertelusuran, dan ketahanan dalam operasi rantai pasokan. Studi-studi juga menyoroti tantangan unik yang dihadapi oleh usaha kecil dan menengah (UKM), pentingnya investasi keamanan siber yang terkoordinasi dan kebutuhan akan kerangka kerja holistik yang membahas aspek teknis dan organisasi. Pemantauan ini mensintesis temuan dari 25 makalah terbaru, memberikan gambaran komprehensif tentang keadaan saat ini, tantangan, dan arah masa depan untuk arsitektur keamanan siber dan Zero Trust dalam rantai pasokan.

Arsitektur Zero Trust semakin diakui sebagai hal penting untuk mengamankan rantai pasokan modern, yang dicirikan oleh perimeter yang berpori dan saling ketergantungan yang kompleks. Model Zero Trust mengasumsikan semua aktor dan aktivitas tidak dapat dipercaya, sehingga memerlukan kontrol akses yang ketat, otentikasi berkelanjutan, dan mikro-segmentasi. Berbagai pembelajaran mengusulkan kerangka kerja untuk transisi menuju Zero Trust dalam rantai pasokan, menekankan perlunya perubahan organisasi, penyelarasan kebijakan, dan kontrol teknis. Integrasi Zero Trust dengan blockchain, AI, dan IoT merupakan tema penting dalam pembelajaran terkini.

Kerangka kerja Zero Trust berbasis Blockchain meningkatkan transparansi, ketertelusuran, dan keamanan dalam transaksi rantai pasokan, sementara analitik berbasis AI meningkatkan deteksi dan respons terhadap ancaman. Rantai pasokan yang didukung IoT mendapat manfaat dari Zero Trust dengan mengurangi risiko yang terkait dengan heterogenitas perangkat dan operasi terdesentralisasi. Implementasi Zero Trust dalam rantai pasokan menghadirkan tantangan terkait skalabilitas, interoperabilitas, biaya, dan kesiapan organisasi. UKM menghadapi hambatan unik karena keterbatasan sumber daya dan keahlian, tetapi mendapat manfaat signifikan dari solusi Zero Trust yang modular, berbasis langganan, dan dapat diskalakan. Studi kasus dan implementasi di dunia nyata menunjukkan peningkatan dalam respons insiden, kepatuhan terhadap peraturan, dan ketersediaan sistem, serta menyoroti perlunya pemantauan dan adaptasi berkelanjutan.

Investasi keamanan siber yang terkoordinasi, kesadaran karyawan, dan keselarasan kebijakan sangat penting untuk keamanan rantai pasokan yang efektif. Studi menunjukkan bahwa kurangnya koordinasi menyebabkan kurangnya investasi atau investasi yang

berlebihan, dan menekankan pentingnya pengambilan keputusan bersama, kompensasi risiko, dan berbagi informasi. Budaya organisasi, dukungan manajemen, dan empati digital juga memainkan peran penting dalam meningkatkan postur keamanan siber.

Literatur menunjukkan bahwa arsitektur Zero Trust semakin penting untuk mengamankan rantai pasokan dari ancaman siber yang terus berkembang, terutama seiring percepatan transformasi digital. Integrasi ZTA dengan blockchain, AI, dan IoT menawarkan peluang menjanjikan untuk meningkatkan transparansi, otomatisasi, dan ketahanan. Namun, tantangan implementasi masih tetap ada, terutama untuk UKM dan organisasi dengan sistem lama. Kebutuhan akan investasi terkoordinasi, kesadaran karyawan, dan strategi adaptif ditekankan oleh studi empiris dan konseptual.

Terlepas dari kemajuan yang telah dicapai, masih terdapat kesenjangan dalam validasi empiris, analisis biaya-manfaat, dan pengembangan kerangka kerja standar untuk adopsi ZTA dalam berbagai konteks rantai pasokan. Literatur menyerukan lebih banyak studi kasus dunia nyata, analisis lintas sektoral, dan pembelajaran tentang dimensi manusia dan organisasi dari keamanan siber. Pembelajaran di masa mendatang harus fokus pada validasi empiris, efektivitas biaya, dan pengembangan kerangka kerja ZTA yang terstandarisasi dan terukur yang disesuaikan dengan berbagai konteks rantai pasokan. Singkatnya, meskipun arsitektur Zero Trust menawarkan jalan yang menjanjikan untuk mengamankan rantai pasokan, pembelajaran dan inovasi berkelanjutan diperlukan untuk mengatasi tantangan teknis, organisasi, dan ekonomi.

15.3 ARSITEKTUR DALAM LANSKAP RANTAI PASOKAN

Lanskap Ancaman Rantai Pasokan Modern

Untuk memahami pentingnya Zero Trust, kita harus terlebih dahulu memahami sifat risiko yang dirancang untuk dimitigasi. Kompleksitas ini menciptakan permukaan serangan yang kaya dan beragam. Jaringan rantai pasokan digital yang khas melibatkan banyak aktor dan sistem, masing-masing mewakili titik kompromi potensial:

- Sistem inti perusahaan: sistem perencanaan sumber daya perusahaan (ERP) milik organisasi sendiri, sistem manajemen gudang (WMS), dan sistem manajemen transportasi (TMS). Ini adalah aset terpenting, yang berisi data keuangan, inventaris, dan pelanggan yang sensitif.
- Pemasok tingkat n: setiap pemasok, dari produsen komponen utama (Tingkat 1) hingga penyedia bahan baku (Tingkat 3), memiliki infrastruktur TI sendiri. Kompromi di tingkat mana pun dapat memiliki efek berantai di sepanjang rantai.
- Penyedia logistik dan layanan: perusahaan logistik pihak ketiga (3PL/4PL), perusahaan pengiriman barang, pialang bea cukai, dan kontraktor pemeliharaan semuanya memerlukan akses ke data pengiriman dan operasional yang sensitif.
- Penyedia cloud dan SaaS: operasi rantai pasokan semakin bergantung pada infrastruktur cloud (IaaS), platform (PaaS), dan aplikasi perangkat lunak sebagai layanan (SaaS) untuk segala hal mulai dari pengadaan hingga analisis data.

- Teknologi operasional (OT) dan IoT: lapisan fisik rantai pasokan kini telah didigitalisasi. Ini termasuk sistem kontrol industri (ICS) di pabrik, otomatisasi robot di gudang, dan berbagai macam perangkat IoT seperti pelacak GPS, sensor lingkungan pada kargo, dan palet pintar. Keterkaitan ini berarti bahwa postur keamanan suatu organisasi tidak lagi hanya miliknya sendiri; melainkan postur keamanan agregat dari seluruh ekosistem mitranya. Penyerang akan selalu menargetkan mata rantai terlemah.

Ancaman yang menargetkan jaringan kompleks ini canggih dan beragam. Kompromi pihak ketiga (*Island Hopping*) adalah salah satu vektor serangan yang paling umum dan efektif. Alih-alih menyerang perusahaan yang terlindungi dengan baik secara langsung, musuh "melompati pulau" dengan terlebih dahulu mengkompromikan mitra yang lebih kecil dan kurang aman ("pulau").

Kemudian mereka menggunakan koneksi dan kredensial terpercaya dari mitra tersebut untuk bergerak secara lateral ke jaringan target utama mereka. Serangan rantai pasokan perangkat lunak, seperti yang dicontohkan oleh SolarWinds, melibatkan penyuntikan kode berbahaya ke dalam alur pengembangan produk perangkat lunak yang sah. Perangkat lunak yang dikompromikan kemudian ditandatangani secara digital dan didistribusikan sebagai pembaruan terpercaya kepada ribuan pelanggan, secara efektif menggunakan infrastruktur vendor sendiri sebagai saluran distribusi untuk malware. Perangkat IoT dan OT sering dirancang dengan fungsionalitas sebagai prioritas, bukan keamanan.

Kegagalan Model Keamanan Tradisional

Model keamanan tradisional "kastil dan parit" didasarkan pada perimeter yang jelas dan dapat dipertahankan. Model ini berinvestasi besar-besaran pada teknologi seperti firewall, sistem deteksi intrusi, dan gateway web yang aman untuk melindungi batas antara jaringan internal yang "tepercaya" dan Internet yang "tidak tepercaya".

ZTA: Paradigma Baru

Zero Trust bukanlah produk, melainkan filosofi dan strategi keamanan. Inti dari ZTA adalah bahwa kepercayaan merupakan kerentanan. Alih-alih mengasumsikan kepercayaan dan kemudian memverifikasi di perimeter, ZTA menerapkan kebijakan "jangan pernah percaya, selalu verifikasi" untuk setiap permintaan akses, terlepas dari asal-usulnya. Arsitektur abstrak untuk ZTA didefinisikan oleh NIST SP 800-207. Tujuan ZTA adalah untuk melindungi sumber daya (aplikasi, data, layanan) secara langsung, bukan segmen jaringan tempat sumber daya tersebut berada. Akses diberikan berdasarkan per sesi dan didasarkan pada prinsip hak akses minimal pengguna dan perangkat diberikan tingkat akses minimum yang mereka butuhkan untuk melakukan tugas spesifik mereka, untuk waktu sesingkat mungkin.

15.4 PILAR-PILAR ZERO TRUST DALAM KONTEKS RANTAI PASOKAN

Untuk mengimplementasikan ZTA, organisasi harus fokus pada pematangan kemampuan mereka di beberapa pilar fundamental. Penerapan pilar-pilar ini pada rantai pasokan adalah di mana strategi tersebut menjadi nyata.

Pilar 1: Identitas

Identitas adalah landasan Zero Trust. Sistem harus mampu menjawab pertanyaan secara pasti: “Siapa atau apa yang meminta akses?” Dalam rantai pasokan, “siapa” bukan hanya karyawan. Cakupan identitas mencakup karyawan, kontraktor, staf pengadaan pemasok, pengemudi truk, pelanggan yang menggunakan portal pelacakan, sistem otomatis (misalnya, mesin penetapan harga bertenaga AI), bot otomatisasi proses robotik (RPA), dan bahkan API yang menghubungkan berbagai sistem.

- Manajemen identitas dan akses (IAM) yang kuat: sistem IAM yang tangguh tidak dapat dinegosiasikan. Sistem ini harus berfungsi sebagai satu-satunya sumber otoritatif untuk semua identitas.
- Otentikasi multi-faktor (MFA): setiap identitas, terutama identitas manusia, harus diverifikasi menggunakan MFA. Ini melampaui kata sandi sederhana untuk memerlukan faktor kedua, seperti kode dari aplikasi seluler, pemindaian biometrik, atau kunci keamanan fisik. Hal ini sangat penting untuk mencegah pencurian kredensial. Tidak praktis untuk mengelola akun setiap karyawan mitra secara langsung. Sistem identitas terfederasi (menggunakan standar seperti SAML atau OIDC) memungkinkan suatu organisasi untuk mempercayai verifikasi identitas yang dilakukan oleh organisasi mitra. Seorang karyawan dari Pemasok A dapat masuk ke portal perusahaan menggunakan kredensial Pemasok A mereka sendiri, dengan pernyataan aman yang melewati sistem identitas kedua organisasi.
- Manajemen akses istimewa (PAM): untuk akun administratif dan akun layanan dengan tingkat hak istimewa yang tinggi, solusi PAM diperlukan untuk mengontrol, memantau, dan mengaudit penggunaannya secara ketat.

Pilar 2: Perangkat

Zero Trust mengasumsikan bahwa setiap perangkat yang mencoba terhubung dapat disusupi. Sistem harus bertanya: “Apakah perangkat ini sehat dan cukup patuh untuk diberikan akses?”. Ini termasuk laptop perusahaan, serta perangkat pribadi yang digunakan oleh karyawan (BYOD), tablet yang digunakan oleh staf gudang, perangkat tahan banting di lapangan, sensor IoT, dan komputer pribadi karyawan mitra yang mengakses sistem. Agen deteksi dan respons titik akhir (EDR) pada titik akhir (laptop, server) terus memantau tanda-tanda penyusupan dan melaporkan status kesehatan perangkat.

Mesin kebijakan dalam model ZTA menggunakan data kesehatan ini untuk membuat keputusan akses. Perangkat dengan sistem operasi yang sudah usang, antivirus yang dinonaktifkan, atau tanda-tanda infeksi aktif dapat ditolak aksesnya atau ditempatkan di jaringan yang dikarantina, terlepas dari identitas pengguna. Untuk ponsel pintar dan tablet, solusi manajemen perangkat seluler (MDM) memberlakukan kebijakan keamanan seperti penguncian layar, enkripsi, dan kemampuan untuk menghapus data dari jarak jauh pada perangkat yang hilang atau dicuri. Mengamankan perangkat IoT merupakan tantangan besar. Setiap sensor dan aktuator membutuhkan identitas unik yang tidak dapat dipalsukan (seringkali tertanam dalam perangkat keras menggunakan modul platform tepercaya atau

yang setara). Sistem harus mampu menginventarisasi dan menilai keadaan jutaan perangkat ini.

Pilar 3: jaringan

Dalam Zero Trust, peran jaringan berubah dari garis pertahanan utama menjadi media transportasi. Asumsinya adalah jaringan telah dikompromikan. Tujuannya adalah untuk membatasi kemampuan penyerang untuk bergerak secara lateral jika mereka berhasil mendapatkan pijakan. Mikro-segmentasi adalah konsep jaringan paling penting dalam ZTA.

Pilar 4: aplikasi dan beban kerja

Aplikasi dan beban kerja (misalnya, mesin virtual, kontainer) harus diamankan dari dalam ke luar. Ini termasuk sistem ERP monolitik yang berjalan di pusat data, aplikasi microservices berbasis cloud, dan aplikasi SaaS pihak ketiga.

- Keamanan API: dalam rantai pasokan modern, sebagian besar komunikasi dilakukan melalui API. Setiap panggilan API harus diautentikasi dan diotorisasi. Gateway API digunakan untuk menegakkan kebijakan ini, menerapkan pembatasan laju untuk mencegah serangan penolakan layanan, dan memeriksa lalu lintas untuk muatan berbahaya.
- Siklus pengembangan perangkat lunak yang aman (SSDLC): keamanan harus "digeser ke kiri" dan diintegrasikan ke dalam proses pengembangan aplikasi. Ini termasuk analisis kode statis dan dinamis, pemindaian ketergantungan untuk mengidentifikasi komponen open-source yang rentan, dan pembuatan SBOM untuk semua perangkat lunak yang dikembangkan.
- Platform perlindungan beban kerja kontainer dan cloud (CWPP): alat-alat ini menyediakan keamanan khusus untuk lingkungan cloud-native modern, memindai citra kontainer untuk kerentanan, memantau perilaku runtime-nya, dan menegakkan mikro-segmentasi pada tingkat aplikasi.

Pilar 5: data

Pada akhirnya, tujuannya adalah untuk melindungi data. Pendekatan Zero Trust yang berpusat pada data mengasumsikan bahwa jaringan, perangkat, dan aplikasi akan mengalami kegagalan pada suatu titik. Data itu sendiri harus memiliki perlindungan tersendiri. Klasifikasi data adalah langkah pertama untuk mengetahui data apa yang Anda miliki dan seberapa sensitifnya data tersebut. Data diklasifikasikan ke dalam kategori seperti publik, internal, rahasia, dan terbatas. Semua data harus dienkripsi, baik saat disimpan di disk (saat diam) maupun saat berpindah melalui jaringan (saat transit). Solusi pencegahan kehilangan data (DLP) memeriksa data dan menerapkan kebijakan berdasarkan klasifikasinya. Solusi ini dapat mencegah pengguna mengirimkan spreadsheet "rahasia" ke alamat email pribadi atau mengunggahnya ke layanan penyimpanan cloud yang tidak diizinkan.

Manajemen hak digital (DRM)/manajemen hak informasi (IRM) adalah kontrol berpusat pada data yang canggih. Pembungkus DRM diterapkan pada file (misalnya, dokumen desain produk yang sensitif). Pembungkus tersebut memberlakukan kebijakan akses yang menyertai file itu sendiri. Bahkan jika file tersebut diekstraksi dari jaringan dan dikirim ke pesaing, file tersebut tidak dapat dibuka kecuali pengguna dapat melakukan autentikasi ke

server DRM dan diotorisasi oleh kebijakan tersebut. Kebijakan tersebut dapat memberikan hak akses tertentu (hanya baca, cetak, edit) dan dapat dicabut kapan saja. Tabel 15.1 merangkum penerapan pilar-pilar ini dalam konteks rantai pasokan.

Pilar	Prinsip inti	Konteks rantai pasokan utama	Teknologi pendukung
Identitas	Verifikasi setiap pengguna dan entitas non-manusia.	Karyawan, pemasok, mitra, pelanggan, API, robot.	IAM, MFA, identitas terfederasi (SAML/OIDC), PAM.
Perangkat	Nilai kesehatan dan kepatuhan setiap perangkat.	Laptop, server, PC mitra, sensor IoT, perangkat seluler.	EDR, MDM, penilaian postur perangkat, identitas IoT.
Jaringan	Isolasi sumber daya dan batasi pergerakan lateral.	Segmentasi portal pemasok, jaringan OT, V-Net cloud.	Mikro-segmentasi, perimeter yang ditentukan perangkat lunak (SDP).
Aplikasi	Amankan akses ke dan di dalam aplikasi.	ERP, WMS, TMS, aplikasi SaaS, layanan mikro yang dibuat khusus.	Gateway keamanan API, SSDLC, SBOM, CWPP.
Data	Lindungi data itu sendiri, terlepas dari lokasinya.	IP, catatan keuangan, PII pelanggan, manifes pengiriman.	Klasifikasi data, enkripsi, DLP, DRM/IRM.

Tabel 15.1. Lima pilar Zero Trust dalam rantai pasokan

15.5 IMPLEMENTASI ZTA: PERGESERAN ARSITEKTUR

Transisi dari model keamanan tradisional ke arsitektur Zero Trust bukanlah sekadar penggantian produk; ini adalah pergeseran mendasar dalam strategi dan arsitektur. Perjalanan menuju ZTA biasanya merupakan proses iteratif. Langkah pertama adalah melupakan jaringan dan mengidentifikasi apa yang paling penting untuk dilindungi. Ini adalah "permukaan perlindungan", dan terdiri dari data, aplikasi, aset, dan layanan (DAAS) yang paling sensitif.

15.6 ZERO TRUST UNTUK TEKNOLOGI RANTAI PASOKAN GENERASI BERIKUTNYA

Prinsip-prinsip ZTA bukan hanya untuk mengamankan sistem TI tradisional; prinsip-prinsip ini sangat penting untuk mengamankan teknologi yang mendefinisikan rantai pasokan generasi berikutnya. Lingkungan pelatihan dapat sepenuhnya diisolasi dalam segmen jaringannya sendiri, dengan kebijakan yang secara ketat mengontrol data apa yang dapat masuk dan pengguna atau sistem mana yang dapat menanyakan model yang telah dilatih. Data pelatihan itu sendiri dapat diklasifikasikan dan dilindungi dengan enkripsi dan kontrol akses, memastikan integritasnya. Penyebaran robot, drone, dan sensor IoT di gudang dan logistik menciptakan tantangan manajemen perangkat yang sangat besar.

15.7 TANTANGAN IMPLEMENTASI ZTA DALAM RANTAI PASOKAN

Menerapkan arsitektur Zero Trust yang komprehensif dalam ekosistem rantai pasokan yang kompleks merupakan tugas yang berat dengan banyak tantangan. ZTA bukanlah satu

produk tunggal, tetapi integrasi dari berbagai teknologi (IAM, EDR, mikro-segmentasi, dll.). Membuat sistem-sistem yang berbeda ini bekerja bersama secara mulus untuk menegakkan kebijakan yang terpadu merupakan tantangan teknik yang signifikan. Rantai pasokan sering dibangun di atas sistem lama yang sudah berusia puluhan tahun (misalnya, ERP berbasis mainframe) yang tidak dirancang dengan mempertimbangkan konsep keamanan modern. Sistem tersebut mungkin tidak mendukung protokol otentikasi modern atau mampu menampung agen keamanan.

15.8 TREN MASA DEPAN ZERO TRUST

Konsep Zero Trust terus berkembang, dengan pembelajaran dan pengembangan berkelanjutan yang bertujuan untuk membuatnya lebih cerdas, adaptif, dan terukur. Blockchain dan teknologi buku besar terdistribusi lainnya menawarkan potensi untuk model verifikasi identitas baru. Pengidentifikasi terdesentralisasi (DID) dapat dibuat untuk pengguna, perangkat, atau organisasi yang tidak dikendalikan oleh satu perusahaan pun. Identitas ini dapat diverifikasi secara kriptografis tanpa bergantung pada otoritas pusat. Dalam rantai pasokan, ini dapat memungkinkan bentuk identitas yang lebih tepercaya dan portabel untuk barang, komponen, dan personel di berbagai organisasi. Perlindungan data di masa depan akan menjadi lebih terperinci.

Teknologi yang muncul dapat menerapkan kebijakan keamanan pada tingkat elemen data individual dalam basis data atau dokumen. Ini akan memungkinkan, misalnya, mitra logistik untuk melihat tujuan dan berat pengiriman dalam catatan basis data, tetapi bidang untuk "isi kargo" dan "nilai" secara otomatis disembunyikan atau disunting oleh kebijakan penegakan. Konvergensi dengan SASE (*Secure Access Service Edge*) adalah model arsitektur yang menggabungkan layanan jaringan dan keamanan ke dalam satu platform berbasis cloud. Model ini menggabungkan kemampuan seperti SD-WAN, gateway web aman, dan akses jaringan Zero Trust (ZTNA) ke dalam layanan terpadu. Seiring semakin banyaknya aplikasi rantai pasokan yang beralih ke cloud, SASE akan menjadi kunci penting untuk memberikan keamanan Zero Trust yang konsisten kepada setiap pengguna, di perangkat apa pun, di mana pun di dunia. Munculnya komputasi kuantum menimbulkan ancaman jangka panjang terhadap algoritma kriptografi yang mendasari sebagian besar keamanan saat ini.

15.9 ZERO TRUST UNTUK KETAHANAN RANTAI PASOK DIGITAL

Digitalisasi rantai pasokan telah membawa keuntungan luar biasa dalam hal efisiensi dan fleksibilitas, namun juga telah menimbulkan lingkungan keamanan yang penuh bahaya. Pendekatan keamanan "kastil dan parit" yang lama, yang didasarkan pada gagasan keliru mengenai jaringan internal yang tepercaya, terbukti sudah usang. Penggunaan kepercayaan yang tidak terucapkan ini merupakan ciri utama serangan siber rantai pasokan baru-baru ini, yang dapat memiliki konsekuensi bencana dan jangka panjang. ZTA akan memberikan jalan yang jauh lebih baik dan sepenuhnya baru. ZTA menawarkan cara yang sangat efektif untuk melindungi rantai pasokan modern, terdistribusi, dan multi-mitra dengan secara khusus menghilangkan konsep kepercayaan dan secara ketat mengunci semua permintaan akses

terhadap serangkaian indikator identitas, perangkat, dan situasional yang diperkaya. Pendekatan yang berpusat pada data memberikan cara yang kuat untuk membatasi radius ledakan pelanggaran dengan administrasi hak akses minimal dan mikro-segmentasi, dan juga melindungi data yang paling penting secara langsung. Jalan menuju Zero Trust adalah jalan yang rumit dan sulit, dan melibatkan investasi strategis, banyak uang, dan proses yang harus dilakukan secara bertahap dan berulang. Isu integrasi sistem lama, risiko bagi mitra, dan kebutuhan untuk berkembang tidak dapat diabaikan. Meskipun demikian, harga yang harus dibayar untuk tidak melakukan apa pun jauh lebih tinggi.

Permukaan serangan akan terus tumbuh seiring dengan semakin banyaknya penggunaan AI, otomatisasi, dan IoT dalam rantai pasokan. Integrasi Zero Trust, analitik berbasis AI yang ditingkatkan, ID terdesentralisasi non-terpusat, dan arsitektur keamanan berbasis cloud – dan terkadang bahkan SASE – akan semakin berarti bahwa pertahanan akan menjadi lebih cerdas dan adaptif di masa depan. Penciptaan fondasi Zero Trust bukan hanya peningkatan teknis dalam dunia rantai pasokan generasi berikutnya yang kacau, tetapi juga tindakan strategis jangka panjang terkait jaminan ketahanan operasional, keamanan citra merek, dan keberlanjutan perdagangan global.

BAB 16

MANUFAKTUR ADITIF DAN MUNCULNYA INVENTARIS DIGITAL

16.1 KETERBATASAN MODEL INVENTARIS FISIK

Rantai pasokan tradisional terbebani oleh beban fisik dan finansial dalam mempertahankan inventaris global yang luas. Bab ini mengeksplorasi bagaimana manufaktur aditif (AM), atau pencetakan 3D, memicu pergeseran paradigma dari persediaan fisik ke inventaris digital. Inventaris digital melibatkan penyimpanan desain komponen sebagai file digital dalam repositori cloud, yang dapat ditransmisikan sesuai permintaan ke fasilitas pencetakan yang tersebar secara geografis. Kami menganalisis bagaimana model ini secara fundamental meningkatkan ketahanan rantai pasokan dengan memungkinkan produksi tepat waktu yang terlokalisasi, secara drastis mengurangi waktu tunggu, biaya pergudangan, dan risiko keusangan. Diskusi meluas ke implikasi mendalam untuk logistik suku cadang, kustomisasi massal, dan pengurangan limbah, memposisikan AM sebagai landasan untuk operasi yang gesit dan berkelanjutan. Namun, transisi ini memerlukan upaya untuk mengatasi berbagai rintangan yang signifikan, termasuk keamanan kekayaan intelektual, standardisasi jaminan kualitas, dan pengembangan talenta digital baru. Terakhir, bab ini menyediakan kerangka kerja strategis untuk memanfaatkan inventaris digital guna membangun rantai pasokan generasi berikutnya yang lebih responsif, hemat biaya, dan ramah lingkungan.

Selama beberapa dekade, landasan rantai pasokan global adalah penyimpanan inventaris fisik secara strategis. Model ini, yang dirancang untuk menahan fluktuasi permintaan dan waktu tunggu yang lama, beroperasi berdasarkan prinsip produksi dan distribusi yang didorong oleh perkiraan. Perusahaan telah menginvestasikan triliunan dolar dalam jaringan gudang yang luas, sistem logistik yang kompleks, dan stok bahan baku, barang setengah jadi, dan barang jadi yang sangat besar. Tujuannya adalah untuk memastikan ketersediaan produk dan perjanjian tingkat layanan, tetapi ini membutuhkan biaya yang sangat besar. Modal yang signifikan terkunci dalam stok yang stagnan, mengikat modal kerja yang dapat digunakan di tempat lain.

Selain itu, pendekatan ini menimbulkan biaya operasional yang sangat besar, termasuk sewa gudang, konsumsi energi, asuransi, tenaga kerja, dan sistem manajemen, yang menciptakan hambatan terus-menerus terhadap profitabilitas dan kelincahan keuangan. Kerapuhan model yang berpusat pada fisik ini telah terungkap secara brutal oleh gangguan global baru-baru ini, mulai dari pandemi dan ketegangan geopolitik hingga kemacetan pelabuhan dan permintaan konsumen yang bergejolak. Peristiwa-peristiwa ini menyoroti kerentanan kritis: persediaan di tempat yang salah pada waktu yang salah bukan hanya aset; itu adalah kewajiban. Hal ini menyebabkan kekurangan stok yang mengikis kepercayaan pelanggan dan kehilangan penjualan, sekaligus menciptakan kelebihan produk usang yang harus dihapus atau dijual dengan kerugian, yang berkontribusi pada pemborosan yang sangat besar. Kekakuan yang melekat ini memaksa organisasi untuk bersikap reaktif, di mana mereka terus-menerus mengelola gejala paradigma yang rusak efek bullwhip, biaya penyimpanan, dan

kebuntuan logistik daripada berinovasi melampauinya. Beban dan risiko sistemik inilah yang menjadi landasan bagi alternatif transformatif: inventaris digital.

16.2 MENDEFINISIKAN PARADIGMA INVENTARIS DIGITAL

Paradigma inventaris digital mewakili pergeseran mendasar dari penyimpanan produk fisik di gudang ke pemeliharaan perpustakaan terpusat file desain digital "resep" untuk komponen. Model ini memisahkan inventaris dari bentuk fisiknya, menyimpan nilai sebagai kekayaan intelektual di cloud daripada sebagai barang fisik di rak. Dalam sistem ini, suatu bagian ada sebagai file digital utama yang aman (misalnya file CAD atau STL) yang dapat ditransmisikan secara instan ke seluruh dunia. Produksi dipicu oleh permintaan aktual, bukan perkiraan, menggeser rantai pasokan dari sistem dorong "produksi untuk persediaan" ke sistem tarik "produksi berdasarkan pesanan". Ini menggantikan jaringan global yang luas dan mahal dari stok fisik dengan kemampuan produksi yang efisien dan sesuai permintaan.

Operasionalisasi paradigma ini bergantung pada jaringan terdistribusi fasilitas manufaktur aditif, yang dapat dimiliki oleh perusahaan, mitranya, atau biro layanan khusus. Ketika suatu komponen dibutuhkan di mana pun di dunia, file digital yang sesuai dikirimkan secara aman ke pusat percetakan terdekat atau yang paling sesuai, di mana barang tersebut diproduksi secara lokal dan segera. Hal ini menghilangkan waktu tunggu, biaya pengiriman, dan emisi karbon yang terkait dengan logistik jarak jauh tradisional. Yang terpenting, inventaris digital juga menghilangkan risiko keusangan fisik, kerusakan, dan pencurian, sekaligus memungkinkan pembaruan desain yang mudah dan instan di seluruh jaringan, memastikan bahwa versi terbaru dari suatu komponen selalu yang diproduksi.

16.3 MANUFAKTUR ADITIF SEBAGAI TEKNOLOGI PENDUKUNG

Manufaktur aditif (AM) berperan sebagai pendukung fundamental inventaris digital dengan mengubah produksi komponen dari proses terpusat yang bergantung pada perkakas menjadi proses digital yang terdesentralisasi. Tidak seperti metode subtraktif tradisional (misalnya, penggilingan) atau formatif (misalnya, pencetakan injeksi) yang membutuhkan perkakas khusus yang mahal dan skala ekonomi, AM membangun objek lapis demi lapis langsung dari model digital 3D.

