



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK



# MANAJEMEN TRANSFORMASI DIGITAL Industri **4.0**

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

# MANAJEMEN TRANSFORMASI DIGITAL Industri 4.0

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 978-634-7227-05-8 (PDF)



# **Manajemen Transformasi Digital Industri 4.0**

## **Penulis :**

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

**ISBN : 978-634-7227-05-8**

## **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 Yuniato, 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](mailto:penerbit_ypat@stekom.ac.id)

## **Distributor Tunggal :**

### **Universitas STEKOM**

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. 08122925000

Fax. 024-6710144

Email : [info@stekom.ac.id](mailto: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 limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku berjudul **Manajemen Transformasi Digital Industri 4.0** ini dapat terselesaikan dengan baik dan hadir di tengah-tengah pembaca. Buku ini disusun sebagai upaya memberikan wawasan komprehensif dan praktis mengenai pengelolaan transformasi digital dalam konteks Revolusi Industri 4.0, yang saat ini menjadi fenomena global dengan dampak yang sangat luas di berbagai sektor industri dan kehidupan.

Era Industri 4.0 menghadirkan tantangan sekaligus peluang besar melalui integrasi teknologi digital, seperti Internet of Things (IoT), big data, kecerdasan buatan, robotika, augmented reality, dan manufaktur aditif. Transformasi digital bukan sekadar adopsi teknologi, melainkan sebuah proses manajerial yang kompleks yang mencakup perubahan budaya organisasi, pengembangan kompetensi sumber daya manusia, serta penyesuaian strategi bisnis agar mampu beradaptasi dan berinovasi secara berkelanjutan.

Buku ini dirancang dengan pendekatan sistematis dan mendalam, dimulai dari kerangka konseptual Industri 4.0, model bisnis produk cerdas, hingga sistem produksi lean yang terotomatisasi. Selanjutnya, pembaca diajak memahami strategi kesiapan dan kematangan industri, peta jalan teknologi, serta pengelolaan portofolio proyek di era digital. Pembahasan juga mencakup pengembangan bakat dan peran pendidikan teknik yang harus bertransformasi untuk mendukung kebutuhan industri masa depan.

Tidak kalah penting, buku ini juga membahas aspek kritis seperti analisis data manufaktur, penerapan IoT, kemajuan robotika, serta keamanan siber yang menjadi tantangan utama dalam menjaga keberlangsungan transformasi digital. Dengan berbagai contoh aplikasi dan studi kasus, buku ini diharapkan dapat menjadi panduan praktis dan inspirasi bagi para akademisi, praktisi industri, pengambil kebijakan, dan mahasiswa yang ingin mendalami dan mengimplementasikan manajemen transformasi digital secara efektif dan berkelanjutan.

Kami menyadari bahwa buku ini masih memiliki keterbatasan, oleh karena itu kami sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan di masa mendatang. Semoga buku ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam memperkuat pemahaman dan praktik manajemen transformasi digital di era Industri 4.0, serta mendorong kemajuan industri dan bangsa.

Semarang, Mei 2025

Penulis

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

## DAFTAR ISI

Halaman Judul .....	i
Kata Pengantar .....	ii
Daftar Isi .....	iv
<b>BAB 1 KERANGKA KONSEPTUAL UNTUK INDUSTRI 4.0 .....</b>	<b>1</b>
1.1. Pendahuluan .....	1
1.2. Konsep Dan Komponen Utama Industri 4.0 .....	3
1.3. Teknologi Virtualisasi (Virtual Reality (VR) Dan Augmented Reality (AR)) .....	7
1.4. Komunikasi Dan Jaringan (Internet Industri) .....	10
1.5. Kerangka Kerja Yang Diusulkan Untuk Industri 4.0 .....	14
<b>BAB 2 MODEL BISNIS PRODUK CERDAS DAN TERHUBUNG .....</b>	<b>19</b>
2.1. Pendahuluan .....	19
2.2. Permodel Bisnis .....	20
2.3. Komponen Utama Model Bisnis Produk Cerdas Dan Terhubung .....	22
2.4. Kerangka Permodelan Bisnis .....	23
<b>BAB 3 SISTEM PRODUKSI LEAN UNTUK INDUSTRI 4.0 .....</b>	<b>31</b>
3.1. Pendahuluan .....	31
3.2. Permodelan Lean Management Dan Foresight .....	33
3.3. Aplikasi Lean Production Berbasis Otomatisasi .....	38
<b>BAB 4 PERMODELAN DAN PERSIAPAN DALAM STRATEGI INDUSTRI 4.0 .....</b>	<b>43</b>
4.1. Pendahuluan .....	43
4.2. Model Kematangan Dan Kesiapan Industri 4.0 Yang Ada .....	44
4.3. Perbandingan Model Kematangan Dan Kesiapan Industri 4.0 Yang Ada .....	49
4.4. Model Kematangan Industri 4.0 .....	49
4.5. Aplikasi Di Sektor Ritel .....	56
<b>BAB 5 PETA JALAN TEKNOLOGI UNTUK INDUSTRI 4.0 .....</b>	<b>59</b>
5.1. Pendahuluan .....	59
5.2. Kerangka Permodelan Peta Jalan Teknologi .....	61
<b>BAB 6 PORTOFOLIO PROYEK DI ERA TRANSFORMASI DIGITAL .....</b>	<b>67</b>
6.1. Pendahuluan .....	67
6.2. Transformasi Digital .....	68
6.3. Model Optimasi Portofolio Proyek .....	72
6.4. Aplikasi .....	74
<b>BAB 7 PENGEMBANGAN BAKAT UNTUK INDUSTRI 4.0 .....</b>	<b>79</b>
7.1. Pendahuluan .....	79
7.2. Persyaratan Keterampilan Di Dunia Digital .....	82
7.3. Praktik Pengembangan Bakat Untuk Industri 4.0 .....	86
<b>BAB 8 PERUBAHAN PERAN PENDIDIKAN TEKNIK DI ERA INDUSTRI 4.0 .....</b>	<b>92</b>
8.1. Pendahuluan .....	92
8.2. Persyaratan Pendidikan Baru .....	93

8.3.	Persyaratan Pendidikan Teknik Baru .....	97
<b>BAB 9</b>	<b>ANALISIS DATA DALAM MANUFAKTUR .....</b>	<b>102</b>
9.1.	Pendahuluan .....	102
9.2.	Manufaktur Dalam Literatur .....	103
9.3.	Analisis Prediktif Dalam Manufaktur .....	109
9.4.	Perhitungan Akurasi Prakiraan .....	111
9.5.	Contoh Adaptasi Prediktif .....	112
<b>BAB 10</b>	<b>INTERNET OF THINGS DAN PROPOSISI NILAI BARU .....</b>	<b>116</b>
10.1.	Pendahuluan .....	116
10.2.	Internet Of Things (IoT) .....	117
10.3.	Contoh Penciptaan Nilai IoT Di Berbagai Industri .....	120
10.4.	Hambatan Implementasi IoT .....	125
<b>BAB 11</b>	<b>KEMAJUAN DALAM ROBOTIKA DI ERA INDUSTRI 4.0 .....</b>	<b>128</b>
11.1.	Pendahuluan .....	128
11.2.	Komponen Teknologi Robot Terkini .....	130
11.3.	Aplikasi Robot Industri .....	135
<b>BAB 12</b>	<b>PERAN AUGMENTED REALITY DI ERA INDUSTRI 4.0 .....</b>	<b>139</b>
12.1.	Pendahuluan .....	139
12.2.	Teknologi Perangkat Keras Dan Perangkat Lunak AR .....	140
12.3.	Aplikasi Industri AR .....	141
<b>BAB 13</b>	<b>TEKNOLOGI DAN APLIKASI MANUFAKTUR ADITIF .....</b>	<b>151</b>
13.1.	Pendahuluan .....	151
13.2.	Teknologi Manufaktur Aditif (AM) .....	152
13.3.	Keuntungan Dan Kerugian Manufaktur Aditif .....	153
13.4.	Bidang Aplikasi Manufaktur Aditif .....	154
13.5.	Dampak Teknik Manufaktur Aditif Terhadap Masyarakat .....	160
<b>BAB 14</b>	<b>APLIKASI PABRIK VIRTUAL .....</b>	<b>163</b>
14.1.	Pendahuluan .....	163
14.2.	Pabrik Virtual Komersial .....	165
14.3.	Perangkat Lunak Pabrik Virtual .....	168
14.4.	Keterbatasan Perangkat Lunak Komersial .....	173
<b>BAB 15</b>	<b>JEJAK DIGITAL MELALUI RANTAI NILAI PRODUKSI .....</b>	<b>175</b>
15.1.	Pendahuluan .....	175
15.2.	Teknologi Ketertelusuran Digital .....	176
15.3.	Arsitektur Sistem Jejak Digital .....	179
15.4.	Aplikasi Sistem .....	181
15.5.	Manajemen Proyek Dalam Ketertelusuran Digital .....	183
<b>BAB 16</b>	<b>KEAMANAN SIBER DI ERA INDUSTRI 4.0 .....</b>	<b>187</b>
16.1.	Pendahuluan .....	187
16.2.	Ancaman Keamanan Dan Kerentanan IoT .....	190
16.3.	Tantangan Industri .....	193

16.4. Evolusi Serangan Siber .....	195
16.5. Kasus Serangan Siber Dan Solusinya .....	196
16.6. Prinsip Strategis Keamanan Siber .....	200
16.7. Langkah-Langkah Keamanan Siber .....	201
<b>Daftar Pustaka .....</b>	<b>203</b>

## **BAB 1**

### **KERANGKA KONSEPTUAL UNTUK INDUSTRI 4.0**

Revolusi Industri memunculkan banyak perbaikan dalam sistem manufaktur dan layanan. Karena perubahan yang luar biasa dan cepat muncul dalam manufaktur dan teknologi informasi, sinergi yang muncul dari integrasi kemajuan dalam teknologi informasi, layanan, dan manufaktur terwujud. Kemajuan ini menghasilkan peningkatan produktivitas baik dalam sistem layanan maupun lingkungan manufaktur.

Dalam beberapa tahun terakhir, perusahaan manufaktur dan sistem layanan telah menghadapi tantangan besar karena perlunya koordinasi dan koneksi konsep-konsep yang mengganggu seperti komunikasi dan jaringan (Internet Industri), sistem tertanam (Sistem Fisik Siber), robotika adaptif, keamanan siber, analisis data dan kecerdasan buatan, dan manufaktur aditif. Kemajuan ini menyebabkan perluasan perkembangan dalam manufaktur dan teknologi informasi, dan teknologi yang terkoordinasi dan komunikatif ini dibentuk menjadi istilah Industri 4.0 yang pertama kali diumumkan oleh pemerintah Jerman sebagai salah satu inisiatif utama dan menyoroti revolusi industri baru.

Hasilnya, Industri 4.0 menunjukkan sistem yang lebih produktif; perusahaan telah mencari adaptasi yang tepat dari istilah ini. Di sisi lain, kriteria pencapaian dan pengukuran kinerja transformasi ke Industri 4.0 masih belum pasti. Selain itu, peta jalan implementasi yang terstruktur dan sistematis masih belum jelas. Dengan demikian, dalam studi ini, relevansi mendasar antara prinsip desain dan teknologi diberikan dan kerangka kerja konseptual untuk Industri 4.0 diusulkan mengenai dasar-dasar produk pintar dan pengembangan proses pintar.

#### **1.1 PENDAHULUAN**

Sejak Revolusi Industri pertama muncul setelah mesin uap, perubahan radikal berikut muncul seperti mesin digital, lingkungan manufaktur otomatis, dan menyebabkan dampak signifikan pada produktivitas. Alasan utama dan pemicu perubahan radikal adalah individualisasi permintaan, efisiensi sumber daya, dan periode pengembangan produk yang singkat. Dengan demikian, perkembangan besar seperti Web 2.0, Aplikasi, Ponsel Pintar, laptop, printer 3D muncul dan situasi ini menciptakan potensi besar dalam pengembangan ekonomi.

Baru-baru ini, di Uni Eropa, hampir 17% PDB dijelaskan oleh industri, yang juga menghasilkan sekitar 32 juta peluang kerja. Berbeda dengan potensi ini, perusahaan saat ini menghadapi tantangan dalam pengambilan keputusan yang cepat untuk meningkatkan produktivitas. Salah satu contoh dapat diberikan dari proses transformasi menuju mesin dan layanan otomatis, yang memimpin koordinasi dan koneksi sistem kompleks yang terdistribusi. Untuk tujuan ini, lebih banyak sistem tertanam perangkat lunak yang digunakan dalam produk dan sistem industri, oleh karena itu, metode prediktif harus disusun dengan algoritma cerdas untuk mendukung infrastruktur elektronik.

Sejalan dengan kebutuhan mekanisme koordinasi, sinergi yang muncul dari integrasi

kemajuan dalam teknologi informasi, layanan, dan manufaktur membentuk konsep baru, Industri 4.0, yang pertama kali dideklarasikan oleh pemerintah Jerman selama Pameran Hannover pada tahun 2011 sebagai awal dari revolusi industri ke-4. Seperti yang dijelaskan dalam laporan Bitkom, VDMA, ZVEI, semakin banyak elemen fisik yang memperoleh penerima seperti sensor dan tag sebagai bentuk teknologi konstruktif dan elemen-elemen ini telah terhubung setelah itu, peningkatan yang terlihat di bidang Internet of Things.

Selain itu, koneksi perangkat elektronik dilakukan sebagai bagian dari sistem terdistribusi untuk menyediakan aksesibilitas semua informasi terkait dalam pemrosesan waktu nyata. Selain itu, kemampuan untuk memperoleh pola dari data kapan saja memicu prediksi perilaku sistem yang lebih tepat dan menyediakan kontrol otonom. Semua keadaan ini memengaruhi proses bisnis dan manufaktur saat ini sementara model bisnis baru bermunculan. Oleh karena itu, penantang bagi perusahaan industri modern muncul sebagai rantai nilai yang lebih kompleks yang memerlukan standarisasi proses manufaktur dan bisnis serta hubungan yang lebih erat antara para pemangku kepentingan. Istilah Industri 4.0 sepenuhnya berhadapan dengan berbagai konsep termasuk peningkatan mekanisasi dan otomatisasi, digitalisasi, jaringan, dan miniaturisasi.

Selain itu, Industri 4.0 bergantung pada integrasi jaringan penciptaan nilai yang dinamis sehubungan dengan integrasi sistem dasar fisik dan sistem perangkat lunak dengan cabang dan sektor ekonomi lain, dan juga, dengan industri dan jenis industri lain. Menurut konsep Industri 4.0, penelitian dan inovasi, arsitektur referensi, standarisasi, dan keamanan sistem jaringan adalah dasar untuk menerapkan infrastruktur Industri 4.0. Transformasi ini dapat dimungkinkan dengan menyediakan substruktur yang memadai yang didukung oleh sensor, mesin, tempat kerja, dan sistem teknologi informasi yang berkomunikasi satu sama lain terlebih dahulu dalam satu perusahaan dan tentu saja dengan sistem komunikasi lainnya. Jenis sistem ini disebut sistem siber fisik dan koordinasi antara sistem ini disediakan oleh protokol dan standar berbasis Internet.

Seperti yang terlihat dari peningkatan dalam manajemen produksi dan layanan, Industri 4.0 berfokus pada pembentukan sistem cerdas dan komunikatif termasuk komunikasi antarmesin dan interaksi manusia-mesin. Sekarang dan di masa mendatang, perusahaan harus berurusan dengan pembentukan manajemen aliran data yang efektif yang bergantung pada perolehan dan penilaian data yang diekstraksi dari interaksi sistem cerdas dan terdistribusi. Gagasan utama perolehan dan pemrosesan data adalah pemasangan sistem pengendalian diri yang memungkinkan pengambilan tindakan pencegahan sebelum pengoperasian sistem terganggu. Dengan demikian, perusahaan telah mencari adaptasi Industri 4.0 yang tepat.

Dalam hal ini, transformasi ke Industri 4.0 didasarkan pada delapan kemajuan teknologi mendasar: robotika adaptif, analisis data dan kecerdasan buatan (analisis data besar), simulasi, sistem tertanam, komunikasi dan jaringan seperti Internet Industri, sistem cloud, manufaktur aditif dan teknologi virtualisasi. Teknologi-teknologi ini harus didukung dengan teknologi dasar seperti keamanan siber, sensor dan aktuator, teknologi RFID dan RTLS, serta teknologi seluler dan tujuh prinsip desain yang disebut sebagai manajemen data waktu nyata, interoperabilitas, virtualisasi, desentralisasi, ketangkasan, orientasi layanan, dan proses bisnis terintegrasi.

Prinsip-prinsip desain dan teknologi ini memungkinkan para praktisi untuk meramalkan kemajuan adaptasi Industri 4.0. Di sisi lain, peta jalan implementasi yang terstruktur dan sistematis untuk transformasi ke Industri 4.0 masih belum pasti.

Dengan demikian, dalam studi ini, relevansi mendasar antara prinsip-prinsip desain dan teknologi pendukung diberikan dan kerangka kerja konseptual untuk Industri 4.0 diusulkan mengenai hubungan mendasar antara produk pintar dan proses pintar. Pertama, teknologi pendukung didefinisikan dengan memberikan kasus implementasi tertentu. Dalam hal ini, prinsip-prinsip desain dicocokkan dengan teknologi yang ada. Selain itu, kerangka kerja konseptual untuk peta jalan strategis Industri 4.0 disajikan, yang terdiri dari langkah-langkah berlapis dan multifungsi, yang merupakan kontribusi utama dari studi ini. Sebagai kesimpulan, arah masa depan dan kemungkinan perbaikan untuk Industri 4.0 diberikan secara singkat.

## **1.2 KONSEP DAN KOMPONEN UTAMA INDUSTRI 4.0**

Dalam beberapa tahun terakhir, Industri 4.0 telah menarik perhatian besar dari perusahaan manufaktur dan sistem layanan. Di sisi lain, tidak ada definisi pasti tentang Industri 4.0 dan tentu saja, tidak ada pemanfaatan pasti dari teknologi yang muncul untuk memulai transformasi Industri 4.0. Industri 4.0 terutama terdiri dari integrasi fasilitas produksi, rantai pasokan, dan sistem layanan untuk memungkinkan pembentukan jaringan bernilai tambah. Dengan demikian, teknologi yang muncul seperti analisis data besar, robot otonom (adaptif), infrastruktur fisik siber, simulasi, integrasi horizontal dan vertikal, Internet Industri, sistem cloud, manufaktur aditif, dan realitas tertambah diperlukan untuk adaptasi yang sukses. Hal terpenting adalah penggunaan Internet Industri yang meluas dan koneksi alternatif yang memastikan jaringan perangkat yang tersebar.