Paradigma produksi "tanpa perkakas" ini memisahkan biaya produksi dari ukuran lot, sehingga secara ekonomis memungkinkan untuk memproduksi satu komponen atau batch kecil sesuai permintaan. Kemampuan AM utama, seperti kebebasan geometris untuk konsolidasi komponen, pengurangan bobot, dan kemampuan untuk menghasilkan geometri internal yang kompleks, tidak hanya memungkinkan penyimpanan digital tetapi juga memfasilitasi optimasi komponen dan peningkatan kinerja yang tidak mungkin dilakukan dengan cara konvensional. Dengan demikian, AM menyediakan jembatan fisik yang menjadikan konsep abstrak file digital yang disimpan di cloud sebagai komponen nyata dan bernilai tinggi yang tersedia di mana saja, sesuai permintaan.

16.4 KETAHANAN, KELINCAHAN, DAN OPTIMASI BIAYA STRATEGIS

Manufaktur aditif (AM) melampaui perannya sebagai alat produksi semata untuk menjadi pengungkit strategis yang secara fundamental mendefinisikan ulang prinsip-prinsip inti rantai pasokan. Dengan memungkinkan pergeseran dari inventaris fisik ke digital, AM secara langsung mengatasi pertukaran tradisional antara efisiensi, daya tanggap, dan biaya, menawarkan paradigma baru di mana rantai pasokan dapat secara bersamaan lebih tangguh, lincah, dan efisien secara ekonomi. Bagian ini membedah tiga keunggulan ini, mengilustrasikan bagaimana inventaris digital bertindak sebagai peredam guncangan terhadap gangguan, katalis untuk produksi yang berpusat pada pelanggan, dan mekanisme untuk secara radikal menyederhanakan jaringan logistik dan biaya terkaitnya.

Meningkatkan Ketahanan Rantai Pasokan

Inventaris digital secara langsung memperkuat ketahanan rantai pasokan dengan memisahkan ketersediaan suatu komponen dari jaringan logistik global yang kompleks. Alih-alih bergantung pada satu pabrik yang jauh atau jaringan pemasok yang rapuh, desain komponen penting dapat disimpan dengan aman di cloud dan ditransmisikan secara instan ke pusat AM lokal, kapan dan di mana pun dibutuhkan. Kemampuan ini mengurangi risiko dari ketidakstabilan geopolitik, sengketa perdagangan, bencana alam, atau keterlambatan transportasi, karena produksi dapat dengan cepat dialihkan ke lokasi alternatif. Untuk suku cadang, terutama di bidang kedirgantaraan, pertahanan, atau mesin berat, hal ini hampir menghilangkan masalah keusangan dan waktu tunggu yang lama, memastikan kontinuitas operasional dan mengubah model pemeliharaan reaktif sebelumnya menjadi layanan proaktif sesuai permintaan.

Memungkinkan Kustomisasi dan Personalisasi Massal

Manufaktur aditif (AM) menghancurkan skala ekonomi yang telah lama mendikte produksi massal, membuka kelincahan yang belum pernah terjadi sebelumnya melalui kustomisasi dan personalisasi massal. Di mana manufaktur tradisional membutuhkan cetakan yang mahal dan waktu penyiapan yang lama untuk variasi produk, inventaris digital memungkinkan produksi barang pesanan khusus yang hemat biaya dalam jumlah kecil atau bahkan satu unit saja. Setiap unit yang dicetak dapat unik tanpa penalti waktu atau biaya yang signifikan, memungkinkan bisnis untuk menanggapi preferensi pelanggan tertentu, membuat perangkat medis yang disesuaikan seperti prostetik atau memproduksi produk edisi terbatas. Kelincahan ini mengubah rantai pasokan dari sistem berbasis dorongan yang memprediksi permintaan menjadi sistem berbasis tarikan yang bereaksi dengan tepat terhadap keinginan pasar yang sebenarnya.

Mengurangi Biaya Pergudangan dan Logistik

Adopsi inventaris digital mendorong redefinisi mendalam dari struktur biaya, terutama melalui pengurangan drastis biaya pergudangan dan logistik. Dengan mengganti tumpukan fisik suku cadang dan komponen yang besar dengan file digital, perusahaan dapat meminimalkan atau bahkan menghilangkan kebutuhan akan gudang terpusat, memangkas biaya real estat, energi, dan penyimpanan inventaris. Lebih lanjut, logistik disederhanakan dan dibuat lebih murah; Alih-alih mengirimkan barang jadi secara global, sebuah file digital tunggal

dikirimkan, dan produk tersebut diproduksi secara lokal, sehingga mengurangi bahan bakar transportasi, emisi karbon, dan bea impor. Pergeseran dari model yang berpusat pada biaya dan berfokus pada pengiriman massal ke model yang memprioritaskan produksi lokal sesuai permintaan ini merupakan penyederhanaan mendasar dari seluruh jaringan pasokan.

16.5 MANUFAKTUR ADITIF (AM) DAN KEBERLANJUTAN RANTAI PASOKAN

Manufaktur aditif (AM) secara intrinsik memajukan keberlanjutan dengan merekayasa ulang produksi secara fundamental menuju model yang lebih hemat dan tidak terlalu intensif karbon. Tidak seperti metode subtraktif tradisional yang mengukir bagian dari blok material padat, yang seringkali membuang lebih dari 90% bahan baku, AM membangun komponen lapis demi lapis, hanya menggunakan material yang diperlukan untuk bagian itu sendiri, secara dramatis mengurangi limbah dan menghemat sumber daya. Kemampuan "pengurangan bobot" ini lebih lanjut memungkinkan desain bagian yang optimal secara struktural yang menggunakan material minimal tanpa mengorbankan kekuatan, mengurangi energi yang dikonsumsi selama siklus hidup produk, khususnya di sektor-sektor seperti kedirgantaraan dan otomotif. Bersamaan dengan itu, model inventaris digital memungkinkan produksi yang benar-benar lokal, di mana bagian-bagian dicetak sesuai permintaan di dekat titik penggunaannya. Hal ini menghilangkan kebutuhan akan pengiriman jarak jauh dan emisi gas rumah kaca terkait dari jaringan logistik global, sekaligus meniadakan limbah yang dihasilkan dari produksi berlebih, persediaan usang, dan barang rusak dalam perjalanan, sehingga menutup siklus rantai pasokan yang lebih sirkular dan bertanggung jawab terhadap lingkungan.

16.6 HAMBATAN TRANSISI KE INVENTARIS DIGITAL

Transisi ke model inventaris digital, meskipun menjanjikan, penuh dengan hambatan operasional dan strategis yang signifikan yang harus diatasi secara proaktif oleh organisasi untuk memastikan implementasi yang layak dan aman. Tantangan ini melampaui sekadar adopsi teknis untuk mencakup isu-isu inti tentang keamanan, kualitas, dan kemampuan.

Kekayaan Intelektual dan Keamanan File Digital

Inti dari inventaris digital – menyimpan file CAD yang berharga dalam repositori digital – menciptakan risiko kekayaan intelektual (IP) yang mendalam, karena satu pelanggaran saja dapat menyebabkan replikasi dan distribusi massal desain milik perusahaan. Tidak seperti komponen fisik yang disimpan di gudang, file digital dapat disalin tanpa batas tanpa degradasi, sehingga memerlukan langkah-langkah keamanan siber yang kuat termasuk enkripsi, kontrol akses, dan berpotensi sistem buku besar berbasis blockchain untuk melacak akses dan penggunaan file, sehingga melindungi aset digital perusahaan yang paling berharga.

Kontrol Kualitas dan Standardisasi

Mencapai kualitas komponen yang konsisten dan dapat diulang di berbagai mesin AM, lokasi geografis, dan batch produksi tetap menjadi hambatan kritis, karena variasi dalam kalibrasi printer, batch material, dan kondisi lingkungan dapat menyebabkan penyimpangan yang tidak dapat diterima dalam sifat mekanik dan akurasi dimensi. Tantangan ini menuntut pengembangan protokol sertifikasi yang ketat dan diterima secara universal untuk file digital

dan proses pencetakan, bersamaan dengan integrasi pemantauan di tempat dan analitik berbasis AI untuk memastikan setiap komponen yang dicetak, terlepas dari tempat produksinya, memenuhi spesifikasi dan standar kinerja yang dibutuhkan.

Keterbatasan Material dan Teknologi

Meskipun mengalami kemajuan pesat, teknologi AM masih menghadapi keterbatasan inheren dalam hal ketersediaan material, kecepatan produksi, dan volume pembuatan, yang dapat membatasi penerapannya untuk komponen bervolume tinggi, berkekuatan tinggi, atau berskala besar tertentu. Organisasi harus dengan cermat mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomi penggunaan AM untuk setiap bagian, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti keterbatasan pilihan material kelas teknik yang memenuhi syarat, laju produksi yang lebih lambat dibandingkan dengan metode produksi massal tradisional seperti pencetakan injeksi, dan persyaratan pasca-pemrosesan yang dapat memengaruhi waktu tunggu dan biaya keseluruhan.

16.7 MENINGTEGRASIKAN INVENTARIS DIGITAL DENGAN AI DAN IOT

Kekuatan transformatif inventaris digital tidak hanya terwujud melalui AM saja, tetapi juga melalui integrasi mendalamnya dengan dua teknologi dasar lainnya: kecerdasan buatan (AI) dan *Internet of Things* (IoT). Sinergi ini menciptakan ekosistem rantai pasokan yang mengoptimalkan diri sendiri, prediktif, dan sangat responsif yang melampaui produksi berdasarkan permintaan sederhana.

Peran AI: dari Reaktif Menjadi Prediktif dan Generatif

AI bertindak sebagai otak cerdas dari sistem inventaris digital.

- Analisis prediktif untuk pencetakan proaktif: alih-alih menunggu komponen rusak atau pesanan ditempatkan, algoritma AI dapat menganalisis data kinerja historis, kondisi operasi waktu nyata dari sensor IoT, dan bahkan faktor eksternal seperti cuaca untuk memprediksi kerusakan komponen atau lonjakan permintaan. Sistem kemudian dapat secara otomatis memicu pencetakan komponen di lokasi yang paling optimal sebelum sangat dibutuhkan, mencapai pemeliharaan prediktif sejati dan meminimalkan waktu henti.
- Desain generatif untuk komponen digital: perangkat lunak desain generatif bertenaga AI dapat digunakan untuk membuat desain komponen yang dioptimalkan khusus untuk AM. Insinyur memasukkan tujuan desain (misalnya, berat, kekuatan, kinerja termal) dan batasan (misalnya, bahan yang tersedia, ukuran platform cetak), dan AI mengeksplorasi semua kemungkinan permutasi untuk menghasilkan geometri optimal, yang seringkali tampak organik. Ini menciptakan pustaka komponen digital yang lebih unggul, lebih ringan, dan lebih efisien yang mengonsumsi lebih sedikit material dan berkinerja lebih baik.
- Optimasi perutean dan logistik dinamis: ketika pesanan cetak dipicu, AI dapat secara dinamis menentukan lokasi produksi terbaik. AI akan menganalisis faktor-faktor seperti kapasitas printer saat ini, ketersediaan material, biaya energi, jarak pengiriman ke

pengguna akhir, dan jejak karbon lokal untuk mengarahkan file digital ke node cetak yang paling efisien dan berkelanjutan dalam jaringan global.

Peran IoT: Sistem Saraf Sensorik

IoT menyediakan data dunia nyata yang memberi makan AI, menciptakan sistem cerdas yang tertutup.

- Pemantauan aset secara waktu nyata: Sensor IoT yang tertanam dalam mesin di seluruh rantai pasokan (misalnya di pabrik manufaktur, kendaraan, atau peralatan di lapangan) terus-menerus mengalirkan data tentang metrik kinerja seperti suhu, getaran, tekanan, dan siklus penggunaan.
- Pembuatan kembaran digital: aliran data IoT yang berkelanjutan ini dapat digunakan untuk membuat "kembaran digital" – replika virtual dari aset fisik. Kembaran digital mencerminkan keausan dan kerusakan dari rekan fisiknya, memungkinkan AI untuk memodelkan dan memprediksi titik kegagalan dengan akurasi yang sangat tinggi, secara langsung memberi informasi kepada jadwal pencetakan prediktif inventaris digital.
- Jaminan kualitas dan sertifikasi: Sensor IoT dapat diintegrasikan langsung ke dalam printer 3D untuk memantau proses pencetakan secara waktu nyata (misalnya pencitraan termal, daya laser). Aliran data ini dapat digunakan oleh AI untuk mendeteksi anomali selama pembuatan dan dapat dicatat secara kriptografis (misalnya pada blockchain) untuk memberikan jejak digital yang dapat diverifikasi dan terjamin kualitasnya untuk bagian yang diproduksi, yang sangat penting untuk industri yang diatur seperti kedirgantaraan dan perawatan kesehatan.

Pustaka inventaris digital berfungsi sebagai fondasi. Mesin AI & Analitik bertindak sebagai inti cerdas, memproses data dari aset fisik yang diaktifkan IoT (melalui kembaran digitalnya) untuk membuat keputusan prediktif. Kemudian secara dinamis mengarahkan file desain yang dioptimalkan ke printer pintar yang sesuai. Sinergi ini memungkinkan model operasional yang proaktif, efisien, dan tangguh.

Sistem Terpadu: Jaringan Pasokan yang Mengoptimalkan Diri Sendiri

Integrasi AI, IoT, dan inventaris digital menciptakan lingkaran umpan balik yang kuat:

- Sensor IoT pada kompresor di operasi pertambangan terpencil mendeteksi pola getaran anomali.
- Data ini dialirkan ke Mesin Analitik AI, yang membandingkannya dengan kembaran digital aset dan memprediksi bahwa bantalan tertentu memiliki peluang kegagalan 95% dalam waktu 72 jam.
- AI secara otomatis memicu perintah kerja dan menanyakan inventaris digital untuk file desain bantalan.
- AI kemudian menjalankan algoritma perutean dinamisnya, mengidentifikasi bahwa solusi yang paling hemat biaya dan tercepat adalah mencetak bantalan di pusat layanan lokal yang berjarak 200 mil dari tambang, daripada mengirimkannya dari gudang pusat di luar negeri.

- File digital dikirimkan secara aman ke fasilitas pencetakan yang ditunjuk. Printer yang mendukung IoT memantau produksi, memastikan kualitas, dan setelah selesai, komponen dikirim untuk pemasangan, mencegah waktu henti yang tidak direncanakan dan mahal.

16.8 STRATEGI TRANSISI BERTAHAP KE INVENTARIS DIGITAL

Transisi ke model inventaris digital bukanlah upaya yang serba atau tidak sama sekali, tetapi perjalanan strategis yang membutuhkan perencanaan yang cermat dan pelaksanaan bertahap. Organisasi harus memulai dengan audit menyeluruh terhadap inventaris dan daftar material yang ada untuk mengidentifikasi komponen bernilai tinggi, bervolume rendah, atau usang yang merupakan kandidat utama untuk konversi awal. Fase pertama ini melibatkan program percontohan yang berfokus pada lini produk tertentu atau pasar regional, memungkinkan pengembangan keahlian AM internal, pembentukan kemitraan pemasok yang berkualitas dengan pusat percetakan, dan implementasi manajemen hak digital yang kuat untuk melindungi kekayaan intelektual. Keberhasilan dalam lingkungan terkontrol ini membangun dasar bisnis dan kepercayaan organisasi, membuka jalan bagi infrastruktur digital yang lebih terukur.

Pada akhirnya, mencapai potensi penuh inventaris digital membutuhkan transformasi holistik yang mengintegrasikan teknologi, strategi, dan talenta. Hal ini melibatkan langkah melampaui proyek percontohan yang terisolasi untuk menanamkan prinsip-prinsip AM (*Additive Manufacturing*) dan inventaris digital ke dalam inti strategi rantai pasokan, mulai dari desain produk untuk kemampuan manufaktur aditif (DfAM) hingga model keuangan yang direvisi yang memperhitungkan total biaya kepemilikan daripada hanya harga satuan. Lebih lanjut, keberhasilan bergantung pada pengembangan kolaborasi lintas fungsi antara tim rantai pasokan, manufaktur, TI, dan keamanan siber untuk menciptakan alur digital yang mulus dan aman. Dengan membangun ekosistem ini secara proaktif dan mengembangkan keterampilan digital yang diperlukan, organisasi dapat memposisikan diri untuk memanfaatkan inventaris digital mereka bukan hanya sebagai alat taktis, tetapi sebagai aset strategis untuk ketahanan, kustomisasi, dan keberlanjutan yang belum pernah terjadi sebelumnya di dunia yang bergejolak.

BAB 17

TATA KELOLA ETIKA DAN SOSIAL RANTAI PASOKAN DIDUKUNG AI

17.1 PENTINGNYA AI ETIS DALAM RANTAI PASOKAN GLOBAL

Bab ini membahas keharusan penting untuk mengintegrasikan kerangka kerja tata kelola etika dan sosial yang kuat ke dalam rantai pasokan yang digerakkan oleh AI. Bab ini mengkaji tantangan inti seperti bias algoritmik, kurangnya transparansi, kesenjangan akuntabilitas, perpindahan tenaga kerja, dan risiko privasi data yang melekat dalam penerapan AI di seluruh jaringan global. Diskusi ini menekankan dampak sosial pada pekerja, pemasok, komunitas, dan konsumen, serta menganjurkan pendekatan inklusif pemangku kepentingan. Bab ini menguraikan kerangka kerja tata kelola praktis, strategi kepatuhan, dan jalur implementasi termasuk siklus hidup desain AI yang etis, mekanisme pengawasan manusia, alat audit, dan metrik dampak untuk mendorong inovasi yang bertanggung jawab. Bab ini berpendapat bahwa tata kelola etika yang proaktif bukan hanya sekadar latihan kepatuhan, tetapi merupakan fondasi strategis untuk membangun rantai pasokan bertenaga AI yang tangguh, tepercaya, dan berkelanjutan yang selaras dengan tujuan ESG (Lingkungan, Sosial, dan Tata Kelola) yang lebih luas.

Integrasi Kecerdasan Buatan (AI) ke dalam rantai pasokan global menjanjikan efisiensi, ketahanan, dan optimasi yang belum pernah terjadi sebelumnya. Algoritma mendorong keputusan tentang pengadaan, logistik, inventaris, peramalan permintaan, alokasi tenaga kerja, dan manajemen risiko. Namun, pergeseran teknologi yang kuat ini membawa implikasi etis dan sosial yang mendalam yang jauh melampaui sekadar kinerja teknis. Pendahuluan ini menetapkan pentingnya menanamkan prinsip-prinsip tata kelola etis dan sosial (ESG+) yang kuat ke dalam inti operasi rantai pasokan yang digerakkan oleh AI. Pendahuluan ini berpendapat bahwa mengabaikan aspek-aspek ini bukan hanya risiko reputasi, tetapi juga mengancam kelangsungan jangka panjang, keadilan, dan izin sosial jaringan pasokan global, serta melemahkan potensi manfaat AI. Tata kelola etis bukan lagi pilihan, melainkan keharusan strategis mendasar untuk bisnis yang bertanggung jawab dan berkelanjutan di era digital.

Mendefinisikan Tata Kelola Etika dan Sosial Dalam Konteks AI

ESG+ dalam konteks ini mengacu pada kerangka kerja, prinsip, proses, dan mekanisme akuntabilitas spesifik yang diperlukan untuk memastikan bahwa sistem AI yang diterapkan di seluruh rantai pasokan beroperasi secara bertanggung jawab, adil, transparan, dan akuntabel, sambil meminimalkan kerugian dan memaksimalkan dampak sosial yang positif. Ini dibangun di atas pelaporan ESG (Lingkungan, Sosial, Tata Kelola) tradisional tetapi menambahkan lapisan "+" yang penting yang secara khusus berfokus pada tantangan unik yang ditimbulkan oleh AI. Ini mencakup:

- Keadilan dan non-diskriminasi algoritmik: memastikan sistem AI tidak mengganggu atau memperkuat bias terhadap pemasok tertentu (terutama UKM), pekerja, komunitas, atau konsumen berdasarkan karakteristik yang dilindungi (misalnya lokasi, ukuran, jenis kelamin, etnis).

- Transparansi dan penjelasan (XAI): membuat keputusan yang didorong oleh AI dapat dipahami oleh pemangku kepentingan yang terpengaruh (misalnya mengapa pemasok tidak dipilih, mengapa rute dipilih, bagaimana kinerja pekerja dinilai).
- Akuntabilitas dan tanggung jawab: mendefinisikan secara jelas siapa yang bertanggung jawab ketika sistem AI menyebabkan kerugian (misalnya, perekrutan yang bias, pemutusan kontrak yang tidak adil, penetapan harga yang diskriminatif, kegagalan kritis keselamatan).
- Pengawasan dan kontrol manusia: mempertahankan penilaian dan titik intervensi manusia yang bermakna (“manusia dalam lingkaran” atau “manusia atas perintah”) untuk keputusan AI yang signifikan atau berisiko tinggi.
- Privasi dan keamanan data: melindungi data sensitif (biometrik pekerja, keuangan pemasok, informasi pelanggan) yang dikumpulkan dan diproses oleh AI di seluruh rantai pasokan.
- Dampak tenaga kerja dan transisi yang adil: secara proaktif mengelola dampak otomatisasi pada pekerjaan, memastikan kondisi kerja yang adil di bawah pengawasan/manajemen AI dan berinvestasi dalam pelatihan ulang tenaga kerja.
- Kesejahteraan masyarakat: mempertimbangkan dampak yang lebih luas pada masyarakat, termasuk pengusuran ekonomi, keadilan lingkungan (misalnya, pengalihan polusi) dan hak data.

Mengapa AI Memperkenalkan Risiko Etika Unik Dalam Jaringan Pasokan Global yang Kompleks

AI memperburuk dan memperkenalkan risiko etika baru dalam rantai pasokan karena beberapa karakteristik bawaan:

- Kompleksitas dan ketidakjelasan (“kotak hitam”): banyak model AI canggih (seperti pembelajaran mendalam) secara inheren kompleks dan sulit untuk diinterpretasikan. Memahami mengapa AI membuat keputusan pengadaan, perutean, atau perekrutan tertentu bisa jadi mustahil, menghambat akuntabilitas dan mempersulit deteksi bias. Ketidakjelasan ini diperbesar dalam jaringan global multi-tingkat.
- Skala dan amplifikasi: AI mengotomatiskan dan meningkatkan skala pengambilan keputusan secara eksponensial. Bias yang tidak terdeteksi dalam algoritma dapat langsung diterapkan di ribuan pemasok, jutaan pengiriman, atau tenaga kerja global, memperkuat ketidakadilan atau diskriminasi pada skala dan kecepatan yang belum pernah terjadi sebelumnya.
- Ketergantungan dan bias data: Sistem AI belajar dari data historis. Data rantai pasokan sering kali mencerminkan ketidaksetaraan masa lalu, praktik diskriminatif, atau perspektif yang tidak lengkap (misalnya, lebih mengutamakan pemasok besar dan mapan daripada UKM yang beragam). AI dapat mengkodifikasi dan melanggengkan bias ini, menjadikannya sistemik.
- Adaptasi dinamis dan konsekuensi yang tidak terduga: Sistem AI, terutama yang menggunakan pembelajaran penguatan, terus beradaptasi. Mereka mungkin mengembangkan strategi yang tidak terduga, tidak diinginkan, atau tidak etis untuk

mencapai tujuan yang diprogram (misalnya, mengoptimalkan biaya dengan secara konsisten mengarahkan rute melalui wilayah dengan hukum ketenagakerjaan yang longgar).

- Akuntabilitas yang tersebar: keterlibatan banyak aktor (pengembang AI, penyedia data, integrator sistem, manajer rantai pasokan, eksekutif) membuat penentuan tanggung jawab atas hasil AI yang merugikan menjadi tantangan secara hukum dan etis.
- Disparitas global: penerapan AI di berbagai yurisdiksi global dengan peraturan, norma budaya, dan tingkat perlindungan pekerja yang berbeda-beda menciptakan risiko eksploitasi atau penerapan etika yang tidak konsisten.

Konvergensi Tekanan Regulasi, Harapan Konsumen, dan Fokus Investor

Keharusan untuk tata kelola AI yang etis didorong oleh kekuatan-kekuatan yang saling berkonvergensi:

- Tekanan regulasi: pemerintah di seluruh dunia dengan cepat memberlakukan undang-undang yang menargetkan etika AI. Undang-Undang AI Uni Eropa (mengklasifikasikan sistem berisiko tinggi, mewajibkan penilaian risiko, transparansi, dan pengawasan manusia), Perintah Eksekutif AS dan rancangan undang-undang tingkat negara bagian, peraturan algoritma Tiongkok, dan inisiatif serupa secara global menciptakan lanskap kepatuhan yang kompleks namun menuntut. Ketidakpatuhan berisiko dikenakan denda yang signifikan dan pembatasan operasional.
- Harapan dan aktivisme konsumen: konsumen semakin sadar dan prihatin tentang implikasi etis dari produk yang mereka beli. Mereka menuntut transparansi tentang sumber, praktik ketenagakerjaan, dan dampak lingkungan. Peran AI di bidang ini sedang diteliti. Konsumen secara aktif memboikot merek yang terkait dengan praktik yang tidak etis, termasuk penggunaan AI yang bias atau eksploitatif. "Asal usul etis" menjadi faktor pembelian utama.
- Fokus investor dan mandat ESG: investor mengintegrasikan faktor ESG, termasuk etika teknologi dan tata kelola sosial, ke dalam pengambilan keputusan dan penilaian risiko mereka. Dana yang berfokus pada investasi berkelanjutan dan bertanggung jawab (SRI) berkembang pesat. Perusahaan dengan tata kelola AI yang buruk menghadapi risiko divestasi, biaya modal yang lebih tinggi, dan kerusakan reputasi serta nilai jangka panjang mereka. Investor menuntut pelaporan yang kuat tentang bagaimana risiko etika dan sosial terkait AI dikelola.
- Ketiga hal ini berarti bahwa AI yang etis dalam rantai pasokan bukan lagi sekadar pertimbangan moral, tetapi merupakan keharusan bisnis yang penting yang memengaruhi kedudukan hukum, pangsa pasar, nilai merek, dan akses ke modal.

Peta Jalan Bab

Bab ini menyediakan peta jalan komprehensif untuk menavigasi medan yang kompleks dari tata kelola etika dan sosial dalam rantai pasokan yang didukung AI. Bab ini dimulai dengan menggali lebih dalam tantangan etika inti (bagian 17.2), memeriksa bias algoritmik, defisit transparansi, kesenjangan akuntabilitas, ancaman privasi, perpindahan tenaga kerja, dan biaya lingkungan yang spesifik untuk AI rantai pasokan. Bagian 17.3 kemudian mengeksplorasi

implikasi sosial dari tantangan-tantangan ini, menganalisis dampaknya pada pekerja, pemasok (terutama UKM yang rentan), komunitas lokal, dan kepercayaan konsumen.

Berdasarkan pemahaman ini, bagian 17.4 menguraikan kerangka kerja dan prinsip-prinsip penting untuk tata kelola AI yang etis, meliputi etika dasar, regulasi yang berkembang, standar yang relevan, dan integrasi etika ke dalam siklus pengembangan AI. Bagian 17.5 berfokus pada implementasi tata kelola sosial, merinci pendekatan praktis seperti pengawasan manusia yang bermakna, keterlibatan pemangku kepentingan, praktik ketenagakerjaan yang adil, dan mempromosikan keragaman dalam pengembangan AI. Bagian 17.6 membahas infrastruktur tata kelola yang penting, termasuk dewan etika, metodologi audit, alat penjelasan, dan mekanisme pengaduan. Bagian 17.7 membahas pengukuran keberhasilan melalui KPI yang relevan dan pengintegrasian kinerja etis ke dalam pelaporan ESG. Bagian 17.8 mengilustrasikan konsep-konsep ini melalui studi kasus praktis tentang dilema dan solusi etis. Terakhir, bab ini diakhiri (bagian 17.9) dengan merangkum argumen untuk tata kelola etis sebagai landasan rantai pasokan berbasis AI yang tangguh, berkelanjutan, dan tepercaya untuk masa depan.

17.2 TANTANGAN ETIKA INTI YANG DITIMBULKAN OLEH AI RANTAI PASOKAN

Bias dan Diskriminasi Algoritmik

Sistem AI belajar dari data historis, yang sering kali mencerminkan bias dan ketidaksetaraan sosial yang ada. Dalam rantai pasokan, hal ini dapat menyebabkan hasil yang diskriminatif di area-area penting. Misalnya, algoritma pengadaan yang dilatih berdasarkan data pembelian masa lalu mungkin secara tidak sengaja lebih menyukai pemasok dari wilayah atau demografi tertentu daripada yang lain, bahkan jika pemasok tersebut secara objektif bukanlah yang terbaik, sehingga melanggengkan kerugian historis. Bias dapat menyelip ke dalam optimasi logistik, secara tidak adil mengarahkan barang menjauh dari lingkungan tertentu berdasarkan asumsi yang salah tentang permintaan atau risiko. AI yang digunakan untuk manajemen tenaga kerja mungkin mengalokasikan shift atau tugas dengan cara yang merugikan kelompok tertentu berdasarkan faktor-faktor yang berkorelasi dalam data pelatihan. Algoritma penilaian kredit yang menilai pemasok dapat secara tidak adil menghukum usaha kecil atau usaha milik minoritas. Dampak sosialnya signifikan, karena AI yang bias dapat memperkuat pengucilan ekonomi, mengurangi keragaman dalam rantai pasokan, dan menyebabkan dinamika pasar yang tidak adil, yang merusak prinsip-prinsip kesetaraan dan keadilan.

Kurangnya Transparansi dan Kemampuan Menjelaskan (“Masalah Kotak Hitam”)

Banyak model AI canggih, khususnya pembelajaran mendalam, beroperasi sebagai “kotak hitam” yang kompleks. Meskipun mereka dapat menghasilkan prediksi atau optimasi yang sangat akurat, seringkali mustahil bagi manusia (termasuk pengembang, operator, dan pemangku kepentingan yang terpengaruh) untuk memahami bagaimana AI sampai pada keputusan tertentu. Kurangnya transparansi ini bermasalah dalam konteks rantai pasokan. Jika AI menolak pemasok, mengubah rute pengiriman penting yang menyebabkan penundaan, menandai karyawan untuk ditinjau, atau mengubah jadwal produksi, pemangku kepentingan

berhak mendapatkan penjelasan. Tanpa kemampuan menjelaskan (XAI), sulit untuk mengidentifikasi kesalahan, memperbaiki masalah, menantang hasil yang tidak adil, atau sekadar membangun kepercayaan. Pekerja, pemasok, komunitas, dan konsumen dibiarkan dalam kegelapan tentang keputusan yang memengaruhi mata pencaharian, bisnis, atau barang yang mereka terima. Ketidaktransparan ini menghambat akuntabilitas, mengikis kepercayaan, dan menyulitkan untuk memastikan AI selaras dengan tujuan etika dan bisnis.

Akuntabilitas dan Tanggung Jawab

Ketika keputusan yang didorong oleh AI menyebabkan kerugian atau kegagalan dalam rantai pasokan, menentukan siapa yang bertanggung jawab menjadi kompleks. Model tanggung jawab tradisional berfokus pada aktor manusia. Namun, dengan AI yang secara otonom membuat keputusan (misalnya, mengalihkan pengiriman, memilih pemasok, mengelola robot gudang), batasannya menjadi kabur. Jika perutean yang dioptimalkan oleh AI menyebabkan kecelakaan truk karena faktor risiko tak terduga yang diprioritaskan (seperti kecepatan di atas keselamatan), siapa yang bertanggung jawab? Pengembang algoritma? Perusahaan yang menerapkannya? Operator yang tidak mengesampingkannya? Bagaimana jika algoritma yang bias secara tidak adil mengakhiri kontrak pemasok, menyebabkan bisnis mereka runtuh? Kerangka hukum dan peraturan saat ini kesulitan dengan tanggung jawab yang terdistribusi dan seringkali ambigu ini. Membangun rantai akuntabilitas yang jelas untuk keputusan AI sangat penting untuk keadilan, perbaikan, dan pemberian insentif untuk pengembangan dan penerapan yang etis.

Privasi dan Keamanan Data

Sistem AI dalam rantai pasokan berkembang pesat dengan sejumlah besar data, termasuk informasi yang sangat sensitif. Ini mencakup data pribadi karyawan (metrik kinerja, pelacakan lokasi melalui IoT, data biometrik), kontrak pemasok dan keuangan yang bersifat rahasia, detail operasional yang bersifat rahasia, dan informasi pelanggan. Pengumpulan, pemrosesan, penyimpanan, dan berbagi data ini di seluruh jaringan global yang kompleks menciptakan risiko privasi dan keamanan yang sangat besar. Akses tanpa izin, pelanggaran data, atau penyalahgunaan dapat menyebabkan pencurian identitas, spionase perusahaan, kerugian kompetitif, kerusakan reputasi, dan pelanggaran peraturan privasi seperti GDPR atau CCPA. Memastikan anonimisasi data yang kuat, menerapkan kontrol akses yang ketat, menggunakan enkripsi canggih, dan menjaga manajemen siklus hidup data yang aman sangat penting. Kegagalan di sini tidak hanya melanggar etika tetapi juga membuat organisasi rentan terhadap sanksi hukum dan keuangan yang signifikan.

Perpindahan Tenaga Kerja dan Transformasi Angkatan Kerja

AI dan otomatisasi (robotika, kendaraan otonom, perencanaan AI) menjanjikan efisiensi tetapi menimbulkan tantangan signifikan bagi angkatan kerja manusia. Tugas-tugas yang sebelumnya dilakukan oleh manusia, pengambilan/pengemasan barang di gudang, mengemudi truk (jangka panjang), entri data, perencanaan rutin semakin diotomatisasi. Meskipun pekerjaan baru tercipta (misalnya, pemeliharaan robot, pengawasan AI, ilmu data), transisi tersebut seringkali mengganggu dan tidak merata. Kekhawatiran etis utama meliputi skala dan kecepatan potensi kehilangan pekerjaan, konsentrasi geografis dampak, dan

ketidaksesuaian antara keterampilan pekerja yang kehilangan pekerjaan dan peran baru. Hal ini menuntut strategi “transisi yang adil” yang proaktif: investasi signifikan dalam program pelatihan ulang dan peningkatan keterampilan, potensi dukungan pendapatan selama transisi, mendesain ulang peran untuk meningkatkan kemampuan manusia dengan AI daripada sekadar menggantinya, dan memastikan bahwa peningkatan produktivitas dibagi secara adil. Mengabaikan tantangan ini berisiko menyebabkan pengangguran yang meluas, keresahan sosial, dan memperdalam ketidaksetaraan dalam tenaga kerja rantai pasokan.

Dampak Lingkungan

Meskipun AI sering disebut-sebut sebagai alat untuk keberlanjutan (misalnya, mengoptimalkan rute untuk mengurangi bahan bakar, meminimalkan limbah), teknologi itu sendiri membawa jejak lingkungan yang signifikan yang tidak dapat diabaikan. Melatih model AI yang besar dan kompleks membutuhkan daya komputasi yang sangat besar, mengonsumsi sejumlah besar listrik, yang sering kali dihasilkan dari bahan bakar fosil. Hal ini berkontribusi langsung pada emisi gas rumah kaca. Menjalankan model-model ini secara terus menerus dalam produksi untuk optimasi rantai pasokan secara real-time menambah beban energi. Pusat data yang mendukung infrastruktur ini juga membutuhkan sumber daya yang substansial untuk pendinginan dan pemeliharaan. Oleh karena itu, penilaian etis harus mempertimbangkan dampak lingkungan bersih: Apakah optimasi sumber daya dan pengurangan limbah yang dicapai oleh AI lebih besar daripada biaya karbon dari pengembangan dan pengoperasian AI? Kegagalan untuk memperhitungkan hal ini dapat menyebabkan “*greenwashing*”, di mana manfaat lingkungan dlebih-lebihkan sementara biaya tersembunyi yang signifikan dari AI itu sendiri tetap tidak ditangani. AI yang berkelanjutan membutuhkan pemilihan arsitektur model yang efisien, penggunaan energi terbarukan untuk komputasi, dan evaluasi yang cermat terhadap ROI lingkungan yang sebenarnya.

17.3 DAMPAK ETIS DAN SOSIAL AI DALAM RANTAI PASOKAN

Dampak pada Pekerja

Integrasi AI ke dalam operasi rantai pasokan secara fundamental membentuk kembali pengalaman pekerja, menimbulkan kekhawatiran etis dan sosial yang kritis. Sistem pemantauan kinerja berbasis AI, otomatisasi gudang, dan alokasi tugas algoritmik dapat menyebabkan pengawasan tempat kerja yang meluas, meningkatkan tekanan, dan berpotensi mengikis otonomi pekerja. Algoritma mungkin mengoptimalkan kecepatan atau biaya tanpa memperhitungkan kelelahan manusia atau keselamatan ergonomis secara memadai, meningkatkan ketegangan fisik dan risiko kecelakaan. Lebih lanjut, sistem AI yang digunakan untuk perekrutan, promosi, atau alokasi shift dapat melanggengkan atau bahkan memperkuat bias sosial yang ada jika dilatih dengan data historis yang cacat, yang menyebabkan hasil yang diskriminatif.

Ancaman perpindahan akibat otomatisasi (robotika, kendaraan otonom) menciptakan kecemasan yang signifikan, menuntut strategi “transisi yang adil” yang kuat yang mencakup pelatihan ulang dan jaring pengaman sosial. Yang terpenting, sifat “kotak hitam” dari banyak keputusan AI menyulitkan pekerja untuk memahami mengapa mereka ditugaskan tugas

tertentu, ditolak shift, atau ditandai karena masalah kinerja, yang merusak kepercayaan dan proses yang adil. Misalnya, AI yang mengoptimalkan rute pengiriman mungkin memprioritaskan kecepatan daripada keselamatan pengemudi atau waktu istirahat, sementara sistem manajemen gudang otomatis dapat menetapkan tugas-tugas yang menuntut fisik hanya berdasarkan metrik efisiensi, mengabaikan kelelahan atau kondisi kesehatan pekerja individu.

Dampak pada Pemasok (Khususnya UKM)

Rantai pasokan yang didukung AI memperkenalkan ketidakseimbangan kekuatan yang signifikan, seringkali secara tidak proporsional memengaruhi usaha kecil dan menengah (UKM). Perusahaan besar semakin banyak menggunakan AI untuk pemilihan pemasok, penilaian risiko, penetapan harga dinamis, dan pemeriksaan kepatuhan kontrak otomatis. Algoritma dapat secara tidak sengaja (atau sistematis) merugikan UKM yang kekurangan infrastruktur digital, volume data, atau sumber daya untuk "terlihat baik" di mata sistem AI. Bias dalam data pelatihan (misalnya, menguntungkan pemasok besar dan mapan) dapat menghalangi UKM dari peluang. Algoritma penetapan harga dinamis atau jangka waktu pembayaran yang didorong AI dapat menekan margin UKM secara tidak adil.

Kurangnya transparansi dalam cara sistem AI ini membuat keputusan sangat merugikan UKM; penolakan oleh algoritma yang tidak transparan tidak menawarkan jalur yang jelas untuk banding atau perbaikan. Hal ini menciptakan "kesenjangan digital", di mana UKM berjuang untuk bersaing bukan pada kualitas produk atau layanan, tetapi pada kemampuan mereka untuk menyesuaikan diri dengan persyaratan data dan logika yang tidak transparan dari platform AI pelanggan mereka yang lebih besar. Sistem penilaian AI mungkin menurunkan peringkat pemasok kecil yang sebenarnya sangat baik karena kurangnya riwayat transaksi digital yang panjang dengan pembeli, atau sistem pemrosesan faktur otomatis mungkin menunda pembayaran kepada UKM karena perbedaan format kecil yang tidak dapat dijelaskan oleh penanda AI.

Dampak pada Komunitas Lokal

Keputusan AI dalam rantai pasokan memiliki konsekuensi yang mendalam, yang seringkali diabaikan, bagi komunitas tempat fasilitas berada dan operasi berlangsung. Penempatan gudang atau pusat logistik yang dioptimalkan AI, yang didorong oleh algoritma efisiensi, dapat memusatkan lalu lintas truk berat, kebisingan, dan polusi di lingkungan tertentu, yang seringkali kurang beruntung secara ekonomi, suatu bentuk ketidakadilan lingkungan. Otomatisasi skala besar di pabrik atau pusat distribusi lokal dapat menyebabkan hilangnya pekerjaan yang signifikan dalam suatu komunitas, berdampak pada ekonomi lokal, basis pajak, dan kohesi sosial, tanpa perencanaan yang memadai untuk diversifikasi ekonomi atau dukungan pekerja.

Sistem AI yang mengoptimalkan ekstraksi sumber daya atau proses manufaktur mungkin memprioritaskan penghematan biaya daripada dampak lingkungan lokal, yang memengaruhi kesehatan masyarakat dan ekosistem. Terdapat pula isu yang muncul yaitu "kolonialisme data", di mana sejumlah besar data tentang kondisi lokal, penggunaan infrastruktur, atau bahkan anggota komunitas (misalnya melalui drone pengiriman atau

pelacakan) dikumpulkan oleh perusahaan untuk sistem AI mereka tanpa persetujuan komunitas yang memadai, pembagian manfaat, atau kendali atas bagaimana data ini digunakan. AI yang mengoptimalkan logistik global mungkin mengarahkan lebih banyak kapal melalui komunitas pelabuhan tertentu untuk menghemat bahan bakar, yang secara dramatis meningkatkan polusi udara lokal tanpa komunitas tersebut memiliki masukan atau jalan keluar.

Kepercayaan dan Transparansi Konsumen

Di era konsumerisme sadar, peran AI dalam rantai pasokan secara langsung memengaruhi reputasi merek dan kepercayaan konsumen. Konsumen semakin menuntut transparansi mengenai asal produk, kondisi kerja, dan jejak lingkungan informasi yang sering dikumpulkan dan diverifikasi menggunakan AI. Namun, jika konsumen menganggap sistem AI tidak transparan, bias, atau digunakan untuk "pencucian etika" (membuat klaim keberlanjutan/sosial yang salah atau berlebihan), kepercayaan akan terkikis dengan cepat. Skor keberlanjutan atau sertifikasi etika yang dihasilkan AI kurang kredibel jika data dan algoritma yang mendasarinya tidak transparan dan dapat diaudit.

Penetapan harga algoritmik, khususnya penetapan harga lonjakan dinamis berdasarkan analisis AI waktu nyata terhadap permintaan dan inventaris, dapat terasa eksploitatif bagi konsumen, merusak loyalitas. Penggunaan AI di bidang-bidang seperti pemasaran personalisasi berdasarkan data rantai pasokan juga menimbulkan kekhawatiran privasi yang signifikan. Pada akhirnya, konsumen membutuhkan jaminan bahwa AI yang memungkinkan pengiriman lebih cepat atau harga lebih rendah tidak mengkompromikan praktik kerja yang etis, keberlanjutan lingkungan, atau perlakuan adil terhadap pemasok.

Sebagai contoh, AI yang menjanjikan "pengiriman netral karbon" harus dapat diverifikasi, dan konsumen mungkin tidak mempercayai klaim yang dihasilkan AI bahwa suatu produk "bersumber secara etis" jika mereka tahu bahwa AI memberikan skor yang tidak adil kepada petani kecil atau kurang transparan mengenai kondisi kerja di pabrik (misalnya, menggunakan visi komputer untuk kepatuhan keselamatan tetapi tidak mencatat data upah). Inisiatif Paspor Produk Digital Uni Eropa menyoroti dorongan menuju transparansi yang dapat diverifikasi dan didukung AI yang dituntut oleh konsumen dan regulator.

17.4 KERANGKA TATA KELOLA AI ETIS DALAM RANTAI PASOKAN

Tata kelola yang efektif membutuhkan kerangka kerja terstruktur untuk menerjemahkan prinsip-prinsip etika ke dalam praktik yang dapat ditindaklanjuti. Bagian ini mengeksplorasi empat pilar untuk membangun tata kelola AI yang kuat dalam rantai pasokan.

Prinsip-Prinsip Dasar

AI etis dalam rantai pasokan dimulai dengan prinsip-prinsip yang diterima secara universal yang disesuaikan dengan tantangan spesifik sektor. Prinsip-prinsip inti meliputi:

- Keadilan: memastikan sistem AI menghindari bias dalam pemilihan pemasok, alokasi tenaga kerja, penentuan rute logistik, atau peramalan permintaan (misalnya, mencegah diskriminasi terhadap UKM atau wilayah yang terpinggirkan).

- Akuntabilitas: mendefinisikan kepemilikan yang jelas untuk keputusan AI (misalnya, siapa yang bertanggung jawab jika rute yang direkomendasikan AI menyebabkan keterlambatan atau kecelakaan?).
- Transparansi: membuat proses yang digerakkan AI dapat dipahami oleh pemangku kepentingan (misalnya, menjelaskan mengapa pemasok ditandai sebagai "berisiko tinggi").
- Ketahanan dan keamanan: memastikan keandalan dalam ketidakpastian (misalnya, ketahanan terhadap gangguan data selama krisis geopolitik).
- Pengawasan manusia: mempertahankan kendali manusia atas keputusan-keputusan penting (misalnya, mengesampingkan pengurangan tenaga kerja yang disarankan AI).
- Privasi dan keamanan: melindungi data sensitif (misalnya, kontrak pemasok, biometrik karyawan).
- Perspektif rantai pasokan: prinsip-prinsip ini harus membahas operasi global multi-tingkat. Sebagai contoh, "keadilan" meluas melampaui batas-batas perusahaan hingga mencakup subkontraktor pemasok.

Lanskap Regulasi

Kepatuhan adalah hal yang mutlak. Regulasi utama meliputi:

- Undang-Undang AI Uni Eropa: mengklasifikasikan AI rantai pasokan (misalnya, kendaraan otonom, sistem biometrik) sebagai "risiko tinggi", yang memerlukan audit ketat, dokumentasi, dan pengawasan manusia.
- GDPR Uni Eropa: mengatur privasi data untuk kumpulan data pelatihan AI yang melibatkan informasi pekerja/pemasok.
- Perintah Eksekutif AS 14110: mewajibkan pengujian keamanan dan mitigasi bias untuk sistem AI yang berdampak.
- Strategi nasional: regulasi AI Tiongkok berfokus pada transparansi algoritma; rancangan undang-undang Brasil menekankan non-diskriminasi.
- Implikasi: ketidakpatuhan berisiko denda (hingga 7% dari pendapatan global berdasarkan Undang-Undang AI Uni Eropa), larangan operasional, dan kerusakan reputasi. Aliran data lintas batas menambah kompleksitas (misalnya, transfer dari Uni Eropa ke AS).

Standar Industri dan Praktik Terbaik

Selain peraturan, standar menyediakan cetak biru implementasi:

- ISO/IEC 42001 (Sistem Manajemen AI): kerangka kerja untuk menetapkan kebijakan tata kelola AI.
- NIST AI RMF (Kerangka Kerja Manajemen Risiko): memandu penilaian risiko untuk AI dalam pengadaan/logistik.
- Desain yang selaras secara etis IEEE: standar teknis untuk pengujian bias dalam algoritma.
- Konsorsium industri: pedoman GS1 untuk keterlacakan AI; kode etik *Responsible Business Alliance* (RBA).

Praktik terbaik meliputi a) melakukan audit algoritma pihak ketiga; b) mengadopsi kode etik pemasok yang mewajibkan penggunaan AI yang etis; c) bergabung dengan inisiatif seperti kemitraan tentang AI untuk alat bersama.

Siklus Hidup Desain dan Pengembangan AI yang Etis

Etika perlu ditanamkan di setiap fase penerapan AI, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 17.1.

Fase	Tindakan Etis	Contoh rantai pasokan
1. Penentuan ruang lingkup masalah	Menetapkan batasan etis; melibatkan beragam pemangku kepentingan.	Konsultasi dengan pemasok tentang ketentuan pembayaran berbasis AI.
2. Pengumpulan data	Mengaudit data untuk bias; memastikan persetujuan (GDPR/CCPA).	Bersihkan data lokasi pemasok untuk bias demografis.
3. Pelatihan model	Menerapkan batasan keadilan; mendokumentasikan asal usul data.	Sesuaikan bobot untuk menghindari hukuman bagi pemasok di daerah pedesaan.
4. Pengujian/validasi	Melakukan pemeriksaan bias/penyimpangan; mensimulasikan kasus ekstrem (misalnya sanksi).	Uji ketahanan AI permintaan selama gangguan perdagangan.
5. Penerapan	Menerapkan protokol pemantauan dan pengesampingan manusia.	Aktifkan manajer gudang untuk menghentikan robot yang rusak.
6. Pemantauan	Melacak KPI (bias, penyimpangan); memperbarui model secara iteratif.	Audit AI transportasi untuk rute yang tidak efisien dalam penggunaan bahan bakar.

Tabel 17.1. Deskripsi tindakan etis untuk berbagai fase

17.5 TATA KELOLA SOSIAL BERBASIS NILAI

Meskipun kepatuhan terhadap peraturan sangat penting, tata kelola sosial yang sejati membutuhkan strategi proaktif dan berbasis nilai yang menanamkan prinsip-prinsip etika ke dalam struktur rantai pasokan yang didukung AI. Bagian ini melampaui persyaratan hukum untuk mengeksplorasi bagaimana organisasi dapat mengoperasionalkan tanggung jawab, keadilan, dan inklusi sebagai keunggulan kompetitif dan keharusan sosial.

Pengawasan dan Kontrol Manusia (“Manusia Dalam Lingkaran/Perintah”)

Pengawasan manusia adalah landasan penerapan AI yang etis. “Manusia dalam lingkaran” (HITL) melibatkan manusia yang memvalidasi atau mengoreksi keputusan AI (misalnya, menyetujui pemilihan pemasok berisiko tinggi atau pengalihan rute logistik). “Manusia dalam perintah” (HIC) melangkah lebih jauh, memastikan manusia menetapkan tujuan, batasan, dan batas etis untuk sistem AI sebelum diterapkan. Dalam rantai pasokan, ini berarti:

- Gerbang keputusan kritis: memerlukan pemantauan manusia untuk keputusan yang berdampak pada hak-hak buruh (misalnya, alokasi shift), mata pencaharian pemasok (misalnya, pemutusan kontrak) atau kesejahteraan masyarakat (misalnya, perubahan lokasi gudang).
- Mekanisme pengesampingan: memberdayakan operator untuk menghentikan proses yang digerakkan oleh AI (misalnya, kendaraan otonom dalam kondisi tidak aman).
- Penilaian kontekstual: memanfaatkan keahlian manusia untuk menafsirkan rekomendasi AI di mana data tidak lengkap atau memiliki nuansa budaya (misalnya, menilai keandalan pemasok di pasar negara berkembang).

Keterlibatan Pemangku Kepentingan dan Kolaborasi

Tata kelola sosial menuntut keterlibatan pihak-pihak yang terdampak oleh sistem AI dalam desain dan tata kelolanya. Ini termasuk:

- Pekerja: karyawan lini depan memberikan wawasan tentang bagaimana alat AI (misalnya, algoritma pemantauan kinerja) memengaruhi pekerjaan sehari-hari, keselamatan, dan moral.
- Pemasok (terutama UKM): lokakarya kolaboratif memastikan platform pengadaan berbasis AI tidak mengecualikan vendor yang lebih kecil karena data yang bias atau kriteria yang tidak transparan.
- Komunitas dan LSM: melibatkan kelompok lokal di dekat pusat manufaktur atau pusat logistik untuk menilai dampak lingkungan/kesetaraan (misalnya, rute truk yang dioptimalkan AI meningkatkan polusi lokal).
- Kerangka kerja kolaborasi: sprint desain partisipatif atau dewan penasihat etika di mana pemangku kepentingan bersama-sama mengembangkan kebijakan penggunaan AI, memastikan solusi mengatasi kebutuhan nyata dan mengurangi dampak negatif yang tidak diinginkan.

Praktik Ketenagakerjaan yang Adil dan Transisi yang Adil

Otomasi berbasis AI (misalnya, gudang robot, penugasan staf prediktif) dapat menggantikan peran atau mengintensifkan pekerjaan. Tata kelola etis mewajibkan:

- Penilaian dampak: secara proaktif mengevaluasi pekerjaan mana yang ditingkatkan versus diotomatisasi, dan mengukur risiko penggantian.
- Program pelatihan ulang: bermitra dengan serikat pekerja/pendidik untuk mentransisikan pekerja ke peran pengawasan AI (misalnya, "koordinator robot") atau bidang pertumbuhan (misalnya, analisis data).
- Desain AI yang berpusat pada tenaga kerja: mengkonfigurasi AI untuk meningkatkan pekerjaan misalnya, menggunakan sensor ergonomis untuk mengurangi tingkat cedera, bukan hanya memaksimalkan produktivitas.
- Perlindungan upah dan jam kerja: memastikan alat penjadwalan algoritmik menghormati hukum ketenagakerjaan dan kesejahteraan pekerja (misalnya, mencegah shift "clopening").

Keberagaman, Kesenjangan, dan Inklusi (DEI) Dalam Tim AI dan Data

Bias dalam AI sering kali berasal dari tim pengembangan yang homogen dan data pelatihan yang tidak representatif. Mitigasi membutuhkan:

- Tim AI yang beragam: merekrut ilmuwan data, insinyur, dan ahli etika dari berbagai latar belakang gender, ras, budaya, dan sosial ekonomi untuk menantang asumsi dan menemukan titik buta.
- Praktik data inklusif: mengaudit kumpulan data untuk kesenjangan representasi (misalnya, data pemasok condong ke perusahaan besar; data pekerja yang tidak termasuk pekerja lepas) dan memperbaiki ketidakseimbangan.
- Pengujian yang berfokus pada kesetaraan: menguji model AI untuk dampak yang berbeda di seluruh demografi pekerja (misalnya, apakah algoritma kinerja merugikan penutur bahasa non-asli) atau segmen pemasok (misalnya, merugikan bisnis milik perempuan).
- Metrik DEI: melacak keragaman dalam tim AI dan insiden bias dalam keluaran AI sebagai KPI untuk pemantauan tata kelola.

17.6 MEKANISME OPERASIONAL TATA KELOLA AI ETIS

Bagian ini melampaui prinsip dan kerangka kerja untuk menguraikan struktur dan proses operasional konkret yang diperlukan untuk menerapkan dan mempertahankan tata kelola etis dan sosial AI dalam rantai pasokan. Ini menerjemahkan komitmen tingkat tinggi menjadi mekanisme yang dapat ditindaklanjuti yang memastikan akuntabilitas, pengawasan, dan perbaikan.

Dewan dan Komite Etika AI

Dewan (atau Komite) Etika AI merupakan landasan infrastruktur tata kelola formal. Ini adalah kelompok lintas fungsi yang berdedikasi dan bertugas memberikan pengawasan strategis, memantau aplikasi AI berisiko tinggi, dan menetapkan kebijakan organisasi untuk penggunaan AI yang etis dalam rantai pasokan. Komposisinya sangat penting: harus mencakup beragam perspektif seperti eksekutif rantai pasokan, ilmuwan AI/data, ahli hukum/kepatuhan, spesialis etika, perwakilan SDM/karyawan, manajemen risiko, dan berpotensi penasihat eksternal (ahli etika, perwakilan komunitas, atau advokat pemasok). Mandat Dewan mencakup peninjauan proyek AI yang diusulkan (terutama yang berdampak pada pekerja, pemasok, atau komunitas) untuk risiko etika sebelum penerapan, menyetujui kebijakan dan pedoman etika AI, memantau kinerja AI yang sedang berlangsung untuk konsekuensi etika yang tidak diinginkan, menyelidiki insiden dugaan kerugian atau bias, dan bertindak sebagai titik eskalasi utama untuk masalah etika. Wewenang harus didefinisikan dengan jelas dan didukung oleh manajemen puncak untuk memastikan rekomendasinya memiliki bobot dan mengarah pada tindakan, seperti menghentikan penerapan atau mewajibkan perubahan.

Audit AI dan Penilaian Dampak

Audit proaktif dan berkelanjutan sangat penting untuk memverifikasi kepatuhan terhadap prinsip-prinsip etika dan mengidentifikasi potensi kerugian. Audit AI melibatkan evaluasi sistematis dan independen terhadap sistem AI berdasarkan kriteria yang telah

ditentukan (keadilan, akurasi, ketahanan, privasi, transparansi). Ini termasuk audit teknis yang memeriksa alur data untuk bias, kinerja model di berbagai subkelompok, dan pengujian ketahanan. Penilaian dampak (seperti Penilaian Dampak Algoritma (AIA) atau Penilaian Dampak Etika (EIA)) adalah alat proaktif yang sangat penting. Dilakukan sebelum dan selama penerapan, penilaian ini secara sistematis mengevaluasi potensi dampak sistem AI terhadap masyarakat, ekonomi, lingkungan, dan hak asasi manusia di seluruh ekosistem rantai pasokan. Untuk AI yang memberi skor pemasok, AIA akan menilai risiko pengecualian yang tidak adil terhadap UKM atau bias terhadap pemasok dari wilayah tertentu. Untuk otomatisasi gudang, AIA akan menilai risiko perpindahan tenaga kerja. Audit dan penilaian menghasilkan laporan yang memberi informasi kepada Dewan Etika, mendorong mitigasi, dan berkontribusi pada pelaporan transparansi.

Alat Transparansi dan Penjelasan

Transparansi membangun kepercayaan dan merupakan hal mendasar bagi akuntabilitas. Hal ini melibatkan dua aspek utama:

- Transparansi sistem/proses: mengkomunikasikan secara jelas di mana dan bagaimana AI digunakan dalam rantai pasokan (misalnya, "AI digunakan untuk peramalan permintaan, penentuan rute robot gudang, dan penyaringan awal pemasok"), sumber data yang digunakan, tujuan sistem, dan keterbatasannya.
- Penjelasan (XAI): memberikan alasan yang dapat dipahami untuk keputusan spesifik yang didorong oleh AI, terutama yang berdampak signifikan pada pemangku kepentingan. Mengapa pemasok ditolak? Mengapa rute pengiriman tertentu dipilih, yang berdampak pada jadwal pengemudi? Mengapa pengiriman ditandai sebagai tertunda? Alat XAI (seperti LIME, SHAP, atau penjelasan kontrafaktual) membantu menghasilkan alasan-alasan ini. Tantangannya adalah menyesuaikan penjelasan dengan audiens: penjelasan teknis untuk auditor, alasan yang disederhanakan untuk pemasok, atau laporan tren agregat untuk konsumen yang peduli dengan klaim keberlanjutan. Penerapan alat-alat ini memastikan keputusan tidak dianggap sebagai "kotak hitam" yang sewenang-wenang dan memungkinkan para pemangku kepentingan untuk menantang atau memahami hasilnya.

Mekanisme Pelapor Pelanggaran dan Penyelesaian Pengaduan

Meskipun dengan langkah-langkah pencegahan yang kuat, kerugian atau praktik tidak etis dapat terjadi. Mekanisme yang aman, mudah diakses, dan efektif bagi para pemangku kepentingan (karyawan, pemasok, kontraktor, dan berpotensi masyarakat) untuk melaporkan kekhawatiran atau mencari penyelesaian sangat penting. Mekanisme pelapor pelanggaran menyediakan saluran rahasia dan seringkali anonim (saluran telepon, portal online yang aman, ombudsman yang ditunjuk) untuk melaporkan dugaan penggunaan AI yang tidak etis, bias, pelanggaran privasi, risiko keselamatan, atau pelanggaran kebijakan.

Perlindungan terhadap pembalasan adalah yang terpenting. Penyelesaian pengaduan mengacu pada proses formal untuk menangani pengaduan setelah diajukan. Ini melibatkan pengakuan penerimaan, melakukan investigasi yang adil dan tidak memihak (seringkali melibatkan Dewan Etika), mengkomunikasikan temuan, dan menerapkan solusi yang tepat

(misalnya, modifikasi sistem, kompensasi, perubahan kebijakan, tindakan disiplin). Mekanisme ini menunjukkan komitmen terhadap akuntabilitas, menyediakan jalan menuju keadilan bagi pihak yang terkena dampak, dan berfungsi sebagai umpan balik penting untuk meningkatkan sistem tata kelola secara keseluruhan.

17.7 METRIK, PELAPORAN, DAN PENINGKATAN TATA KELOLA AI

Melampaui prinsip dan kerangka kerja, bagian ini membahas implementasi praktis dan operasionalisasi tata kelola etika dan sosial untuk rantai pasokan yang didukung AI. Bagian ini berfokus pada cara mengukur kinerja, mengkomunikasikannya secara efektif, dan memastikan sistem tata kelola berkembang dan meningkat dari waktu ke waktu. Tanpa metrik konkret dan mekanisme umpan balik, tata kelola etika tetap menjadi aspirasi daripada tindakan nyata.