Sebagai konsekuensi dari perkembangan Internet Industri, dengan kata lain Internet Industri untuk Segala, sistem terdistribusi seperti jaringan sensor nirkabel, sistem cloud, sistem tertanam, robot otonom, dan manufaktur aditif telah terhubung satu sama lain. Selain itu, robot adaptif dan sistem siber fisik menyediakan lingkungan berbasis komputer terpadu yang harus didukung oleh simulasi dan visualisasi tiga dimensi (3D) serta pencetakan. Di atas segalanya, seluruh sistem harus melibatkan analisis data dan berbagai alat koordinasi untuk melakukan pengambilan keputusan waktu nyata dan otonomi untuk proses manufaktur dan layanan.

Saat membangun kerangka kerja, jaringan sensor, alat pemrosesan waktu nyata, perangkat berbasis peran dan otonom saling terhubung satu sama lain untuk pengumpulan data sistem manufaktur dan layanan secara waktu nyata. Untuk memahami kerangka kerja yang diusulkan yang dibahas dalam studi ini, bagian ini memberikan informasi terperinci tentang teknologi pendukung dan prinsip desain yang digarisbawahi untuk implementasi Industri 4.0 dengan kasus dan contoh kehidupan nyata. Setelah itu, kerangka kerja yang diusulkan disajikan sehubungan dengan prinsip desain dan teknologi pendukung untuk memperoleh sistem operasional yang sadar konteks termasuk produk cerdas dan proses cerdas.

### **Keadaan terkini**

Untuk adaptasi sistem yang sukses terhadap Industri 4.0, tiga fitur harus diperhitungkan: (1) integrasi horizontal melalui rantai nilai, (2) integrasi vertikal dan jaringan sistem manufaktur atau layanan, dan (3) rekayasa menyeluruh dari keseluruhan rantai nilai. Integrasi vertikal memerlukan hubungan silang yang cerdas dan digitalisasi unit bisnis di berbagai tingkat hierarki dalam organisasi. Oleh karena itu, integrasi vertikal memungkinkan transformasi ke pabrik pintar dengan cara yang sangat fleksibel dan menyediakan produksi ukuran lot kecil dan produk yang lebih disesuaikan dengan tingkat keuntungan yang dapat diterima.

Misalnya, mesin pintar menciptakan ekosistem otomatis mandiri yang dapat disubordinasikan secara dinamis untuk memengaruhi produksi berbagai jenis produk; dan sejumlah besar data diproses untuk mengoperasikan proses manufaktur dengan mudah. Di sisi lain, integrasi horizontal memperoleh seluruh penciptaan nilai antara organisasi untuk memperkaya siklus hidup produk menggunakan sistem informasi, manajemen keuangan yang efisien, dan aliran material.

Integrasi horizontal dan vertikal memungkinkan pembagian data secara real-time, produktivitas dalam alokasi sumber daya, unit bisnis yang bekerja secara koheren, dan perencanaan yang akurat yang sangat penting bagi perangkat yang terhubung dalam istilah Industri 4.0. Terakhir, rekayasa menyeluruh membantu proses pengembangan produk melalui integrasi digital teknologi pendukung yang mempertimbangkan persyaratan pelanggan, desain produk, pemeliharaan, dan daur ulang.

### **Teknologi Pendukung**

Untuk keberhasilan implementasi transformasi Industri 4.0, tiga inti dan sembilan teknologi fundamental diperlukan untuk menjadi bagian dari keseluruhan sistem. Di bagian ini, informasi terperinci mengenai teknologi pendukung ini diberikan untuk pemahaman yang lebih baik mengenai kerangka kerja yang diusulkan.

*Robot adaptif:* Sebagai konsekuensi dari kombinasi mikroprosesor dan metodologi AI, produk, mesin, dan layanan menjadi lebih cerdas dalam hal tidak hanya memiliki kemampuan komputasi, komunikasi, dan kontrol, tetapi juga memiliki otonomi dan sosialitas. Dalam hal ini, robot adaptif dan fleksibel yang dikombinasikan dengan penggunaan kecerdasan buatan menyediakan kemudahan pembuatan berbagai produk dengan mengenali segmen bawah setiap bagian. Segmentasi ini bertujuan untuk menyediakan biaya produksi yang lebih rendah, mengurangi waktu produksi, dan waktu tunggu dalam operasi.

Selain itu, robot adaptif berguna dalam sistem manufaktur terutama dalam fase desain, manufaktur, dan perakitan. Misalnya, tugas yang diberikan dibagi menjadi sub-masalah yang lebih sederhana dan kemudian disusun menjadi serangkaian modul untuk menyelesaikan setiap sub-masalah. Di akhir setiap penyelesaian subtugas, integrasi modul untuk mencapai solusi optimal sangatlah penting. Salah satu subteknologi yang mendasari robot adaptif dapat diberikan dari robot ko-evolusi yang secara energetik otonom dan memiliki pemikiran berbasis skenario serta prinsip kerja yang berfokus pada reaksi.

Contoh kehidupan nyata dapat diberikan: robot bernama Yumi yang dibuat untuk

operasi manufaktur ABB. Yumi memiliki penanganan yang fleksibel, mekanisme pengumpanan komponen, sistem deteksi lokasi komponen berbasis kamera, dan kontrol gerakan canggih untuk adaptasi proses produksi ABB sebagaimana dilaporkan dalam ABB Contact (2014).

Contoh lain dapat diberikan sebagai robot Kuka KR Quantec yang memiliki sekumpulan pendistribusi tugas dan material produksi lainnya dengan mengirimkan kotak KANBAN yang dipesan dari rak gudang pusat. “Workerbot”, yang dibuat dari pi4, memiliki anatomi humanoid dengan dua lengan, tubuh bagian atas yang berputar, dan didukung oleh kamera serta sistem pemrosesan gambar. Mekanisme gabungan ini memungkinkan identifikasi aktivitas berbasis memori menggunakan pengenalan independen dari posisi dan karakteristik komponen produksi sebelumnya.

Karakteristik umum aplikasi ini diberikan sebagai berikut:

- Terhubung melalui Ethernet atau Wi-Fi untuk transmisi data berkecepatan tinggi
- Integrasi mudah dalam sistem komunikasi mesin yang ada
- Pemrosesan optik dan gambar untuk pemosisian komponen
- Pengontrol robot terintegrasi
- Mekanisme pembelajaran berbasis memori atau berbasis kasus.

Sistem tertanam (Infrastruktur fisik siber): Sistem tertanam, yang disebut sebagai Sistem Fisik Siber (CPS), dapat dijelaskan sebagai teknologi pendukung untuk organisasi dan koordinasi sistem jaringan antara infrastruktur fisik dan kemampuan komputasinya. Dalam hal ini, perangkat fisik dan digital harus diintegrasikan dan dihubungkan dengan perangkat lain untuk mencapai tindakan yang terdesentralisasi. Dengan kata lain, sistem tertanam umumnya mengintegrasikan realitas fisik sehubungan dengan fungsionalitas inovatif termasuk infrastruktur komputasi dan komunikasi.

Secara umum, sistem tertanam memperoleh dua persyaratan fungsional utama: (1) tingkat jaringan tingkat lanjut untuk menyediakan pemrosesan data waktu nyata dari infrastruktur fisik dan umpan balik informasi dari struktur digital; dan (2) pemrosesan data cerdas, pengambilan keputusan, dan kemampuan komputasi yang mendukung infrastruktur fisik. Untuk tujuan ini, sistem tertanam terdiri dari teknologi RTLS, sensor, aktuator, pengontrol, dan sistem jaringan yang data atau informasinya diubah dan ditransfer dari setiap perangkat. Selain itu, perolehan informasi dapat diperoleh dari pemrosesan data dan perolehan data dalam hal penerapan kecerdasan komputasional yang didukung oleh strategi pembelajaran seperti penalaran berbasis kasus.

Contoh khusus untuk sistem tertanam dapat diamati pada alat pemeliharaan Beckhoff: Parameter proses (tegangan, waktu produksi, dll.) dari komponen mekanis dapat direkam secara digital sambil melakukan beberapa penyesuaian seperti eksperimen teknis di platform daring atau luring. Selain kasus tersebut, platform penelitian dan pembelajaran siber-fisik “CP Factory” dari Festo menyediakan akses ke teknologi dan aplikasi Industri 4.0 bagi lembaga pendidikan dan perusahaan. Bagian utama dari mekanisme (fisik) didukung oleh modul cerdas untuk komunikasi data proses—“CPS Gate”. “CPS Gate” beroperasi di dalam stasiun kerja pabrik sebagai modul “tulang punggung” untuk mengendalikan proses.

Schunk menggerakkan motor linier dengan setiap pesanan yang diprioritaskan di jalur

perakitan secara berulang untuk jaminan kualitas yang terdesentralisasi dan dokumentasi kriteria kualitas. Sistem tertanam memiliki beberapa properti yang disebutkan sebagai berikut:

- Peningkatan keselamatan operasional melalui deteksi status kritis keselamatan sebelum tingkat kepentingannya,
- Pemantauan kondisi tanpa sensor atau dengan sensor switching,
- Kontrol dan pemantauan menggunakan loop umpan balik,
- Integrasi sistematis dan terarah dari penyimpanan dan analisis data secara langsung dan interaktif pada kontrol lokal, dalam jaringan pribadi atau dalam sistem cloud publik,
- Komponen dan mesin yang fleksibel dan dapat dikonfigurasi ulang.

*Manufaktur aditif:* Manufaktur aditif adalah serangkaian teknologi baru yang menghasilkan objek tiga dimensi secara langsung dari model digital melalui proses aditif, khususnya dengan menyimpan dan menggabungkan produk dengan polimer, keramik, atau logam yang tepat. Secara rinci, manufaktur aditif dimulai dengan membentuk desain berbantuan komputer (CAD) dan pemodelan yang mengatur serangkaian fitur digital produk dan mengirimkan deskripsi item ke mesin industri.

Mesin melakukan deskripsi yang dikirimkan sebagai cetak biru untuk membentuk item dengan menambahkan lapisan material. Lapisan-lapisan, yang diukur dalam mikron, ditambahkan berkali-kali hingga muncul objek tiga dimensi. Bahan mentah dapat berupa cairan, bubuk, atau lembaran dan khususnya terdiri dari plastik, polimer lain, logam, atau keramik. Dalam hal ini, manufaktur aditif terdiri dari dua tingkatan, yaitu perangkat lunak untuk memperoleh objek 3D dan sisi akuisisi material.

Meskipun hambatan terhadap teknologi yang ada muncul terutama dalam proses produksi, terdapat properti yang tak tertandingi dengan menggunakan printer 3D dan manufaktur aditif. Misalnya, proses manufaktur aditif mengungguli mekanisme manufaktur konvensional untuk beberapa produk termasuk membentuk geometri yang awalnya tidak mungkin seperti struktur rangka kisi piramida. Jelas, mekanisme pencetakan mengurangi limbah material dengan hanya memanfaatkan material yang diperlukan.

Selain itu, sistem jaringan yang terdiri dari pemesanan, pemilihan cetakan injeksi juga diperlukan untuk memantau variabel dan parameter proses pada antarmuka tertentu. Persyaratan pelanggan juga terlibat dalam desain manufaktur dan komponen yang diperlukan untuk pembuatan komponen plastik ini dikumpulkan terlebih dahulu. Mesin cetak injeksi membungkus bilah logam dan sistem informasi untuk fitur desain menghubungkan langkah-langkah proses desain individual dengan operasi sistem manufaktur aditif yang tepat. Selain itu, fase penandaan laser juga diadopsi dalam lini produksi. Contoh nyata diambil dari ARBURG GmbH yang menangani produk plastik bervolume tinggi yang dipersonalisasi. Mesin cetak injeksi ALLROUNDER dan freeformer untuk manufaktur aditif dihubungkan melalui robot tujuh sumbu ke huruf plastik 3D menggunakan proses aditif.

*Teknologi cloud:* Pengoperasian berbasis cloud merupakan topik penting lainnya untuk kontribusi integrasi sistem jaringan dalam transformasi Industri 4.0. Istilah "cloud" mencakup komputasi cloud dan manufaktur serta desain berbasis cloud. Manufaktur cloud menyiratkan

produksi yang terkoordinasi dan terhubung yang merupakan manufaktur "tersedia sesuai permintaan".

Manufaktur berbasis permintaan menggunakan kumpulan sumber daya manufaktur terdistribusi untuk membuat dan mengoperasikan proses manufaktur siber-fisik yang dapat dikonfigurasi ulang. Di sini, tujuan utamanya adalah meningkatkan efisiensi dengan mengurangi biaya siklus hidup produk, dan memungkinkan pemanfaatan sumber daya yang optimal dengan mengatasi pekerjaan yang berfokus pada pelanggan dengan permintaan variabel. Secara komprehensif, desain berbasis cloud dan operasi manufaktur menunjukkan model pengembangan produk yang terintegrasi dan kolektif berdasarkan inovasi terbuka melalui jejaring sosial dan platform crowd-sourcing.

Sebagai konsekuensi dari kemajuan teknologi cloud seperti berkurangnya jumlah waktu reaksi, data manufaktur akan semakin banyak dipraktikkan dalam sistem cloud yang menyediakan pengambilan keputusan yang lebih berbasis data untuk sistem layanan dan produksi. Di sisi lain, menurut laporan "From Industry 4.0 to Digitizing Manufacturing" yang disampaikan oleh Manufacturing Technology Center, masalah privasi dan keamanan yang timbul dari kekurangan sistem perlu dipertimbangkan dan kedua, kebutuhan penyimpanan tambahan, opsi pembayaran, dan lokasi fisik harus diputuskan dengan hati-hati sebelumnya.

Pada saat yang sama, produktivitas meningkat di awal: contohnya adalah dari GE Digital yang mengusulkan "Brilliant Manufacturing Suite" yang menggunakan analitik cerdas untuk mengevaluasi data operasional dan efektivitas peralatan pabrik secara keseluruhan meningkat sebesar 20% atau lebih. Selain itu, platform layanan cloud industri M&M Software didasarkan pada analisis data waktu nyata dan terdiri dari sistem inti universal portal web individual. Sistem yang disebutkan dapat dioperasikan dari jarak jauh baik pada PC menggunakan browser maupun pada perangkat seluler.

Persyaratan pemrosesan berbasis cloud tercantum sebagai berikut:

- Aplikasi berbasis data bekerja pada infrastruktur berbasis cloud, dan setiap elemen rantai pasokan dan pengguna terhubung melalui sistem cloud.
- Analisis data waktu nyata untuk pemberitahuan dan ketidaknormalan menggunakan fungsi basis data cloud yang independen.
- Manfaatkan sepenuhnya big data untuk mengoptimalkan kinerja sistem sesuai dengan perubahan eksternal dan tiba-tiba.
- Pengguna memerlukan perangkat yang terhubung untuk melihat informasi yang diperlukan di cloud, dan mereka memiliki akses resmi ke aplikasi dan data yang tersedia di seluruh dunia.
- Fungsi aplikasi proaktif sebagai log shift otomatis atau log perubahan alat, melakukan kontrol umpan adaptif, mendeteksi tabrakan, memantau proses, dan banyak lagi.

### **1.3 TEKNOLOGI VIRTUALISASI (VIRTUAL REALITY (VR) DAN AUGMENTED REALITY (AR))**

Teknologi virtualisasi didasarkan pada alat AR dan VR yang berhak atas integrasi refleksi lingkungan dunia nyata yang didukung komputer dengan informasi tambahan dan berharga. Dengan kata lain, informasi virtual dapat dimasukkan ke dalam presentasi dunia nyata dengan

tujuan memperkaya persepsi manusia terhadap realitas dengan objek dan elemen yang diperbesar. Untuk tujuan ini, aplikasi VR dan AR yang ada mengaitkan antarmuka grafis dengan pandangan pengguna terhadap lingkungan saat ini.

Peran penting antarmuka pengguna grafis adalah bahwa pengguna dapat secara langsung memengaruhi representasi visual elemen dengan menggunakan perintah yang muncul di layar dan berinteraksi dengan menu-menu ini yang dirujuk oleh umpan balik ad hoc. Menurut tujuan ini, teknologi visualisasi memiliki empat persyaratan fungsional: (i) perekaman adegan, (ii) identifikasi adegan, (iii) pemrosesan adegan, (iv) visualisasi adegan. Dengan demikian, perangkat keras seperti perangkat genggam, sistem visualisasi stasioner, sistem visualisasi spasial, tampilan yang dipasang di kepala, kacamata pintar, dan lensa pintar digunakan untuk implementasi.

Di sisi lain, tantangan utama untuk adaptasi kasus visualisasi menghadirkan lingkungan dengan objek yang realistis untuk pengalaman pengguna yang lebih baik, menambahkan informasi yang diperlukan melalui metagrafik, dan memperkaya persepsi pengguna melalui saturasi dan kontras warna. Dalam hal ini, pendekatan untuk tampilan teknologi visualisasi didasarkan pada tiga fokus: (i) adaptasi berbasis video yang didukung oleh kamera yang membantu informasi tambahan, (ii) adaptasi optik yang memungkinkan pengguna memberikan informasi dengan mengenakan tampilan khusus, dan (iii) proyeksi objek yang dinyatakan.

Saat ini, teknologi visualisasi terutama diterapkan dalam berbagai bidang seperti permainan video, pariwisata, dan baru-baru ini, topik ini mulai dipertimbangkan dalam konteks membangun sistem manajemen mutu, perencanaan jalur perakitan, dan pengorganisasian logistik serta tindakan rantai pasokan untuk pabrik pintar.

Contoh spesifik dapat diberikan dari BMW Connected Drive yang memungkinkan informasi navigasi dan membantu sistem bantuan pengemudi, helm Q-Warrior untuk keperluan militer, Liver explorer untuk praktisi medis, dan Recon Jet untuk kegiatan rekreasi. Khususnya, sistem AR dan VR diadaptasi untuk penilaian mutu berbantuan komputer untuk estimasi skala, pelacakan posisi produk, dan visualisasi status produk terkini melalui antarmuka pengguna grafis. Dalam penerapan teknologi visualisasi di lantai pabrik, kacamata berbasis video (Oculus Rift), kacamata optik (C wear), dan perangkat berbasis Android, tablet berbasis video, dan proyektor spasial digunakan. Contoh terakhir dapat diberikan untuk logistik, terutama dengan mempertimbangkan operasi gudang, pengoptimalan transportasi, pengiriman jarak dekat, layanan pelanggan, dan pemeliharaan.

Dalam dunia virtual ini, operator dapat berinteraksi dengan mesin atau perangkat lain dengan menggunakannya pada representasi siber dan mengubah parameter untuk menginterpretasikan instruksi operasional dan pemeliharaan. Implementasi sistem visualisasi masa depan yang paling luar biasa adalah persyaratan solusi yang dibuat khusus untuk kolaborasi manusia dan robot serta perangkat yang lebih ramah pengguna untuk pengalaman yang lebih baik.