Mendefinisikan Indikator Kinerja Utama (KPI) untuk Kinerja Etis dan Sosial Sistem AI

Mendefinisikan indikator kinerja utama (KPI) untuk kinerja etis dan sosial sistem AI sangat penting untuk menerjemahkan prinsip-prinsip abstrak seperti keadilan, transparansi, dan akuntabilitas ke dalam ukuran yang terstruktur dan dapat dilacak. Proses ini melibatkan penyelarasan perilaku dan dampak sistem dengan tantangan etis, memungkinkan evaluasi objektif daripada penilaian subjektif. Misalnya, bias dan keadilan dapat diukur menggunakan rasio paritas demografis, perbedaan kesempatan yang sama, atau tingkat pengaduan terkait keputusan AI yang tidak adil, sementara transparansi dan kemampuan menjelaskan dapat dinilai dengan melacak penggunaan alat penjelasan, pemahaman pengguna melalui survei, atau kompleksitas model.

Akuntabilitas dapat diperkuat melalui struktur kepemilikan yang terdokumentasi, waktu penyelesaian insiden, dan kepatuhan terhadap protokol pengawasan. Demikian pula, kinerja privasi dan keamanan data dapat dilacak melalui kepatuhan terhadap prinsip-prinsip minimalisasi, insiden pelanggaran, dan penyelesaian DPIA khusus AI. Indikator dampak tenaga kerja dapat mencakup metrik tentang penambahan tenaga kerja versus otomatisasi, jam pelatihan ulang, tingkat mobilitas, dan sentimen karyawan. Dampak lingkungan dapat dikuantifikasi dengan menghitung jejak karbon dan memantau peningkatan efisiensi dalam operasi AI. Terakhir, kepercayaan pemangku kepentingan dapat diukur melalui kepuasan pemasok, kepercayaan pelanggan terhadap klaim yang didorong oleh AI, dan sentimen masyarakat terhadap implementasi, sehingga memastikan bahwa pertimbangan etis tidak hanya diakui tetapi juga diukur dan dikelola secara sistematis.

Mengintegrasikan Metrik AI Etis ke Dalam Kerangka Pelaporan ESG yang Lebih Luas

Untuk menghindari pelaporan yang terisolasi, KPI AI etis harus diintegrasikan dalam kerangka Lingkungan, Sosial, dan Tata Kelola (ESG) yang lebih luas, memperkuat bahwa tata kelola AI yang bertanggung jawab merupakan bagian integral dari keberlanjutan dan kredibilitas organisasi. Pemetaan KPI ini ke pilar ESG memastikan koherensi dan menjawab tuntutan investor dan pemangku kepentingan yang semakin meningkat untuk pengungkapan holistik. Di bawah pilar sosial, metrik seperti dampak tenaga kerja, keadilan dalam hubungan pemasok, kesejahteraan pekerja, privasi data, dampak masyarakat, dan uji tuntas hak asasi

manusia secara langsung berkontribusi pada tujuan keragaman, kesetaraan, dan inklusi (DEI), pengembangan karyawan, dan praktik ketenagakerjaan.

Pilar tata kelola mencakup KPI yang terkait dengan struktur akuntabilitas, dewan etika, manajemen risiko AI, frekuensi audit, kepatuhan terhadap peraturan, dan mekanisme transparansi, yang menyoroti pengawasan terhadap risiko teknologi baru. Meskipun kurang langsung, pilar lingkungan mencakup jejak karbon dan efisiensi energi dari operasi AI, menyelaraskan pertumbuhan teknologi dengan tanggung jawab lingkungan. Untuk memastikan keterbandingan dan kepatuhan, KPI terkait AI ini harus selaras dengan standar yang telah ditetapkan seperti GRI, SASB (sekarang bagian dari IFRS), TCFD, dan CSRD Uni Eropa, dengan pelaporan yang secara jelas menunjukkan bagaimana AI dikelola secara etis dan perannya dalam memajukan atau berpotensi menantang tujuan ESG.

Membangun Lingkaran Umpan Balik untuk Pemantauan dan Peningkatan Berkelanjutan Praktik Tata Kelola AI

Membangun lingkaran umpan balik untuk pemantauan dan peningkatan berkelanjutan memastikan bahwa tata kelola AI yang etis berkembang seiring perubahan teknologi, peraturan, dan risiko, mengubah tata kelola dari kerangka kerja statis menjadi sistem pembelajaran yang dinamis. Hal ini membutuhkan mekanisme formal untuk pengumpulan data berkelanjutan dari KPI, laporan insiden, audit, saluran umpan balik, mekanisme pengaduan, laporan pelapor, pemantauan Dewan Etika, dan log kinerja sistem AI. Informasi yang dikumpulkan kemudian harus dianalisis secara berkala oleh Dewan Etika AI, komite tata kelola, dan tim operasional biasanya setiap triwulan atau setengah tahun untuk mengidentifikasi tren, menyelidiki akar penyebab masalah seperti lonjakan bias, menyoroti keberhasilan, dan mendeteksi area di mana kontrol atau metrik tata kelola kurang memadai. Pembandingan dengan praktik terbaik industri dan standar yang muncul lebih lanjut mendukung penyempurnaan, memungkinkan organisasi untuk beradaptasi secara proaktif dan memastikan bahwa sistem AI tetap selaras dengan prinsip-prinsip etika dan harapan pemangku kepentingan.

17.8 MENAVIGASI DILEMA ETIS DAN TATA KELOLA AI DALAM RANTAI PASOKAN

Bagian ini menyajikan skenario dunia nyata yang dianonimkan atau hipotetis untuk menunjukkan bagaimana organisasi menghadapi tantangan etika saat menerapkan AI dalam rantai pasokan. Setiap kasus berfokus pada dilema tertentu, menganalisis ketegangan etika, dan menguraikan strategi tata kelola yang dapat ditindaklanjuti untuk menyelesaikannya.

Contoh Ilustratif (Hipotetis atau Dunia Nyata yang Dianonimkan) yang Mencakup

Peritel Global X menerapkan alat AI untuk mengotomatiskan penyaringan pemasok demi efisiensi dan pengurangan biaya, tetapi audit mengungkapkan bahwa sistem tersebut secara tidak proporsional mengecualikan UKM dari negara berkembang karena data pelatihan yang bias yang menguntungkan pemasok Barat besar dan mapan serta proksi seperti lamanya beroperasi atau riwayat kredit bank. Untuk mengatasi hal ini, perusahaan melatih ulang model dengan kumpulan data yang tidak bias dan algoritma yang sadar akan keadilan, memperkenalkan titik pemeriksaan manusia untuk aplikasi UKM, dan bermitra dengan LSM

untuk mengidentifikasi pemasok marginal yang berpotensi tinggi. Sebagai hasilnya, keragaman pemasok meningkat sebesar 40%, memperkuat ketahanan rantai pasokan dan menyelaraskan praktik pengadaan dengan tujuan ESG.

Mengurangi Bias Dalam Pemilihan Pemasok Berbasis AI

Perusahaan Logistik Y menerapkan sistem AI untuk mengoptimalkan rute pengiriman, sehingga menghasilkan biaya bahan bakar yang lebih rendah dan ketepatan waktu yang lebih baik, tetapi para pengemudi segera menyampaikan kekhawatiran tentang rute yang tidak aman melalui daerah dengan tingkat kejahatan tinggi dan tekanan waktu yang tidak realistis. Kurangnya transparansi dalam algoritma "kotak hitam" membuat para pekerja tidak dapat menantang atau memahami pertimbangan yang dibuat, seperti keselamatan versus kecepatan. Untuk mengatasi hal ini, perusahaan menerapkan teknik AI yang Dapat Dijelaskan (XAI) seperti nilai SHAP untuk memperjelas logika pembuatan rute, memperkenalkan antarmuka umpan balik pengemudi yang memungkinkan penyesuaian waktu nyata untuk keselamatan, dan menanamkan batasan etika dalam model untuk menghindari zona berisiko tinggi setelah gelap. Perubahan ini meningkatkan kepercayaan dan keselamatan, menghasilkan peningkatan kepuasan pengemudi sebesar 30% dan pengurangan angka kecelakaan, secara efektif menyeimbangkan efisiensi dengan kesejahteraan pekerja.

Implementasi AI yang Dapat Dijelaskan untuk Perutean Logistik yang Mempengaruhi Pekerja Pengiriman

Raksasa E-Commerce Z mengotomatiskan 60% peran pengambilan dan pengemasan gudangnya dengan robot bertenaga AI untuk memungkinkan operasi sepanjang waktu, tetapi hal ini menimbulkan kekhawatiran etis seputar pemecatan pekerja, kurangnya kesempatan pelatihan ulang, dan dampak yang tidak proporsional pada tenaga kerja berketerampilan rendah. Untuk mengatasi tantangan ini, perusahaan mengadopsi pendekatan "transisi yang adil" dengan meluncurkan program pelatihan ulang multi-tahun dalam kemitraan dengan perguruan tinggi teknik lokal, menawarkan jaminan penempatan kembali seperti mentransisikan pekerja yang dipecat ke peran pemeliharaan robot, dan secara bertahap meluncurkan otomatisasi untuk mengurangi gangguan. Akibatnya, 85% pekerja yang terdampak berhasil dipertahankan di posisi baru, membantu perusahaan mempertahankan kepercayaan masyarakat dan izin sosialnya untuk beroperasi.

Mengelola Transisi Tenaga Kerja Akibat Otomatisasi Gudang

Perusahaan Farmasi A memanfaatkan sensor IoT untuk melacak pengiriman yang sensitif terhadap suhu di seluruh dunia, tetapi pengumpulan data lokasi secara real-time menimbulkan risiko terungkapnya rute pengiriman yang sensitif, seperti pengiriman vaksin ke zona konflik, dan potensi pelanggaran GDPR/CCPA melalui pelacakan karyawan yang tidak disengaja. Untuk menyeimbangkan visibilitas operasional dengan privasi, perusahaan mengadopsi pembelajaran federasi untuk memproses data secara lokal di edge, mengurangi ketergantungan pada kumpulan data terpusat, menerapkan kontrol akses berbasis peran yang menganonimkan identitas pekerja untuk tim non-keamanan, dan memperkenalkan mekanisme persetujuan dinamis yang memungkinkan karyawan untuk menonaktifkan berbagi lokasi di luar jam kerja. Langkah-langkah ini memberikan visibilitas rantai pasokan ujung-ke-

ujung tanpa pelanggaran privasi, menetapkan tolok ukur untuk penerapan IoT yang etis di sektor farmasi.

17.9 PERAN PENTING TATA KELOLA AI ETIS & SOSIAL DALAM RANTAI PASOKAN

Meringkas Peran Penting Tata Kelola Etis dan Sosial

Penerapan AI dalam rantai pasokan global bukan hanya peningkatan teknologi, tetapi merupakan transformasi mendalam dengan konsekuensi etis dan sosial yang luas. Sepanjang bab ini, kita telah menetapkan bahwa tata kelola etis dan sosial bukanlah tambahan opsional, melainkan prasyarat mendasar untuk operasi berbasis AI yang berkelanjutan dan tangguh. Tantangan inti bias algoritmik yang menyebabkan praktik pengadaan atau ketenagakerjaan yang diskriminatif, sifat "kotak hitam" yang mengaburkan akuntabilitas, ancaman terhadap privasi data, potensi perpindahan tenaga kerja, dan biaya lingkungan dari komputasi AI menimbulkan risiko signifikan terhadap reputasi perusahaan, kepatuhan hukum, stabilitas operasional, dan izin sosial untuk beroperasi.

Tata kelola yang kuat bertindak sebagai perlindungan penting terhadap risiko-risiko ini. Hal ini memastikan bahwa keputusan berbasis AI selaras dengan nilai-nilai manusia, kerangka hukum, dan harapan masyarakat, sehingga membangun kepercayaan – kepercayaan di antara para pekerja yang pekerjaannya terdampak, pemasok yang bersaing di pasar berbasis AI, konsumen yang menuntut asal usul yang etis, dan komunitas yang terdampak oleh aktivitas rantai pasokan. Di dunia yang semakin berfokus pada kinerja ESG, tata kelola AI yang etis adalah kunci yang menghubungkan kemampuan teknologi dengan kelangsungan jangka panjang dan dampak sosial yang positif. Hal ini mengubah AI dari potensi sumber gangguan dan bahaya menjadi kekuatan untuk efisiensi dan kesetaraan.

Poin-Poin Penting Bagi Para Pemimpin: Mengintegrasikan Etika Sebagai Pilar Strategis Inti

Bagi para pemimpin rantai pasokan dan eksekutif tingkat C, keharusannya jelas: etika harus diintegrasikan sebagai pilar strategis inti, bukan hanya sekadar pertimbangan kepatuhan. Hal ini membutuhkan komitmen kepemimpinan yang proaktif dan terlihat. Poin-poin penting yang dapat ditindaklanjuti meliputi:

- Kepemilikan dari atas: tata kelola AI yang etis membutuhkan persetujuan dan akuntabilitas eksplisit di tingkat tertinggi (CEO, Dewan Direksi). Para pemimpin harus memperjuangkan prinsip-prinsip etika dan mengalokasikan sumber daya khusus (anggaran, personel).
- Menanamkan etika sejak tahap desain: pertimbangan etika harus diintegrasikan ke dalam seluruh siklus hidup AI – mulai dari definisi masalah awal dan pengumpulan data hingga pengembangan model, penerapan, dan pemantauan berkelanjutan. Hal ini membutuhkan kolaborasi lintas fungsi antara tim rantai pasokan, TI, hukum, SDM, dan etika/kepatuhan.
- Prioritaskan transparansi dan kemampuan menjelaskan: investasikan pada alat dan proses (AI yang Dapat Dijelaskan – XAI) yang membuat keputusan AI dapat dipahami oleh pemangku kepentingan terkait (misalnya, mengapa pemasok tidak dipilih, bagaimana rute pengiriman dioptimalkan). Kembangkan strategi komunikasi yang jelas.

- Tetapkan struktur tata kelola yang konkret: bentuk Dewan atau Komite Etika AI khusus dengan keahlian yang beragam (etika, hukum, teknologi, SCM, ilmu sosial) dan mandat yang jelas. Terapkan penilaian dampak pra-implementasi yang ketat dan protokol audit AI yang berkelanjutan.
- Berdayakan pengawasan manusia: tetapkan peran yang jelas untuk pengawasan "manusia dalam lingkaran" atau "manusia dalam komando", memastikan bahwa penilaian manusia yang bermakna diterapkan pada keputusan penting, terutama yang berdampak pada orang atau sumber daya yang signifikan.
- Libatkan pemangku kepentingan secara proaktif: secara aktif libatkan pekerja, pemasok (terutama UKM), komunitas, dan organisasi masyarakat sipil dalam diskusi tentang dampak implementasi AI dan kerangka kerja tata kelola. Dorong kolaborasi jika memungkinkan.
- Fokus pada transisi tenaga kerja: mengembangkan dan mendanai strategi komprehensif untuk pelatihan ulang dan peningkatan keterampilan pekerja yang kehilangan pekerjaan atau terdampak oleh otomatisasi AI, memastikan transisi yang adil.
- Mengukur dan melaporkan: menetapkan KPI spesifik untuk kinerja AI yang etis (misalnya, skor mitigasi bias, tingkat penyelesaian audit, kepuasan pemangku kepentingan) dan mengintegrasikan metrik ini ke dalam pelaporan ESG yang lebih luas.

Perjalanan yang Berkelanjutan

Mencapai rantai pasokan berbasis AI yang benar-benar bertanggung jawab dan dapat dipercaya bukanlah tujuan akhir, melainkan perjalanan adaptasi dan peningkatan yang berkelanjutan. Lanskap teknologi terus berubah, dengan kemampuan AI baru (seperti AI generatif) yang muncul dengan cepat, menghadirkan dilema etika baru. Kerangka peraturan berkembang secara global (misalnya, Undang-Undang AI Uni Eropa), menuntut kewaspadaan kepatuhan yang berkelanjutan. Harapan masyarakat tentang keadilan, privasi, dan tanggung jawab perusahaan terus meningkat. Oleh karena itu, kerangka tata kelola tidak dapat menjadi dokumen statis; kerangka tersebut harus menjadi sistem hidup yang mampu belajar dan berkembang. Organisasi harus menumbuhkan budaya refleksi etika yang berkelanjutan, mendorong dialog terbuka tentang dampak AI dan kejadian nyaris celaka. Investasi dalam pendidikan berkelanjutan bagi semua karyawan yang terlibat dalam pengembangan dan penerapan AI sangat penting. Kolaborasi lintas industri, akademisi, pembuat kebijakan, dan masyarakat sipil sangat penting untuk berbagi praktik terbaik, mengembangkan standar, dan mengatasi tantangan sistemik. Kewaspadaan, kemampuan beradaptasi, dan komitmen jangka panjang terhadap prinsip-prinsip etika adalah ciri khas organisasi yang akan berhasil menavigasi medan yang kompleks ini. Dengan merangkul perjalanan berkelanjutan ini, bisnis dapat memastikan rantai pasokan berbasis AI mereka tidak hanya efisien dan tangguh, tetapi juga adil, transparan, dan layak dipercaya oleh semua pemangku kepentingan, sehingga mengamankan kesuksesan berkelanjutan di dunia yang penuh gejolak di masa depan.

BAB 18

MODEL KONSEPTUAL REVOLUSI RANTAI PASOKAN DENGAN AI & ML

18.1 AI DAN ML DALAM TRANSFORMASI RANTAI PASOK GLOBAL

Rantai pasokan saat ini bergerak lebih cepat, melibatkan lebih banyak pemain, dan menghasilkan volume data yang jauh lebih besar daripada beberapa tahun yang lalu. Kecerdasan buatan (AI) dan pembelajaran mesin (ML) kini menjadi pusat upaya banyak perusahaan untuk membuat jaringan ini lebih gesit, tangguh, dan bahkan mampu belajar sendiri. Bab ini menyajikan kerangka kerja bertahap untuk menanamkan alat AI dan ML di setiap fungsi rantai pasokan, dengan tujuan khusus untuk meningkatkan visibilitas, mempertajam perkiraan, meningkatkan pilihan, dan memperkuat pertahanan risiko. Dengan mengacu pada pandangan berbasis sumber daya dan teori kemampuan dinamis, model ini memetakan sumber daya, rutinitas, dan peningkatan kinerja yang menyertai adopsi teknologi cerdas. Selain memajukan wacana ilmiah, bab ini berupaya mengarahkan para peneliti dan manajer ke arah pembelajaran praktis dengan mengajukan hipotesis yang dapat diuji dan menyarankan lokasi pembuktian konsep dalam rantai pasokan yang matang secara digital.

Volatilitas, kompleksitas, dan ketidakpastian menjadi ciri lingkungan rantai pasokan global saat ini, yang merupakan akibat dari dampak pandemi Covid-19, meningkatnya ketegangan geopolitik, dan perkembangan pesat teknologi digital. Model rantai pasokan tradisional, yang seringkali terlalu lambat, kaku, dan pada dasarnya buta terhadap proyeksi permintaan di pasar yang berubah dengan cepat, memiliki kekurangan mendasar yang telah terungkap oleh kekuatan-kekuatan ini. Aplikasi AI dan pembelajaran mesin memimpin transformasi digital saat ini dalam rantai pasokan dengan memproses kumpulan data yang sangat besar, mengungkap pola yang sebelumnya tersembunyi, dan memungkinkan pengambilan keputusan berbasis bukti secara real-time. Cakupan luas AI meliputi pemrosesan bahasa alami, robotika, visi komputer, dan berbagai teknik pembelajaran mesin, yang semuanya berupaya meniru fungsi kognitif manusia tertentu. Dalam kerangka kerja ini, ML berada sebagai cabang yang lebih sempit namun ampuh yang mengajarkan komputer untuk belajar dari pengalaman alih-alih hanya mengikuti aturan yang telah ditulis sebelumnya. Karena jaringan pasokan sering menghadapi pergeseran yang cepat dan tidak terduga, sifat adaptif ini membuat ML sangat berguna dalam domain tersebut.

Pemantauan ilmiah tentang manajemen rantai pasokan kontemporer sekarang menganggap ML dan AI sebagai teknologi dasar, bukan sekadar teknologi tambahan. Penerapan disiplinnya secara rutin mendukung peramalan permintaan, optimasi inventaris, otomatisasi gudang, penjadwalan transportasi, dan identifikasi serta mitigasi risiko sistemik. Dasbor AI terpadu memungkinkan petugas risiko untuk mendeteksi, menilai, dan menetralkan anomali jauh sebelum sinyal tertinggal tradisional, sehingga menjaga kesinambungan operasional dan memperluas nilai di luar peningkatan efisiensi yang sempit. Analisis terbaru menunjukkan bahwa sistem ini berfungsi sebagai platform strategis yang membangun nilai

berkelanjutan, mendorong inovasi, dan memperkuat ketahanan, bukan sekadar instrumen yang berdiri sendiri.

Publikasi saat ini biasanya berfokus pada penggunaan diskrit dalam industri atau tahapan rantai tertentu, sehingga akademisi dan praktisi tidak memiliki referensi bersama yang menghubungkan semua temuan melalui satu alur naratif. Yang dibutuhkan bidang ini sekarang adalah cetak biru terintegrasi yang secara jelas menggambarkan bagaimana fitur AI dan ML terlibat dengan setiap fungsi SCM dan menyelaraskan interaksi tersebut dengan tujuan strategis yang lebih besar, seperti ketangkasan operasional, ketahanan sistemik, dan kinerja perusahaan secara keseluruhan. Untuk mengisi kesenjangan yang nyata dalam literatur ini, karya ini memperkenalkan kerangka kerja konseptual tahap awal yang memetakan, secara logis, bagaimana alat AI dan ML dapat diintegrasikan ke dalam tugas-tugas rutin rantai pasokan. Dibangun berdasarkan penalaran berbasis sumber daya (RBV) dan didukung oleh prinsip-prinsip teori kemampuan dinamis (DCT), model ini mengidentifikasi sumber daya AI dan ML yang diskrit, melacak penerapannya melalui aktivitas SCM yang saling terkait, dan menghubungkan alur tersebut dengan hasil kinerja yang dapat diamati. Dengan menyajikan langkah-langkah ini secara terstruktur dan visual, kerangka kerja ini diharapkan dapat mengarahkan para cendekiawan di masa depan menuju pertanyaan-pertanyaan sistemik sekaligus menawarkan panduan yang mudah bagi para manajer untuk memposisikan AI dan ML sebagai pengungkit yang disengaja untuk peningkatan rantai pasokan.

18.2 AI DAN ML SEBAGAI PENGUAT KETAHANAN RANTAI PASOKAN

Organisasi telah memperkuat rantai pasokan mereka melalui AI dan ML, dimotivasi oleh pencarian wawasan data yang lebih tajam, operasi yang lebih ramping, dan jaringan yang mampu menyerap guncangan. Pemantauan sistematis oleh Younis dkk. memetakan kasus penggunaan utama, termasuk peramalan permintaan, optimasi inventaris, penilaian risiko pemasok, dan perutean logistik. Memperluas tema tersebut, Tirkolaee dkk. mengusulkan kerangka kerja lima pilar untuk manajemen rantai pasokan, mengelompokkan metode ML di bawah peramalan permintaan, perencanaan produksi, pengendalian inventaris, logistik, dan manajemen risiko.

Sistem peramalan permintaan yang menggabungkan rangkaian penjualan historis yang panjang dengan indikator mendekati waktu nyata secara rutin mengungguli tolak ukur ekonometrik klasik dalam pemeriksaan di luar sampel. Di lantai pabrik, AI mengurutkan jadwal produksi, mengalokasikan kembali sumber daya dengan cepat, dan mendukung node keputusan semi-otonom atau sepenuhnya otonom di sepanjang jalur. Dalam transportasi dan pergudangan, mesin ML mendukung optimasi rute adaptif, memungkinkan pelacakan aset secara langsung, dan mengarahkan lengan robot atau penumpuk otomatis untuk penanganan unit. Singh berpendapat bahwa alur kerja yang kaya data ini membuat rantai pasokan menjadi lebih ramping dan lebih reaktif, terus-menerus menyeimbangkan inventaris dan memperpendek waktu tunggu.

Manajemen risiko muncul sebagai medan uji berikutnya untuk disiplin ini. Dasbor analitik risiko yang dihosting di cloud dapat memutar ulang skenario gangguan, memetakan

kerentanan pemasok, dan merekomendasikan kontingensi taktis dalam hitungan menit. Karena platform tersebut juga menyerap umpan media sosial, rilis pendapatan, dan aliran tidak terstruktur lainnya, platform tersebut menerjemahkan sinyal kualitatif menjadi peringatan dini yang dapat segera ditindaklanjuti oleh manajer logistik. Karena jaringan pasokan global menghadapi guncangan yang lebih sering dan tidak terduga, banyak perusahaan beralih ke AI dan ML untuk memperkuat ketahanan dan mempercepat waktu respons. Belhadi et al. menyajikan bukti empiris yang menunjukkan bahwa, ketika lingkungan bisnis menjadi sangat fluktuatif, inovasi berbasis AI meningkatkan kinerja dan ketahanan rantai pasokan secara keseluruhan.

Studi mereka menunjukkan bahwa alat digital ini membantu organisasi untuk merasakan, memutuskan, dan beradaptasi lebih cepat terhadap berbagai gangguan, baik yang dipicu oleh ketegangan geopolitik maupun keadaan darurat kesehatan, seperti pandemi terbaru. Dalam pembelajaran terkait, Soori dkk. menunjukkan bahwa, ketika dikombinasikan dengan AI, robotika canggih mempercepat pemrosesan pesanan dan mempertajam pengiriman jarak terakhir, dua aktivitas inti yang mendukung rantai pasokan yang benar-benar lincah. Adopsi teknik AI dan ML tidak merata di berbagai industri. Sircar dkk. meneliti rantai pasokan minyak dan gas dan melaporkan bahwa model pemeliharaan prediktif mengurangi waktu henti peralatan, sementara perkiraan ML menyederhanakan keputusan inventaris. Di bidang pertanian, Liu menunjukkan bagaimana sensor yang terhubung dengan AI melacak hasil pertanian dari gerbang pertanian hingga rak supermarket dan bagaimana perkiraan hasil panen sekarang menggabungkan data cuaca waktu nyata.

Melanjutkan pembelajaran tersebut, Belhadi dkk. mengembangkan kerangka kerja model ensemble yang mengevaluasi risiko kredit untuk perusahaan pertanian kecil dan menengah, sehingga menghubungkan aktivitas pasokan dengan pilihan keuangan dan investasi. Onukwulu dkk. menyajikan model energi-logistik ujung-ke-ujung yang dipandu oleh perkiraan permintaan waktu nyata, dan Saurabh dan Dey menunjukkan bahwa menggabungkan AI dengan blockchain meningkatkan transparansi dalam jaringan agribisnis berkelanjutan. Bersama-sama, studi-studi ini menegaskan bahwa alat AI dan ML cukup fleksibel untuk memenuhi persyaratan yang berbeda dari banyak sektor yang berbeda.

Pembelajaran tentang AI dan ML dalam manajemen rantai pasokan berkembang pesat, tetapi beberapa kesenjangan mendasar masih ada. Pertama, banyak laporan yang diterbitkan sebagian besar terdiri dari studi kasus deskriptif atau prototipe eksperimental, tanpa kerangka kerja teoretis yang menyatukan yang mengaitkan teknik AI dan ML tertentu dengan tujuan strategis dan operasional. Investigasi masa depan yang ketat dapat menutup kesenjangan ini dengan mengembangkan model formal yang menghubungkan setiap alat dengan kemampuan dinamis dan hasil rantai pasokan yang terukur, yang diuji di berbagai konteks. Kedua, faktor-faktor seperti infrastruktur digital yang kuat, tata kelola data yang disiplin, dan dukungan eksekutif yang berkelanjutan jarang diteliti, padahal faktor-faktor ini sering menentukan apakah organisasi dapat berhasil menerapkan teknologi baru. Akibatnya, para akademisi belum menawarkan jalur yang jelas dan berbasis bukti yang dapat diikuti oleh para manajer untuk mempersiapkan perusahaan mereka menghadapi adopsi yang lebih besar dan

berkelanjutan. Ancaman keamanan yang muncul dari wawasan yang dihasilkan AI, seperti input yang merugikan dan pintu belakang laten, belum mendapat perhatian berkelanjutan dalam pembelajaran rantai pasokan, sehingga isu-isu sentral tentang kepercayaan dan kepatuhan regulasi belum ditangani secara memadai. Demikian pula, para ahli menyadari bahwa AI kini beroperasi bersamaan dengan IoT, blockchain, dan edge computing, tetapi bukti sistematis tentang bagaimana konvergensi teknologi ini mengubah kinerja rantai pasokan masih minim dan sangat dibutuhkan.

18.3 PENDEKATAN KONSEPTUAL AI & ML DALAM SCM

Bab ini mengambil pendekatan konseptual, sebuah pilihan yang terbukti berharga ketika para peneliti menghadapi bukti empiris yang tipis atau bergerak cepat dan masih perlu merangkai cerita teoretis yang koheren. AI dan saudaranya yang lebih sempit, ML, menyebar ke hampir setiap fungsi rantai pasokan dengan kecepatan luar biasa; dengan berfokus pada ide-ide besar terlebih dahulu, para penulis dapat mengumpulkan laporan-laporan yang tersebar ke dalam satu peta langkah demi langkah tentang kemungkinan masa depan.

Alih-alih meluncurkan survei atau eksperimen baru, mereka mengandalkan penalaran deduktif, pencampuran teori strategis, dan pembacaan cermat terhadap karya yang telah dipublikasikan untuk membuat sketsa model tentang bagaimana AI dan ML dapat membentuk kembali rantai pasokan di tingkat strategis. Dalam membangun model tersebut, para penulis secara sistematis menyaring literatur untuk konsep-konsep utama, teknologi-teknologi kunci, dan hasil bisnis yang terukur yang terkait dengan AI dan ML dalam SCM. Mereka melakukan pencarian di Scopus, Web of Science, dan ScienceDirect dengan frasa target AI, pembelajaran mesin, manajemen rantai pasokan, logistik, optimasi inventaris, dan peramalan permintaan, dan mempersempit hasilnya ke artikel yang diterbitkan antara tahun 2017 dan awal 2024.