Teknologi visualisasi memiliki beberapa properti yang disebutkan sebagai berikut:

- Dukungan pengguna yang optimal melalui augmented reality dan gamifikasi.

- Desain antarmuka yang jauh lebih nyaman dan ramah pengguna.
- Proyeksi seluler yang menyediakan dukungan holistik dan bebas latensi.

Simulasi: Sebelum penerapan paradigma baru, sistem harus diuji dan refleksi harus dipertimbangkan dengan saksama. Dengan demikian, berbagai jenis simulasi termasuk simulasi kejadian diskrit dan gerakan 3D dapat dilakukan dalam berbagai kasus untuk meningkatkan perencanaan produk atau proses. Misalnya, simulasi dapat diadaptasi dalam pengembangan produk, pengujian dan pengoptimalan, pengembangan dan pengoptimalan proses produksi, serta desain dan peningkatan fasilitas. Contoh lain dapat diberikan dari studi Biegelbauer dkk. (2004) yang menangani penyeimbangan jalur perakitan dan perencanaan permesinan yang memerlukan penghitungan waktu siklus operasi robot dan memungkinkan keselarasan desain dan manufaktur.

Dalam perspektif Industri 4.0, simulasi dapat dievaluasi sebagai alat pendukung untuk mengikuti refleksi yang dikumpulkan dari berbagai perubahan parameter dan memungkinkan visualisasi dalam pengambilan keputusan. Oleh karena itu, alat simulasi dapat digunakan dengan teknologi dasar Industri 4.0 lainnya. Misalnya, integrasi CAD berbasis simulasi memastikan berfungsinya beberapa sistem CAD yang berbeda dengan mengubah parameter penting. Selain itu, simulasi dapat mencerminkan skenario what-if untuk meningkatkan ketahanan proses. Khususnya untuk pabrik pintar, simulasi virtual memungkinkan evaluasi aturan perencanaan otonom sesuai dengan ketahanan sistem.

Analisis Data dan Kecerdasan Buatan: Sebagai konsekuensi dari perusahaan manufaktur mulai mengadopsi teknologi informasi dan pengetahuan canggih untuk memfasilitasi aliran informasi mereka, sejumlah besar data real-time yang terkait dengan manufaktur terakumulasi dari berbagai sumber. Data yang dikumpulkan yang terjadi selama proses R&D, produksi, operasi, dan pemeliharaan meningkat dengan kecepatan eksponensial. Secara khusus, integrasi dan pemrosesan data dalam Industri 4.0 diterapkan untuk meningkatkan adaptasi yang mudah dan sangat scalable untuk analisis kinerja berbasis aliran data dari mesin dan proses jaringan.

Data muncul dalam volume besar, perlu diproses dengan cepat dan memerlukan kombinasi berbagai sumber data dalam format yang beragam. Misalnya, teknik penambangan data harus digunakan di mana data dikumpulkan dari berbagai sensor. Informasi ini membantu evaluasi status dan konfigurasi terkini dari berbagai mesin, lingkungan, dan kondisi mitra lainnya yang dapat memengaruhi produksi seperti yang terlihat di pabrik pintar. Analisis semua data tersebut dapat memberikan keuntungan kompetitif yang signifikan bagi perusahaan karena mereka dapat mengevaluasi seluruh proses secara bermakna.

Beberapa pendekatan penambangan data yang dikombinasikan dengan support vector machines, algoritma pohon keputusan, jaringan saraf, algoritma heuristik berhasil diterapkan untuk kasus klasifikasi pengelompokan dan pembelajaran mendalam. Selain itu, pendekatan penambangan data umumnya dikombinasikan dengan metode riset operasi termasuk pemrograman integer campuran dan pemrograman stokastik. Misalnya, masalah visualisasi data yang disebabkan oleh data berdimensi tinggi khususnya dihadapi dalam manajemen data besar dan untuk mengatasi masalah ini, adaptasi formulasi masalah penugasan kuadrat

diperlukan terlebih dahulu.

Tidak seperti pemrosesan data dalam basis data relasional, tiga fungsi harus dipertimbangkan untuk membangun infrastruktur data besar yang dapat beroperasi dengan sukses dengan komponen Industri 4.0: (i) Akuisisi dan integrasi data besar (ii) Pemrosesan dan penyimpanan data besar (iii) Penambangan data besar dan penemuan pengetahuan dalam basis data. Tahap akuisisi dan integrasi big data mencakup pengumpulan data dari pembaca RFID, sensor pintar, dan tag RFID, dll. Pemrosesan dan penyimpanan big data menggambarkan data waktu nyata dan non-waktu nyata sebagai bentuk data terstruktur dan tidak terstruktur melalui pembersihan, transformasi, dan integrasi.

Terakhir, penambangan big data diadopsi melalui pengelompokan, klasifikasi, asosiasi, dan prediksi menggunakan pohon keputusan, algoritma genetik, mesin vektor pendukung, dan teori himpunan kasar untuk penambangan big data dan penemuan pengetahuan. Khususnya, penambangan big data tidak hanya memerlukan pemahaman tertentu tentang aplikasi yang tepat, tetapi juga memerlukan penanganan data tidak terstruktur. Dengan demikian, sejumlah besar persiapan data termasuk menentukan variabel substansial dan mengekstraksi data yang sesuai dilakukan untuk membuat prediksi dan klasifikasi yang tepat.

#### **1.4 KOMUNIKASI DAN JARINGAN (INTERNET INDUSTRI)**

Komunikasi dan jaringan dapat digambarkan sebagai tautan antara sistem fisik dan terdistribusi yang didefinisikan secara individual. Dengan menggunakan alat dan perangkat komunikasi, mesin dapat berinteraksi untuk mencapai target yang diberikan, fokus pada penyematan sensor cerdas dalam lingkungan dan proses dunia nyata. Industrial Internet of Things (IIoT) mengandalkan objek cerdas dan jaringan cerdas serta memungkinkan integrasi objek fisik ke jaringan dalam proses manufaktur dan layanan. Dengan kata lain, tujuan utama IIoT adalah menyediakan komputer dan mesin untuk melihat dan merasakan aplikasi dunia nyata yang dapat menyediakan konektivitas kapan saja, di mana saja bagi siapa saja untuk apa saja.

Persyaratan utama untuk komunikasi dan jaringan tercantum sebagai (i) komputasi terdistribusi dan komputasi paralel untuk pemrosesan data, (ii) Protokol Internet (IP), (iii) teknologi komunikasi, (iv) perangkat tertanam termasuk tag RFID atau Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) dan (v) aplikasi. Selain persyaratan ini, Uckelmann dkk. (2011) menambahkan Internet of People dan Intranet/Extranet of Things untuk mencerminkan integritas bagian internal bisnis di dalamnya dan meningkatkan orientasi layanan dengan kesinambungan perangkat lain yang efektif. Di sisi lain, isu utama untuk periode integrasi adalah konstruksi standar untuk komunikasi berbagai perangkat. Perusahaan juga menghadapi masalah lain, kelemahan keamanan, seperti yang disadari dari masalah privasi.

Berkat kemajuan terkini dalam penurunan biaya untuk jaringan sensor, NFC, RFID, dan teknologi nirkabel, komunikasi dan jaringan yang digunakan untuk IIoT tiba-tiba menjadi topik yang menarik bagi industri dan pengguna akhir. Potensi IIoT sangat signifikan: diprediksi bahwa jumlah IIoT akan mencapai potensi sebesar 50 miliar pada tahun 2020, yang menunjukkan skalabilitas IoT. Penentuan status fisik objek melalui sensor dan integrasi teknologi Web 2.0

dapat menyebabkan pengumpulan dan pemrosesan data operasional yang sangat besar, memungkinkan respons waktu nyata sebagai reaksi terhadap status berbagai hal. Saat ini, interoperabilitas dengan platform pemrosesan data besar dapat menyediakan layanan berbasis agen, analitik waktu nyata, dan sistem intelijen bisnis yang penting untuk jaringan.

Mempertimbangkan kemajuan manufaktur yang didukung oleh teknologi komunikasi dan jaringan, industri manufaktur siap untuk meningkatkan proses produksi dengan analitik data besar untuk memanfaatkan kinerja komputasi yang lebih tinggi dengan standar terbuka dan mencapai ketersediaan pengetahuan industri sebelumnya. Sebagai hasil dari penetrasi intelijen manufaktur, produsen dapat meningkatkan kualitas, meningkatkan hasil manufaktur. Pengetahuan ini memberikan wawasan yang lebih baik untuk mendeteksi akar penyebab masalah produksi dan pemetaan cacat, memantau kinerja mesin dan mengurangi kegagalan mesin dan waktu henti. Oleh karena itu, IIoT atau sistem komunikatif tidak hanya dianggap sebagai teknologi Industri 4.0 tetapi juga dievaluasi sebagai "penutup" yang berisi banyak fitur dari alat Industri 4.0.

Contoh dapat diberikan dari pemeliharaan prediktif: Pemeliharaan prediktif yang berkelanjutan mencakup evaluasi mekanis dari proses produksi seperti peringkat motor, jumlah pompa dan katup, panjang sabuk, pencitraan termal dan analisis getaran dasar. Dengan demikian, sistem terintegrasi harus memproses data dengan mempertimbangkan data historis yang diambil dari sensor dan kondisi lingkungan lainnya seperti kualitas material, komentar material yang dikumpulkan dari pengguna lain.

Pengumpulan data dapat didukung dengan menggunakan teknologi Web 2.0 dan penggalan pengetahuan dari data yang terkumpul dapat diubah menjadi "know how" organisasi. Proses ini memerlukan bantuan analisis big data dan tentunya, sistem pelacakan waktu nyata harus diterapkan dengan mempertimbangkan dua cara: (i) pengumpulan data (ii) pemesanan ke mesin atau layanan menggunakan pengetahuan yang muncul dari analisis big data. Atas dasar ini, komunikasi dan jaringan dapat dievaluasi sebagai teknologi inklusif yang mendukung fungsi alat Industri 4.0 lainnya seperti analisis big data, simulasi, dan sistem tertanam.

Sejauh ini, kita membahas teknologi pendukung untuk Industri 4.0 secara terperinci. Teknologi ini memerlukan struktur fundamental agar implementasinya berhasil. Oleh karena itu, teknologi RTLS dan RFID, keamanan siber, sensor dan aktuator, serta teknologi seluler merupakan infrastruktur untuk teknologi pendukung.

*Teknologi RTLS dan RFID:* Pabrik Pintar memiliki beberapa operasi penting seperti logistik cerdas, transportasi, dan penyimpanan dengan memenuhi koordinasi yang efisien antara sistem tertanam dan logistik informasi. Operasi ini meliputi identifikasi, deteksi lokasi, dan pemantauan kondisi objek dan sumber daya dalam organisasi dan di seluruh perusahaan menggunakan teknologi Auto-ID.

Agregasi dan pemrosesan data waktu nyata yang dikumpulkan dari proses produksi dan berbagai sumber daya lingkungan membantu integrasi fungsi organisasi dan memungkinkan pengambilan keputusan sendiri dari mesin dan perangkat cerdas lainnya. Dengan demikian, identifikasi frekuensi radio (RFID) dan sistem lokasi waktu nyata (RTLS) dapat menghasilkan

nilai dalam operasi manufaktur dan logistik sebagaimana Uckelmann (2008) menjelaskan konsep dasar sistem pemantauan waktu nyata dengan cara berikut:

- Identifikasi—terutama RFID dengan pembacaan tunggal dan massal,
- Penentuan lokasi—RTLS seperti GPS dan lainnya,
- Penginderaan—misalnya sensor suhu dan kelembapan.

Dalam hal ini, kemungkinan pelacakan berbasis barang—untuk proses logistik (misalnya pengendalian barang masuk) dan juga penting untuk proses produksi (misalnya pengendalian komponen yang dirakit dengan benar)- memastikan otomatisasi proses yang ada dan pembuatan ulang komponen. Dengan demikian, praktisi banyak mengadaptasi teknologi berbasis RTLS dan RFID untuk keberhasilan implementasi pabrik dan proses cerdas.

Misalnya, Hologram Company RAKO GmbH menerapkan label identifikasi cerdas yang memungkinkan identifikasi elektronik produk individual dengan mudah dan andal baik pada produk itu sendiri maupun pada kemasan. Label yang digunakan di pabrik mesin digital HP memiliki nomor seri unik seperti kode matriks data, kode QR, atau kode batang standar. Contoh lain dapat diberikan dari jalur perakitan canggih untuk mesin pembersih lantai Alfred Kärcher GmbH yang menggunakan kode QR yang disematkan dengan chip RFID untuk melacak produk sejak awal produksi. Dalam kasus ini, data dibacakan di setiap stasiun kerja untuk mengikuti petunjuk perakitan terperinci yang ditampilkan pada monitor di stasiun kerja tertentu.

Hasil dari sistem berbasis RTLS dan RFID ditampilkan sebagai berikut:

- Produksi produk yang dioptimalkan proses dalam sejumlah besar versi
- Peningkatan fungsionalitas dan fleksibilitas jalur perakitan
- Tingkat transparansi data yang tinggi
- Aliran data waktu nyata untuk memungkinkan dukungan cepat bagi pekerja.

Keamanan siber: Seperti yang disebutkan di bagian sebelumnya, transformasi Industri 4.0 memerlukan aktivitas pengumpulan dan pemrosesan data yang intensif. Dengan demikian, keamanan proses penyimpanan dan transfer data merupakan konsep mendasar bagi perusahaan. Keamanan harus disediakan baik dalam teknologi cloud, mesin, robot, dan sistem otomatis dengan mempertimbangkan isu-isu berikut:

- Keamanan teknologi ekspor data
- Peraturan privasi dan standarisasi protokol komunikasi
- Tingkat otorisasi pribadi untuk berbagi informasi
- Deteksi dan reaksi terhadap perubahan yang tidak terduga dan akses tidak sah oleh algoritma standar.

Untuk menghindari hasil dari isu-isu ini, pemulihan operasional, edukasi pengguna akhir, keamanan jaringan, dan keamanan informasi harus dipastikan melalui respons insiden siber, pemulihan operasi kritis, dan program deteksi tingkat otorisasi. Tindakan pencegahan lainnya dapat berupa kontrol akses akun pengguna, firewall, sistem deteksi intrusi, dan uji penetrasi yang menggunakan pemindai kerentanan.

Contoh nyata dapat diberikan seperti CodeMeter dari Wibu-Systems AG yang mekanisme perlindungan IP-nya mencegah penyalinan ilegal dan rekayasa balik perangkat lunak, pencurian data produksi, dan pemalsuan produk; integritas kode mesin menggagalkan

pemalsuan, deteksi Freud, dan identifikasi serangan siber. Selain itu, penghitung tersembunyi yang ada di dalam lisensi perangkat lunak mengontrol produksi volume, memastikan hanya batch yang teridentifikasi yang diproduksi. Seluruh sistem keamanan siber menyediakan komunikasi jarak jauh yang diadaptasi dengan menggunakan rantai sertifikat dan dikombinasikan dengan tanda tangan digital dan membantu keamanan titik akhir untuk sensor, perangkat, dan mesin.

Manfaat sistem keamanan siber diberikan sebagai berikut:

- Algoritma enkripsi untuk perlindungan berbasis perangkat keras,
- Protokol komunikasi tepercaya antara sensor, perangkat, dan mesin yang diaktifkan dengan menggunakan tanda tangan digital dan sertifikat,
- Model lisensi yang fleksibel dan deteksi tingkat otorisasi,
- Otomatisasi kantor pusat yang lebih cepat dengan integrasi lisensi yang mulus di semua sistem CRM, ERP, dan e-commerce terkemuka.

### **Sensor Dan Actuator**

Sensor dan aktuator adalah teknologi dasar untuk sistem tertanam karena seluruh sistem memperoleh unit kontrol, biasanya satu atau lebih mikrokontroler, yang memantau sensor dan aktuator yang diperlukan untuk berinteraksi dengan dunia nyata. Dalam adaptasi industri Industri 4.0, sistem tertanam juga terdiri dari unit kontrol, beberapa sensor dan aktuator, yang terhubung ke unit kontrol melalui bus lapangan. Unit kontrol melakukan fungsi pemrosesan sinyal dalam sistem tersebut. Karena sensor dan aktuator pintar telah dikembangkan untuk kondisi industri, sensor menangani pemrosesan sinyal dan aktuator secara independen memeriksa status produksi terkini, dan memperbaikinya, jika perlu. Sensor ini mengirimkan datanya ke unit kontrol pusat, misalnya melalui bus lapangan. Dalam hal ini, sensor dan aktuator dapat didefinisikan sebagai elemen inti untuk seluruh sistem tertanam.

Contoh adaptasi sensor dan aktuator terhadap implementasi Industri 4.0 dapat dilihat dari pneumatik cerdas yang diaktualisasikan dari AVENTICS GmbH. Dalam hal ini, seri Advanced Valve (AV) diadaptasi dengan katup pneumatik, sensor, atau aktuator yang terhubung ke elektronik katup. Koneksi ini menghubungkan sistem tertanam ke kontrol tingkat tinggi melalui adaptasi IIoT. AES mendukung semua fieldbus konvensional dan protokol Ethernet untuk aliran data yang lancar guna menerapkan pemeliharaan preventif. Contoh lain dapat dilihat dari Bosch GmbH yang memungkinkan sistem memantau kualitas produk dalam rantai pasokan.

Dalam hal ini, pengemasan transportasi dilengkapi dengan sensor Bosch terintegrasi yang terhubung ke sistem cloud Bosch IoT. Sensor tersebut terus merekam data yang relevan dengan kualitas produk, seperti suhu, guncangan, atau kelembapan. Manfaat sensor dan aktuator adalah:

- Pelacakan waktu nyata di sepanjang seluruh sistem produksi atau layanan
- Dokumentasi dan pengumpulan data berkelanjutan untuk mendukung analisis big data, pembelajaran mendalam, dan ekstraksi pengetahuan
- Ketersediaan sistem yang diperkaya melalui pemantauan kondisi.

*Teknologi seluler:* Perangkat seluler mengalami kemajuan signifikan setelah perangkat ini

pertama kali diperkenalkan dan kini jauh lebih dari sekadar alat komunikasi dasar. Perangkat ini memastikan penerimaan dan pemrosesan sejumlah besar informasi melalui internet dan dilengkapi dengan kamera dan mikrofon berkualitas tinggi, yang memungkinkannya untuk merekam dan mengirimkan informasi.

Mempertimbangkan penerapan komunikasi dan jaringan dalam adaptasi Industri 4.0, konektivitas ke benda mati memungkinkan perusahaan untuk berkomunikasi satu sama lain. Ketika perangkat seluler menjadi mendukung internet dan diperkaya oleh teknologi Wi-Fi, perangkat tersebut akan menggunakan platform yang sama dengan peralatan proses lainnya.

Situasi ini menyiratkan bahwa perangkat seluler dapat menerima dan mengirimkan data terkait proses terlebih dahulu, dan memungkinkan pengguna untuk mengatasi masalah saat mereka mengatasi pengambilan keputusan secara waktu nyata. Dengan menggunakan teknologi seluler, masalah kini dapat dikenali dan ditangani lebih cepat karena informasi bergerak dengan kecepatan lebih tinggi di posisi yang tepat. Perangkat seluler kini digunakan secara praktis dan mampu berinteraksi dengan peralatan proses, material, barang jadi, dan suku cadang melalui IIoT.

Sebelum menerapkan Industri 4.0, prinsip desain harus diperhatikan. Prinsip desain menyediakan adaptasi menyeluruh dari seluruh sistem dan memungkinkan koordinasi antara komponen Industri 4.0, yang dibahas di bagian berikut. Ada tujuh prinsip desain yang muncul dalam penerapan dan implementasi Industri 4.0: Kelincahan, Interoperabilitas, Virtualisasi, Desentralisasi, Manajemen data waktu nyata, Orientasi Layanan, dan Proses bisnis terintegrasi. Interoperabilitas menyiratkan komunikasi komponen sistem fisik siber satu sama lain menggunakan Internet Industri dan proses standarisasi reguler untuk menciptakan pabrik pintar. Selain itu, virtualisasi memungkinkan pemantauan seluruh sistem, adaptasi sistem baru, dan perubahan sistem menggunakan alat simulasi atau realitas tertambah.

Desentralisasi adalah istilah kunci untuk pengambilan keputusan sendiri oleh mesin dan bergantung pada pembelajaran dari peristiwa dan tindakan sebelumnya. Manajemen data waktu nyata adalah penelusuran dan pelacakan sistem dengan pemantauan daring untuk mencegah kekurangan sistem saat terjadi kegagalan. Orientasi layanan adalah kepuasan adaptasi persyaratan pelanggan terhadap keseluruhan sistem dengan menggunakan perspektif mengintegrasikan subsistem internal dan eksternal.

Proses bisnis terintegrasi adalah hubungan antara sistem fisik dan platform perangkat lunak dengan mengaktifkan mekanisme komunikasi dan koordinasi yang dibantu oleh layanan manajemen data perusahaan dan jaringan yang terhubung. Prinsip terakhir, ketangkasan berarti fleksibilitas sistem terhadap perubahan persyaratan dengan mengganti atau meningkatkan modul terpisah berdasarkan antarmuka perangkat lunak dan perangkat keras standar. Mempertimbangkan prinsip-prinsip ini, akademisi dapat mencari implementasi dan kerangka kerja lebih lanjut untuk Industri 4.0 dan praktisi akan dapat mengimplementasikan komponen Industri 4.0 ke sistem otonom dengan benar.

## **1.5 KERANGKA KERJA YANG DIUSULKAN UNTUK INDUSTRI 4.0**

Motivasi utama Industri 4.0 adalah koneksi dan integrasi sistem manufaktur dan

layanan untuk memberikan efektivitas, kemampuan beradaptasi, kerja sama, koordinasi, dan efisiensi, sebagaimana yang diwujudkan dari prinsip-prinsip desain. Oleh karena itu, korelasi antara prinsip-prinsip desain dan teknologi yang ada dijelaskan dalam Tabel 1.1 untuk pemahaman yang lebih baik tentang kerangka kerja yang diusulkan.

**Tabel 1.1** Kategorisasi teknologi Industri 4.0 dan prinsip desain

Teknologi	Prinsip						
	(1) Manajemen data (Pengumpulan/Pemrosesan/ Analisis/Inferensi)	(2) Interoperabilitas	(3) Virtualisasi	(4) Desentralisasi	(5) Agility	(6) Orientasi Pelayanan	(7) Proses Bisnis Terintegrasi
Robotika Adaptif					●		
Analisis Data & Kecerdasan Buatan	●			●	●		
Simulasi			●		●		
Sistem Tertanam				●			
Komunikasi & Jaringan		●		●	●		●
Keamanan Dunia Maya		●					●
Teknologi Awan					●	●	●
Manufaktur Adiktif					●		
Teknologi Virtualisasi (VR & AR)			●		●		
Sensor & Aktuator	●			●			●
Teknologi RFID & RTLS	●			●	●		●
Teknologi Seluler					●		

Menurut Tabel 1.1, interoperabilitas komponen komunikatif dapat dipenuhi dengan menggunakan keamanan sistem fisik siber dan adaptasi Internet of Things Industri seperti komunikasi dan jaringan. Dengan cara yang sama, pemantauan perubahan dalam sistem yang ada dapat disediakan oleh pemodelan simulasi dan teknik virtualisasi seperti realitas tertambah dan realitas virtual.

Contoh dapat diberikan dari CAutoD yang mengoptimalkan proses desain yang ada dari coba-coba dengan mengubah masalah desain menjadi masalah simulasi, sebagai prototipe digital yang mengotomatiskan. Selain itu, robot adaptif, sistem tertanam berdasarkan infrastruktur fisik siber, sistem awan, dan analitik data besar harus berhasil digabungkan untuk memungkinkan pengambilan keputusan mandiri dan otonomi. Misalnya, dengan memanfaatkan pemrosesan, analisis, dan berbagi data, penemuan pengetahuan dapat diekstraksi dan tindakan pencegahan dapat dipastikan untuk setiap komponen fisik siber.

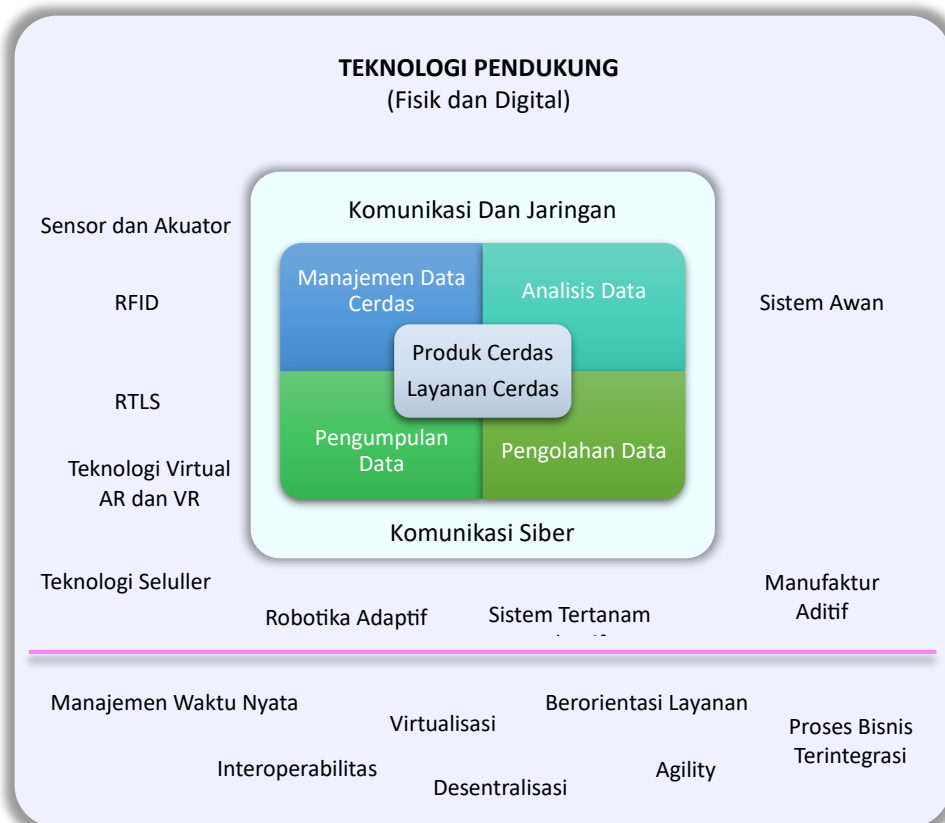
Teknologi RFID dan RTLS, sensor, dan aktuator adalah komponen utama untuk manajemen data waktu nyata dalam hal keterlacakan dan reaksi waktu nyata terhadap perubahan mendadak yang muncul di subsistem. Sebagai ilustrasi, sistem pemeliharaan waktu nyata dapat menjadi preseden dengan menghadirkan integrasi pemrosesan data waktu nyata. Dengan cara ini, tindakan pencegahan yang mungkin diambil melalui platform RTLS dan sensor terhadap insiden instan. Sistem awan, analitik data, dan teknik kecerdasan buatan juga memastikan spesifikasi pelanggan tertentu dengan menilai informasi eksternal dari lingkungan manufaktur digital dan memenuhi arsitektur berorientasi layanan dari kerangka Industri 4.0.

Dengan mempertimbangkan koordinasi antara prinsip desain dan teknologi pendukung, kelincahan dan proses bisnis terintegrasi dapat dievaluasi sebagai prinsip desain

yang paling penting. Dalam hal ini, proses bisnis terintegrasi menyiratkan hubungan antara keamanan siber dan sistem cloud yang didasarkan pada infrastruktur komunikasi dan jaringan seperti Internet Industri.

Selain itu, robot adaptif yang terhubung dan berjejaring, manufaktur aditif, sistem cloud, analisis data, dan kecerdasan buatan memainkan peran penting untuk adaptasi terhadap perubahan persyaratan guna memenuhi stabilitas dan kelincihan sistem. Misalnya, akuisisi data tentang kerusakan yang dikumpulkan dari studi analisis data dan transfer pengetahuan melalui sistem cloud memungkinkan pabrik "belajar". Di sini, pencetakan 3D adalah alat yang tak terelakkan untuk mengirimkan komponen yang kompatibel dalam waktu sesingkat-singkatnya sebelum operasi produksi terganggu oleh kerusakan.

Dengan mempertimbangkan refleksi yang dikumpulkan dari hubungan antara prinsip desain dan teknologi pendukung, kerangka kerja umum untuk adaptasi Industri 4.0 disajikan seperti yang terlihat pada Gambar 1.1. Agar implementasi Industri 4.0 dapat berjalan dengan sukses, perusahaan harus fokus pada pelibatan dan pendefinisian ulang produk dan proses cerdas ke fungsi inti mereka seperti pengembangan produk, manufaktur, logistik, pemasaran, penjualan, dan layanan purnajual. Dalam hal ini, produk cerdas mengandung tiga komponen dasar: (i) komponen fisik termasuk komponen mekanis, (ii) komponen cerdas yang memiliki sensor, mikroprosesor, sistem operasi tertanam, dan antarmuka pengguna (iii) komponen konektivitas yang memiliki port, antena, dan protokol.



**Gambar 1.1** Framework Indutri 4.0

Semua produk dan proses cerdas harus memiliki platform teknologi pendukung yang mengandalkan koneksi dan koordinasi pertukaran data, pengumpulan data, pemrosesan data, dan analitik antara produk dan layanan dengan sumber eksternal. Dengan menggunakan analitik big data, produk dan layanan dapat dipantau dan perubahan dapat diamati dalam berbagai kondisi lingkungan. Selain itu, teknologi cloud memastikan produksi yang terkoordinasi dan terhubung ke sistem terdistribusi. Akibatnya, interoperabilitas dengan platform pemrosesan big data diperkuat oleh layanan berbasis agen, analitik waktu nyata, dan sistem intelijen bisnis, yang penting untuk jaringan.

Dengan demikian, platform big data dan sistem cloud dapat menyediakan manajemen data real-time untuk memberikan reaksi cepat terhadap pemrosesan data, manajemen aliran data, dan penggalian pengetahuan untuk meningkatkan kinerja dan pemanfaatan seluruh produk. Dengan cara ini, penyesuaian dapat dilakukan sesuai dengan perbedaan antara kondisi saat ini dan persyaratan yang diinginkan dengan mengadaptasi algoritma dan proses iteratif seperti pembelajaran mandiri dan penilaian mandiri. Manajemen data cerdas ini harus dipromosikan melalui pembangunan infrastruktur komunikasi dan jaringan berdasarkan Internet Industri dan keamanan siber untuk pengendalian dan pemantauan jarak jauh yang berhasil.

Teknologi inti yang digarisbawahi untuk mendukung teknologi adalah sensor dan aktuator, teknologi RFID dan RTLS, teknologi virtualisasi, dan teknologi seluler. Untuk memenuhi bagian virtualisasi dari Industri 4.0, realitas tertambah dan realitas virtual adalah alat yang tak terelakkan. Realitas virtual (VR) menyediakan alat simulasi berbantuan komputer untuk mencerminkan penciptaan kembali lingkungan kehidupan nyata yang dirasakan dan dilihat pengguna sebagai realitas simulasi sebagaimana yang mereka alami dalam kehidupan nyata. Di sisi lain, realitas tertambah dikembangkan dalam aplikasi untuk menggabungkan elemen digital dengan tindakan dunia nyata. Integrasi keseluruhan VR dan AR menyediakan pengayaan kasus dan tindakan kehidupan nyata.

Lebih jauh lagi, teknologi RFID, sensor, dan RTLS memungkinkan aliran data waktu nyata dan pengumpulan data, yang penting untuk manajemen data cerdas dalam sistem terdesentralisasi. Selain itu, teknologi seluler memungkinkan penerimaan dan pemrosesan sejumlah besar informasi untuk merekam dan mengirimkan informasi dan mendukung kendali jarak jauh yang gesit dari seluruh bisnis. Teknologi pendukung seperti robotika adaptif, sistem tertanam, dan manufaktur aditif dapat dibangun berdasarkan teknologi inti. Misalnya, sistem tertanam dibangun berdasarkan integrasi sistem fisik termasuk sensor dan aktuator untuk meningkatkan sifat otonom Industri 4.0. Selain itu, manufaktur aditif memungkinkan model digital melalui proses aditif dengan membentuk fitur 3D untuk manufaktur yang gesit. Dengan demikian, adaptasi teknologi inti harus disediakan dengan tepat sebelum menerapkan teknologi pendukung.

Karena peningkatan dalam teknologi pendukung, model bisnis baru, layanan jarak jauh, dan operasi produksi berkelanjutan pun muncul. Misalnya, banyak perusahaan yang berinisiatif menawarkan produk mereka sebagai layanan yang meningkatkan strategi saling menguntungkan bagi perusahaan dan pelanggan. Selain itu, perusahaan terutama berfokus

pada keseluruhan sistem, bukan komponen tunggal dari sistem secara terpisah.

Di sini, pertanyaan utamanya adalah, apakah perusahaan industri akan berfokus pada produk yang terkait erat atau membuat platform yang memenuhi keseluruhan produk terkait? Selain pertanyaan-pertanyaan ini, operasi produksi berkelanjutan menyiratkan produk dan proses yang saling berhubungan yang memanfaatkan teknologi jaringan dan cloud. Faktanya, produk sebenarnya adalah teknologi yang diusulkan atau platform yang membutuhkan keberlanjutan siklus hidup produk. Di sini, isu kritisnya adalah menjadi bagian dari tanggung jawab bersama untuk keamanan siber dan berpartisipasi dalam proses standarisasi untuk memastikan pengorganisasian dan pembagian data secara teratur.

### ***Kesimpulan***

Produk yang saling terhubung dan cerdas diadaptasi secara dramatis untuk penciptaan nilai dalam manufaktur dan area lain setelah perubahan cepat muncul dalam kombinasi manufaktur dan teknologi komputer. Sebagai hasil dari Industri 4.0 yang menunjukkan sistem yang lebih produktif dan berkelanjutan, perusahaan telah mencari adaptasi yang tepat dari istilah ini. Situasi ini memerlukan penjelasan yang jelas tentang strategi implementasi.

Dengan demikian, dalam studi ini, pertama-tama kami berfokus pada penjelasan tentang teknologi inti dan pendukung serta deskripsi prinsip desain untuk pemahaman yang lebih baik tentang kerangka kerja yang diusulkan. Setelah itu, hubungan antara prinsip desain dan teknologi dijelaskan secara rinci. Akhirnya, kerangka kerja konseptual untuk Industri 4.0 diusulkan dengan memperhatikan hubungan mendasar antara produk cerdas dan proses cerdas.

Dari pengalaman perusahaan industri, arah masa depan menunjukkan bahwa produksi, kontrol, dan pemantauan produk cerdas dan terhubung akan berubah dari produksi yang berpusat pada tenaga kerja manusia menjadi cara yang sepenuhnya otomatis. Dalam hal ini, transformasi Industri 4.0 memerlukan perencanaan tenaga kerja yang strategis, membangun struktur organisasi yang tepat, mengembangkan kemitraan, serta berpartisipasi dan berbagi standarisasi teknologi, yang merupakan faktor penting untuk mendorong kemajuan teknologi.

Seperti yang terlihat dari laporan McKinsey (2016), area implementasi utama dalam manufaktur adalah optimalisasi rantai pasokan waktu nyata, kolaborasi manusia-robot, konsumsi energi cerdas, manajemen kinerja digital, dan pemeliharaan prediktif. Selain itu, teknologi pendukung akan lebih efektif dengan adaptasi nanoteknologi dan robotika terhadap implementasi Industri 4.0. Selain itu, sistem yang terorganisasi sendiri, bermotivasi sendiri, dan belajar sendiri akan dialami dengan menggunakan algoritma kecerdasan buatan yang lebih canggih dan pembuatan otomatis proses bisnis akan ditemui dalam waktu dekat.

## BAB 2

### MODEL BISNIS PRODUK CERDAS DAN TERHUBUNG

Model bisnis menggambarkan nilai yang ditawarkan oleh perusahaan. Model bisnis memiliki dampak yang signifikan terhadap keberhasilan bisnis. Produk cerdas dan terhubung, yang menghubungkan objek fisik dengan menggunakan sensor dan teknologi komunikasi, mengubah sifat bisnis dan model bisnis tradisional. Proposisi nilai, aliran pendapatan, dan teknologi yang ditawarkan dengan produk cerdas dan terhubung ini berbeda dari model bisnis tradisional. Dalam bab ini, kami mendefinisikan fitur utama model bisnis produk cerdas dan terhubung dan mengungkap kasus kehidupan nyata yang sukses dengan kerangka kerja ini.

#### 2.1 PENDAHULUAN

Revolusi industri keempat diwujudkan dengan kombinasi berbagai teknologi fisik dan digital seperti sensor, sistem tertanam, komputasi awan, dan Internet of Things (IoT). Terlepas dari teknologi pemicunya, tujuan utama transformasi industri adalah untuk meningkatkan efisiensi sumber daya dan produktivitas guna meningkatkan daya saing perusahaan. Era transformasi yang kita jalani saat ini berbeda dengan era lainnya karena tidak hanya menghadirkan perubahan dalam proses bisnis utama, tetapi juga mengungkap konsep produk cerdas dan terhubung dengan menghadirkan model bisnis yang digerakkan oleh layanan.

Model bisnis adalah deskripsi nilai yang ditawarkan perusahaan kepada satu atau beberapa segmen pelanggan dan arsitektur perusahaan serta jaringan mitranya untuk menciptakan, memasarkan, memberikan nilai dan modal hubungan ini, serta menghasilkan aliran pendapatan yang menguntungkan dan berkelanjutan.