Pemantauan ini secara strategis memilih jendela publikasi yang mencakup perangkat lunak mutakhir dan pola penggunaan terkini dalam disiplin ilmu tersebut. Selama fase pencarian akhir, tim membatasi perhatian pada artikel yang ditinjau sejawat dalam bahasa Inggris saja, dengan sengaja menghilangkan abstrak konferensi, editorial, dan makalah yang belum dipublikasikan sebagai pengaman untuk keabsahan metodologis. Oleh karena itu, studi yang menggambarkan inisiatif AI dan ML dengan kaitan eksplisit pada manajemen rantai pasokan dipertahankan. Hasilnya, investigasi analitik prediktif, mitigasi risiko, perutean pengiriman, otomatisasi gudang, dan pengadaan yang ditingkatkan dengan kecerdasan lolos penyaringan awal. Setelah menerapkan filter tematik tersebut bersamaan dengan ambang batas kualitas yang ketat, 30 catatan dari jurnal regional dan internasional yang terkemuka muncul untuk diteliti secara sistematis. Para peneliti kemudian melakukan pengkodean tematik induktif untuk memetakan konsep, alat, kompetensi, dan indikator kinerja yang berulang di berbagai industri dan yurisdiksi. Entri ilustratif pada matriks yang dihasilkan termasuk Baryannis dkk., Cioffi dkk., Younis dkk., dan Belhadi dkk., yang masing-masing menunjukkan bagaimana AI dan ML saling terkait dengan tugas-tugas rantai pasokan tertentu. Analisis selanjutnya didasarkan pada RBV dan DCT sebagai landasan teoritis utamanya.

18.4 MODEL KONSEPTUAL AI & ML UNTUK RANTAI PASOKAN CERDAS

Kompleksitas rantai pasokan kontemporer yang semakin meningkat mulai dari guncangan geopolitik dan ketidakpastian pasar hingga digitalisasi yang cepat membutuhkan sistem manajemen yang tidak hanya canggih tetapi juga terus adaptif dan cerdas. Berdasarkan pembelajaran yang ada dan berlandaskan pada RBV dan DCT, model berikut mengartikulasikan jalur strategis untuk menanamkan AI dan ML ke dalam manajemen rantai pasokan, dengan tujuan meningkatkan kinerja, ketahanan, dan kelincahan secara keseluruhan.

Landasan Teoretis

Teori pandangan berbasis sumber daya menyatakan bahwa keunggulan berkelanjutan suatu perusahaan muncul dari kemampuannya untuk memperoleh dan menggunakan sumber daya yang berharga, langka, tak tertandingi, dan tak tergantikan. Dalam ekonomi digital saat ini, platform AI dan ML terintegrasi mencapai ciri VRIN tersebut hanya jika dipadukan dengan fondasi data yang kokoh, personel yang berpengalaman, dan proses yang dibentuk untuk konteks tertentu. Teori kemampuan dinamis menambahkan bahwa perusahaan yang beroperasi di pasar yang berubah dengan cepat harus terus-menerus merasakan, merebut, dan mengkonfigurasi ulang campuran sumber daya mereka. AI dan ML mendukung tindakan ini dengan menyediakan instrumen penginderaan mendekati waktu nyata, seperti detektor anomali, algoritma perkiraan permintaan yang mengarahkan langkah-langkah perebutan, dan mesin perutean otomatis yang memperlancar jalan menuju konfigurasi ulang yang berkelanjutan.

Konstruksi kunci dalam model konseptual: model ini diorganisasikan dalam tiga lapisan yang berbeda namun saling terkait.

Kemampuan AI/ML (lapisan masukan)

- Analisis prediktif.
- Pembelajaran penguatan.
- Pemrosesan bahasa alami (NLP).
- Visi komputer.
- Pembelajaran mendalam dan jaringan saraf.

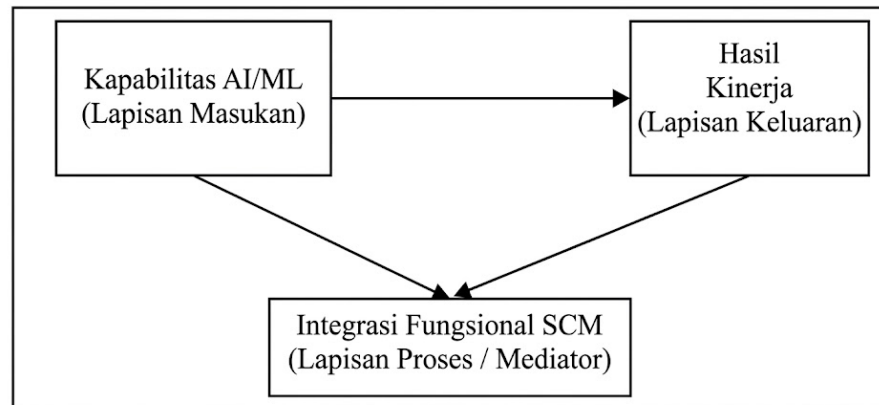
Integrasi fungsional SCM (lapisan proses/mediator)

- Peramalan permintaan: akurasi dan responsivitas menggunakan data waktu nyata.
- Manajemen persediaan: tingkat persediaan melalui model konsumsi prediktif.
- Pengadaan dan pemilihan pemasok: penilaian risiko menggunakan informasi historis dan waktu nyata.
- Logistik dan distribusi: optimasi rute, pelacakan pengiriman, dan otomatisasi gudang.
- Manajemen risiko dan gangguan: deteksi dini dan tindakan korektif melalui simulasi skenario.

Hasil kinerja (lapisan keluaran)

- Ketangkasan rantai pasokan: kecepatan reaksi terhadap perubahan pasar dan peristiwa tak terduga.
- Ketahanan rantai pasokan: kemampuan untuk pulih dan tetap stabil selama masa tekanan.

- Efisiensi operasional: optimalisasi biaya, waktu, dan sumber daya.
- Kinerja perusahaan: keunggulan kompetitif yang berkelanjutan dan peningkatan penciptaan nilai.



Gambar 18.1. Model konseptual

18.5 LIMA TEMA AI & ML DALAM SCM

Riset yang ekstensif menunjukkan bahwa alat AI dan ML secara bertahap menjadi elemen rutin manajemen rantai pasokan (SCM). Dipandu oleh RBV dan DCT, bab ini mengumpulkan studi empiris terbaru dan menyoroti lima topik yang saling terkait yang merangkum janji strategis dan praktik sehari-hari yang dibentuk ulang oleh teknologi ini. Topik pertama mendokumentasikan perusahaan yang menanamkan AI dan ML ke dalam tugas-tugas inti SCM seperti peramalan permintaan, penyesuaian persediaan, perutean logistik, penetapan harga pengadaan, dan penilaian risiko. Dengan demikian, organisasi beralih dari pilihan reaktif dan berdasarkan aturan praktis menuju operasi proaktif yang diinformasikan oleh data dan dipandu oleh bukti waktu nyata. Platform peramalan permintaan yang kini diperkaya dengan AI menggabungkan sinyal pasar streaming dengan data historis selama beberapa dekade, meningkatkan akurasi, mengurangi stok pengaman, dan mengurangi kekurangan stok dan kelebihan persediaan. Demikian pula, mesin pembelajaran mesin dalam logistik merevisi rute dan menjadwalkan armada secara terus-menerus, mempercepat pengiriman sekaligus mengurangi biaya transportasi. Pemantauan ini juga mengisolasi poin kedua yang terkait erat: para eksekutif senior semakin menganggap ketahanan dan kelincihan sebagai aset perusahaan utama dalam lingkungan yang diguncang oleh ketegangan geopolitik dan krisis kesehatan masyarakat.

Studi terbaru menunjukkan bahwa wawasan berbasis AI kini mendeteksi potensi gangguan lebih cepat, menyesuaikan rantai pasokan secara langsung, dan menawarkan rekomendasi waktu nyata pada saat-saat ketidakpastian puncak. Sejalan dengan itu, kelincihan organisasi mendapat manfaat dari analitik prediktif dan otomatisasi cerdas, memungkinkan perusahaan untuk mengubah arah mereka hampir seketika setiap kali sinyal pasar, atau permintaan pelanggan yang mendesak, berubah. Namun demikian, keuntungan ini tidak dapat muncul begitu saja secara kebetulan; Mewujudkan hal tersebut bergantung pada

arsitektur data yang koheren, sikap digital-pertama di seluruh organisasi, staf yang kompeten yang mampu mengubah strategi menjadi praktik, dan dukungan berkelanjutan dari para pemimpin senior.

Perusahaan yang membangun ekosistem data yang solid dan memetakan lintasan digital yang tepat secara konsisten mengungguli para pesaingnya, mengubah potensi AI dan ML menjadi peningkatan kinerja yang konkret dan keunggulan kompetitif yang berkelanjutan. Karena itu, konteks membentuk realisasi nilai dan harus menempati posisi sentral dalam kerangka kerja apa pun yang memandu penerapan teknologi. Kerangka kerja yang dikemukakan di sini mengklarifikasi jalur kausal di mana AI dan ML menghasilkan kinerja perusahaan yang unggul, mengidentifikasi peningkatan dalam fungsi manajemen rantai pasokan sebagai saluran mediasi utama; akibatnya, keuntungan muncul bukan dari rumus matematika sederhana tetapi dari waktu tunggu yang lebih pendek, tingkat layanan yang lebih tinggi, dan efisiensi biaya yang lebih baik.

Piramida yang diusulkan secara eksplisit menerjemahkan indikator digital ke dalam hasil taktis dan memberikan panduan bertahap bagi para akademisi yang bermaksud untuk memvalidasi konstruksi tersebut dalam praktik. Di luar pemantauan konseptual, studi kasus merinci penggunaan yang berbeda dan berbasis domain serta terobosan terbaru. Di bidang pertanian, misalnya, rutinitas pembelajaran mesin secara otomatis mengautentikasi asal produk, sementara di sektor energi, algoritma prognostik menjadwalkan perbaikan turbin sebelum kerusakan yang akan segera terjadi. Ilustrasi ini menunjukkan bahwa AI dan alat-alat terkaitnya dapat disesuaikan dengan keterbatasan dan prospek unik yang ada dalam rantai pasokan tertentu. Secara keseluruhan, temuan empiris memetakan jalur yang koheren untuk menanamkan sistem tersebut ke dalam operasi rantai pasokan sehari-hari. Dengan dasar tersebut, analisis yang disusun menempatkan AI dan ML sebagai katalis untuk peningkatan ketangkasan, daya tahan, dan kinerja dalam jaringan yang berorientasi pada ekonomi digital. Dengan mendasarkan pernyataan ini pada model teoretis yang mapan, kerangka kerja ini mulai mengisi kekosongan penting dalam debat akademis tentang evolusi sistem pasokan skala besar.

18.6 IMPLIKASI MANAJERIAL AI & ML

Aplikasi AI dan ML saat ini dalam manajemen rantai pasokan memberikan wawasan praktis bagi para eksekutif senior dan tim operasional lini depan. Kerangka kerja yang diuraikan dalam bab ini menunjukkan bahwa teknologi ini melakukan lebih dari sekadar menurunkan biaya personel atau melakukan tugas rutin lebih cepat: teknologi ini memaksa organisasi untuk mempertimbangkan kembali prioritas strategis, mendesain ulang alur kerja eksekusi, dan menciptakan keunggulan berkelanjutan di pasar yang bergerak cepat. Bagi para eksekutif rantai pasokan, bukti tersebut menegaskan bahwa teknologi digital harus diintegrasikan ke dalam strategi perusahaan yang lebih luas, bukan dikelola sebagai serangkaian perangkat atau proyek percontohan yang terpisah. Peluncuran AI dan ML dengan demikian menjadi tanggung jawab kepemimpinan, yang menuntut visi yang jelas, dukungan eksekutif yang berkelanjutan, dan budaya tempat kerja yang meningkatkan setiap keputusan dengan data akurat dan real-

time. Oleh karena itu, para manajer senior didesak untuk hanya mensponsori proyek AI dan ML yang memperkuat prioritas seperti ketangkasan operasional, layanan yang berfokus pada pelanggan, dan ketahanan organisasi.

Mempertahankan inisiatif semacam itu membutuhkan pendanaan yang disiplin untuk infrastruktur digital dasar dataset yang bersih dan aktif, platform yang aman dan terukur, serta jalur yang jelas untuk perluasannya, dan personel terampil yang mampu memanfaatkannya. Tim bekerja paling baik ketika ilmuwan data, perencana rantai pasokan, dan spesialis TI bekerja berdampingan; manajer harus memformalkan kolaborasi ini dalam kelompok lintas fungsi dan mengalokasikan anggaran, waktu, dan insentif untuk meningkatkan keterampilan staf yang ada dalam literasi data dan praktik manajemen perubahan.

Kerangka kerja penilaian kinerja harus terus berkembang; keberhasilan kontemporer tidak lagi hanya didefinisikan oleh biaya yang lebih rendah atau output yang lebih tinggi, tetapi oleh akurasi prediksi yang lebih tajam, peningkatan ketahanan terhadap gangguan, dan respons yang lebih cepat terhadap perubahan kondisi pasar. Mengingat tujuan yang lebih luas ini, indikator kinerja utama dan protokol eskalasi yang tertanam dalam setiap kerangka kerja harus dikalibrasi ulang secara sistematis untuk mencatat dan menganalisis dimensi kinerja yang baru. Sama pentingnya, keterlibatan pemangku kepentingan yang berkelanjutan, ditambah dengan praktik manajemen perubahan yang terstruktur, tetap penting untuk menerjemahkan kemampuan teknis yang ditingkatkan menjadi nilai bisnis yang berkelanjutan.

Ketika anggota tim, pemasok, mitra, dan pelanggan akhir kurang percaya pada sistem dan satu sama lain, momentum menuju otomatisasi dan pengambilan keputusan berbasis data biasanya akan terhambat. Untuk mengurangi risiko ini, para manajer didorong untuk melibatkan vendor bersama staf mereka sendiri dalam pelatihan berkelanjutan, komunikasi yang terbuka dan transparan, serta serangkaian proyek percontohan kecil bersama yang menunjukkan manfaat langsung dan secara bertahap membiasakan semua peserta dengan penggunaan AI.

18.7 AI & ML SEBAGAI PENGUNGKIT KETANGKASAN DAN KETAHANAN

Dipandu oleh pemantauan terstruktur dan dibingkai melalui pandangan berbasis sumber daya bersama dengan teori kemampuan dinamis, bab ini mengemukakan model baru yang menunjukkan bahwa teknologi ini dapat meningkatkan kelincahan, ketahanan, dan kinerja keseluruhan dalam jaringan pasokan yang terhubung secara digital. Bukti yang diambil dari literatur menunjukkan berbagai aplikasi yang meliputi peramalan permintaan, pengendalian persediaan, perencanaan transportasi, pengadaan, dan penilaian risiko, di mana AI dan ML memberikan keuntungan nyata dalam akurasi, kecepatan, dan daya tanggap. Di luar keuntungan operasional ini, alat-alat tersebut memperkuat kemampuan dinamis perusahaan dengan meningkatkan kapasitas mereka untuk merasakan pergeseran, memanfaatkan peluang baru, dan mengatur ulang proses secara langsung.

Namun, janji AI dan ML hanya akan terwujud ketika algoritma canggih berada di atas data yang bersih dan tepat waktu, ketika orang dan budaya siap beradaptasi, dan ketika para pemimpin mengarahkan upaya tersebut dengan visi digital yang jelas. Dengan cara ini, studi

ini menambahkan cetak biru yang koheren pada kajian rantai pasokan, memetakan bagaimana sumber daya AI dan ML terhubung dengan fungsi-fungsi spesifik dan, pada akhirnya, dengan kinerja organisasi yang unggul. Model ini tidak hanya memperjelas teori yang ada tetapi juga menawarkan platform yang koheren di mana para peneliti selanjutnya dapat membangun pengujian empiris yang diperlukan untuk mengkonfirmasi atau menyesuaikan hubungan yang diusulkan. Seiring rantai pasokan menjadi semakin fluktuatif, penyertaan AI dan ML secara sengaja bergeser dari kemungkinan yang berorientasi ke masa depan menjadi kebutuhan mendesak. Bagi para manajer, analis, dan akademisi, karya ini berfungsi sebagai peta panduan dan undangan mendesak: perlakukan AI dan ML bukan sebagai perangkat terpisah, tetapi sebagai elemen integral yang digerakkan oleh pembelajaran dari arsitektur rantai pasokan yang tangguh dan responsif.

18.8 ARAH PEMBELAJARAN AI & ML DALAM SCM

Bab ini mengembangkan model konseptual yang menghubungkan AI dan ML dengan hasil rantai pasokan strategis dan operasional, namun masih banyak jalur pembelajaran penting yang belum dieksplorasi. Seiring teknologi ini berkembang dengan kecepatan yang belum pernah terjadi sebelumnya dan rantai pasokan menjadi lebih digital dan terdesentralisasi, para akademisi dituntut untuk menguji, menyempurnakan, dan memperluas kerangka kerja yang disajikan di sini. Prioritas pertama adalah melakukan pengujian empiris sampel besar terhadap model di berbagai industri dan wilayah geografis. Meskipun versi saat ini menawarkan jalur umum di mana AI dan ML membentuk fungsi rantai pasokan, faktor-faktor spesifik sektor dalam manufaktur, pertanian, farmasi, atau e-commerce dapat memperkuat atau melemahkan hubungan tersebut. Survei, dikombinasikan dengan pemodelan persamaan struktural (SEM), sangat cocok untuk menguji kekuatan prediktif model dan untuk mengungkapkan bagaimana konteks mengubah strukturnya.

Jalan penting kedua adalah identifikasi pendorong dan penghambat organisasi terhadap adopsi AI dan ML dalam manajemen rantai pasokan. Para peneliti harus mengukur bagaimana kepemimpinan, infrastruktur data, keterampilan digital, dan budaya perusahaan memengaruhi keberhasilan teknologi ini. Studi kasus longitudinal kemudian akan menggambarkan transformasi langkah demi langkah perusahaan yang beralih dari sistem konvensional ke rantai pasokan yang ditingkatkan AI. Ketiga, investigasi diperlukan tentang bagaimana AI dan ML bergabung dengan teknologi baru lainnya, termasuk Internet of Things, blockchain, edge computing, dan jaringan seluler generasi kelima. Alat-alat ini semakin bekerja sama untuk menciptakan lingkungan operasi yang cerdas, sehingga pengaruh gabungan mereka terhadap proses manajemen rantai pasokan dan pengambilan keputusan layak untuk dipelajari secara mendalam. Banyak pertanyaan muncul: misalnya, bagaimana penggabungan AI-IoT memperdalam visibilitas waktu nyata untuk logistik rantai dingin? Selain itu, bagaimana buku besar bersama dan ML secara bersamaan meningkatkan kepercayaan pemasok dan ketertelusuran barang? Keempat, seiring meningkatnya pembicaraan tentang bias algoritma, penyalahgunaan, dan pelanggaran data, perhatian harus beralih ke risiko dan batasan yang terkait dengan AI dalam ekosistem rantai pasokan.

Para akademisi dapat merancang kerangka kerja praktis yang mendorong penggunaan model yang bertanggung jawab, menjunjung tinggi transparansi, dan memastikan keadilan dalam pilihan seperti pemilihan vendor, penjadwalan staf, atau penetapan kredit. Kelima, studi tentang kemitraan manusia-AI tetap mendesak. Banyak tulisan yang ada menggambarkan AI sebagai mesin pengambilan keputusan independen, tetapi rantai pasokan nyata adalah perpaduan sosial-teknis di mana manusia dan mesin berinteraksi. Pembelajaran baru harus memetakan cara untuk menyelaraskan penilaian manusia dan wawasan buatan, menyoroti kepercayaan, interpretasi, dan pelatihan yang ditargetkan sebagai penghubung penting.

Terakhir, para akademisi dapat membangun sistem penilaian kinerja yang jauh melampaui biaya dan kecepatan output. Peringkat berkelanjutan dapat mencakup ukuran pengalaman pelanggan, dampak ekologis, dan kesetaraan sosial. Evaluasi komprehensif AI dan ML dalam rantai pasokan berkelanjutan dapat mencakup metrik seperti akurasi prediksi, fleksibilitas terhadap kondisi baru, pengurangan karbon, dan pengalaman pelanggan secara keseluruhan.

BAB 19

FAKTOR KUNCI AI UNTUK TRANSFORMASI RANTAI PASOKAN

19.1 AI UNTUK EFISIENSI & TRANSPARANSI RANTAI PASOKAN

Bab ini mengkaji peran transformatif kecerdasan buatan (AI) dalam meningkatkan efisiensi dan transparansi dalam manajemen rantai pasokan (SCM). Dipengaruhi oleh tekanan Industri 4.0 dan munculnya Logistik 4.0, AI menawarkan potensi signifikan untuk mengoptimalkan berbagai aspek rantai pasokan, termasuk transportasi, peramalan permintaan, pengendalian persediaan, dan operasi pergudangan. Melalui riset yang komprehensif dan penerapan Teknik Penilaian Multi-Atribut Sederhana (SMART), bab ini mengidentifikasi faktor keberhasilan kritis untuk adopsi AI dalam SCM dan mengevaluasi efektivitas berbagai strategi berbasis AI. Analisis sensitivitas lebih lanjut mengkaji ketahanan strategi ini dalam berbagai kondisi. Temuan tersebut menyoroti dominasi pendekatan berbasis data dalam memaksimalkan manfaat AI dalam SCM, menekankan perlunya investasi teknologi strategis, pelatihan tenaga kerja, dan budaya organisasi yang mendukung. Pembelajaran ini memberikan wawasan berharga bagi para produsen yang ingin memanfaatkan AI untuk meningkatkan efisiensi, transparansi, dan daya saing dalam lanskap Industri 4.0 yang terus berkembang.

Lanskap bisnis yang berkembang pesat saat ini menuntut adopsi teknologi canggih untuk meningkatkan kinerja dan transparansi manajemen rantai pasokan (SCM). Salah satu fasilitator utama dalam evolusi ini adalah kecerdasan buatan (AI), yang telah menjadi bagian intrinsik dari transisi dari Logistik 4.0 ke serangkaian paradigma operasional baru di berbagai sektor, dan salah satu sektor tersebut adalah agribisnis. Penggunaan AI dalam SCM meluas melampaui metode optimasi tradisional dan seringkali memiliki potensi transformatif. Ini termasuk fasilitas pengambilan keputusan strategis seperti pemilihan pemasok berdasarkan efisiensi operasional, yang dipadukan dengan evaluasi keberlanjutan. Kemampuan ini juga menjadi lebih relevan dengan meningkatnya penerimaan pendekatan manajemen baru dengan label manajemen rantai pasokan hijau (GSCM), yang semakin populer karena kesadaran lingkungan yang lebih besar di seluruh dunia.

Aplikasi AI dalam SCM kompleks, dengan fungsi yang berkisar dari mengoptimalkan rute transportasi hingga meningkatkan akurasi perkiraan permintaan dan manajemen inventaris. AI mengotomatiskan proses yang rumit ini dan memungkinkan perusahaan untuk secara signifikan mengurangi biaya operasional, memperpendek jangka waktu pengiriman, dan meningkatkan kepuasan pelanggan. AI juga merupakan katalis penting dalam mendorong transparansi rantai pasokan. AI memimpin era baru SCM dengan memberikan pemangku kepentingan visibilitas pergerakan fisik dan digital barang dan jasa secara real-time, memungkinkan semua pihak yang terlibat di seluruh jaringan untuk mengakses informasi yang tepat waktu dan akurat yang dapat mereka andalkan untuk meningkatkan kemitraan kinerja dalam ekosistem operasional yang saling bergantung. Pembelajaran ini mengkaji berbagai penggunaan AI untuk rantai pasokan yang lebih efisien dan transparan. Bab ini juga menyelidiki

prospek penerapan AI dalam SCM dan beberapa hambatan yang menyertainya, serta memberikan perspektif tentang bagaimana organisasi dapat mengkonfigurasi teknologi ini untuk meningkatkan daya saing mereka dalam skenario industri saat ini.

Latar Belakang

Pergeseran menuju Industri 4.0 (dan segera juga Industri 5.0), dengan berbagai aspek rantai pasokan yang sedang didigitalisasi, telah menyediakan lahan subur bagi Logistik 4.0 untuk mengambil alih. Inti dari hal ini adalah AI yang berpusat pada bagaimana produk dan layanan dibuat, dikirim, dan dikonsumsi. AI adalah penggerak di balik Logistik 4.0, karena memiliki potensi untuk memproses kumpulan data yang besar, mengotomatiskan alur kerja yang rumit, dan memungkinkan proses pengambilan keputusan yang cerdas. AI penuh dengan kemungkinan dalam SCM, memungkinkan berbagai manfaat yang dapat mengarah pada efisiensi, transparansi, dan keberlanjutan.

Penggunaan utama AI dalam SCM:

- Prediksi permintaan tingkat lanjut: AI memberikan dimensi baru pada domain peramalan permintaan, di mana ia dapat muncul dengan memanfaatkan data penjualan historis, tren pasar, dan beberapa faktor lainnya. Hal ini memungkinkan mereka untuk menjaga tingkat persediaan tetap terkendali dan mencegah kekurangan stok sekaligus mengurangi pemborosan.
- Manajemen persediaan yang ditingkatkan: pelacakan persediaan secara real-time dan pengisian ulang otomatis memudahkan sistem yang didukung AI untuk mengontrol persediaan secara lebih efisien. Metode ini mengurangi biaya penyimpanan persediaan, mencegah kekurangan stok, dan meningkatkan tingkat pemenuhan pesanan.
- Otomatisasi gudang: otomatisasi AI memungkinkan robot untuk melakukan kebutuhan mereka dalam aktivitas gudang inti seperti pengambilan, pengemasan, dan pengiriman. Otomatisasi ini pada gilirannya menghasilkan peningkatan produktivitas, mengurangi biaya tenaga kerja, dan meminimalkan kemungkinan kesalahan operasional.
- Pelacakan dan pemantauan real-time: pelacakan kargo secara real-time melalui AI memberikan visibilitas berkelanjutan kepada pihak-pihak terkait sepanjang siklus hidup pesanan. Tingkat visibilitas ini membangun kepercayaan, menciptakan mitra yang lebih kuat, dan meningkatkan kesadaran rantai pasokan secara keseluruhan.
- Dengan menggunakan kemampuan ini secara bersamaan, AI tidak hanya meningkatkan efektivitas operasional tetapi juga mendukung tujuan strategis untuk membangun rantai pasokan yang ramah lingkungan dan transparan yang selaras dengan prinsip-prinsip Revolusi Industri Keempat.

Tujuan Studi

- Mengembangkan evaluasi teknologi dan aplikasi AI utama yang dapat meningkatkan efisiensi dan transparansi dalam rantai pasokan.
- Memastikan fungsi pemrograman/model bekerja sama erat dengan tim pengembangan teknologi.

- Membangun model pengambilan keputusan multi-kriteria (MCDM) untuk menilai strategi kombinasi cerdas dari perspektif rantai pasokan.
- Menerapkan model MCDM pada studi kasus kehidupan nyata dan dengan demikian menekankan pentingnya AI pada efisiensi dan transparansi rantai pasokan.

19.2 APLIKASI AI DALAM SCM, KEBERLANJUTAN, XAI, DAN KEMBARAN DIGITAL

Chen dkk. memantau berbagai teknik AI seperti pembelajaran mesin (ML), metaheuristik, dan pembelajaran penguatan (RL) untuk perutean, perencanaan armada, dan desain jaringan di bawah kendala karbon dan energi. Pembelajaran mereka meletakkan dasar untuk menjembatani teknik dengan masalah seperti varian VRP serta wawasan tentang perencanaan intermodal dengan hibrida optimasi AI. Para penulis menekankan Indikator Kinerja Utama (KPI) yang terukur, termasuk emisi bahan bakar dan CO₂, serta waktu tunggu, sambil juga menjelaskan bagaimana penetapan harga karbon berperan dalam tujuan model tersebut. Dua hambatan potensial untuk adopsi diidentifikasi sebagai fragmentasi data dan kemampuan menjelaskan, sementara agenda pembelajaran tentang operasi logistik yang lebih ramah lingkungan dan didukung AI disarankan.

Qu dan Kim memberikan pemantauan yang dipandu oleh *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) terhadap 170 artikel Scopus yang terkait dengan AI, Big Data, IoT, dan sistem pendukung keputusan terhadap hasil Manajemen Rantai Pasokan Berkelanjutan (SSCM). Mereka mengungkap sepuluh tema sesuai dengan sifat operasi dan penerapan berdasarkan pemodelan topik *Latent Dirichlet Allocation* (LDA) yang membuktikan dari pemilihan pemasok, optimasi transportasi hingga integrasi energi terbarukan. Meskipun dimensi lingkungan dan ekonomi tampaknya tercakup dengan baik, pemantauan mereka menunjukkan bahwa keberlanjutan sosial masih kurang dieksplorasi. Para penulis menyajikan kerangka kerja mekanis dari SSCM dinamis, menguraikan 20 proposisi pembelajaran spesifik dan menawarkan panduan praktis untuk menyelaraskan proyek AI dengan proses *Supply Chain Operations Reference* (SCOR) untuk secara efektif mencapai tujuan keberlanjutan.

Moosavi dkk. meneliti teknik XAI seperti SHAP, LIME, peta saliensi, dan penjelasan kontrafaktual dalam konteks luas pengendalian mutu, pemeliharaan prediktif, dan optimasi proses dalam manufaktur/CPS industri. Mereka memeriksa trade-off antara fidelitas dan interpretabilitas, diikuti dengan eksplorasi pertimbangan run-time dalam pengaturan rantai produksi. Untuk tujuan ini, para penulis menyarankan penggunaan kartu model dan mekanisme ketertelusuran di sektor yang diatur dan menyelaraskan prinsip-prinsip XAI dengan panduan tata kelola AI ISO/IEC. Mereka juga merekomendasikan beberapa pola desain, misalnya, integrasi kembaran digital dan dasbor XAI.

Pemantauan sistematis oleh Drissi Elbouzidi dkk, yang mensintesis 277 publikasi, mengidentifikasi 22 studi inti tentang Kembaran Digital Gudang (WDT) yang digerakkan oleh AI. Pembelajaran ini memetakan perkembangan kematangan WDT dari model digital ke bayangan digital dan akhirnya ke kembaran digital terintegrasi. Analisis tersebut menghubungkan teknik AI spesifik dengan fungsi operasional; misalnya, pembelajaran

penguatan mengoptimalkan kontrol aliran, sementara visi komputer memastikan keamanan dan kualitas. Para penulis menyimpulkan bahwa interoperabilitas dan kurangnya standar merupakan hambatan yang signifikan dan, sebagai tanggapan, mengembangkan skala kematangan untuk mengevaluasi implementasi WDT dalam intralogistik.