Model bisnis yang sukses harus memiliki empat blok bangunan fundamental (1) proposisi nilai pelanggan yang memenuhi tugas penting; (2) rumus laba yang menjabarkan cara perusahaan Anda menghasilkan uang dengan memberikan proposisi nilai; (3) sumber daya utama yang dibutuhkan proposisi nilai; dan (4) proses utama yang diperlukan untuk memberikannya (Innosight 2017). Dalam persaingan ketat dunia bisnis saat ini, hanya perusahaan yang mengembangkan model bisnis yang tepat yang dapat berhasil. Perusahaan yang memiliki model bisnis inovatif dapat mengubah bisnis, menciptakan pasar baru, dan membuka pertumbuhan yang signifikan.

Dengan munculnya IoT, semakin banyak produk pintar dan terhubung yang memasuki pasar, mengubah domain industri dan struktur persaingan. Dengan model bisnis yang digerakkan oleh layanan, mereka membentuk kembali batasan industri dan menciptakan industri yang sama sekali baru. Kemampuan produk pintar dan terhubung dapat dikelompokkan ke dalam empat kategori:

- *Monitor*: Sensor dan sumber data eksternal memungkinkan pemantauan kondisi produk, operasi, dan lingkungan eksternal untuk menghasilkan peringatan dan intelijen yang dapat ditindaklanjuti.
- *Kontrol*: Perangkat lunak yang dibangun ke dalam produk memungkinkan kontrol dan

personalisasi.

- *Optimalkan*: Kemampuan pemantauan dan pengendalian memungkinkan algoritme pengoptimalan untuk meningkatkan kinerja produk dan melakukan layanan dan perbaikan jarak jauh.
- *Otomatisasi*: Kombinasi kemampuan pemantauan, pengendalian, dan pengoptimalan yang ditingkatkan dengan algoritme perangkat lunak dan logika bisnis memungkinkan produk untuk bekerja secara mandiri.

Produk pintar dan terhubung yang memiliki kemampuan yang ditingkatkan memungkinkan perubahan radikal dalam model bisnis. Pergeseran dari model bisnis berbasis produk ke model bisnis yang berpusat pada layanan telah muncul. Transformasi ini memaksa perusahaan untuk membedakan penyelarasan rantai nilai mereka, menetapkan keputusan strategis baru untuk menghadapi persaingan, mendefinisikan ulang struktur organisasi dan mengubah faktor keberhasilan aplikasi mereka.

Proposisi nilai, aliran pendapatan, dan teknologi merupakan penentu utama model bisnis produk pintar dan terhubung. Dalam bab ini, kami mengusulkan kerangka kerja model bisnis untuk produk pintar dan terhubung. Dalam kerangka kerja ini, penentu utama diklasifikasikan dengan kasus yang relevan.

## 2.2 PERMODEL BISNIS

Pemodelan bisnis merupakan alat yang berguna untuk membuat proses yang ada dalam sistem menjadi lebih murah, lebih efisien, dan memuaskan ekspektasi laba dengan kemajuan yang sangat baik. Pemodelan bisnis menentukan nilai prioritas perusahaan terhadap ekspektasi pelanggan, mengembangkan metode dengan membentuk fondasi tentang prioritas yang ditentukan dan kemajuan kerja untuk menyediakan kesinambungan pada metode tersebut. Karena banyak tindakan wirausahawan tidak dapat memenuhi ekspektasi era saat ini, mereka tidak dapat bertahan hidup.

Kewirausahaan bermakna ketika memenuhi kebutuhan. Memodelkan kebutuhan ini pada nilai tertentu memberikan kesinambungan bagi perusahaan. Bisnis yang tidak maju dengan metode dan sistem tertentu memiliki umur yang terbatas, karena mereka tidak dapat mengendalikan pekerjaan di dunia saat ini. Menurut penelitian ilmiah, ada berbagai model bisnis.

Namun, karena setiap perusahaan telah mengembangkan modelnya berdasarkan prioritasnya, tidak ada model tertentu yang berlaku untuk setiap perusahaan. Proyek ini melibatkan informasi tentang model yang ada dan kemajuan penerapan model yang ada. Penelitian mendalam tentang model menunjukkan bahwa model tersebut menyediakan pendekatan holistik terhadap bisnis dan mengungkap kebutuhan penelitian secara terperinci.

Dalam literatur, berbagai penelitian berfokus pada berbagai nilai. Beberapa penulis mendukung gagasan untuk berfokus pada permintaan pelanggan, dan beberapa mendukung gagasan untuk berfokus pada penentuan perusahaan. Model bisnis adalah alat yang komprehensif untuk memahami cara menjalankan bisnis perusahaan dan menganalisis kinerja serta strategi kompetitif mereka melalui desain produk atau layanan yang ditawarkan ke pasar.

Model bisnis juga membantu untuk melakukan pemindaian penuh terhadap suatu perusahaan. Dengan model bisnis, seseorang dapat memahami biaya produksi perusahaan, nilai yang mereka tawarkan ke pasar, dan strategi yang mereka ikuti untuk berkomunikasi dengan konsumen. Model bisnis adalah proposisi nilai yang menjelaskan bagaimana perusahaan memenuhi kebutuhan pelanggan. Model bisnis adalah sistem aktivitas yang saling bergantung yang memperluas batasan suatu organisasi.

Perusahaan harus menyadari harapan pelanggan dan mereka harus membangun struktur model bisnis baru berdasarkan nilai yang diciptakan. Weisbord (1976) mendefinisikan tujuan, struktur, hubungan, penghargaan, kepemimpinan, mekanisme yang membantu sebagai komponen utama dari suatu model bisnis. Menurut Amit dan Zott (2001), strategi samudra biru dan model bisnis dapat diklasifikasikan sebagai lintas industri alternatif, kelompok strategis dan rantai pembeli, penawaran pelengkap, daya tarik emosional dan fungsional. Proposisi nilai, penciptaan nilai, pengiriman, dan penangkapan nilai dianggap sebagai komponen utama dari sebuah model bisnis.

Dalam proposisi nilai, perusahaan memutuskan produk/layanan mana yang mereka tawarkan kepada konsumen mereka dan segmen pelanggan mana yang mereka miliki. Hal terakhir yang harus dilakukan di bagian pertama adalah memilih cara berkomunikasi dengan pelanggan. Perusahaan menganalisis apa yang mereka miliki untuk segmen pelanggan ini dan bagaimana mereka menerapkan bisnis mereka mengenai sumber daya, saluran, mitra, dan teknologi mereka. Setelah semua proses ini, di bagian terakhir, perusahaan harus memperkenalkan struktur biayanya dan menentukan aliran pendapatannya untuk membiayai pengeluaran ini.

Model bisnis dalam literatur dan mengembangkan templat komprehensif untuk model bisnis. Dalam model ini, terdapat lima komponen utama dari struktur bisnis, infrastruktur, penawaran, pelanggan, keuangan, dan sumber daya. Awal pembangunan model harus dimulai dengan bagian Segmen Pelanggan. Sebelum menganalisis strategi dan aktivitas mereka, perusahaan harus menentukan segmen pelanggan mana yang menjadi target mereka.

Mereka harus membuat segmentasi pelanggan menurut kepentingan mereka dan kemudian memilih kelompok sasaran terbaik untuk langkah-langkah berikutnya. Langkah berikutnya adalah proposisi nilai. Setiap perusahaan harus fokus pada nilai, yang memengaruhi pelanggan untuk meningkatkan strategi bisnis baru. Nilai ini harus ditentukan menurut pemahaman harapan klien. Setelah mendeteksi proposisi nilai, perusahaan harus memutuskan saluran mana yang mereka gunakan untuk memberikan manfaat ini bagi pelanggan. Langkah berikutnya adalah hubungan pelanggan.

Di bagian ini, perusahaan harus menentukan cara mereka berkomunikasi dengan pelanggan. Perusahaan harus memutuskan, apakah itu pertemuan tatap muka atau melalui panggilan telepon dan sebagainya. Setelah mengevaluasi bagian pelanggan, perusahaan harus menentukan aliran pendapatan, yang menunjukkan hal-hal, atau aktivitas, yang akan menghasilkan uang. Tahap selanjutnya adalah mendeteksi mitra utama. Selama bisnis ini, perusahaan perlu melakukan kemitraan yang sama dengan perusahaan lain atau beberapa Yayasan

Perusahaan harus menentukan mitra ini. Setelah bagian-bagian ini, bagian penting yang disebut aktivitas utama harus diisi. Langkah selanjutnya adalah menetapkan rencana tindakan untuk menjangkau segmen pelanggan ini dengan memasok nilai tertentu melalui saluran yang terdeteksi untuk mendapatkan aliran pendapatan yang dituju. Setelah rencana tindakan yang dirancang dengan baik, perusahaan harus mengendalikan sumber daya utamanya apakah cukup untuk rencana jangka pendek dan jangka panjang atau tidak. Tahap terakhir adalah menentukan struktur biaya, yang merupakan total pengeluaran model ini.

Model bisnis produk pintar dan terhubung yang sukses berbeda dari model bisnis tradisional mengenai proposisi nilai, aliran pendapatan, dan teknologi.

### **2.3 KOMPONEN UTAMA MODEL BISNIS PRODUK CERDAS DAN TERHUBUNG**

Model bisnis adalah alat manajemen yang memfasilitasi penciptaan, perluasan, dan retensi nilai bisnis. Dalam beberapa tahun terakhir, terdapat minat yang signifikan terhadap model bisnis cerdas dan terhubung, khususnya model bisnis IoT, karena model tersebut meningkatkan keunggulan kompetitif. Terdapat banyak tantangan dari model bisnis ini. Misalnya, menghubungkan perangkat yang berbeda dan mengembangkan standar atau menjaga keamanan informasi merupakan beberapa tantangan dari model bisnis cerdas dan terhubung. Model bisnis adalah alat yang membantu mengatasi kesulitan ini. Pada bagian ini, komponen utama dari model bisnis cerdas dan terhubung akan dibahas.

Dampak model bisnis IoT terhadap nilai bisnis. Mereka mengklasifikasikan model bisnis sebagai model yang berpusat pada hal baru, berpusat pada efisiensi, berpusat pada keterikatan, dan saling melengkapi. Model bisnis IoT yang berpusat pada hal baru berfokus pada penciptaan pasar baru, layanan baru, atau inovasi. Model bisnis IoT yang berfokus pada efisiensi mencoba meningkatkan efisiensi transaksi.

Tujuan dari model ini adalah untuk mempercepat, menyederhanakan, menghilangkan kesalahan, dan meningkatkan transparansi transaksi. Model bisnis IoT yang berpusat pada lock-in mencoba memperbesar volume transaksi dan meningkatkan loyalitas pelanggan dengan berbagai cara seperti penyesuaian, peningkatan keamanan, dan keandalan. Model bisnis IoT berbasis komplementer menyediakan barang/jasa tambahan yang lebih berharga secara bersamaan. Model bisnis IoT beserta beberapa faktor seperti keamanan dan privasi dianggap sebagai faktor yang memengaruhi penggunaan IoT. IoT meningkatkan industri dan rantai pasokan dengan memperpendek siklus pengoptimalan, proses pengujian, dan meningkatkan kualitas, fleksibilitas, dan efisiensi. Model bisnis IoT diklasifikasikan ke dalam enam kelompok yaitu, penggunaan jarak jauh dan pemantauan kondisi, layanan mandiri objek, add-on digital, lock-in digital, produk sebagai titik penjualan, dan freemium fisik.

Adopsi model kanvas bisnis ke model bisnis IoT. Dalam studi ini, mitra kunci dalam model IoT adalah produsen perangkat keras, pengembang perangkat lunak, dan pemasok lain, integrasi data, meluncurkan pelanggan, distributor, logistik dan mitra layanan.

Aktivitas utamanya adalah pengembangan pelanggan, pengembangan produk, implementasi/layanan, pemasaran/penjualan, pengembangan platform, pengembangan perangkat lunak, manajemen mitra, logistik. Sumber daya utama adalah sumber daya fisik,

kekayaan intelektual, kemampuan karyawan, sumber daya keuangan, perangkat lunak, dan hubungan. Proposisi nilai adalah kebaruan, kinerja, kustomisasi, menyelesaikan pekerjaan, desain, merek/status, harga, pengurangan biaya, mitigasi risiko, aksesibilitas, kemudahan/kegunaan, kenyamanan, dan kemungkinan untuk pembaruan.

Komponen hubungan pelanggan adalah bantuan pribadi, bantuan khusus, layanan mandiri, layanan otomatis, komunitas, dan penciptaan bersama. Saluran adalah tenaga penjualan, penjualan web, toko sendiri, toko mitra, dan grosir. Segmen pelanggan adalah pasar massal, pasar khusus, platform tersegmentasi, terdiversifikasi, dan multi-sisi. Struktur biaya adalah biaya pengembangan produk, biaya TI, biaya personel, biaya perangkat keras/produksi, biaya logistik, pemasaran, dan biaya penjualan. Penjualan aset, penggunaan, penyewaan, langganan, lisensi, pemasangan, dan biaya iklan merupakan aliran pendapatan utama.

## 2.4 KERANGKA PERMODELAN BISNIS

Model bisnis yang cerdas dan terhubung dapat diklasifikasikan berdasarkan proposisi nilai, aliran pendapatan, serta arsitektur dan teknologi yang ditawarkan. Proposisi nilai mengkategorikan nilai yang diciptakan dengan model bisnis. Aliran pendapatan menunjukkan bagaimana model bisnis menciptakan pendapatan dan teknologi yang digunakan dapat dijelaskan dalam tiga lapisan, yaitu lapisan fisik, lapisan konektivitas, dan lapisan digital. Kombinasi masa depan ini menciptakan manfaat bagi pelanggan.

### Proposisi Nilai

Teknologi produk pintar dan terhubung mengubah model bisnis inti secara signifikan. Teknologi tersebut tidak hanya memberikan pengurangan biaya tetapi juga menciptakan aliran pendapatan baru. Model bisnis ini menawarkan empat nilai utama. Dalam bab ini, proposisi nilai bisnis produk pintar dan terhubung diklasifikasikan berdasarkan klasifikasi sebagai berikut:

- Kebaruan

Kebaruan mengacu pada pasar baru, layanan baru, dan inovasi. Aplikasi IoT memungkinkan perusahaan menciptakan pasar baru, layanan baru, dan inovasi. Tidak hanya solusi IoT yang memungkinkan terciptanya model bisnis baru, tetapi juga Platform IoT itu sendiri dapat dianggap sebagai model bisnis baru.

Platform IoT Watson memungkinkan produsen mengembangkan robot adaptif yang dipersonalisasi. Demikian pula, Libelium menyediakan Platform IoT yang memungkinkan menghubungkan berbagai perangkat yang terletak di lokasi berbeda dan mengumpulkan data dari perangkat tersebut. Kota, sistem pertanian, atau sumber daya air dapat dikelola dengan menggunakan platform Libelium. Platform IoT Microsoft menyediakan berbagai solusi untuk menghubungkan, menganalisis, dan mengoptimalkan penggunaan peralatan dan perangkat industri di pabrik. Platform ini dapat meningkatkan keselamatan tempat kerja secara signifikan. Mobil AT&T Connected mengubah kendaraan menjadi hotspot Wi-Fi. Menjaga mobil tetap terhubung ke jaringan bahkan selama perjalanan. Pengguna dapat melakukan streaming video, menjelajah web, dan radio Internet melalui jaringan Mobil.

- Efisiensi

Model bisnis produk cerdas dan terhubung yang menghadirkan efisiensi membuat transaksi lebih cepat, sederhana, transparan, dan menghilangkan kesalahan. Sasaran utama aplikasi produk cerdas dan terhubung adalah meningkatkan efisiensi transaksi. Efisiensi dapat ditingkatkan dengan membuat transaksi lebih cepat, sederhana, atau meningkatkan keandalan dan transparansinya. Meningkatkan efisiensi biasanya merupakan langkah pertama dalam penerapan sistem tertanam. Oleh karena itu, efisiensi merupakan manfaat paling umum yang dicari dalam bisnis IoT.

Misalnya, sensor getaran tertanam IoT yang dikembangkan oleh Intel dapat melacak getaran di jembatan dan menyediakan data yang andal untuk perencanaan pemeliharaan yang dapat meningkatkan keandalan konstruksi. Nest Thermostat yang dikembangkan oleh Nest Labs melacak perilaku pengguna dan mengurangi biaya pemanasan dan pendinginan dengan menyesuaikan suhu ruangan yang diinginkan sebelum pemilik tiba di rumah. Ia juga terhubung dengan perusahaan energi dan memungkinkan perusahaan-perusahaan ini untuk mengoptimalkan tingkat produksi mereka berdasarkan informasi konsumsi.

- Lock-in

Aplikasi produk yang cerdas dan terhubung memungkinkan perusahaan untuk memperbesar volume transaksi bagi pelanggan yang sudah ada dan meningkatkan loyalitas pelanggan. Mereka dapat menyediakan program afiliasi atau komunitas virtual. Aplikasi ini dapat meningkatkan kustomisasi, penggunaan berulang, retensi pelanggan, keandalan, dan keamanan transaksi.

Amazon Dash Button adalah perangkat yang terhubung dengan Wi-Fi yang memesan ulang produk dengan menekan tombol. Tombol dasbor ini dipasangkan dengan produk yang telah dipilih sebelumnya. Menekan tombol sudah cukup untuk memesan ulang. Produk yang cerdas dan terhubung ini memungkinkan penggunaan berulang dari item yang telah dipilih sebelumnya.

Sentrian (Platform) adalah platform pemantauan pasien jarak jauh yang menganalisis data biosensor dan mengirimkan peringatan khusus pasien kepada dokter dan belajar dari umpan balik mereka.

- Komplementer

Model bisnis IoT berbasis komplementer menyediakan barang/jasa tambahan yang lebih berharga jika digabungkan. Penjualan silang dan penggabungan yang efektif tersedia dengan model bisnis ini.

Layanan Pengisian Ulang Amazon Dash memungkinkan pemesanan ulang otomatis untuk produk seperti deterjen untuk mesin cuci atau kartrid tinta untuk printer. Layanan pengisian ulang tertanam ini memberikan pesanan otomatis sebelum pengisian terakhir. Layanan ini menggunakan sistem layanan pelanggan Amazon seperti sistem pembayaran dan autentikasi.

Serupa dengan itu, Moov adalah perangkat kebugaran yang dapat dikenakan dengan pelatih pribadi berbasis kecerdasan buatan.

## Lapisan dan Teknologi Penciptaan Nilai IoT

IoT adalah istilah yang digunakan secara luas untuk serangkaian teknologi, sistem, dan prinsip desain yang terkait dengan gelombang baru hal-hal yang terhubung ke Internet yang didasarkan pada lingkungan fisik. Arsitektur IoT terdiri dari tiga lapisan utama yang dapat disebut sebagai lapisan fisik, konektivitas, dan digital. Di bagian ini, Streetline Smart Parking Solution akan digunakan sebagai contoh untuk menjelaskan bagaimana lapisan penciptaan nilai terbentuk. Streetline adalah perusahaan parkir pintar yang menggunakan teknologi IoT yang membantu memecahkan masalah parkir dengan memberikan data pintar dan analisis canggih kepada pelanggannya.

- Lapisan Fisik

Pada lapisan fisik, sensor dan mikrokontroler bekerja sama untuk menyediakan salah satu aspek terpenting dari Internet of Things (IoT): Mendeteksi perubahan pada suatu objek atau lingkungan, memungkinkan penangkapan data yang relevan untuk pemrosesan waktu nyata atau pascaproses. Sensor digunakan untuk mendeteksi perubahan fisik termasuk suhu, cahaya, tekanan, suara, dan gerakan. Sensor juga digunakan untuk mendeteksi hubungan logis satu objek dengan objek lain dan lingkungan termasuk ada/tidaknya entitas, lokasi, atau aktivitas yang dapat dilacak secara elektronik. Aktuator adalah perangkat penting lainnya di lapisan fisik yang digunakan untuk memengaruhi perubahan lingkungan seperti pengontrol suhu pendingin udara.

Sebagai contoh dalam Streetline Smart Parking Solution di lapisan fisik, sensor daya sangat rendah mendeteksi status tempat parkir dan berkomunikasi melalui jaringan mesh nirkabel. Jaringan mesh dibangun menggunakan serangkaian repeater yang tidak mencolok dan mudah dipasang, yang ditempatkan di lokasi seperti lampu jalan dan tiang telepon, untuk membentuk kanopi di atas area yang ditargetkan. Monitor Meter dapat dipasang di meteran ruang tunggal yang lama untuk mendeteksi pembayaran dan mengintegrasikan meteran secara nirkabel ke dalam jaringan.

- Lapisan Konektivitas

Lapisan konektivitas bertanggung jawab untuk menghubungkan ke benda pintar, perangkat jaringan, dan server lainnya. Fitur-fiturnya juga digunakan untuk mengirimkan dan memproses data sensor. Perangkat IoT terhubung dan berkomunikasi menggunakan berbagai model dan teknologi komunikasi teknis seperti jaringan IP, 3G/4G, Bluetooth, Z-Wave, WiFi ZigBee, RFID atau NFC.

Model komunikasi perangkat ke perangkat mewakili dua atau lebih perangkat yang secara langsung terhubung dan berkomunikasi satu sama lain, bukan melalui server aplikasi perantara.

Dalam model komunikasi perangkat ke cloud, perangkat IoT terhubung langsung ke layanan cloud Internet seperti penyedia layanan aplikasi untuk bertukar data dan mengendalikan lalu lintas pesan.

Dalam model perangkat ke gateway, atau lebih umum, model gateway lapisan perangkat ke aplikasi (ALG), perangkat IoT terhubung melalui layanan ALG sebagai

saluran untuk mencapai layanan cloud.

Model berbagi data back-end mengacu pada arsitektur komunikasi yang memungkinkan pengguna untuk mengeksport dan menganalisis data objek pintar dari layanan cloud yang dikombinasikan dengan data dari sumber lain.

Dalam Streetline Smart Parking Solution, sensor dihubungkan ke jaringan Wi-Fi kotamadya menggunakan model perangkat ke gateway di lapisan konektivitas.

- Lapisan Digital

Lapisan digital menyimpan, menganalisis, dan memproses sejumlah besar data yang berasal dari lapisan konektivitas. Lapisan ini dapat mengelola dan menyediakan serangkaian layanan yang beragam ke lapisan yang lebih rendah. Lapisan ini menggunakan banyak teknologi seperti basis data, komputasi cloud, dan modul pemrosesan data besar. Lapisan ini juga bertanggung jawab untuk memberikan layanan khusus aplikasi kepada pengguna. Lapisan ini mendefinisikan berbagai aplikasi tempat IoT dapat digunakan, misalnya, rumah pintar, kota pintar, dan kesehatan pintar. Dalam Streetline Smart Parking Solution, di lapisan digital, teknik pembelajaran mesin digunakan untuk menggabungkan beberapa sumber data menjadi satu set data terintegrasi untuk panduan parkir waktu nyata. Kemampuan analisis data digunakan untuk meningkatkan akurasi dan memberikan gambaran menyeluruh tentang pemanfaatan parkir di seluruh kota. Rangkaian aplikasi seluler dan web memungkinkan setiap pemangku kepentingan utama dalam ekosistem parkir.

Tabel 2.1 menunjukkan karakteristik beberapa kasus model bisnis yang cerdas dan terhubung. Baik model bisnis ke bisnis (B2B) maupun bisnis ke pelanggan (B2C) dipertimbangkan dalam tabel ini.

**Tabel 2.1** Karakteristik beberapa kasus model bisnis cerdas dan terhubung

Perusahaan / Produk	Bisnis	Proposisi nilai	Proposisi nilai	Aliran pendapatan	Lapisan fisik	Lapisan konektivitas	Lapisan digital
IBM/Streetline	B2C	Efisiensi	Streetline mempercepat pencarian tempat parkir dengan memberikan petunjuk ke slot parkir yang terbuka	Pembayaran parkir dapat dilakukan melalui aplikasi seluler, memiliki model berlangganan bulanan, perusahaan parkir dapat mempublikasikan slot parkir mereka	Sensor dengan sensitivitas cahaya dipasang di slot parkir	Sensor-sensor tersebut terhubung ke jaringan Wi-Fi milik pemerintah kota. Data yang diperoleh dari sensor ditransfer ke platform cloud.	Data dianalisis di platform analitik cloud, dan pelanggan menggunakan aplikasi streetline parker yang menghadap konsumen
Nestlab	B2C	Efisiensi	Termostat Nest yang dikembangkan oleh Nest Labs melacak perilaku pengguna dan mengurangi biaya pemanasan dan pendinginan dengan menyesuaikan suhu ruangan yang diinginkan sebelum pemilik tiba di rumah. Termostat ini juga terhubung dengan perusahaan energi dan memungkinkan perusahaan-perusahaan ini untuk mengoptimalkan tingkat	Nest menjual produk konsumen rumah pintarnya, yaitu termostatnya, yang harganya lebih mahal daripada termostat tradisional. Nest menjual data konsumsi energi yang dapat dikumpulkan di seluruh perangkatnya.	Memiliki sensor asap spektrum terpisah yang mendeteksi karbon monoksida, mikrofon yang memungkinkan pemantauan mandiri lengkap, dan sensor lain yang mendeteksi suhu, kelembapan, hunian, dan cahaya sekitar.	Sensor dihubungkan ke jaringan Wi-Fi	Aplikasi Nest memungkinkan penggunaan produk dari jarak jauh

			produksi mereka berdasarkan informasi konsumsi.				
Tombol dasbor Amazon	B2C	Terkunci	Tombol dasbor Amazon adalah perangkat yang terhubung dengan Wi-Fi yang mengatur ulang	Tombol dasbor dijual dengan harga murah	Sensor dan koneksi Wi-Fi adalah produk dengan menekan tombol. Tombol dasbor ini dipasangkan dengan produk yang telah dipilih sebelumnya	Sensor dihubungkan ke jaringan Wi-Fi tertanam di tombol dasbor	Tombol dasbor dikelola dengan aplikasi seluler
Pengisian ulang dasbor Amazon	Layanan B2B/B2C	Komple- menter	Layanan pengisian ulang Amazon Dash memungkinkan pemesanan ulang otomatis untuk produk seperti deterjen untuk mesin cuci	Perusahaan dapat menggunakan sistem autentikasi dan pembayaran Amazon, layanan pelanggan, dan jaringan pemenuhan untuk pemesanan ulang otomatis	Ia bekerja dengan sensor atau mekanisme pelacakan apa pun, tetapi dapat melacak penggunaan pelanggan secara langsung	Perangkat terhubung ke internet melalui cloud perusahaan atau langsung	Layanan pengisian ulang Dash menggunakan Login with Amazon (LWA), Amazon Simple Notification Service, dan titik akhir RESTful API untuk memungkinkan perangkat atau cloud terintegrasi
AT&T/B2C Terhubung	Mobile	Kebaruan	Mengubah kendaraan menjadi hotspot Wi-Fi. Menjaga mobil tetap terhubung ke jaringan bahkan selama perjalanan. Pengguna dapat melakukan streaming video, browsing web, dan radio internet melalui jaringan mobil	Tidak perlu pembayaran awal. Pembayaran bulanan dengan kontrak 2 tahun. Pembayaran berubah sesuai isi paket internet	Sebuah plug-in, yang terpasang pada mobil, menyediakan koneksi Wi-Fi kepada orang-orang di dalam mobil	Plug-in terhubung ke jaringan 4G LTE AT&T.	Orang-orang di dalam mobil dapat terhubung ke internet dari perangkat pintar mereka melalui jaringan Wi-Fi di mobil mereka. Selain itu, mereka dapat menemukan tempat parkir mobil mereka, mengirimkan petunjuk arah ke mobil mereka, dan menyalakannya dari jarak jauh melalui aplikasi seluler.
Shipwise	B2B	Efisiensi	Shipwise menyediakan platform web untuk perusahaan kecil dan menengah yang memesan dan mengelola pengiriman barang global. Dasbor online Shipwise memungkinkan pelacakan pengiriman global dan menyediakan alat analisis untuk mengurangi kesalahan	Shipwise membuat pengaturan berdasarkan kontrak menjadi kecil dan usaha menengah	Semua kendaraan perlengkapan, gudang, barang, pengangkut kargo dan perangkat lainnya di rantai pasokan telah menanamkan sensor pintar	Sensor dihubungkan ke jaringan Wi-Fi	Dasbor online Shipwise menyediakan pengirim informasi menyeluruh pengelolaan pengiriman
Placemeter	B2B	Efisiensi	Placemeter mengubah video menjadi data yang bermakna. Placemeter menyediakan solusi untuk kota pintar, iklan luar ruang, dan pengecer	Model berlangganan bulanan dengan kontrak 1 tahun, yang mencakup paket data seluler, akses fitur lengkap, pembaruan perangkat lunak, dan bantuan teknis 24/7	Platform ini mengumpulkan video melalui kamera Arlo atau kamera keamanan yang ada	Kamera keamanan terhubung ke jaringan Wi-Fi tertutup atau tersembunyi dan ke server cloud	Dari dasbor Placemeter, pengguna dapat mengakses semua informasi tentang pergerakan di lokasi tertentu
Belkin/WeMo	B2C	Efisiensi	Steker pintar yang dapat dikontrol dari telepon pintar. Situasi menyalakan/mematikan daya dapat diatur sesuai jadwal yang telah ditentukan. Selain itu, melacak konsumsi	Model pembayaran satu kali. Pelanggan harus membayar sejumlah harga tertentu untuk tahap pembelian. Tidak ada pembayaran tambahan selama	WeMo dicolokkan ke stopkontak listrik, dan mengendalikan pemadaman listrik berdasarkan sinyal yang datang dari jaringan Wi-Fi	WeMo terhubung ke jaringan Wi-Fi. Kemudian terhubung ke server cloud.	Melalui server cloud, pengguna dapat mengontrol produk elektronik mereka yang terhubung ke WeMo dari aplikasi seluler

			energi perangkat elektronik terkait. Steker pintar mengurangi konsumsi energi dari steker tersebut.	penggunaan.			
Philips/Hue	B2C	Efisiensi	Bohlam lampu yang dapat dinyalakan dan dimatikan dari jarak jauh melalui perangkat seluler. Bohlam ini juga dapat mengubah warna cahayanya	Model pembayaran satu kali. Pelanggan harus membayar harga tertentu untuk tahap pembelian. Tidak ada pembayaran tambahan selama penggunaan.	Perangkat internal kecil menyediakan komunikasi dengan jaringan	Melalui jaringan WiFi, penerimaan byte ditransmisikan ke Hue. Ia memiliki tiga saluran komunikasi: router, Ethernet, dan ZigBee	Dengan aplikasi seluler Philips Hue, pengguna mengirimkan perintah ke bola lampu
Agustus/Kunci pintar	B2C	Efisiensi	Kunci pintar yang dapat dibuka saat pemilik rumah pulang dengan ponsel pintarnya dan terkunci saat pemilik rumah pergi. Hak akses dapat diberikan kepada orang lain melalui aplikasi di ponsel pintar.	Model pembayaran satu kali. Pelanggan harus membayar sejumlah harga tertentu untuk tahap pembelian. Tidak ada pembayaran tambahan selama penggunaan.	Sinyal perintah melalui Wi-Fi atau Bluetooth diterima oleh reseptor	Kunci pintar August terhubung ke jaringan Wi-Fi melalui koneksi August. Kemudian terhubung ke server cloud	Melalui aplikasi seluler, yang terhubung ke kunci melalui jaringan Wi-Fi, pengguna dapat mengontrol kunci pintar august
Pelacakan dan pemantauan DHL/IoT	B2B	Efisiensi	Implementasi aplikasi IoT pada bidang logistik terkait penyediaan pelacakan dan pemantauan situasi paket atau kendaraan, sekaligus memberikan informasi mengenai status pemeliharaan. Ini mengurangi biaya yang terkait dengan logistik.	Mengurangi biaya pemantauan	Lokasi dan pemanfaatan mesin atau kendaraan ditentukan melalui sinyal yang berasal dari sensor	Sensor dihubungkan ke jaringan Wi-Fi. Data yang diperoleh dari sensor ditransfer ke platform cloud.	Data dianalisis pada platform analitik cloud, dan pelanggan memperoleh informasi melalui aplikasi seluler DHL
Farmobile	B2C	Efisiensi	Memberikan petani kemampuan untuk mengumpulkan data mesin dan pertanian. Informasi digital dapat dilacak dari aplikasi seluler. Efisiensi dapat ditingkatkan dengan berbagi data pertanian dengan ahli agronomi dan agen asuransi.	Model langganan tahunan, yang mencakup paket data seluler, akses fitur lengkap, akun pengguna tak terbatas, penyimpanan data tak terbatas, pembaruan perangkat lunak, dan bantuan teknis 24/7	Dengan perangkat kecil (sensor) yang disebut PUC, informasi mesin dikumpulkan	Sensor-sensor tersebut terhubung ke jaringan Wi-Fi. Data yang diperoleh dari sensor ditransfer ke platform cloud detik demi detik.	Data dianalisis di platform analitik cloud, dan pelanggan menggunakan aplikasi seluler yang menghadap konsumen
Rasa Condeco	B2B	Efisiensi	Sensor hunian tempat kerja yang mengumpulkan data waktu nyata dari tempat kerja. Data yang dikumpulkan biasanya menunjukkan tingkat pemanfaatan meja atau area tempat kerja seperti ruang rapat.	Model pembayaran satu kali. Pelanggan harus membayar harga tertentu untuk setiap unit produk. Tidak ada pembayaran tambahan selama penggunaan.	Sensor nirkabel mengumpulkan data waktu nyata tentang hunian tempat kerja. Setiap sensor memantau pergerakan dan panas di tempat kerja tertentu.	Sensor dihubungkan ke jaringan Wi-Fi. Data yang diperoleh dari sensor ditransfer ke platform cloud.	Data mentah yang dikumpulkan kemudian dianalisis dan diubah menjadi wawasan untuk membantu perusahaan mengelola kantor secara lebih efektif dari perangkat pintar.
Daqri/Helm pintar	B2B	Efektivitas	Meningkatkan kemampuan di tempat kerja melalui visualisasi data, penglihatan termal, pekerjaan terpandu instruksi, dan fungsi ahli jarak jauh	Model pembayaran satu kali yang meliputi: Helm Daqri, Paket komputasi dengan Daqri VOS terpasang, Alat Pengembang, Pembaruan dan manajemen perangkat untuk perusahaan	Pelacakan kamera sudut lebar berkecepatan tinggi dan pengumpulan informasi visual di sekitar. Kamera RGB, kamera inframerah stereo, dan proyektor cahaya inframerah. Juga, memiliki kamera termal	Kamera terhubung ke prosesor Intel Core	Prosesor ini menyediakan aplikasi multimedia dan Augmented Reality berperforma tinggi. Visualisasi data, termal, gambar, dan instruksi kerja diberikan kepada pengguna di tempat kerja
Spire	B2C	Efisiensi	Melacak napas dan	Model pembayaran	Sensor gaya	Spire	Data yang dianalisis

			aktivitas pengguna, dan memberikan peringatan dalam situasi stres untuk menenangkan pengguna. Bahkan saat pengguna tidak merasa tegang, Spire dapat mendeteksinya dan memperingatkan pengguna agar tenang melalui pengiriman notifikasi ke ponsel pintar pengguna.	satu kali. Pelanggan harus membayar sejumlah harga tertentu untuk tahap pembelian. Tidak ada pembayaran tambahan selama penggunaan.	khusus Spire mendeteksi pantulan napas ke tubuh dan diafragma. Kemudian menganalisis periode napas untuk memahami suasana hati pengguna.	menggunakan protokol nirkabel yang sangat populer dan berdaya rendah yang disebut Bluetooth untuk mengirim dan menerima data ke dan dari ponsel Anda	di prosesor Spire dikirim ke aplikasi seluler Spire, yang memungkinkan pengguna melacak data napasnya
Semio	B2B	Efisiensi	Semios membantu petani mengelola dan melindungi kebun mereka. Embun beku, kelembapan daun, kelembapan tanah, dan tekanan hama dapat dikontrol dan dilihat secara langsung	Model langganan tahunan, yang mencakup paket data seluler, akses fitur lengkap, akun pengguna tak terbatas, penyimpanan data tak terbatas, pembaruan perangkat lunak, dan bantuan teknis 24/7	Sensor Semios di kebun mengumpulkan semua data tentang lapangan seperti hama, kondisi cuaca, dan irigasi	Sensor terhubung langsung dengan platform semios melalui penyedia seluler	Melalui aplikasi Semios, pengguna bisa mendapatkan notifikasi, mencapai intelijen yang dapat ditindaklanjuti, dan melihat catatannya
SkyBitz/ Pemantauan tangki	B2B	Efisiensi	Menyediakan pemantauan dan analitik jarak jauh untuk menyimpan cairan dan gas terkompresi seperti minyak bumi, bahan kimia, atau air. Mengoptimalkan efisiensi operasi dengan pemantauan nirkabel	Model berlangganan bulanan, yang mencakup monitor, sensor, dan kabel	Melalui sensor di dalam tangki, pemantauan tangki mengumpulkan informasi level tangki, level tekanan, dan lokasi	Sensor terhubung ke jaringan Wi-Fi. Data yang diperoleh dari sensor ditransfer ke platform cloud	Data dianalisis di Portal Pemantauan Tangki Skybitz yang dapat diakses pengguna 24/7 dan melihat semuanya informasi tentang tangki mereka
Enevo	B2B	Efisiensi	Enevo membantu kotamadya atau perusahaan untuk menyederhanakan limbah mereka dan memberikan solusi yang efektif untuk pengelolaan limbah	Layanan diberikan dengan kontrak 1-10 tahun dengan biaya berlangganan	Enevo, analisis pengelolaan limbah, menggunakan teknologi sonar ultrasonik canggih untuk mendeteksi tingkat pengisian tempat sampah	Sensor dihubungkan ke jaringan Wi-Fi. Data yang diperoleh dari sensor ditransfer ke platform cloud.	Di platform Enevo pengguna dapat mengelola limbah mereka dan mengakses semua informasi tentangnya.
Wellintel	B2B	Efisiensi	Ini adalah sistem informasi air tanah untuk pemilik rumah, petani, dan ilmuwan. Ini membantu melacak level air tanah dan mengirimkan peringatan jika diperlukan	Model pembayaran satu kali, yang mencakup paket data seluler, akses fitur lengkap, akun pengguna tak terbatas, penyimpanan data tak terbatas, pembaruan perangkat lunak, dan bantuan teknis 24/7	Sensor yang ditempatkan di sumur mengumpulkan semua informasi yang diperlukan tentang sumur	Sensor dihubungkan ke jaringan Wi-Fi. Data yang diperoleh dari sensor ditransfer ke platform cloud.	Data dianalisis di platform WellIntel yang dapat diakses pengguna 24/7 dan melihat semua informasi tentang tangki mereka
Garagio	B2C	Efisiensi	Ini memberi pengguna untuk mengontrol pintu garasi mereka dari mana saja, kapan saja	Model pembayaran satu kali, yang mencakup paket data seluler, akses fitur lengkap, akun pengguna tak terbatas, penyimpanan data tak terbatas, pembaruan perangkat lunak, dan bantuan teknis 24/7	Kotak hitam yang dimasukkan ke garasi berkomunikasi dengan pintu garasi dan mentransfer data ke jaringan Wi-Fi	Kotak hitam dihubungkan ke jaringan Wi-Fi rumah. Data yang diperoleh dari kotak hitam ditransfer ke platform cloud.	Dasbor Garagio berbasis web dan aplikasi memungkinkan pengguna untuk melihat aktivitas pintu garasi, berbagi akses, dan mengontrol pintu garasi.