Bhattacharya dkk. menyelidiki paradigma *human-in-the-loop* (HIL) dalam intensifikasi produksi, menarik garis dari Industri 4.0 ke Industri 5.0 dan mempromosikan strategi campuran "Industri X.0" selama tahap transformasi. Studi ini memantau kasus-kasus sistem siber-fisik di mana operator manusia mengawasi dan mengendalikan AI untuk penjadwalan, visualisasi, dan keamanan siber. Para penulis juga menyoroti perlunya mengadopsi metrik dan standar untuk evaluasi kinerja HIL (*Human-Integrated Learning*) di lapangan, sekaligus menarik perhatian pada fakta bahwa, meskipun pabrik-pabrik sangat otomatis, intervensi manusia sangat penting untuk pemeriksaan keselamatan dan pengawasan etika. Akibatnya, mereka menemukan kekurangan terkait metode benchmarking dan penanganan bias dalam alur kerja interaksi manusia-mesin. Teixeira dkk. mengeksplorasi apa yang menyatukan kasus penggunaan AI di seluruh proses penambahan nilai SCM yang berurutan yang diidentifikasi dalam fase perencanaan, sumber, pembuatan, pengiriman, pengembalian, dan pengaktifan. Beberapa aplikasi yang ditampilkan dalam pemantauan tersebut termasuk ML untuk peramalan permintaan, pemrosesan bahasa alami untuk deteksi risiko, visi komputer untuk kontrol kualitas, dan RL untuk perutean dinamis.

Terakhir, jumlah penulis yang membandingkan kumpulan data dan metrik evaluasi antar studi sedikit lebih panjang, tetapi pertimbangan mendasar seputar tata kelola, kualitas data, manajemen pergeseran model, dan pedoman etika tampaknya disambut baik. Mereka menyarankan agenda pembelajaran yang berfokus pada interpretasi dan kerja sama manusia-AI dalam rantai pasokan. Pemantauan kritis oleh Douaioui dkk. mengeksplorasi teknik ML klasik hingga arsitektur pembelajaran mendalam (DL), seperti Jaringan Saraf Konvolusional (CNN), Jaringan Saraf Berulang (RNN), dan model peramalan Transformer untuk SCM. Kami menyelidiki perilaku mereka untuk berbagai horizon peramalan: bagaimana mereka dapat menangani musiman (jika ada), apakah variabel eksogen didukung, dan jenis validasi silang apa yang tersedia. Beberapa yang paling umum termasuk kebocoran data, penggunaan metrik kesalahan dengan cara yang merugikan, dan garis dasar yang lemah. Para penulis menyarankan kombinasi model hibrida dan peramalan probabilistik sebagai cara untuk mengatasi risiko pasokan dan berbagi pembelajaran untuk desain dan penerapan kumpulan data. Samuels menemukan sintesis terkini tentang penerapan AI dalam SCM dari Industri 4.0 hingga Industri 6.0, khususnya seputar peramalan, optimasi inventaris, dan ketahanan. Rekomendasi utama dari pemantauan tersebut adalah keberlanjutan dan keamanan siber. Dua isu terpenting yang dihadapi AI di masa depan akan diuntungkan oleh penekanan pada kerja sama manusia-AI dan pengembangan keterampilan. Studi ini mendokumentasikan upaya mitra rantai pasokan seputar AI, mengkarakterisasi tata kelola dan interoperabilitas sebagai hambatan abadi dalam menjembatani hambatan tersebut, dan menyoroti serangkaian bacaan yang direkomendasikan untuk pembuat kebijakan dan praktisi agar dapat memanfaatkan AI secara efektif.

Daios dkk. memberikan pemantauan dan analisis komprehensif tentang aplikasi AI dalam fungsi-fungsi utama rantai pasokan, termasuk manajemen hubungan pelanggan, pengadaan, manajemen inventaris, peramalan pengiriman, dan manajemen risiko. Studi ini menyajikan matriks kesesuaian algoritma-tugas dan mencakup pembelajaran dalam jaringan pasokan dengan jaringan saraf graf, perutean dengan RL, dan analisis berita gangguan oleh NLP. Para penulis kemudian membahas praktik umum MLOps seperti pemantauan pergeseran, pelatihan ulang jadwal, dan silsilah data, bersama dengan kebutuhan akan pertimbangan etika dan penjelasan untuk menciptakan kepercayaan mitra. Studi ini menyediakan sumber penting bagi perusahaan yang menetapkan jalur menuju adopsi AI dalam rantai pasokan. Xu dkk. menawarkan pandangan baru tentang otomatisasi rantai pasokan multi-agen karena teknologi untuk manufaktur terintegrasi yang digerakkan oleh konsumen kini lebih matang, berkat kemampuan dalam IoT, buku besar terdistribusi, dan ML. Para penulis menyarankan bahwa hal ini memungkinkan agen cerdas untuk melampaui otomatisasi dasar dan mencapai otonomi penuh dalam persepsi, perencanaan, dan tindakan.

Secara khusus, kerangka kerja baru dipertimbangkan untuk rantai pasokan menggunakan strategi modern dengan menggunakan teknologi agen dan isu-isu pembelajaran dijelaskan, seperti masalah interoperabilitas sambil berbagi struktur tanggung jawab hukum di antara berbagai pihak yang berkontribusi pada kontrak. Pembelajaran ini menetapkan hubungan antara sistem berbasis agen dan struktur siber-fisik transparansi dan keterlacakan terkini yang sesuai untuk lanskap Logistik 4.0. Tran memberikan gambaran umum tentang peran AI sebagai "otak" manufaktur cerdas dan mencakup topik-topik yang muncul termasuk pemeliharaan prediktif, RL dalam penjadwalan, pemantauan yang dapat dijelaskan, dan kembaran digital. Seperti dalam literatur saat ini, perspektif ini berfungsi sebagai pengantar untuk edisi khusus dalam "sensor", yang menyatukan 19 kontribusi tentang topik-topik terkait ini (disebutkan di bawah) dan menetapkan arah pembelajaran masa depan. Ini memberikan titik masuk tingkat atas untuk penggerak dan bereaksi terhadap pembacaan terarah tentang aplikasi AI dalam manufaktur.

19.3 PENDEKATAN SMART UNTUK TRANSFORMASI MANUFAKTUR CERDAS

Teknik Penilaian Multi-Atribut Sederhana (SMART) adalah alat pendukung keputusan berupa metodologi terstruktur yang digunakan untuk mengevaluasi dan memberi peringkat berbagai pilihan dalam inisiatif transformasi manufaktur cerdas. Proses ini dimulai dengan menetapkan daftar kriteria yang bergantung pada konteks (misalnya, kesiapan teknologi, rasio manfaat bersih, risiko gangguan operasional bisnis, dan keselarasan dengan tujuan perusahaan).

Alternatif kemudian dinilai berdasarkan kriteria ini, sementara setiap kriteria diberi bobot berdasarkan kepentingan relatifnya. Evaluasi berbobot ini dijumlahkan menjadi sebuah angka, yang memungkinkan pengambil keputusan untuk mengetahui strategi terbaik untuk perjalanan transformasi mereka. Oleh karena itu, metodologi ini memungkinkan proses penilaian yang kuat, transparan, dan berkelanjutan yang menghasilkan pengambilan keputusan yang diinformasikan oleh industri manufaktur yang kompetitif dan cepat berubah.

Kerangka Kerja Metodologi

- Langkah 1: Pembobotan faktor keberhasilan kritis (CSF).

Sebanyak 19 faktor keberhasilan kritis (CSF) diekstrak, dan kemudian 19 bobot diberikan untuk menunjukkan tingkat signifikansi dari CSF tersebut.

- Langkah 2: Normalisasi bobot.

Kemudian, bobot yang diberikan untuk setiap kriteria dinormalisasi sehingga jumlahnya menjadi 1,0.

- Langkah 3: Pilihan antara berbasis data dan berbasis fase.

Efektivitas kedua strategi (berbasis data, berbasis fase) dinilai dalam kaitannya dengan lima CSF menggunakan skala kinerja 1–3 (1 = buruk, 3 = sangat baik).

- Langkah 4: Hitung skor berbobot.

Skor berbobot ini dihitung dengan mengalikan skor penilaian CSF dengan bobot yang dinormalisasi. Kami menyajikan hasil ini dalam dua grafik batang, yang menunjukkan perbedaan kinerja di seluruh strategi.

- Langkah 5: Perbandingan skor akhir.

Semua CSF memiliki skor agregat, yang kemudian dibandingkan, dan cara berbasis data memiliki skor keseluruhan yang lebih tinggi dalam perbandingan tersebut. Dengan demikian, ini adalah strategi yang lebih baik di sini.

- Langkah 6: Analisis sensitivitas.

Melalui analisis sensitivitas, faktor keberhasilan kritis (CSF) yang paling berdampak diisolasi, dan pengetahuan yang lebih bijaksana disoroti untuk mendorong mitigasi risiko dan penjadwalan tindakan strategis.

Melalui evaluasi berbasis SMART yang sistematis ini, kita dapat mengidentifikasi jalur berbasis data sebagai strategi optimal menuju transisi manufaktur cerdas yang mengutamakan efisiensi dan adaptabilitas dengan risiko minimal.

Faktor keberhasilan kritis (CSF)	Pedoman berat badan	Berat yang dinormalisasi
Dukungan manajemen puncak	5	0,0793651
Rantai pasokan yang tangguh (SC)	5	0,0793651
Pabrik daur ulang	5	0,0793651
Metaheuristik	5	0,0793651
Riset Operasi (OR)	—	0.047619
Konsumsi Gas	3	0.047619
Jejak Karbon	3	0.047619
Kriteria Pemasok Ramah Lingkungan	3	0.047619
Simulasi Berbasis Data	3	0.047619
Algoritma Genetika Pengurutan Non-Dominasi	5	0.0793651
Perilaku yang Dapat Diprediksi	5	0.0793651
Manajemen Rantai Pasokan Digital	3	0.047619

Tabel 19.1. Memberikan bobot pada faktor keberhasilan kritis (CSF)

Pedoman bobot yang diidentifikasi untuk CSF pada teknologi dan praktik manufaktur cerdas disajikan pada Tabel 20.1 beserta bobot yang dinormalisasi.

- CSF: elemen kunci atau faktor strategis yang sangat penting untuk penerimaan, adopsi, dan efektivitas inisiatif manufaktur cerdas.
- Rekomendasi bobot: ini mewakili bobot awal setiap CSF. Oleh karena itu, nilai yang lebih tinggi menunjukkan pentingnya tujuan transformasi.
- Bobot yang dinormalisasi: setelah bobot awal diberikan, bobot tersebut kemudian dinormalisasi sehingga jumlah total semua bobot rata-rata menjadi 1,0. Standardisasi ini mempertahankan kepentingan relatif setiap CSF sekaligus memastikan perbandingan yang setara dalam hal evaluasi.

Dukungan manajemen puncak, rantai pasokan yang tangguh, pabrik daur ulang, metaheuristik, riset operasi (OR), konsumsi gas, jejak karbon, kriteria pemasok hijau, simulasi berbasis data, algoritma genetik pengurutan non-dominasi (NDSGA), perilaku yang dapat diprediksi, dan SCM digital disebut sebagai CSF kunci untuk studi ini.

Dukungan manajemen puncak memiliki bobot normalisasi tertinggi dalam kelompok ini, yaitu 0,0793651, yang menunjukkan pentingnya strategisnya, diikuti oleh rantai pasokan yang tangguh dan pabrik daur ulang dengan skor penyeimbang yang mempertahankan posisi strategisnya. Sebaliknya, CSF (konsumsi gas, jejak karbon, kriteria pemasok hijau, simulasi berbasis data, OR, dan konteks rantai pasokan digital) dianggap memiliki bobot normalisasi 0,047619 karena kepentingannya relatifnya. Bobot normalisasi ini menjamin bahwa dampak setiap faktor terwakili dalam evaluasi keseluruhan sampai batas tertentu dan dapat dianalisis lebih lanjut sesuai dengan metodologi SMART.

Analisis Sensitivitas

- CSF: area fokus utama, atau ukuran pencapaian, harus cukup terwujud untuk memungkinkan penerapan inovatif teknologi dan praktik SM.
- Pedoman bobot: ini adalah pentingnya awal setiap CSF. Jadi, semakin tinggi nilainya, semakin penting untuk keberhasilan transformasi cerdas dari perspektif manufaktur.
- Bobot yang dinormalisasi: bobot setelah penyesuaian dalam pembobotan di mana bobot diberikan kepada setiap item interpretasi, sehingga jumlah semua bobot sama dengan 1,0. Metode ini menjaga bobot masing-masing CSF tetap konstan satu sama lain dan, dengan demikian, memungkinkan perbandingan langsung antara semua faktor.

Faktor keberhasilan kritis (CSF)	Skor Data-driven (0.1)	Skor Data-driven (0.2)	Skor Data-driven (0.3)	Skor Phased (0.1)	Skor Phased (0.2)	Skor Phased (0.3)
Dukungan manajemen puncak	64.625	64.250	63.875	40.250	40.500	40.750
Rantai pasok (SC) yang tangguh	65.250	65.500	65.750	40.250	40.500	40.750
Pabrik daur ulang	65.250	65.500	65.750	39.625	39.250	38.875
Metaheuristik	65.250	65.500	65.750	40.250	40.500	40.750

Perilaku yang dapat diprediksi*	64.625	64.250	63.875	39.625	39.250	38.875
---------------------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Tabel 19.2. Analisis sensitivitas faktor keberhasilan kritis (CSF) teratas

Hasil analisis sensitivitas disebarluaskan melalui grafik garis, menunjukkan bagaimana skor keseluruhan hanya berubah dari pendekatan berbasis data dan bertahap ketika kita meningkatkan (sebesar 10%, 20% atau 30%) bobot masing-masing dari lima CSF teratas dibandingkan dengan sektor lain.

Pengamatan Utama

Dalam setiap skenario ini, kami meningkatkan bobot masing-masing CSF sebesar 10%, 20%, dan 30%. Ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis data lebih menguntungkan bukan hanya karena alokasi bobot awalnya. Skor keseluruhan dari hasil tersebut lebih sensitif terhadap peningkatan bobot IoT dan fusi data untuk kedua pendekatan. Namun, dampaknya lebih bermanfaat ketika berbasis data (dibandingkan dengan pendekatan bertahap). Pencetakan 3D memiliki sensitivitas terendah, yang berarti bahwa ia memainkan peran yang berbeda dalam manufaktur cerdas, peran yang tidak membedakan kinerja strategi relatif satu sama lain untuk CSF utama lainnya.

19.4 HASIL SMART: STRATEGI BERBASIS DATA LEBIH UNGGUL

Analisis SMART pada skor keseluruhan menunjukkan pendekatan berbasis data sebagai pilihan terbaik untuk transformasi manufaktur cerdas, dibandingkan dengan pendekatan bertahap. Seperti yang dapat kita lihat baik pada skor tertimbang (150 vs. 102) maupun skor yang dinormalisasi (2.38 vs. 1.62), pendekatan berbasis data akan lebih efektif sesuai dengan CSF yang telah diidentifikasi.

Faktor keberhasilan kritis (CSF)	Pedoman berat badan	Berat yang dinormalisasi
Dukungan manajemen puncak	5	0,0793651
Rantai pasokan yang tangguh (SC)	5	0,0793651
Pabrik daur ulang	5	0,0793651
Metaheuristik	5	0,0793651

Tabel 19.3. Lima Faktor Keberhasilan Kritis (CSF) Teratas

Fokus pada data, komunikasi, dan penggunaan teknologi canggih dalam mempromosikan manufaktur cerdas sudah tercermin melalui CSF teratas ini. Fleksibilitas strategis dan transformasi model bisnis menunjukkan bahwa dukungan manajemen puncak dan ketahanan bisnis/keberlanjutan rantai pasokan sangat penting untuk mempertahankan perubahan besar. Penyebutan pabrik daur ulang mencerminkan peningkatan prioritas manufaktur berkelanjutan, dan metaheuristik, sebagai algoritma optimasi canggih, lebih lanjut menguraikan peningkatan efisiensi pengambilan keputusan. Bersama-sama, ini menggambarkan akselerator baru keberhasilan transisi manufaktur: inovasi teknologi yang terintegrasi dengan prioritas strategis dan berkelanjutan.

Implikasi Studi

Beberapa pelajaran untuk keputusan manufaktur cerdas di masa depan muncul dari hasil analisis SMART; yang paling penting, pendekatan berbasis data terbukti dominan. Diagnostik komprehensif ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi faktor keberhasilan kritis (CSF) utama yang akan membantu produsen merancang kerangka kerja strategis untuk mengatur inisiatif mereka, memastikan prioritas dan alokasi sumber daya yang efektif untuk mendapatkan manfaat maksimal dari transformasi. Berikut adalah poin-poin pentingnya:

- Investasi teknologi strategis: proses pendekatan berbasis data ini hanya mungkin dilakukan jika kita memiliki kemampuan teknis yang baik, yang memungkinkan organisasi untuk memanfaatkan pengumpulan, penyimpanan, analisis, dan penerapan wawasan yang dihasilkan oleh penerapan data. Ini termasuk investasi dalam sensor, perangkat keras IoT, penyimpanan data, dan analitik canggih. Dukungan manajemen puncak dan rantai pasokan yang tangguh tetap menjadi CSF utama, sehingga pendekatan yang menyelaraskan teknologi baru/peningkatan teknologi dengan hal-hal tersebut akan membantu memaksimalkan efektivitas strategi berbasis data.
- Pelatihan tenaga kerja dan proses literasi data: proses berbasis data hanya akan berkelanjutan jika ada tenaga kerja yang memiliki kompetensi dalam literasi data, analisis, dan interpretasi. Produsen perlu berinvestasi dalam program peningkatan keterampilan khusus yang memberikan kompetensi yang dibutuhkan karyawan untuk mengubah wawasan data menjadi keputusan. Hal ini membantu dalam peningkatan operasional, yang merupakan kunci untuk mempertahankan keunggulan kompetitif.
- Memupuk budaya organisasi berbasis data: adopsi pendekatan berbasis data ini membutuhkan pergeseran budaya dalam organisasi. Mereka harus memfasilitasi suasana di mana data dipromosikan, didistribusikan, dan dimanfaatkan untuk pengambilan keputusan di seluruh lapisan operasional. Ini termasuk mendorong inovasi dan eksperimen serta menegakkan data yang bersih, serta memfasilitasi peningkatan kerja sama tim antara rekan-rekan pemasaran dan teknologi.

Dengan berfokus pada CSF tertinggi, seperti dukungan manajemen puncak dan penyediaan AI yang dapat dijelaskan untuk transparansi, produsen akan lebih mampu menetapkan jalur yang jelas untuk perjalanan transformasi manufaktur cerdas mereka. Mengatasi area prioritas ini tidak hanya akan membantu memberikan pengembalian investasi yang lebih baik tetapi juga mempercepat proses transformasi digital sejalan dengan rencana Industri 4.0.

Menyelaraskan strategi dengan Faktor Keberhasilan Kritis (CSF) ini dapat menghasilkan banyak manfaat bagi produsen:

- *Peningkatan efisiensi*: wawasan berbasis data dapat mengidentifikasi hambatan, mengoptimalkan proses, dan mengurangi pemborosan, yang mengarah pada peningkatan efisiensi yang signifikan.
- *Peningkatan produktivitas*: dengan memanfaatkan data untuk memantau dan mengontrol produksi secara real-time, produsen dapat meningkatkan produktivitas dan hasil produksi.

- *Peningkatan inovasi*: pendekatan berbasis data dapat mengungkap peluang baru untuk inovasi produk dan proses, memungkinkan produsen untuk tetap unggul dalam persaingan.
- *Daya saing yang lebih besar*: dengan mengadopsi teknologi dan praktik manufaktur cerdas, produsen dapat meningkatkan efektivitas biaya, kualitas, dan responsivitas terhadap permintaan pelanggan, sehingga memperkuat posisi kompetitif mereka di pasar.

Wawasan dari analisis ini dapat digunakan untuk mengembangkan peta jalan komprehensif untuk transformasi manufaktur cerdas. Peta jalan ini harus menguraikan langkah-langkah berikut:

1. *Menilai kondisi saat ini*: mengevaluasi infrastruktur data, kemampuan teknologi, dan keterampilan tenaga kerja yang ada di organisasi untuk mengidentifikasi kesenjangan dan area untuk perbaikan.
2. *Menentukan tujuan*: mengartikulasikan dengan jelas tujuan dan sasaran transformasi manufaktur cerdas, seperti meningkatkan efisiensi, mengurangi biaya, atau meningkatkan inovasi.
3. *Mengembangkan strategi*: merumuskan strategi berbasis data yang menguraikan teknologi, proses, dan perubahan budaya spesifik yang diperlukan untuk mencapai tujuan yang telah ditentukan.
4. *Menerapkan dan memantau*: menjalankan strategi secara bertahap, dimulai dengan proyek percontohan dan secara bertahap meningkatkan skalanya. Terus memantau kemajuan dan menyesuaikan pendekatan sesuai kebutuhan, berdasarkan wawasan berbasis data.
5. *Mempertahankan dan mengembangkan*: membangun mekanisme untuk pengumpulan, analisis, dan pemanfaatan data yang berkelanjutan untuk memastikan bahwa transformasi manufaktur cerdas dipertahankan dan terus ditingkatkan dari waktu ke waktu.

Menghubungkan strategi manufaktur cerdas dengan CSF yang telah ditentukan memiliki potensi keuntungan besar dalam meningkatkan efisiensi operasional dan daya saing. Namun, dengan menggunakan wawasan berbasis data, produsen dapat menemukan hambatan, mengoptimalkan proses untuk efisiensi, dan secara efektif menghilangkan pemborosan.

Pemantauan dan kontrol waktu nyata yang dioptimalkan dapat memaksimalkan produktivitas dan hasil produksi, sementara analitik canggih menemukan solusi untuk peluang produk baru dan titik fokus kemampuan, memastikan perusahaan tetap setidaknya setara dengan pesaing. Selain itu, kemajuan manufaktur cerdas meningkatkan pangsa pasar perusahaan dalam lanskap Industri 4.0 dengan memungkinkan optimalisasi proses untuk mengurangi biaya, meningkatkan kualitas, dan meningkatkan respons pelanggan.

Peta jalan terperinci yang mendukung analisis SMART ini akan menjadi dasar dari setiap inisiatif transformasi. Peta jalan untuk membangun lingkungan yang mampu AI dan data harus dimulai dengan penilaian kondisi saat ini, dengan mengevaluasi infrastruktur data, kemampuan teknologi, dan keterampilan sumber daya manusia untuk menentukan kekuatan

dan kelemahan perusahaan. Ini kemudian diikuti oleh tujuan yang jelas dan strategi berbasis data yang mendefinisikan teknologi, proses, dan perubahan budaya yang dibutuhkan untuk mencapai tujuan tersebut. Eksekusi harus bertahap, dimulai dengan proyek percontohan dan berlanjut berdasarkan hasil yang terukur dan evaluasi berkelanjutan untuk menyesuaikan melalui umpan balik analitis.

Terakhir, infrastruktur untuk mendukung pengumpulan, analisis, dan pemanfaatan data jangka panjang perlu dibangun yang berkelanjutan sehingga jaminan kualitas dan peningkatan berkelanjutan dapat diinstitusionalisasikan. Mengadopsi metode sistematis memungkinkan produsen untuk mempercepat perjalanan transformasi mereka, memastikan bahwa mereka dapat mengoptimalkan pengembalian investasi dan menjamin keberhasilan berkelanjutan dalam skenario industri yang bertransformasi.

19.5 EVALUASI PENDEKATAN CERDAS UNTUK MANUFAKTUR CERDAS

Metodologi akhir didasarkan pada kombinasi opini ahli, tetapi selama peluncuran penilaian awal, setiap faktor dalam analisis SMART telah diberi bobot subjektif (sekarang dinormalisasi untuk memastikan perbandingan di semua kriteria). Prioritas yang muncul dari bobot yang dinormalisasi ini adalah dukungan kepemimpinan yang kuat, penciptaan rantai pasokan yang tangguh, praktik daur ulang dalam pengadaan dan penggunaan sejauh mungkin, dan teknik optimasi canggih seperti metaheuristik dan algoritma genetik. Karakteristik ini semakin memperkuat perhatian yang sama terhadap kewajaran dan keberlanjutan. Masing-masing area ini sangat penting, tetapi kekuatan dukungan manajemen puncak menegaskan temuan kami sendiri, menunjukkan betapa pentingnya kepemimpinan bagi keberhasilan inisiatif manufaktur cerdas.

Meskipun studi ini secara eksplisit menyebutkan riset operasi dan simulasi berbasis data yang menyiratkan fokus pada analisis tren sistematis dan optimasi alur data, studi ini kurang memiliki detail metodologis yang diperlukan untuk mendukung interpretasi yang lebih dalam dari temuannya. Untuk mendapatkan interpretasi yang lebih kaya tentang implikasinya, kita benar-benar harus membaca seluruh makalah dan juga memeriksa bagaimana studi lain di bidang ini dibandingkan dengannya.

Dalam bab ini, analisis SMART dilakukan sebagai kerangka evaluasi pendekatan cerdas strategis untuk manufaktur cerdas. Namun, SMART bukannya tanpa kekurangan. Ini berarti bahwa bobot untuk CSF, pada tingkat dasar, selalu sangat subjektif dan cenderung berbeda dalam spesifikasinya oleh produsen sebagai akibat dari prioritas kontekstual dan kendala operasional. Lebih lanjut, ruang metrik untuk perbandingan pendekatan berbasis data dengan pendekatan bertahap sempit dan oleh karena itu mungkin tidak mencerminkan bahwa kompleksitas manufaktur cerdas telah terbukti dengan baik. Lebih banyak faktor evaluasi harus dipertimbangkan dalam pembelajaran masa depan, dan studi ini harus diperluas ke konteks industri lainnya. Selain itu, dalam pengembangan lebih lanjut, kami akan berupaya memvalidasi hasil kami dengan data kinerja empiris dari studi kasus pada berbagai perusahaan yang lebih luas.

BAB 20

KECERDASAN BERKELANJUTAN: AI ETIS UNTUK RANTAI PASOKAN GLOBAL

20.1 AI RANTAI PASOKAN: EFISIENSI & RISIKO ETIS

Bab ini bertujuan untuk mengeksplorasi pertimbangan etis dalam praktik manajemen rantai pasokan yang didukung kecerdasan buatan (AI). Bab ini menguraikan berbagai isu teknologi etis dan berkelanjutan dalam praktik rantai pasokan kontemporer. Praktik rantai pasokan saat ini menggabungkan prosedur AI untuk memungkinkan penyederhanaan proses, memprediksi kebutuhan di masa depan, dan mengoptimalkan operasi logistik. Otomatisasi dan analitik prediktif terus diterapkan untuk menyederhanakan prosedur rantai pasokan. Hal ini menghasilkan munculnya masalah terkait bias, penetapan akuntabilitas, dan perlindungan data. Praktik AI yang etis harus diteliti dengan saksama untuk mencegah dampak negatif AI, menjaga kepercayaan, dan menjamin keadilan di seluruh jaringan pasokan global. Studi ini menggunakan desain pembelajaran kualitatif dan melakukan meta-analisis literatur yang ada, studi kasus, dan pedoman peraturan tentang etika AI, serta memperkenalkan pedoman untuk pengembangan dan penerapan AI yang bertanggung jawab yang disesuaikan dengan konteks rantai pasokan, dengan mengintegrasikan dimensi keadilan, penjelasan, dan metrik keberlanjutan. Kerangka kerja yang diusulkan mendeteksi bahaya AI yang kritis dan etis dalam aplikasi AI. Bahaya tersebut terkait dengan metodologi penilaian pemasok, alat analitik prediktif, dan sistem perencanaan permintaan. Makalah ini menyajikan pendekatan yang dapat diterapkan untuk pendekatan proaktif dan sistematis dalam memasukkan pertimbangan etis di seluruh siklus hidup AI dalam rantai pasokan. Pembelajaran ini menyediakan pendekatan terstruktur untuk membangun rantai pasokan yang siap menghadapi masa depan dan berkelanjutan, yang mendorong inovasi yang bertanggung jawab dan membangun sistem AI yang dapat dipercaya.

Peningkatan penggunaan teknologi canggih dan integrasinya dalam mekanisme rantai pasokan global telah menghadirkan pergeseran transformatif dalam cara operasi rantai pasokan ditangani terkait efisiensi, akurasi, dan pengambilan keputusan secara real-time. Seluruh proses yang berkaitan dengan optimasi inventaris dan peramalan permintaan, serta penilaian risiko pemasok, dilakukan melalui teknologi berbasis kecerdasan buatan (AI). Penggunaan teknologi cerdas dan berkelanjutan disajikan dalam cara-cara inovatif di mana barang dan jasa dikirimkan ke berbagai negara. Integrasi teknologi cerdas ke dalam mekanisme rantai pasokan menghadirkan berbagai peluang bagi cara rantai pasokan dikelola dan diatur, namun juga menghadapi tantangan kompleks yang membuat jaringan rantai pasokan rentan terhadap berbagai risiko. Rantai pasokan yang terintegrasi dengan AI memungkinkan bisnis untuk memperoleh berbagai keuntungan berupa efektivitas biaya, peningkatan kecepatan, dan responsivitas rantai pasokan. Pada saat yang sama, hal ini juga menghadapi berbagai tantangan terkait dengan kurangnya pendekatan terstruktur dan kerangka kerja yang dapat

mengurangi risiko yang disebabkan oleh AI dan menyebabkan berbagai ketidaksetaraan. Skenario seperti itu menimbulkan pertanyaan kritis mengenai penerapan kecerdasan buatan dan keselarasan dengan praktik keberlanjutan. Bisnis kontemporer telah mengaktifkan mekanisme berbasis AI untuk menyederhanakan operasi rantai pasokan mereka, namun mereka menghadapi berbagai masalah terkait akuntabilitas, etika, dan meningkatnya AI dalam kesetaraan. Kurangnya mekanisme tata kelola yang ditingkatkan dan distandarisasi serta akses yang adil terhadap teknologi digital semakin meningkat. Risiko-risiko ini menciptakan skenario di mana peningkatan teknologi melampaui etika dan akuntabilitas dari pihak bisnis.

20.2 TIGA RANAH: AI & KEBERLANJUTAN, ETIKA AI, TATA KELOLA AI

Studi ini mempertimbangkan tiga ranah literatur yang berkaitan dengan: (1) integrasi mekanisme AI dan praktik rantai pasokan berkelanjutan, (2) dimensi etika penggunaan AI dalam jaringan rantai pasokan global, dan (3) tata kelola, transparansi, dan akuntabilitas dalam sistem manajemen rantai pasokan yang didukung AI. Hal ini dijelaskan pada bagian-bagian berikut.