## Kesimpulan

Bab ini menyajikan penelitian yang mengarah pada kerangka kerja untuk model bisnis

produk cerdas dan terhubung. Dengan menggunakan tinjauan pustaka yang disempurnakan, kami mendefinisikan determinan utama model bisnis dan jenis spesifik determinan utama ini. Selanjutnya, kami mengklasifikasikan kasus produk cerdas dan terhubung berdasarkan determinan utama.

Dalam literatur, hanya sedikit penelitian yang berfokus pada model bisnis produk cerdas dan terhubung. Bab ini memenuhi kebutuhan ini dengan mendefinisikan fitur utama, proposisi nilai, aliran pendapatan, dan teknologi. Bab ini dapat memandu model bisnis cerdas dan terhubung di masa mendatang.

Meskipun penelitian kami menghasilkan hasil baru dan berwawasan untuk model bisnis produk cerdas dan terhubung, pendekatan yang lebih komprehensif dapat diterapkan untuk melihat berbagai aplikasi di berbagai pasar. Sebuah penelitian kualitatif dapat diterapkan untuk menunjukkan korelasi di antara determinan utama.

## BAB 3

### SISTEM PRODUKSI LEAN UNTUK INDUSTRI 4.0

Berhasil melakukan transformasi yang berorientasi pada budaya dan sumber daya manusia, Lean Producers mengadopsi filosofi melakukan lebih banyak dengan sumber daya yang lebih sedikit dengan menghilangkan aktivitas yang tidak bernilai tambah dari proses produksi untuk mempertahankan efektivitas, fleksibilitas, dan profitabilitas.

Dengan konteks Industri 4.0, solusi baru tersedia untuk menggabungkan teknologi otomasi dengan Produksi Lean. Selain itu, ketika penggunaan sumber daya yang efektif (keuangan, tenaga kerja, material, mesin/peralatan) diperhatikan, jelas bahwa Industri 4.0 harus diterapkan pada proses lean. Dalam konteks ini, bab ini mencoba untuk menekankan interaksi antara Produksi Lean dan Industri 4.0 dan mengusulkan metodologi yang memberikan panduan untuk Industri 4.0 dalam lingkungan produksi lean. Selain itu, teknologi Industri 4.0 dan aplikasi Produksi Lean yang berorientasi pada otomasi juga disertakan.

#### 3.1 PENDAHULUAN

*“Dari kekacauan, temukan kesederhanaan. Dari perselisihan, temukan harmoni. Di tengah kesulitan, terletak peluang.”*

Albert Einstein

Berkembang dari konseptualisasi Sistem Produksi Toyota oleh inisiatif Taichii Ohno di Toyota Motor Company, Lean Manufacturing dapat dideskripsikan sebagai pendekatan produksi multifaset yang terdiri dari berbagai praktik industri, yang diarahkan untuk mengidentifikasi proses penambahan nilai dari sudut pandang pelanggan dan untuk memungkinkan aliran proses ini atas tarikan pelanggan melalui organisasi. Saat ini, pendekatan ini diadopsi oleh banyak perusahaan setelah krisis minyak tahun 1973. Perusahaan-perusahaan Eropa telah melaporkan hasil yang signifikan melalui upaya ini, tidak hanya di sektor manufaktur, tetapi juga di bidang layanan seperti ritel, perawatan kesehatan, perjalanan, dan layanan keuangan.

Tujuan utama sistem ini adalah untuk menghilangkan berbagai jenis pemborosan yang tersembunyi dalam suatu sistem melalui berbagai aktivitas perbaikan. Bahkan selama periode pertumbuhan yang lambat, Toyota dapat memperoleh laba dengan mengurangi biaya melalui sistem produksi yang sepenuhnya menghilangkan persediaan dan tenaga kerja yang berlebihan. Mungkin tidak berlebihan jika dikatakan bahwa ini adalah sistem manajemen produksi revolusioner lainnya yang mengikuti sistem Taylor (manajemen ilmiah) dan sistem Ford (lini perakitan massal). Perusahaan yang menerapkan perangkat Lean Manufacturing pada akhirnya ingin memenuhi permintaan pelanggan dengan lebih sedikit sumber daya dan lebih sedikit pemborosan.

Dari sudut pandang teknologi, Lean Production dapat dianggap sebagai pelengkap

otomatisasi. Kompleksitas sistem produksi harus dikurangi dengan praktik lean dan menyatakan bahwa terlalu bergantung pada teknologi tidak selalu dapat meningkatkan kinerja tetapi dapat membuat sistem lebih rumit. Lean Production menyarankan lima tingkat otomatisasi yang berbeda yang harus dipertimbangkan saat memutuskan strategi otomatisasi yang tepat seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1. Pada tingkat pertama, semuanya dilakukan secara manual. Operator memuat mesin dan menyalakan mesin, dan mesin berputar.

**Tabel 3.1** Tingkatan Otomasi Lean

Tingkat	Loading Machine	Siklus Mesin	Unloading Machine	Mentransfer bagian
1	Operator	Operator	Operator	Operator
2	Operator	Otomatis	Operator	Operator
3	Operator	Otomatis	Otomatis	Operator
<b>KESENJANGAN BESAR (Biaya dan Fleksibilitas berubah secara drastis)</b>				
4	Otomatis	Otomatis	Otomatis	Operator
5	Otomatis	Otomatis	Otomatis	Otomatis

Berikutnya operator membongkar komponen dan memindahkannya secara manual ke langkah produksi berikutnya. Tingkat otomatisasi kedua adalah ketika operator memuat mesin secara manual, mesin secara otomatis berputar, dan operator secara manual mengeluarkan komponen dan membawanya ke stasiun berikutnya. Dalam otomatisasi tingkat tiga, operator memuat komponen secara manual ke dalam mesin, dan komponen secara otomatis berputar. Komponen secara otomatis dibongkar dari mesin dan operator kemudian memindahkan komponen.

Otomatisasi tingkat empat secara otomatis memuat komponen; komponen secara otomatis didaur ulang, dibongkar secara otomatis, dan kemudian dipindahkan secara manual ke proses berikutnya. Akhirnya, otomatisasi tingkat lima sepenuhnya otomatis. Mesin secara otomatis dimuat, didaur ulang, dan dibongkar, dan komponen dipindahkan oleh otomatisasi. Sementara itu, ada kesenjangan besar antara otomatisasi tingkat tiga dan tingkat empat. Ketika melakukan lompatan ke otomatisasi tingkat empat, biaya (perawatan, rekayasa, mesin, dll.) sering kali meningkat sementara fleksibilitas dapat menurun.

Faktanya, aplikasi untuk integrasi Industri 4.0 ke dalam Lean Production sudah ada dan telah diungkapkan sebagai istilah Lean Automation. Lean Automation bertujuan untuk perubahan yang lebih tinggi dan arus informasi yang lebih pendek untuk memenuhi permintaan pasar di masa mendatang. Bertentangan dengan kepercayaan umum, Lean Production tidak mengecualikan otomatisasi. Menurut prinsip otonomi Lean Production, tugas yang berulang dan bernilai tambah harus diotomatisasi. Dengan istilah *Low Cost Intelligent Automation* (LCIA), disarankan bahwa solusi yang terstandarisasi, otomatis, fleksibel, dan hemat biaya harus lebih disukai daripada solusi yang disesuaikan.

Namun, LCIA hanya berfokus pada sistem mekanik dan listrik dan tidak mempertimbangkan teknologi informasi dan komunikasi. Baik Lean Production maupun Industri 4.0 lebih menyukai struktur yang terdesentralisasi daripada sistem yang besar dan kompleks dan keduanya bertujuan untuk modul yang kecil dan mudah diintegrasikan dengan

tingkat kompleksitas yang rendah. Dengan mempertimbangkan cara-cara yang disebutkan di atas, bab ini menekankan hubungan antara Industri 4.0 dan lean manufacturing, dan mengusulkan metodologi yang menyediakan lingkungan perburuan limbah untuk aplikasi Industri 4.0.

### **3.2 PERMODELAN LEAN MANAGEMENT DAN FORESIGHT**

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menekankan interaksi antara Lean Manufacturing dan Industri 4.0. Misalnya, analisis hubungan antara Industri 4.0 dan lean manufacturing dan menyelidiki apakah Industri 4.0 mampu menerapkan lean. Sebuah metodologi telah diusulkan untuk mengintegrasikan Lean Manufacturing dan Industri 4.0 berkenaan dengan pemasok, pelanggan, proses serta faktor manusia dan kontrol. Para penulis juga menyatakan bahwa penelitian dan publikasi di bidang Industri 4.0 memiliki jawaban untuk mengatasi hambatan penerapan lean manufacturing.

Lean Management dan Foresight terintegrasi, yang mempertimbangkan kondisi tren dalam Industri 4.0, sumber daya manusia dan waktu. Tidak hanya meninjau literatur yang relevan dari revolusi industri ke industri 4.0 yang baru, tetapi juga menambahkan kebutuhan penggunaan otomatisasi dalam sistem produksi ramping dan karakterisasi rantai pasokan dengan tujuan mengembangkan kerangka kerja untuk integrasi sistem informasi dan teknologi.

Rancangan permainan simulasi baru dengan fokus pembelajaran pada Logistik Lean dengan komponen Industri 4.0 untuk mengajarkan penerapan teknologi Industri 4.0 yang memadai dalam logistik produksi. Analisis perusahaan global dan lokal yang didasarkan pada tinjauan pustaka dan kuesioner untuk mengembangkan model Kroasia tentang Perusahaan Cerdas Inovatif (model HR-ISE). Desain aksiomatik yang dapat dianggap sebagai seperangkat pedoman untuk desain Proses Pengembangan Produk Lean. Terkait dengan Industri 4.0, pedoman ini menunjukkan bagaimana proses pengembangan produk yang ramping dan cerdas dapat dicapai dengan penggunaan teknologi dan instrumen yang canggih dan modern.

Pertama, informasi singkat tentang konsep dasar filosofi lean dan sistem produksi lean akan disajikan. Filosofi lean terutama bertujuan untuk menghilangkan semua aktivitas yang menghabiskan waktu dan sumber daya tetapi tidak menambah nilai pada penyelesaian fisik produk. Aktivitas ini disebut pemborosan atau dalam bahasa Jepang muda, dan disebut sebagai aktivitas yang tidak menambah nilai. Di sini, nilai didefinisikan dari sudut pandang pelanggan akhir dan spesifik produk.

Oleh karena itu, aktivitas yang memberikan nilai tambah adalah aktivitas yang berkontribusi pada penyelesaian fisik produk dan aktivitas yang mungkin ingin dibayar oleh pelanggan. Menurut filosofi lean, pemborosan dimaksudkan untuk dihilangkan. Namun, terkadang beberapa pemborosan tampaknya tidak dapat dihindari dengan teknologi atau aset manufaktur saat ini. Misalnya, saat beralih dari satu produk ke produk lain, waktu penyiapan tidak dapat dihindari. Selain itu, ada pemborosan lain yang dapat segera dihilangkan dengan menerapkan alat dan teknik lean.

Menurut filosofi lean, ada tujuh pemborosan tradisional atau aktivitas yang tidak

memberikan nilai tambah yang umum dalam sistem manufaktur. Ini adalah produksi berlebih, transportasi, gerakan, menunggu, inventaris, pemrosesan yang tidak perlu, dan suku cadang/produk yang cacat. Kemudian, Womack dan Jones mengusulkan bahwa produk atau layanan yang tidak memenuhi harapan pelanggan harus dianggap sebagai jenis pemborosan. Pemborosan produksi berlebih mencakup produksi barang yang tidak ada pesanan atau persyaratannya.

Ini adalah jenis pemborosan terburuk, karena menyebabkan pemborosan lainnya. Karena produksi berlebih, persediaan dalam jumlah besar terkumpul, jumlah staf yang dipekerjakan berlebihan; ruang penyimpanan yang ditempati berlebihan, dan sebagainya. Pemborosan persediaan terkait dengan produksi berlebih, dan juga mencakup bahan baku berlebih, barang dalam proses, dan persediaan barang jadi yang disimpan. Selain itu, persediaan berlebih menyembunyikan masalah dalam sistem produksi seperti kerusakan mesin yang sering terjadi, waktu penyiapan yang lama, komponen yang rusak.

Pemborosan karena menunggu meliputi pekerja yang mengawasi mesin yang sedang beroperasi atau menunggu material, kendaraan, perkakas yang dibutuhkan; dan suku cadang yang menunggu sisa batch selesai. Pemborosan ini sering terjadi karena ketidakseimbangan lini produksi, sumber daya yang terbatas, produksi batch yang besar atau keterlambatan pengiriman material oleh pemasok. Pemborosan transportasi meliputi penanganan material untuk jarak yang jauh atau berlebihan.

Hal ini terjadi karena perencanaan tata letak fasilitas yang buruk, dan penggunaan gudang pusat daripada penyimpanan mini yang terdesentralisasi. Pemborosan proses mengacu pada pelaksanaan langkah-langkah tambahan karena desain alat, desain produk, atau desain proses yang buruk.

Pemborosan Cacat menyiratkan komponen atau produk yang tidak memenuhi syarat, di mana beberapa di antaranya adalah barang bekas dan yang lainnya dapat diperbaiki dengan pengerjaan ulang, tetapi cacat ini menyebabkan penggunaan sumber daya tambahan untuk membuat ulang komponen atau melakukan pengerjaan ulang. Selain itu, pemborosan Gerakan mencakup gerakan yang tidak perlu selama bekerja, seperti gerakan saat mencari, meraih, atau menumpuk perkakas dan komponen.

Ada beberapa alat dan teknik lean yang dapat digunakan untuk menghilangkan pemborosan. Alat/teknik lean dan pemborosan yang membantu menghilangkannya ditunjukkan pada Tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Tujuh Pemborosan versus Alat/Teknik Lean

	Manufaktur Seluler	Reduksi Pengaturan	Kontrol Kualitas	TPM	Smoothing produksi	Kanban	Pengurangan WIP	Pengembangan Pemasok	Jidoka	CIM
Overproduksi	√	√				√	√	√		
Transportasi	√									
Motion	√								√	√
Waiting	√	√		√	√	√		√	√	√
Inventori	√	√	√		√	√	√	√		
Tidak Perlu diolah		√								√
cacat		√	√	√				√	√	√

Di sisi lain, ada berbagai teknologi Industri 4.0 canggih dan sistem siber-fisik yang dapat digunakan untuk menghilangkan pemborosan dalam sistem manufaktur canggih. Teknologi paling mendasar dan jenis limbah terkait yang dapat dikurangi dengan teknologi ini digambarkan dalam Tabel 3.3. Manufaktur aditif (Pencetakan 3-D) dapat memfasilitasi desain dan manufaktur produk yang disesuaikan dengan harapan pelanggan dan sebanyak yang dibutuhkan, dalam kompleksitas desain, kustomisasi, dan kondisi volume produksi yang sesuai. Oleh karena itu, hal ini dapat mengurangi waktu tunggu produk dan membantu mengurangi waktu tunggu, inventaris, pemrosesan yang tidak perlu, pemborosan produksi berlebih, dan komponen/produk yang cacat.