Integrasi Mekanisme AI dan Praktik Rantai Pasokan Berkelanjutan

Konvergensi mekanisme AI ke dalam sistem rantai pasokan global muncul sebagai cakrawala baru dalam cara bisnis modern diatur dan dioperasikan. Perubahan teknologi tersebut tidak hanya terlihat sebagai perubahan kecil bertahap, tetapi menghadirkan perkembangan transformatif dalam cara produk dan layanan diproduksi, dipasok, diangkut, dan dikirim ke berbagai negara. Implementasi mekanisme AI memastikan bahwa data diproses secara real-time, memungkinkan analitik prediktif, dan memastikan pengambilan keputusan otonom. Semua proses ini memungkinkan bisnis untuk merespons dengan cepat berbagai tantangan yang muncul karena manajemen logistik dan efisiensi.

Literatur masa lalu mengeksplorasi aspek-aspek praktik berkelanjutan dan menguraikan bahwa kemampuan ini telah ditunjukkan atau diupayakan untuk mencapai tujuan yang terkait dengan degradasi lingkungan, peningkatan efisiensi energi, dan pencapaian tujuan pengadaan yang bertanggung jawab. Beberapa karya menyoroti pentingnya penerapan model pembelajaran mesin untuk memprediksi permintaan secara akurat dan mencapai tujuan pengurangan produksi berlebih dan pemborosan. Hasil kolektif dari studi yang berfokus pada penerapan sistem cerdas dalam praktik rantai pasokan berkelanjutan menyoroti bahwa sistem perutean cerdas harus memungkinkan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah dengan mengenali berbagai jalur pengiriman optimal. Beberapa studi mengeksplorasi pentingnya penggunaan alat pemantauan AI dan menghubungkannya dengan sistem manajemen kepatuhan standar lingkungan. Dalam pembelajaran mereka, diuraikan bahwa perubahan kondisi iklim dan kelangkaan sumber daya berarti bahwa AI akan menjadi faktor penting dalam memastikan praktik rantai pasokan berkelanjutan bagi bisnis.

Beberapa studi menunjukkan berbagai tantangan dalam menerapkan mekanisme AI dalam praktik rantai pasokan. Hasil pembelajaran mereka mengungkapkan bahwa isu-isu seperti pengurangan biaya dan kecepatan operasional dapat mengalahkan tantangan penting dalam menjaga keseimbangan ekologis dan kesejahteraan sosial. Studi-studi tersebut

menunjukkan bahwa jejak lingkungan dari pelatihan model AI besar menimbulkan berbagai masalah terkait penggunaan energi yang berlebihan di pusat data AI dan pencapaian hasil keberlanjutan bersih. Lebih lanjut, ditekankan bahwa pengoptimalan proses sistem AI untuk memastikan kecepatan pengiriman menyebabkan peningkatan emisi karbon dengan lebih mengutamakan penggunaan transportasi udara daripada mengikuti alternatif transportasi yang lebih lambat dan ramah lingkungan.

Konsensus di antara para akademisi terlihat dalam pembelajaran mereka mengenai mekanisme AI dalam praktik rantai pasokan dan distribusinya yang tidak merata. Studi pembelajaran mereka menunjukkan bahwa bisnis yang beroperasi di negara maju lebih cenderung menggunakan alat AI yang canggih, sementara bisnis yang beroperasi di negara berkembang dan terbelakang menghadapi masalah signifikan terkait infrastruktur digital, sumber daya keuangan, dan keahlian teknis untuk mengelola sistem rantai pasokan mereka. Dinyatakan pula bahwa kesenjangan digital dalam mekanisme rantai pasokan menciptakan tantangan seperti penentuan persyaratan dan penguatan ketidakseimbangan yang ada.

Tema yang berulang dalam literatur sebelumnya berkaitan dengan ketidakjelasan algoritma AI, yang menciptakan kesulitan bagi otoritas pengatur dalam memastikan bahwa keputusan bisnis yang didorong oleh AI selaras dengan praktik berkelanjutan. Isu penting yang diangkat dalam literatur sebelumnya adalah keterbatasan standarisasi indikator keberlanjutan, dan cara indikator tersebut didefinisikan, diukur, dan diberi bobot dalam mekanisme algoritma AI. Tidak adanya tolok ukur keberlanjutan yang diterima secara universal menciptakan tantangan dalam melakukan perbandingan dan memastikan akuntabilitas di berbagai bisnis. Mengingat hal tersebut, terdapat kesenjangan pembelajaran, dan ada kebutuhan untuk mengembangkan kerangka kerja di mana mekanisme AI dapat digunakan secara efektif sebagai alat untuk peningkatan efisiensi dan untuk memastikan transformasi keberlanjutan yang sistematis.

Dimensi Etika Penggunaan AI dalam Jaringan Rantai Pasokan Global

Penggunaan mekanisme kecerdasan buatan dan menjaga etika dalam sistem rantai pasokan global membutuhkan pengelolaan isu-isu yang berkaitan dengan keadilan, transparansi, dan martabat manusia. Literatur sebelumnya menguraikan bahwa penggunaan mekanisme AI menuntut peningkatan tanggung jawab dalam pengambilan keputusan penting terkait pemilihan pemasok, alokasi tenaga kerja, dan penilaian risiko.

Beberapa studi menggarisbawahi pentingnya membentuk kembali kondisi ekonomi tenaga kerja, khususnya di ekonomi berpendapatan rendah, yang mencakup sejumlah besar fasilitas manufaktur dan ekstraksi bahan baku. Penerapan sistem pemantauan kinerja otomatis dan algoritma prediktif harus diterapkan untuk menilai skor kredit pemasok dan mengidentifikasi kebutuhan pelatihan tentang informasi yang kurang terwakili. Pendekatan studi kasus digunakan dalam beberapa studi terkemuka, dan model AI dievaluasi dalam hal kepatuhan pabrik. Kepatuhan ini dinilai berdasarkan hasil audit masa lalu untuk mengidentifikasi penegakan peraturan yang lemah dan persyaratan untuk perbaikan saat ini.

Selain itu, beberapa studi mengakui pentingnya penerapan algoritma peramalan permintaan untuk memangkas biaya tenaga kerja dan memastikan efisiensi biaya dalam

manajemen rantai pasokan. Ditekankan bahwa pertimbangan etis harus diberikan perhatian yang sewajarnya dalam desain sistem bisnis untuk mencegah ketidakadilan di bawah elemen praktik inovatif. Hasil kolektif dari beberapa studi berfokus pada pengembangan kerangka kerja AI etis, yang mempertimbangkan aspek penyeimbangan inovasi dengan akuntabilitas, kesetaraan, dan otomatisasi dengan tenaga kerja manusia. Isu tata kelola AI telah diuraikan dalam beberapa studi, dan telah ditetapkan bahwa sistem AI yang etis tidak dapat dicapai hanya berdasarkan fokus teknis semata. Disarankan bahwa keterlibatan pemangku kepentingan dan akuntabilitas diperlukan untuk mencapai tata kelola mekanisme AI yang diinginkan. Konsep desain yang peka terhadap nilai dan integrasi prinsip-prinsip etika telah diberi bobot penting dalam pembelajaran sebelumnya.

Ditekankan bahwa prinsip-prinsip seperti transparansi, keadilan, dan etika manusia harus diimplementasikan dalam pengembangan proses AI. Sebuah contoh penting disorot di mana platform AI secara efektif digunakan untuk alokasi pesanan di antara pemasok, dan diprogram untuk mengurangi biaya dan waktu pengiriman dengan mempertimbangkan praktik emisi karbon. Telah ditetapkan bahwa standarisasi harus dipastikan dalam pembuatan standar AI, untuk memastikan kolaborasi industri dan untuk menjalankan berbagai mekanisme verifikasi. Kekhawatiran utama telah diangkat dalam literatur sebelumnya mengenai penjelasan algoritmik. Sistem AI harus dirancang untuk mengekstrak sejumlah penjelasan yang wajar bagi semua pihak yang terpengaruh dalam rantai pasokan. Karya-karya ilmiah sebelumnya juga mengangkat kekhawatiran terkait risiko AI dan pengamanan risiko tersebut dalam praktik manajemen rantai pasokan. Dikemukakan bahwa ada kebutuhan untuk mengembangkan kerangka kerja tata kelola partisipatif, yang melibatkan komunitas lokal, tenaga kerja, dan produsen, yang harus memengaruhi cara sistem AI beroperasi dalam bisnis. Hal ini harus memastikan pemeliharaan kepercayaan dan kepatuhan terhadap standar yang dibutuhkan.

Tata Kelola, Transparansi, dan Akuntabilitas dalam Sistem Manajemen Rantai Pasokan yang Didukung AI

Mekanisme tata kelola yang efektif sangat penting untuk memastikan bahwa proses AI berkontribusi secara bermakna dalam memastikan keberlanjutan dan kepatuhan terhadap etika dalam sistem rantai pasokan global. Literatur yang ada telah menimbulkan kekhawatiran terkait dengan tidak adanya mekanisme yang mempertimbangkan aspek kepatuhan, pengawasan, dan manajemen teknologi. Telah diuraikan bahwa teknologi canggih dan penggunaannya tidak diterapkan dengan benar oleh entitas kolektif seperti bisnis, penyedia logistik, dan vendor teknologi.

Intensifikasi mekanisme AI dan kompleksitasnya menciptakan kesulitan dalam cara audit, pelacakan, dan pengelolaannya. Contoh penting dari penurunan peringkat pemasok dibahas, yang mengakibatkan pengalihan rute pengiriman berdasarkan analisis risiko prediktif. Masalah kurangnya transparansi merusak akuntabilitas dan manajemen serta mengakibatkan manipulasi dan bias AI. Ditekankan bahwa struktur tata kelola harus sesuai dengan skala kemajuan teknologi dan memastikan efisiensi dan kesejahteraan sistem manusia dan ekologis.

Hasil kolektif dari literatur sebelumnya mendorong pengembangan bentuk-bentuk kolaborasi baru di antara berbagai pihak yang berpartisipasi untuk membangun mekanisme pemantauan yang tepat dan mengatasi masalah yang muncul dalam sistem rantai pasokan yang diatur oleh AI. Beberapa studi mengakui bahwa mekanisme tata kelola tidak dapat mengatasi masalah sifat transnasional dan dinamis dari sistem rantai pasokan berbasis AI. Literatur sebelumnya merekomendasikan agar kode etik dan program sertifikasi harus dibentuk untuk memastikan tata kelola yang tepat. Beberapa studi mengusulkan pengembangan intervensi regulasi, seperti persyaratan pengungkapan AI dan penilaian dampak algoritma wajib, untuk diterapkan dalam sistem manajemen rantai pasokan.

Masalah yang berkaitan dengan tantangan yurisdiksi disoroti dalam beberapa studi, di mana kekhawatiran terkait kapasitas penegakan hukum dibahas. Contoh penting dari legislasi AI Uni Eropa dipaparkan, yang menguraikan penegakan hukum yang signifikan untuk memastikan regulasi alat AI berisiko tinggi. Penting untuk mengatasi permasalahan yang berkaitan dengan manajemen tenaga kerja dan infrastruktur penting guna memastikan tata kelola dalam jaringan pasokan global. Diyakini bahwa otoritas pengatur tidak dapat menyelesaikan masalah sendirian dan harus dilengkapi dengan perubahan organisasi di dalam bisnis. Ada kebutuhan untuk mengembangkan komite etik internal dan berinvestasi besar-besaran dalam program literasi AI untuk melaporkan berbagai dampak negatif algoritma. Penerapan teknologi blockchain dan distributed ledger ditawarkan sebagai solusi untuk memastikan catatan transaksi yang tidak dapat diubah dan memenuhi tantangan keberlanjutan.

Teknologi canggih ini dapat memverifikasi asal bahan baku dengan tepat, melacak emisi karbon, dan mengautentikasi praktik ketenagakerjaan dalam sistem rantai pasokan. Literatur yang ada telah menekankan bahwa badan pengawas independen harus dibentuk untuk melakukan audit terhadap sistem AI di dalam bisnis. Badan-badan tersebut dapat menilai dengan tepat keadilan model rantai pasokan AI dan mengevaluasi dampak lingkungannya. Ada kebutuhan untuk fokus pada aspek-aspek penting seperti keahlian teknis, inklusivitas, dan kemandirian finansial untuk memajukan kecerdasan berkelanjutan dalam sistem rantai pasokan global.

20.3 KESENJANGAN ETIKA DAN KEBERLANJUTAN AI DALAM RANTAI PASOK

Literatur yang berkembang tentang integrasi mekanisme AI dalam sistem rantai pasokan telah menghadirkan beberapa kesenjangan kritis dalam pemahaman. Pertimbangan etis dalam cara sistem dikelola dan dikendalikan. Pengambilan keputusan berbasis AI dalam manajemen rantai pasokan membutuhkan pengembangan kerangka kerja komprehensif yang memenuhi berbagai isu keberlanjutan. Literatur yang ada telah banyak berfokus pada kemampuan teknis AI terkait permintaan, peramalan, logistik, optimasi, dan analitik prediktif, dan masih ada kesenjangan dalam bagaimana mekanisme AI ini diatur pada tingkat inti dalam bisnis.

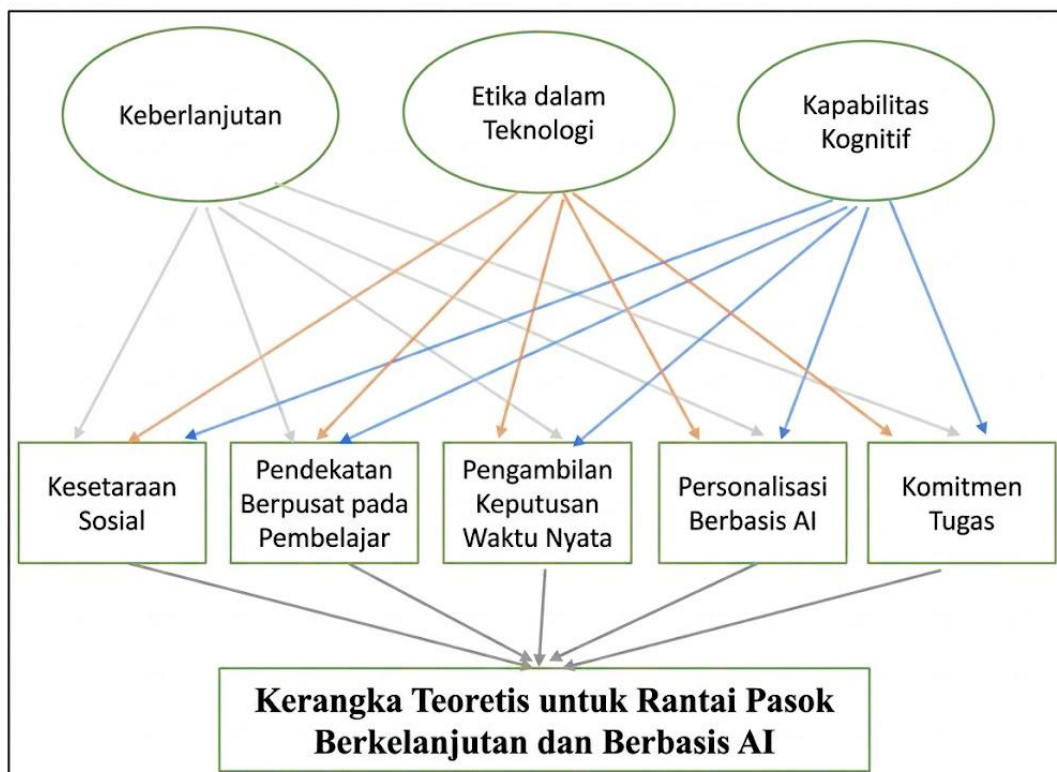
Fokus studi sebelumnya adalah pada penerapan AI sebagai alat untuk memastikan efisiensi dalam rantai pasokan. Namun, aspek teknologi ini tidak mempertimbangkan

konsekuensi lingkungan dan etis dari penggunaan mekanisme AI dalam rantai pasokan global. Berbagai masalah terlihat terkait dengan kerentanan tenaga kerja, asimetri AI, dan degradasi lingkungan, yang perlu ditangani dengan tepat. Pembelajaran sebelumnya kurang memiliki kerangka kerja komprehensif yang menyelaraskan mekanisme AI dengan prinsip-prinsip etika keadilan, akuntabilitas, dan inklusivitas dalam pengelolaan rantai pasokan. Tidak adanya kerangka kerja holistik telah menciptakan kesenjangan antara penggunaan teknologi canggih dan pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan. Beberapa studi mengakui risiko bias algoritma AI dan eksklusi data, tetapi kekhawatiran ini disorot secara terpisah daripada sebagai komponen yang terhubung dari isu tata kelola yang lebih luas. Terlihat bahwa tidak ada konsensus dalam cara mengukur kinerja etis alat AI dalam rantai pasokan. Selain itu, tidak ada mekanisme standar yang ditujukan untuk audit dan pelaporan bias algoritma AI. Lebih jauh lagi, terlihat bahwa partisipasi pemangku kepentingan dalam rantai pasokan AI pemerintah sangat minim.

Desain keseluruhan mekanisme AI dikendalikan oleh teknologi, data, ilmuwan, dan bisnis, sementara peserta utama dalam sistem rantai pasokan terpengaruh oleh keputusan algoritma, dan mereka dikecualikan dari keseluruhan proses. Kekhawatiran mereka tidak dimasukkan dengan benar dalam pengembangan protokol, pedoman, dan dalam melakukan penilaian dampak. Hal ini merusak kepercayaan, legislasi tata kelola AI, dan meningkatkan risiko bias AI. Terbukti juga bahwa isu-isu terkait konsumsi energi tidak diperhitungkan dengan baik saat melakukan penilaian keberlanjutan, yang pada akhirnya menyebabkan emisi karbon yang tinggi. Disimpulkan bahwa literatur yang ada tidak menyediakan model yang holistik dan praktis untuk kecerdasan berkelanjutan dalam praktik rantai pasokan. Hal ini menyerukan perlunya pengembangan aspek-aspek yang berkaitan dengan tata kelola, etika, dan tanggung jawab lingkungan ke dalam kerangka inti sistem rantai pasokan yang didukung AI. Kekhawatiran semua pemangku kepentingan harus diperhitungkan, memberdayakan pemangku kepentingan di semua tingkatan untuk mencapai tujuan yang dibutuhkan dari praktik rantai pasokan berkelanjutan kontemporer.

20.4 KERANGKA TEORETIS AI BERKELANJUTAN DALAM SCM GLOBAL

Kerangka teoretis studi ini meletakkan dasarnya dengan mengintegrasikan perspektif dari domain interdisipliner. Perspektif ini diambil dari teori pembangunan sosial, teknologi, etika, teori institusional, dan teori pemikiran sistem untuk membangun kerangka kerja inklusif yang terkait dengan sistem rantai global berbasis AI. Kerangka kerja yang diusulkan dalam bab ini mengintervensi mekanisme AI sebagai sistem sosio-teknologis yang terintegrasi dengan tujuan yang lebih luas dari struktur ekonomi dan lingkungan. Tujuan keseluruhannya adalah untuk melampaui pandangan instrumental tentang AI dan memposisikannya sebagai mekanisme peningkatan efisiensi untuk memastikan keberlanjutan dan akuntabilitas jangka panjang dalam sistem rantai pasokan.



Gambar 20.1. Kerangka teoritis mengenai rantai pasokan berkelanjutan dan berbasis AI. Untuk versi berwarna dari gambar ini, lihat www.iste.co.uk/bhambri/nextgensupply.zip

Studi ini merangkum konstruksi teoritis penting untuk membangun kerangka kerja yang kuat yang membantu memandu penyelarasan AI dengan perspektif keberlanjutan di seluruh jaringan rantai pasokan internasional. Teori pembangunan berkelanjutan adalah pilar dasar dari kerangka kerja yang diusulkan dalam studi ini. Teori ini menekankan integrasi aspek-aspek yang berkaitan dengan perlindungan lingkungan dan kesetaraan sosial. Dalam konteks pembelajaran saat ini, keberlanjutan tidak hanya mempertimbangkan pengurangan limbah, tetapi juga pemberdayaan hak-hak tenaga kerja dalam sistem rantai pasokan. Aspek kecepatan, biaya, dan perputaran persediaan adalah aspek inti dari teori ini, yang dimaksudkan untuk menciptakan jadwal pengiriman yang tepat dan mengurangi pengurangan tenaga kerja otomatis. Hasil dari teori pembangunan berkelanjutan menuntut pengembangan model AI berkelanjutan dengan menyeimbangkan kekhawatiran variabel ekonomi dan sosial.

Teori institusional adalah aspek penting kedua yang menguraikan pembentukan regulasi, kemampuan kognitif dalam membentuk perilaku organisasi dalam bisnis. Aspek inti dari teori ini adalah mempertimbangkan bahwa bisnis harus tertanam dengan benar dengan mempertimbangkan praktik rantai pasokan yang sah dan dapat diterima. Integrasi AI dalam pemasok harus diadopsi dengan benar untuk memastikan praktik bisnis yang inovatif dan kepatuhan terhadap standar. Teori ini berfokus pada pembuatan tindakan terkoordinasi di seluruh badan pengatur untuk memastikan ekosistem normatif diikuti, memenuhi semua kepentingan pemangku kepentingan.

Teori penting ketiga berkaitan dengan etika teknologi, yang berfokus pada penciptaan desain yang peka terhadap nilai dan inovasi yang bertanggung jawab. Aspek penting dari teori ini melibatkan pemberian nilai dan prioritas yang semestinya kepada kebutuhan para pemangku kepentingan. Teori ini harus mempertimbangkan suara pemasok, pekerja, dan komunitas lokal untuk mengelola rantai pasokan global secara efisien. Penggunaan AI harus etis dan dirancang dengan mempertimbangkan kepentingan berbagai pemangku kepentingan. Teori ini memandu desain kerangka kerja yang menanamkan nilai-nilai etika transparansi dan keadilan sejak awal. Kekhawatiran terkait dengan kemampuan menjelaskan juga merupakan bagian integral dari rantai pasokan yang didukung AI, yang melibatkan pemahaman keputusan otomatis dan menantangnya bila diperlukan. Teori penting keempat yang dipertimbangkan berkaitan dengan pemikiran sistem, yang memandang sistem rantai pasokan sebagai jaringan yang dinamis dan saling terhubung. Teori ini menguraikan bahwa sistem AI tidak beroperasi secara terisolasi tetapi melibatkan interaksi yang diperlukan dengan kekuatan pasar dan tenaga kerja. Mekanisme umpan balik merupakan bagian integral dari keseluruhan sistem rantai pasokan global.

Dalam hal ini, pembelajaran ini mempertimbangkan aspek pemodelan berbasis agen dan pemetaan ketahanan sebagai bagian integral dalam merancang kerangka kerja. Hasil kolektif dari semua teori telah menetapkan panduan untuk pembangunan kerangka kerja komprehensif yang memberikan pertimbangan yang semestinya terhadap aspek-aspek yang berkaitan dengan memenuhi tuntutan pemangku kepentingan, memastikan pedoman etika, dan mematuhi praktik berkelanjutan.

Pilar Teoretis	Prinsip inti	Komponen utama	Peran dalam kerangka rantai pasokan yang didukung AI
Teori Pembangunan Berkelanjutan	Integrasi tujuan kesetaraan ekonomi, lingkungan, dan sosial	Perlindungan lingkungan, keadilan sosial, pengelolaan sumber daya jangka panjang, dan hak-hak pekerja	Memposisikan AI tidak hanya untuk efisiensi tetapi juga untuk memajukan keberlanjutan dengan menyeimbangkan biaya, kecepatan, dan dampak sosial
Teori Kelembagaan	Perilaku organisasi yang dibentuk oleh peraturan, norma, dan legitimasi	Kepatuhan terhadap peraturan, standar industri, tekanan normatif, dan tata kelola lintas batas	Memastikan adopsi AI selaras dengan praktik yang sah dan diterima serta mempromosikan tindakan terkoordinasi di antara pemerintah, perusahaan, dan badan internasional untuk membangun ekosistem yang tepercaya dan terstandarisasi
Etika Teknologi (Desain Sensitif Nilai & Inovasi)	Teknologi harus mencerminkan nilai-nilai	Keadilan, transparansi, keterlibatan	Memandu desain AI yang etis dengan memasukkan suara pemangku kepentingan (pekerja,

Bertanggung Jawab)	kemanusiaan dan prinsip-prinsip etika	pemangku kepentingan, kemampuan menjelaskan, dan akuntabilitas	pemasok, komunitas) dan memastikan keputusan dapat dipahami, dapat diperdebatkan, dan selaras dengan hak asasi manusia
Teori Pemikiran Sistem	Rantai pasokan sebagai sistem dinamis dan saling terhubung dengan lingkaran umpan balik	Saling ketergantungan, kemampuan beradaptasi, ketahanan, pemodelan berbasis agen, analisis skenario	Memperlakukan AI sebagai bagian dari sistem kompleks yang berinteraksi dengan pasar, tenaga kerja, dan lingkungan serta mendukung pengambilan keputusan adaptif, respons terhadap guncangan, dan penilaian dampak holistik

Tabel 20.1. Aspek-aspek kerangka teoritis dan prinsip-prinsip yang mengaturnya

20.5 KECERDASAN BERKELANJUTAN BERBASIS AI DALAM RANTAI PASOK

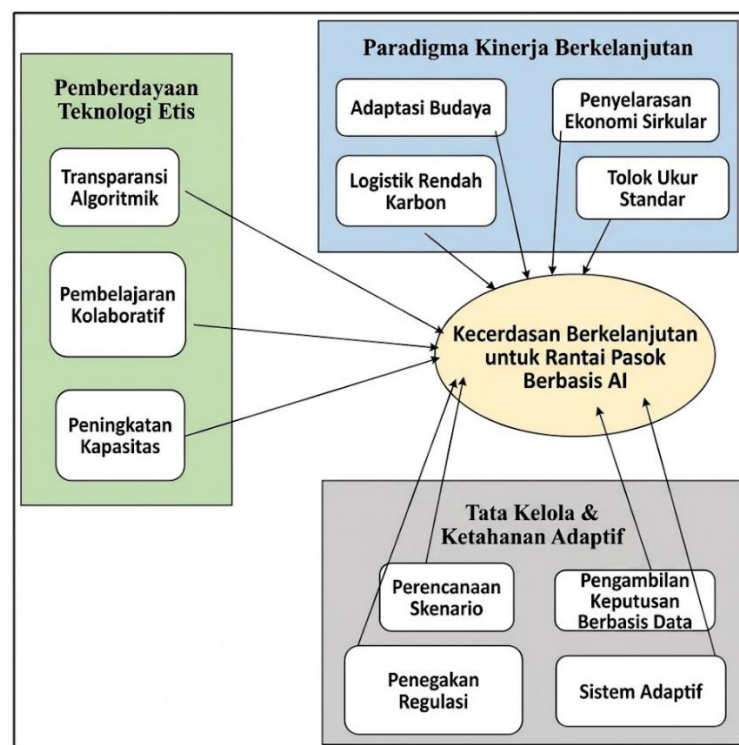
Bab ini mengusulkan kerangka kerja yang komprehensif dan inklusif yang mempromosikan kecerdasan berkelanjutan dalam sistem rantai pasokan yang didukung AI. Kerangka kerja ini bertujuan untuk menjembatani kesenjangan antara aspek penggabungan mekanisme AI dengan praktik etika dan lingkungan. Dimensi kerangka kerja ini memperlakukan mekanisme AI sebagai transformatif, yang, ketika diintegrasikan dengan struktur etika dan sistematis, menghasilkan penyampaian hasil yang bermakna dan masuk akal. Seluruh kerangka kerja didasarkan pada lima aspek penting yang terkait dengan desain etika, keberlanjutan, tata kelola yang kuat, akuntabilitas pemangku kepentingan, dan sistem adaptif. Masing-masing komponen bertujuan untuk memenuhi kompleksitas yang muncul dalam manajemen rantai pasokan. Kerangka kerja ini memungkinkan bisnis untuk meneliti mekanisme AI kontemporer mereka, mengenali berbagai ketidaksesuaian dengan tujuan keberlanjutan, dan menerapkan strategi yang diperlukan untuk memungkinkan kelangsungan jangka panjang dalam sistem rantai pasokan.

Aspek awal dari kerangka kerja ini berkaitan dengan perancangan proses AI secara etis. Kerangka kerja ini menetapkan panduan untuk pengembangan mekanisme AI yang memadai dalam sistem rantai pasokan. Aspek ini mempertimbangkan berbagai dimensi etika yang terintegrasi dalam arsitektur sistem. Kerangka kerja ini dibangun berdasarkan keprihatinan yang diangkat dalam literatur yang ada mengenai inovasi yang bertanggung jawab dan desain AI yang sensitif. Dalam hal ini, dimensi ini berfokus pada pelatihan model AI yang secara etis baik dan beragam dalam operasinya. Aspek penting lainnya dari dimensi ini berkaitan dengan memastikan transparansi algoritma dan mendefinisikan kembali kerahasiaan seluruh ekosistem AI. Penerapan AI yang dapat dijelaskan merupakan bagian integral dari kerangka kerja yang memungkinkan otoritas pengatur dan perusahaan audit untuk memahami logika utama di balik pengambilan keputusan otomatis. Evaluasi mekanisme AI harus dilakukan oleh dewan peninjau yang tepat, yang harus mempertimbangkan etika dan perlindungan lingkungan. Algoritma yang diatur oleh standar etika harus digunakan untuk melarang

pemilihan pemasok dengan riwayat pelanggaran peraturan dan penggunaan praktik yang intensif karbon.

Aspek utama kedua dari kerangka kerja ini berkaitan dengan memastikan matriks berkelanjutan yang selaras dengan mekanisme AI. Literatur yang ada menyoroti bahwa rantai pasokan tradisional berfokus pada pengurangan biaya dan manajemen efisiensi dengan mengorbankan keberlanjutan. Oleh karena itu, dalam hal ini, kerangka kerja yang diusulkan dalam pembelajaran ini bertujuan untuk membangun indikator holistik yang mencerminkan kesetaraan dan praktik lingkungan. Sistem AI yang digunakan dalam manajemen rantai pasokan harus menyeimbangkan isu lingkungan dan sosial. Sistem ini harus bertujuan untuk mengurangi intensitas karbon dari berbagai sumber energi yang diterapkan dalam manajemen logistik. Model peramalan permintaan harus bertujuan untuk menggunakan kembali dan memproduksi ulang produk untuk memenuhi pedoman keberlanjutan. Aspek kerangka kerja ini menyoroti penetapan berbagai standar yang terkait dengan kesetaraan tenaga kerja, penggunaan air, emisi karbon, dan keragaman pemasok.

Aspek ketiga dari kerangka kerja ini berkaitan dengan memastikan tata kelola yang memenuhi tantangan pengaturan mekanisme AI di seluruh jaringan rantai pasokan. Kerangka kerja ini menguraikan penerapan mekanisme AI yang etis dan memastikan tata kelolanya di dalam perusahaan, di dalam industri, dan di tingkat nasional dan global. Digarisbawahi bahwa di dalam bisnis, unit tata kelola AI yang tepat harus dirumuskan yang mempertimbangkan penilaian risiko di semua tingkatan.



Gambar 20.2. Kerangka kerja untuk kecerdasan berkelanjutan untuk rantai pasokan yang didukung AI

Tingkat industri harus mengembangkan berbagai pedoman dan standar untuk memastikan praktik AI yang etis. Di tingkat nasional, otoritas pengatur harus memberlakukan prosedur audit wajib dan berbagai skema sertifikasi untuk memenuhi standar etika AI yang dibutuhkan. Kekhawatiran yang berkaitan dengan bias algoritmik harus diatasi dengan menerapkan kebijakan perlindungan pelapor. Di tingkat global, organisasi internasional harus berkoordinasi satu sama lain untuk membawa harmonisasi dalam peraturan. Tujuan utama dari lapisan ini adalah untuk memastikan bahwa akuntabilitas dan pengawasan etis diperkuat dengan benar di seluruh manajemen rantai pasokan.

Aspek penting lain dari kerangka kerja ini berkaitan dengan memastikan akuntabilitas dari semua pemangku kepentingan untuk menghasilkan keputusan berbasis AI di semua tingkatan dalam organisasi. Fase ini membutuhkan penerapan sistem AI dengan memastikan mekanisme partisipatif dan melibatkan semua pemangku kepentingan yang diperlukan, seperti pemasok, tenaga kerja, dan petugas komunitas, dalam desain dan pengembangan mekanisme AI. Studi ini mengusulkan pengembangan dewan penasihat yang ditujukan untuk para pemangku kepentingan untuk memastikan bahwa mekanisme pengujian dan umpan balik yang tepat selalu diterapkan. Bisnis harus berupaya untuk mengembangkan mekanisme penyelesaian pengaduan untuk memberikan bantuan kepada pihak yang terkena dampak karena menyampaikan masalah mereka terkait bias algoritma dan penggunaan AI yang tidak memadai. Dikemukakan bahwa mekanisme digital yang diterapkan dalam organisasi harus digunakan untuk mengumpulkan umpan balik secara real-time dan harus fokus pada peningkatan berkelanjutan. Ada kebutuhan untuk mengembangkan kegiatan peningkatan kapasitas dan platform berbagi pengetahuan untuk memberdayakan semua pemangku kepentingan yang terlibat dalam jaringan rantai pasokan global yang terhubung dengan AI. Fase terakhir dari kerangka kerja ini berkaitan dengan memastikan ketahanan rantai pasokan yang tertanam AI.

Para pemangku kepentingan yang terlibat dalam keseluruhan pengelolaan rantai pasokan harus membantu mengembangkan sistem rantai pasokan yang etis, yang terus berkembang dan merespons dengan tepat terhadap ketidakpastian apa pun. Aspek kerangka kerja yang diusulkan ini bertujuan untuk mengatasi segala jenis gangguan yang muncul dalam bisnis rantai pasokan. Proses desain rantai pasokan yang didukung AI harus adaptif dan terus memperbarui model datanya sebagai respons terhadap skenario bisnis yang berubah.

Dalam hal ini, sangat penting bagi bisnis untuk menggunakan berbagai alat simulasi AI dan membantu dalam pengembangan skenario. Praktik perencanaan harus terus memeriksa mekanisme kerja sistem rantai pasokan mereka. Pengembangan praktik tersebut akan mencegah mereka dari guncangan mendadak yang disebabkan oleh perang dagang yang berkelanjutan dan peristiwa ekonomi yang tidak pasti.

Kesimpulannya adalah bahwa kelima aspek penting yang diusulkan dalam kerangka kerja komprehensif bertujuan untuk mencapai pedoman yang dapat ditindaklanjuti dan kohesif terkait dengan pengoperasian sistem rantai pasokan cerdas. Tujuannya adalah untuk membangun, menilai, memperbaiki, dan meningkatkan mekanisme AI yang berkelanjutan di dunia bisnis yang tidak pasti. Hasil dari kerangka kerja ini memberikan wadah bagi para

pembuat kebijakan, otoritas pengatur, dan pengembang teknologi untuk mengembangkan sistem rantai pasokan global yang cerdas, tangguh, dan berkelanjutan.

Aspek-aspek	Prinsip inti	Komponen utama	Mekanisme implementasi
Desain AI yang Etis	Menanamkan etika dalam AI sejak awal	Desain yang peka terhadap nilai, mitigasi bias, kemampuan menjelaskan, batasan etika	Dewan peninjau etika, alat XAI, audit bias, integrasi hak asasi manusia
Integrasi Kinerja yang Berkelanjutan	Mengoptimalkan AI untuk ESG, bukan hanya efisiensi	Tujuan multi-objektif, data ESG, KPI keberlanjutan	Mendefinisikan ulang tujuan AI, dasbor ESG waktu nyata
Tata Kelola Multilevel	Memastikan pengawasan di semua tingkatan	Unit internal, standar industri, regulasi nasional, koordinasi global	Tim tata kelola AI, konsorsium industri, kepatuhan peraturan, kerangka kerja internasional
Akuntabilitas yang Berpusat pada Pemangku Kepentingan	Melibatkan suara pihak yang terdampak dalam proses AI	Desain partisipatif, penyelesaian masalah, umpan balik, peningkatan kapasitas	Dewan penasihat, platform umpan balik digital, mekanisme banding, program pelatihan
Ketahanan Adaptif	Memungkinkan AI untuk belajar dan merespons guncangan	Pembelajaran dinamis, perencanaan skenario, diversifikasi, pembaruan berkelanjutan	Model adaptif, simulasi AI, perutean responsif terhadap guncangan, lingkaran umpan balik

Tabel 20.2. Komponen integral dari rantai pasokan berkelanjutan dan berbasis AI

20.6 IMPLIKASI KEBIJAKAN AI BERKELANJUTAN

Hasil pembelajaran ini menghadirkan implikasi signifikan bagi para pembuat kebijakan, otoritas pengatur, dan inovator teknologi yang terlibat dalam sistem rantai pasokan cerdas. Implikasi ini membimbing mereka dalam desain, penerapan, dan tata kelola yang memadai. Integrasi mekanisme AI dalam logistik, pengadaan, dan manajemen pemasok membutuhkan pengembangan ekosistem yang dibangun berdasarkan prinsip kesetaraan dan keberlanjutan. Penyematan mekanisme AI membutuhkan pengawasan yang sesuai dan arahan yang tepat untuk mengurangi inefisiensi dan berbagai ketidaksetaraan dalam pengelolaan rantai pasokan. Pembelajaran ini menguraikan lima implikasi utama yang bertujuan untuk memberikan wawasan yang sesuai kepada pihak berwenang untuk memungkinkan aktivitas transformatif yang etis dan berkelanjutan dalam praktik rantai pasokan.

Pengembangan Standar yang Mengikat untuk AI Etis dalam Rantai Pasokan

Hasil studi saat ini menguraikan bahwa peraturan yang ada mengenai operasi AI etis dalam manajemen rantai pasokan masih terfragmentasi, yang seringkali menimbulkan kekhawatiran terkait privasi data dan kepatuhannya. Kerangka kerja yang diusulkan dalam studi ini menguraikan aspek penting tersebut dan menyerukan pengembangan pedoman yang memadai yang mengharuskan bisnis untuk menjalankan penilaian dampak algoritma yang tepat. Penilaian tersebut harus diterapkan pada sistem AI sebelum memengaruhi berbagai pemangku kepentingan yang terhubung dalam rantai pasokan. Penilaian ini harus mampu menyelidiki berbagai bias dalam sistem otomatis. Sangat penting bagi otoritas pengatur untuk mewajibkan penerapan AI yang dapat dijelaskan dalam sistem yang membutuhkan kredit, penilaian, penilaian pemasok, dan penjadwalan tenaga kerja.

Pembentukan Metrik Keberlanjutan Dalam Mekanisme AI

Kerangka kerja yang diusulkan menyerukan pengembangan matriks keberlanjutan yang tepat dan pengintegrasian ke dalam pedoman transformasi digital. Hasil studi ini mengharuskan para pembuat kebijakan untuk melakukan reorientasi dalam kerangka kerja AI, dan mereka harus memasukkan aspek keberlanjutan ke dalam sistem rantai pasokan. Para pembuat kebijakan harus mengembangkan insentif yang tepat untuk sistem AI yang cenderung menurunkan emisi karbon dan mematuhi prinsip-prinsip ekonomi sirkular. Pembentukan sistem AI harus didasarkan pada kriteria keberlanjutan yang telah ditentukan sebelumnya, dan platform data standar harus dikembangkan untuk membawa transparansi pada sistem rantai pasokan. Pemerintah harus meluncurkan berbagai insentif pajak untuk bisnis yang menunjukkan peningkatan signifikan dalam kinerja keberlanjutan mereka dan menunjukkan penggunaan AI yang bertanggung jawab.

Adopsi Desain yang Peka Terhadap Nilai Sebagai Prinsip Inti dari Sistem Rantai Pasokan Cerdas

Kerangka kerja yang disorot dalam pembelajaran ini menyerukan untuk mempertimbangkan aspek etika dan sosial dari aplikasi AI. Hal ini mencerminkan bahwa prinsip-prinsip penciptaan nilai harus tertanam dalam mekanisme AI untuk memastikan keadilan dan transparansi dalam arsitektur rantai pasokan. Para pengembang teknologi harus fokus pada perancangan algoritma yang sesuai yang menghindari hasil diskriminatif dan memastikan umpan balik pemangku kepentingan yang tepat. Hasil pembelajaran ini mendorong teknologi untuk memprioritaskan kemampuan antar operator dari kerangka kerja rantai pasokan berkelanjutan. Penerapan dan penggunaan alat sumber terbuka dan perangkat AI etis harus dipromosikan. Hal ini seharusnya memungkinkan pemasok yang beroperasi dalam skala kecil untuk berpartisipasi dengan baik dalam proses transformasi digital manajemen rantai pasokan tanpa bergantung pada sistem AI milik perusahaan.

Pengembangan Struktur Tata Kelola Dengan Mempertimbangkan Pengawasan AI

Studi ini menyerukan untuk mengatasi setiap penyimpangan dan ketidaksesuaian etika dalam praktik keberlanjutan. Dalam hal ini, bisnis harus bertujuan untuk membentuk dewan khusus yang harus merumuskan dan menjalankan tata kelola AI; dewan tersebut akan bertanggung jawab untuk menilai risiko algoritmik dan memastikan kepatuhan terhadap

standar etika. Pemantauan dan pemantauan yang tepat terhadap dampak jangka panjang penggunaan AI pada para pemangku kepentingan harus dilakukan. Dewan tersebut harus mencakup anggota yang ahli dalam memastikan perilaku etis, kepatuhan terhadap standar keberlanjutan, dan memastikan kinerja terkait AI dilakukan dengan benar. Prosedur manajemen audit harus sejalan dengan praktik AI yang unggul dan etis serta harus melibatkan pelaksanaan audit algoritmik pada interval yang tepat.

Memastikan Penerapan AI yang Inklusif dan Adil

Hasil studi ini menyerukan kepada para pembuat kebijakan untuk membentuk dewan penasihat pemangku kepentingan yang diperlukan, yang harus memenuhi harapan dan kepentingan tenaga kerja, pemasok, dan usaha kecil. Hal ini seharusnya memungkinkan mereka untuk hidup berdampingan dalam sistem rantai pasokan yang didukung AI dan juga untuk memantau kinerja mereka menggunakan platform umpan balik digital. Skenario ini seharusnya memungkinkan mereka untuk melakukan pelaporan secara real-time atas setiap masalah algoritmik. Otoritas pemerintah harus bertujuan untuk mempromosikan dan mengembangkan program peningkatan kapasitas untuk membekali para anggota dengan praktik manajemen rantai pasokan yang diperlukan. Hal ini seharusnya memungkinkan mereka untuk menjalankan bisnis di bawah pengawasan etis dan berkelanjutan. Otoritas pengatur harus bertujuan untuk mengembangkan undang-undang yang berkaitan dengan hak data, literasi algoritmik, dan kepatuhan digital.

Oleh karena itu, disimpulkan bahwa lima implikasi yang disajikan dalam pembelajaran ini merumuskan peta jalan untuk melakukan transformasi yang efektif menuju bantuan rantai pasokan berkelanjutan dengan menanamkan mekanisme AI. Studi ini menekankan penerapan sudut pandang holistik dan menyajikan pendekatan berbasis nilai untuk menjaga praktik inovatif dalam sistem rantai pasokan. Otoritas pengatur dan pembuat kebijakan harus menciptakan ekosistem seperti itu, di mana para pemangku kepentingan ini diberdayakan untuk mengambil keputusan etis untuk menjalankan perilaku yang sesuai dari keseluruhan rantai pasokan. Implikasinya menuntut tindakan terkoordinasi dan multilevel yang dapat membangun sistem rantai pasokan kontemporer menjadi mekanisme terintegrasi berbasis AI yang cerdas, tangguh, dan pintar.

20.7 KESIMPULAN

Penggabungan mekanisme AI ke dalam sistem rantai pasokan telah menghadirkan perubahan transformatif dalam cara pengelolaan logistik, pengadaan, dan praktik rantai pasokan berkelanjutan dilakukan di seluruh dunia. Integrasi AI ke dalam manajemen rantai pasokan menunjukkan pergeseran penting yang bertujuan untuk mengurangi pemborosan, meningkatkan daya tanggap, dan meningkatkan efisiensi sistem dari perspektif dimensi keberlanjutan. Pembelajaran saat ini menggarisbawahi bahwa mekanisme AI tidak dapat diperlakukan hanya sebagai alat teknis, tetapi harus diintegrasikan dengan benar, dengan mempertimbangkan dimensi teknisnya. Studi ini menyerukan penyelarasan dengan prinsip keberlanjutan untuk mengurangi ketidakadilan dan ketidakseimbangan yang timbul dari penggunaan sistem AI. Kerangka kerja kecerdasan berkelanjutan yang diusulkan dalam rantai

pasokan terintegrasi AI menguraikan kemampuan komprehensif dan adaptif untuk mengintegrasikan etika, partisipasi pemangku kepentingan, dan memastikan tata kelola di semua tingkatan. Model yang diusulkan menggarisbawahi perlunya merangkul pandangan holistik tentang kecerdasan, menerapkan kemampuan yang berpusat pada efisiensi, dan memprioritaskan akuntabilitas dan keadilan sosial. Hasil pembelajaran menunjukkan bahwa tugas keseluruhan kecerdasan berkelanjutan dalam rantai pasokan tidak hanya terletak pada kemajuan teknologi; Sebaliknya, hal ini membutuhkan desain yang cermat dan terampil dari kecerdasan rantai pasokan yang terintegrasi dengan AI. Studi ini menyerukan pengintegrasian metrik keberlanjutan untuk menghilangkan bias algoritmik, memastikan transparansi, dan membangun mekanisme tata kelola yang tepat dalam sistem rantai pasokan.

Hasil studi ini memberikan wawasan kepada para pembuat kebijakan, otoritas pengatur, dan inovator teknologi untuk menciptakan standar yang sesuai yang memastikan kedaulatan data dan melindungi kepentingan pemangku kepentingan yang rentan. Sangat penting bahwa sistem AI mencegah inefisiensi, kolonialisme digital, dan memastikan pembagian manfaat yang adil di semua tingkatan. Memastikan dan menciptakan ketahanan adaptif adalah area inti yang menjadi dasar seluruh kerangka kerja studi ini, yang selanjutnya menekankan bahwa mekanisme AI harus proaktif untuk belajar dari berbagai gangguan ekonomi dan sosial dan harus mengadopsi kemampuan simulasi untuk menilai risiko di masa depan. Studi ini telah mengusulkan solusi inovatif untuk memungkinkan kecerdasan berkelanjutan dalam rantai pasokan yang terintegrasi dengan AI. Namun, studi ini juga mengusulkan beberapa jalan untuk melakukan pembelajaran lebih lanjut di masa mendatang dalam dimensi ini. Pembelajaran lebih lanjut harus dilakukan untuk memvalidasi kerangka kerja rantai pasokan berkelanjutan yang didukung AI di berbagai bisnis dan wilayah geografis. Penerapan praktis kerangka kerja ini harus diuji secara tepat di berbagai sektor dan bisnis dalam konteks tantangan keberlanjutan. Selain itu, pembelajaran di masa mendatang dapat berfokus pada analisis komparatif antar bisnis yang berbeda.

Dengan cara ini, mereka mengadopsi praktik AI yang etis dan memastikan aspek ketahanan dan kepercayaan pemangku kepentingan tetap terjaga dalam proses holistik rantai pasokan. Selanjutnya, pembelajaran di masa mendatang juga dapat bertujuan untuk mengeksplorasi pembangunan aspek standar dan berbagai alat audit untuk meneliti kinerja keberlanjutan mekanisme AI. Kurangnya metodologi yang diterima, dan literatur yang ada belum menyajikan kerangka kerja yang secara memadai mengukur keadilan algoritmik, dampak lingkungan, dan akuntabilitasnya dalam mekanisme rantai pasokan. Pengembangan tolok ukur yang sesuai akan memungkinkan pemangku kepentingan untuk mengevaluasi mekanisme AI secara objektif guna memastikan inovasi yang bertanggung jawab di semua tahapan rantai pasokan. Studi ini juga menyerukan eksplorasi peran teknologi baru berdasarkan sistem blockchain dan pembelajaran federasi untuk mengawasi dan memeriksa interaksi variabel, seperti transparansi dan privasi data, dalam rantai pasokan yang didukung AI. Verifikasi klaim keberlanjutan dapat dilakukan dengan meneliti aspek berbagi data terdesentralisasi dan aspek teknis dalam bisnis. Isu-isu penting terkait literasi teknis dan struktur insentif, yang dapat menghambat adopsi praktik kecerdasan berkelanjutan, dapat

dieksplorasi. Aspek manajemen perubahan, program pengembangan kapasitas, dan berbagai strategi kepemimpinan dapat dieksplorasi untuk memberikan panduan praktis bagi bisnis dan sistem rantai pasokannya.

Pembelajaran longitudinal perlu dilakukan untuk memahami sistem manajemen respons bisnis dengan mempertimbangkan perubahan situasi ekonomi. Oleh karena itu, disimpulkan bahwa kecerdasan berkelanjutan dalam mekanisme rantai pasokan membutuhkan inovasi teknis, pembentukan etika, tata kelola yang memadai, dan reformasi kelembagaan. Studi ini meletakkan dasar yang tepat untuk mengarahkan praktik-praktik transformatif tersebut dengan menawarkan kerangka kerja komprehensif yang tangguh dan dapat diregenerasi dalam membangun mekanisme rantai pasokan yang terukur.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M. A. F., & Suhud, U. (2025). Green International Business: Tren Sustainability Dalam Perdagangan Global. Unindra Press.
- Aliyah, Y., Anandha, R. N. Y. T., Hanafiah, L., & Patmi, S. (2025). Multipolar Quantum World: Tantangan Dan Peluang Bagi Pertahanan Indonesia. Penerbit Widina.
- Amadea, I. B. N. K., Judijanto, L., Pamela, E., & Gaspersz, V. (2025). Manajemen Teknologi Dan Inovasi. Pt. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Amalia, A. (2026). Logsy: Arsitektur Efisiensi Dalam Navigasi Data Dan Optimasi Sistem. Afdan Rojabi Publisher.
- Ariyawan, K. L. D. M. H., Patmi, M. H. S., Kom, S. I., & Han, M. (2026). The Future Of Air Power: Quantum, Artificial Intelligence, Dan Kemenangan Di Udara. Penerbit Widina.
- Astuti, B. (Ed.). (2025). Manajemen Pemasaran Digital: Teknologi Digital Dan Inovasi Global. Serasi Media Teknologi.
- Aurantia Marina, M. M., Zulkarnain, M., Kunio, N. I. H., Kom, M., Wati, A. S., Kom, M., ... & Utari, M. (2024). E-Business (Elektronik Bisnis). Mega Press Nusantara.
- Eryc, E., & Deu, I. (2024). Integrasi Teknologi Digital Dan Ai Dalam Memperkuat Akuntabilitas Pada Operasi Manajemen Rantai Pasokan: Analisis Literatur Sistematis. Teknimedia: Teknologi Informasi Dan Multimedia, 5(2), 200-2011.
- Harto, B., Rukmana, A. Y., Subekti, R., Tahir, R., Waty, E., Situru, A. C., & Sepriano, S. (2023). Transformasi Bisnis Di Era Digital: Teknologi Informasi Dalam Mendukung Transformasi Bisnis Di Era Digital. Pt. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Husen, T. I., Rafiie, S. A. K., Yuliana, D., Jalaluddin, T., Rezaldi, M., Ariyati, N., ... & Fudzah, N. (2025). Literasi Digital Dalam Manajemen Dan Bisnis: Adaptasi, Strategi Dan Inovasi. Cv Eureka Media Aksara.
- Intyas, C. A., Putritamara, J. A., & Haryati, N. (2022). Dinamika Agrobisnis Era Vuca: Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity. Universitas Brawijaya Press.
- Judijanto, L., Kusumastuti, S. Y., & Mudjiyanti, R. (2025). Ekonomi Kontemporer: Dinamika Dan Tantangan Abad 21. Pt. Sonpedia Publishing Indonesia.

- Juniansyah, M. A., Rosyidah, D. M., Pahrijal, R., & Ardhiyansyah, A. (2026). Ketahanan Bisnis Di Era Digital: Bagaimana Adaptasi Dan Inovasi Menyelamatkan Umkm. Pt Arunika Aksa Karya.
- Kholil, M., Saepudin, T. H., Tambunan, E. B. M., Sjarifudin, D., Mu'min, R., Almahdy, I., ... & Riadi, S. (2025). Industrial Excellence 5.0 Di Indonesia: Safety, Intelligence, And Sustainability In Action. Cv Eureka Media Aksara.
- Kurniawan, D. (2026). Rtmklik: Struktur Transformatif, Geopolitik Global, Akselerasi Digital, Dan Resiliensi Ekosistem Masa Depan. Afdan Rojabi Publisher.
- La Sumange, I. (2025). Manajemen Strategi Dalam Kebijakan Agribisnis. Pt Bukuloka Literasi Bangsa.
- Layak, P. (2026). Pekerjaan Layak Dan. 17 Mutiara Pembangunan Berkelanjutan-Interpretasi Bebas Tujuan Sdgs Dalam Berkehidupan, 153.
- Magdalena, L., Hatta, M., Valentino, F., Kuraesin, S., & Ardiningrat, R. M. R. P. (2025). Model Cerdas Supply Chain Pertanian: Integrasi Keberlanjutan Dan Produktivitas Dengan Teknologi Ai. Pt. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Maulidah, S., Yuswita, E., & Rayesa, N. F. (2026). Green Supply Chain Management: "Strategi Dan Inovasi Dalam Keberlanjutan Global". Universitas Brawijaya Press.
- Noviar, H. (2025). Revolusi Hijau Dan Biru: Inovasi Ekonomi Untuk Masa Depan. Usk Press.
- Nugraha, M. S. A. (2026). Distribusi Dan Rantai Pasok. Perencanaan Pemasaran, 110.
- Oktarino, A., Iqbal, M., Widianoro, S., Rahayu, N., Candra, R., Usman, S., ... & Nurfitri, A. R. (2024). Dunia Di Era Transformasi Digital. Cv. Gita Lentera.
- Pasaribu, I. F., Hapsari, T. D., Kurohman, F., Machdani, S., & Isbah, F. (2025). Menjala Masa Depan Paradigma Baru Perikanan Tangkap. Samudra Biru.
- Purnata, H., Diningrat, M. S. M., Dionova, B. W., Rahmatulloh, A., Imprun, A., Bani, F. C. D., ... & Akbari, F. (2025). Smart Systems, Smart Decisions. Pt Penerbit Qriset Indonesia.
- Purnomo, B. R. (2024). Manajemen Di Era Digital: Perspektif Keuangan, Inovasi, Dan Umkm. Ugm Press.
- Puspitarini, E. W., Judijanto, L., Paliling, A., Gaspersz, V., & Setiyani, A. (2026). Chatgpt Mastery: Pengenalan Dan Penguasaan Chatgpt Secara Proporsional. Pt. Sonpedia Publishing Indonesia.

- Rahadjeng, I. R., Tuslaela, M., Muhammad Sobirin, S. T., Rahman, I. M. S., Mt, M., Nuha Nadhiroh, S. T., ... & Akhmad Jamaah, S. T. (2025). Teknik Elektro Dalam Era Industri 4.0. Pt Bukuloka Literasi Bangsa.
- Romdoni, M. L., Sm, M., Husain, N. H., Se, S., Hadikusumo, R. A., Se, M., ... & Saul Weipsa, S. T. (2025). Transformasi Manajemen Pemasaran Dalam Era 4.0. Cendikia Mulia Mandiri.
- Rustiyana, R., Judijanto, L., Datya, A. I., Lase, M. C. M., Hidayat, M. M., Wardani, A. T., ... & Novianto, R. (2025). Pengantar Teknologi Informasi. Pt. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Saleh, L., Syarbiah, S., Junus, M., Sukratman, I. M., & Amartani, K. (2025). Buku Referensi Pengantar Agroindustri: Konsep, Sistem, Dan Implementasi. Pt. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Salsabila, O. N. (2026). Inovasi Dico: Mentransformasi Efisiensi Di Era Digital. Afdan Rojabi Publisher.
- Sariwardani, A., & Si, S. E. M. (2024). Manajemen Produksi Dan Operasi. Manaj. Produksi Dan Operasi Era Revolusi Ind, 4, 35.
- Savitri, A. (2019). Revolusi Industri 4.0: Mengubah Tantangan Menjadi Peluang Di Era Disrupsi 4.0. Penerbit Genesis.
- Simangunsong, E., Rahman, F., & Maheswari, H. (2026). Rekonfigurasi Rantai Pasok Fmcg Indonesia: Membangun Viabilitas Melalui Strategi Digital Dan Intrapreneurship Menuju Daya Saing Global. Prasetya Mulya Publishing.
- Sri Gusty, S. T., Syafar, I. A. M., Md, A., Ibrahim, F., Halik, J., Mr, I. F., ... & Anhar, I. (2026). Insinyur Untuk Kemandirian Pangan. Arsy Media.
- Sundari, S., & Se, M. (2023). Manajemen Sumber Daya Manusia Dan Masa Depan Dunia Kerja Di Era Industri 4.0 Dan Society 5.0. Cv Jejak (Jejak Publisher).
- Sutanto, M. M., Purnomo, J. F., Judijanto, L., Wibowo, D. U., Setiyani, A., Rahadian, D., & Hia, S. W. (2026). Manajemen Produksi: Teori Dan Praktik. Pt. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Wibowo, A. (2025). Disrupsi Tata Kelola Global Ekonomi Digital. Penerbit Yayasan Prima Agus Teknik.
- Widjaja, D., & Samuel, S. (2025). Adaptability Marketing In Digital Era: Strategi Pemasaran Adaptif Di Era Digital Yang Terus Berubah. Penerbit Nem.
- Wijayanto, H. G. (2026). Pengantar Bisnis Modern: Strategi, Inovasi, Dan Keberlanjutan Di Era Digital. Cv. Nusantara Press Indonesia.

- Wijayati, H., & Rachmawati, I. (2025). Manajemen Rantai Pasok: Mengenal Konsep, Implementasi, Hambatan, Dan Teknologi Dalam Operasi Bisnis. Anak Hebat Indonesia.
- Wiwik Handayani, S. E., Yaacob, M. D. Z., Virginia Mandasari, S. E., Nurkholis Majid, S. E., Utomo, S. S., & Sm, M. (2025). Manajemen Operasional Berkelanjutan: Mengintegrasikan Lingkungan, Sosial, Dan Ekonomi. Thalibul Ilmi Publishing & Education.
- Yasik, Y. L., & Amin, A. M. (2026). Manajemen Inovasi Digital: Strategi Menang Di Pasar Global. Pt Kimhsafi Alung Cipta.
- Yudatama, U., Dianto, I. A., St, S., Kom, S., Ak, M., Fergina, A., ... & Manurung, H. E. (2023). Sistem Enterprise Di Era Digital: Inovasi, Transformasi, Dan Keberlanjutan. Kaizen Media Publishing.

RANTAI PASOKAN

(Supply Chains)

**Peran AI, Otomatisasi, dan Keberlanjutannya
ditengah situasi dunia yang tak menentu**

Dr. Agus Wibowo, M.Kom, M.Si, MM.

BIO DATA PENULIS



Penulis memiliki berbagai disiplin ilmu yang diperoleh dari Universitas Diponegoro (UNDIP) Semarang. dan dari Universitas Kristen Satya Wacana (UKSW) Salatiga. Disiplin ilmu itu antara lain teknik elektro, komputer, manajemen dan ilmu sosiologi. Penulis memiliki pengalaman kerja pada industri elektronik dan sertifikasi keahlian dalam bidang Jaringan Internet, Telekomunikasi, Artificial Intelligence, Internet Of Things (IoT), Augmented Reality (AR), Technopreneurship, Internet Marketing dan bidang pengolahan dan analisa data (komputer statistik).

Penulis adalah pendiri dari Universitas Sains dan Teknologi Komputer (Universitas STEKOM) dan juga seorang dosen yang memiliki Jabatan Fungsional Akademik Lektor Kepala (Associate Professor) yang telah menghasilkan puluhan Buku Ajar ber ISBN, HAKI dari beberapa karya cipta dan Hak Paten pada produk IPTEK. Sejak tahun 2023 penulis tercatat sebagai Dosen luar biasa di Fakultas Ekonomi & Bisnis (FEB) Universitas Diponegoro Semarang. Penulis juga terlibat dalam berbagai organisasi profesi dan industri yang terkait dengan dunia usaha dan industri, khususnya dalam pengembangan sumber daya manusia yang unggul untuk memenuhi kebutuhan dunia kerja secara nyata.



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PENERBIT :

YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK
Jl. Majapahit No. 605 Semarang
Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144
Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

ISBN 978-634-7695-28-4 (PDF)



9

786347

695284