**Tabel 3.3** Tujuh limbah dan teknologi Industri 4.0 yang canggih

	Manufaktur Aditif (3-D)	Realitas Tertambah	Simulasi & virtualisasi	Robotika Adaptif	IoT	Analisis Data	Komputasi Awan
Overproduksi		√	√	√		√	
Transportasi		√		√			√
Motion	√		√	√	√	√	√
Waiting	√				√	√	
Inventori	√		√	√			√
Tidak Perlu diolah	√				√	√	
cacat	√	√	√	√	√	√	

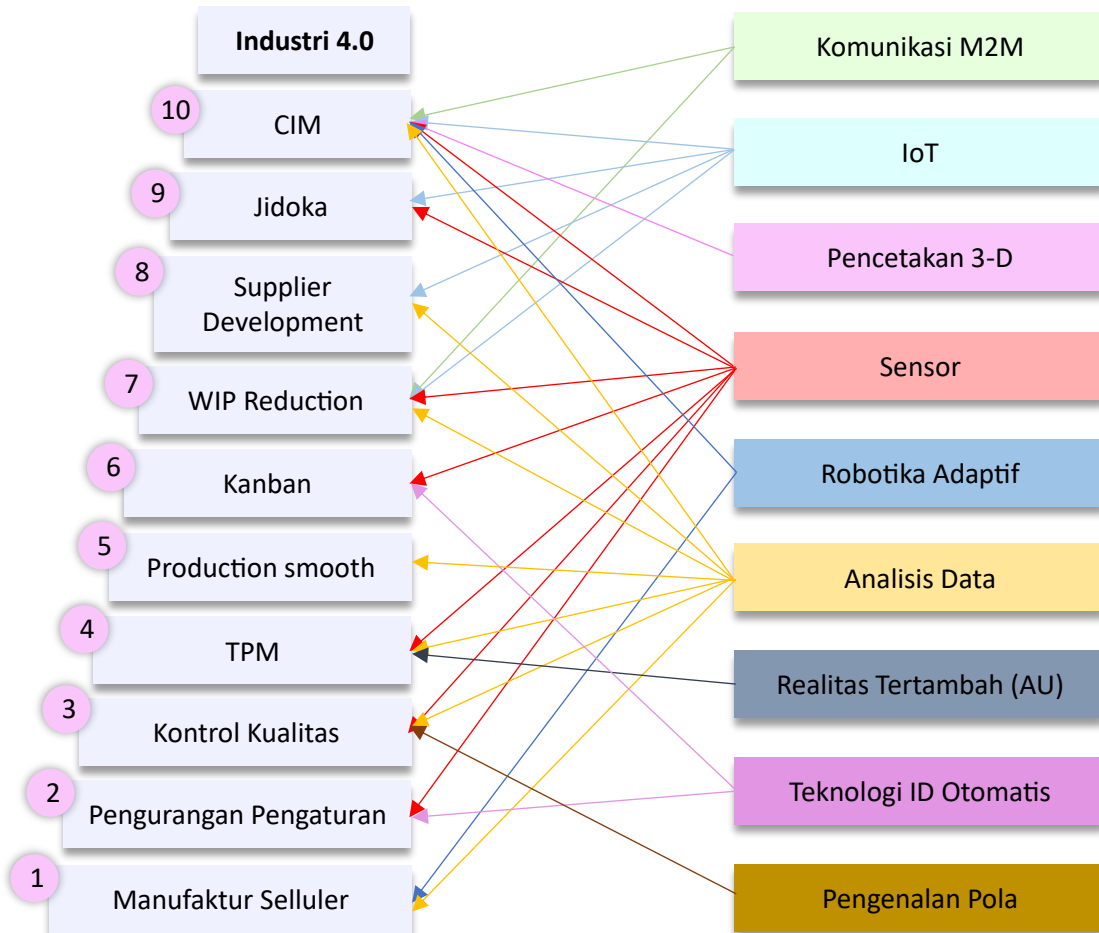
Selain itu, teknologi Augmented Reality di mana objek virtual 3D diintegrasikan ke dalam lingkungan nyata secara real time dapat digunakan untuk visualisasi instruksi kerja operasional dan spesifikasi komponen/produk yang memenuhi syarat. Hal ini dapat membantu menghilangkan pemborosan gerakan dan transportasi serta cacat.

Selain itu, paradigma Digital Twin mulai sering disebutkan yang menunjukkan potensi Simulasi dan Virtualisasi. Model simulasi pabrik dan proses manufaktur dapat dibangun dalam lingkungan virtual untuk mengukur dan mengamati desain sistem alternatif. Kemampuan komputasi awan bahkan dapat ditingkatkan untuk Pemodelan dan Simulasi jarak jauh dari sistem manufaktur. Melalui Simulasi dan Virtualisasi, limbah transportasi, waktu tunggu, pemrosesan, dan produk cacat dari sistem manufaktur dapat dikurangi.

Selain itu, Robotika Adaptif merupakan aspek penting dari Pabrik Cerdas, sehingga robot dapat beradaptasi dengan kondisi lingkungan dinamis atau parameter sistem manufaktur. Robotika Adaptif meningkatkan penghapusan beberapa jenis limbah, termasuk transportasi, gerakan, waktu tunggu, pemrosesan, dan cacat.

Internet of the Things (IoT) meningkatkan integrasi di antara sistem fisik dalam sistem manufaktur melalui sensor dan teknologi komunikasi nirkabel. Oleh karena itu, hal itu dapat mengurangi pemborosan waktu tunggu, inventaris yang tidak perlu, produksi berlebih, dan cacat.

Ketika Analisis Data diterapkan pada sistem manufaktur, diharapkan dapat memfasilitasi prediksi kegagalan. Analisis ini juga disebut Analisis Prediktif. Oleh karena itu, dengan mencegah kegagalan, pemborosan waktu tunggu, kelebihan persediaan (atau stok pengaman), kelebihan produksi, cacat, dan biaya transportasi dapat dikurangi.



**Gambar 3.1** Tangga alat Lean dan teknologi Industri 4.0

Komputasi awan adalah sistem paralel dan terdistribusi yang sedang berkembang yang terdiri dari komputer yang saling terhubung dan tervirtualisasi yang digunakan berdasarkan perjanjian tingkat layanan antara penyedia layanan dan pelanggan. Komputasi awan memberikan manfaat yang signifikan bagi perusahaan dengan membebaskan mereka dari menyiapkan infrastruktur perangkat keras dan perangkat lunak dasar dan investasi terkait.

Komputasi awan dan IoT, bersama-sama, meningkatkan persepsi dan komunikasi cerdas berdasarkan M2M dan penggunaan sumber daya sesuai permintaan dan efektif, dalam sistem manufaktur. Melalui penggunaan peralatan manufaktur yang efisien, pemborosan waktu tunggu, pemrosesan dan gerakan yang tidak perlu dapat dihilangkan sampai batas tertentu. Setelah membahas kemungkinan manfaat dari penghapusan pemborosan yang disediakan oleh teknologi Industri 4.0, cara penerapan teknologi ini yang terintegrasi dengan perangkat Lean dibahas. Gambar 3.1 mengilustrasikan hubungan yang diproyeksikan antara perangkat/teknik Lean dan teknologi canggih.

Gambar tersebut seperti tangga yang menyiratkan bahwa perangkat/teknik lean harus diterapkan secara berurutan. Pertama, tata letak sistem manufaktur harus diubah menjadi sistem manufaktur Seluler yang bertujuan untuk memproduksi keluarga produk oleh sel otonom dan khusus yang dilengkapi dengan semua sumber daya yang diperlukan. Saat menerapkan sistem Manufaktur Seluler, analisis Data dapat digunakan dengan melakukan

analisis pengelompokan pada matriks komponen-mesin, untuk membangun sel manufaktur. Selain itu, Robotika Adaptif dapat digunakan untuk penanganan material yang ditingkatkan, dan pemuatan-pembongkaran komponen.

Untuk tujuan pengurangan pengaturan, sensor yang mendeteksi komponen mesin seperti cetakan, bilah, dll. dapat mempercepat operasi pengaturan internal dan melindungi operator dari kecelakaan. Oleh karena itu, keselamatan kerja akan ditingkatkan. Selain itu, Robotika Adaptif juga dapat diimplementasikan untuk Pengurangan Pengaturan.

Kontrol Kualitas dan mekanisme anti-gagal (Poka Yoke) merupakan aspek penting lainnya dari sistem produksi ramping. Untuk mencegah komponen dan produk yang cacat, teknologi pengenalan pola dapat digunakan untuk mendeteksi komponen yang cacat secara visual melalui kamera. Selain itu, Augmented Reality dapat digunakan untuk memberikan instruksi kepada operator tentang operasi secara visual guna mencegah mereka melakukan tugas dengan buruk. Sensor dapat digunakan sebagai mekanisme atau perangkat anti-gagal (poka-yoke).

*Total Productive Maintenance (TPM)* bertujuan untuk meningkatkan efektivitas peralatan mesin secara keseluruhan yang mencakup pengurangan waktu, kecepatan, dan kerugian kualitas. Kerugian waktu terutama disebabkan oleh pengaturan dan kegagalan mesin. Kegagalan mesin dapat dicegah dengan perawatan otomatis dan penggantian komponen yang meningkatkan status mesin dan memperlambat degradasinya. Selama aktivitas perawatan, Augmented Reality dapat digunakan untuk memandu operator dalam aktivitas perawatan. Selain itu, sensor yang melacak getaran, kebisingan, dan panas membantu operator mendeteksi kondisi abnormal sebelum terjadi kegagalan.

Production Smoothing adalah aktivitas penjadwalan produksi di mana kuantitas komponen atau produk yang sama dicoba untuk diproduksi setiap hari atau setiap jam, sejauh mungkin. Analisis Data adalah alat yang cocok untuk menganalisis frekuensi permintaan yang datang dari pelanggan.

Kanban adalah alat produksi ramping tempat kontrol produksi tarik dilakukan. Ini berarti sejumlah komponen/produk baru diproduksi hanya saat dibutuhkan dan sebanyak yang dibutuhkan. Secara tradisional, kode batang dicetak pada kanban. Namun, berkat Teknologi Auto-ID yang canggih, alih-alih memindai kode batang dari banyak kanban, tag RFID dideteksi oleh pembaca dan komunikasi cepat antar tahapan dapat dicapai.

Untuk Pengurangan Proses Kerja (WIP) di antara mesin, Komunikasi M2M, IoT, sensor, dan analisis data yang lebih baik harus digunakan. Saat komunikasi M2M melalui sensor dilakukan, setiap mesin merasakan status ketersediaan mesin berikutnya dan memutuskan untuk memulai atau menghentikan produksi agar tidak melebihi kapasitas area penyangga. Mekanisme ini pada dasarnya mengurangi kuantitas WIP. Selain itu, melalui analisis Data, waktu siklus dan karakteristik kegagalan mesin dapat dianalisis dan kapasitas area penyangga di antara mesin dapat disesuaikan. Untuk tujuan Pengembangan Pemasok, analisis Data yang lebih baik harus digunakan untuk menganalisis data permintaan dengan lebih baik. Untuk mencapai koordinasi dan komunikasi yang lebih baik antara pihak pemasok dan pelanggan, teknologi IoT harus digunakan.

Jidoka berarti otomatisasi dengan sentuhan manusia. Dengan kata lain, sistem manufaktur menggunakan teknologi otomatisasi di bawah pengawasan para pekerja. Jadi, saat menerapkan Jidoka, sensor dan IoT dapat digunakan.

Saat mengubah sistem menjadi Sistem Manufaktur Terintegrasi Komputer, Komunikasi M2M, sensor, IoT, Percetakan 3-D, Robotika adaptif, dan Analisis Data dapat digunakan untuk memperoleh lebih banyak manfaat dari teknologi manufaktur canggih.

### 3.3 APLIKASI LEAN PRODUCTION BERBASIS OTOMATISASI

Teknologi dan otomatisasi Industri 4.0 dapat diterapkan pada beberapa metode Lean Production. Bagian berikut menjelaskan contoh kombinasi yang memungkinkan.

*Sistem E-Kanban:* Digitalisasi sistem Kanban telah dikenal sejak beberapa tahun lalu. Kartu fisik konvensional untuk kontrol produksi berorientasi pesanan digantikan oleh Kanban virtual. Bergantung pada penerapan sistem e-Kanban ini, tempat penyimpanan yang hilang atau kosong dikenali secara otomatis melalui sensor. Sistem e-Kanban mengirimkan Kanban virtual untuk memicu pengisian ulang. Dengan menggunakan Teknologi Komunikasi Informasi, Kanban yang hilang tidak lagi menyebabkan kesalahan dalam kontrol produksi selama inventaris dalam sistem pelaksanaan manufaktur sesuai dengan inventaris sebenarnya. Selain itu, penyesuaian Kanban karena perubahan ukuran batch, proses, atau waktu siklus dapat dilakukan dengan mudah.

Thermo King, produsen sistem kontrol suhu internasional, telah menerapkan RFID aktif untuk apa yang disebutnya sistem pengisian ulang suku cadang "e-Kanban" di pabriknya di Galway, Irlandia. Ketika suku cadang yang tersedia di stasiun perakitan turun ke tingkat yang telah ditetapkan sebelumnya, pekerja cukup menekan tombol panggil yang terintegrasi ke tag RFID aktif. Sinyal tag diterima oleh LAN nirkabel fasilitas tersebut. Transmisi tag menunjukkan nomor suku cadang dan lokasi yang memerlukan pengisian ulang, dan perangkat lunak sistem memerintahkan sejumlah suku cadang untuk dikirim ke stasiun kerja yang sesuai.

*Otomatisasi dalam Pembuktian Kesalahan:* Magna T.E.A.M. Systems menggunakan teknologi kode batang secara luas untuk menghilangkan kesalahan manusia dan kesalahan produksi. Operator memindai kode batang yang dililitkan di pergelangan tangan mereka untuk memastikan bahwa mereka merakit produk yang benar pada jalur produksi campuran tinggi. Semua operator menggunakan kode batang untuk masuk ke stasiun kerja mereka sehingga kami memiliki catatan tentang siapa yang membangun suku cadang apa. Instruksi kerja elektronik yang ditampilkan di setiap stasiun kerja membahas pembuktian kesalahan dan berfungsi sebagai alat bantu visual bagi operator.

Sistem tanpa kertas merupakan cara bagi anggota tim untuk berinteraksi saat merakit komponen di Magna. Karena semua nuansa yang terlibat dalam perakitan campuran tinggi, perakitan harus terus-menerus melihat layar untuk memastikan bahwa mereka menggunakan komponen yang benar saat merakit dengan benar sesuai pekerjaan standar dan memvalidasi nilai torsi melalui sensor. Operasi dan pemantauan kontrol proses di pabrik Magna ditangani oleh sistem MES. Seluruh proses pengurutan diotomatisasi, termasuk semuanya mulai dari menerima siaran perintah pembuatan hingga mengirimkan bill of lading. Selain itu, alat

pengikat elektrik, pemindai kode batang, dan tag RFID dihubungkan ke dalam sistem untuk pencegahan kesalahan.

Pada tahun 2012, Universitas Denmark Selatan bersama dengan produsen mainan Lego A/S mengembangkan pendekatan untuk mengintegrasikan teknologi otomasi di stasiun perakitan berbentuk U, yang juga dikenal sebagai lini Chaku Chaku. Interaksi manusia dan mesin menjadi fokus proyek ini. Hasilnya, mereka mengembangkan sistem manajemen pesanan lokal yang mengalihkan tugas-tugas umum sistem ERP kepada karyawan di lini Chaku Chaku. Menurut mereka, otomasi tugas-tugas yang memberikan nilai tambah sangatlah wajar karena investasi diamortisasi dalam waktu yang lebih singkat. Selain itu, akurasi dan presisi mesin lebih tinggi daripada manusia.

Di sisi lain, proses-proses yang kompleks, penanganan pengecualian, dan tugas-tugas logistik merupakan fungsi-fungsi umum yang tidak memungkinkan untuk diotomatisasi. Selain itu, proyek penelitian yang sedang berlangsung Lean Intelligent Assembly Automation juga membahas lini Chaku Chaku. Konsorsium yang terdiri dari misalnya Adam Opel AG dan Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA, mengembangkan solusi berbasis robot untuk mendukung karyawan dalam tugas-tugas perakitan di lini Chaku Chaku. Tujuannya adalah untuk memperkaya tugas perakitan manual agar lebih menguntungkan untuk batch yang lebih besar.

*Sistem iBin:* Pada tahun 2013, Würth Industrie Services GmbH & Co. KG memperkenalkan sistem pemesanan optik iBin sebagai perluasan untuk tempat penyimpanan Kanban (Gambar. 3.1). Kamera dalam modul mendeteksi tingkat pengisian tempat penyimpanan dan iBin melaporkan status tersebut secara nirkabel ke sistem kontrol inventaris. Selain itu, iBin juga dapat mengirim pesanan secara otomatis ke pemasok. Hasilnya, stok penyangga dapat dikurangi dan suku cadang dapat dijadwalkan sesuai pesanan.

*Sistem Milkrun terintegrasi kode QR:* Wittenstein AG dan BIBA—Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH bekerja sama di antara perusahaan lain dalam proyek yang didanai negara CyProS pada sistem pasokan material fleksibel untuk lini produksi. Alih-alih interval tetap, sistem TI menghitung interval perjalanan pulang pergi untuk sistem transportasi berdasarkan permintaan waktu nyata. Pada prototipe pertama, pengumpulan data selama apa yang disebut milk run ini dilakukan dengan memindai kode QR. Interaksi dengan karyawan sistem transportasi diwujudkan oleh PC tablet konvensional. Dengan sistem pasokan material yang berorientasi pada pesanan ini, jarak tempuh dapat dikurangi sekitar 25% pada tingkat keandalan pemasok yang sama.

*Pick-by-Vision:* Dalam aplikasi DHL, pekerja gudang melihat realitas fisik lorong dan rak di depannya sama seperti yang dapat dilihatnya jika ia tidak mengenakan layar yang dipasang di kepala, tetapi ini ditambah dengan kode AR yang ditumpangkan dalam bentuk instruksi kerja grafis, yang muncul setelah ia memindai kode batang di lokasi penyimpanan dengan kaca mata pintarnya. Kode ini memberi tahu dia ke mana harus pergi, berapa banyak barang yang harus diambil, dan bahkan di mana harus meletakkannya di trolinya. Dengan selesainya proyek percontohan ini, DHL sedang mengevaluasi kesesuaian operasional dan kelayakan ekonomis dari penerapan pemilihan visi realitas tertambah. Sementara itu, tim Riset Trennya telah

mengidentifikasi aktivitas logistik lain yang dapat ditingkatkan dengan penerapan teknologi AR yang tepat (Url-1).

*Sistem kontrol berorientasi pesanan:* Produk Cerdas dapat berisi informasi Kanban untuk mengontrol proses produksi. Contoh produksi terkontrol yang sepenuhnya terdesentralisasi berdasarkan Produk Cerdas didemonstrasikan oleh SmartFactoryKL di Hannover Messe 2014 di Jerman. Stasiun kerja yang disajikan memproduksi secara otonom sesuai dengan jadwal kerja pada produk. Meskipun produksi ini dikendalikan dengan dorongan, konsep ini dapat diadopsi untuk sistem kontrol berorientasi pesanan.

*Standarisasi kerja berbasis Augmented Reality:* Project MOON (assembly Oriented authoring augmented reality) dikembangkan oleh AIRBUS Military. MOON menggunakan informasi 3D dari Industrial Digital Mock-Up untuk menghasilkan instruksi perakitan dan penyebarannya dengan menerapkan teknologi Augmented Reality. Sebuah prototipe dikembangkan untuk perutean kabel listrik di rangka 36 AIRBUS A400M.

*Stasiun kerja Plug'n'Produce:* Industri 4.0 selanjutnya dapat mendukung persyaratan Lean Production untuk produksi yang fleksibel dan modular. Selama beberapa tahun SmartFactoryKL mendemonstrasikan stasiun kerja modular berdasarkan antarmuka fisik dan TI yang terstandarisasi, yang dapat dikonfigurasi ulang secara fleksibel ke jalur produksi baru melalui Plug'n'Produce. Menurut prinsip Single-Minute-exchange-of-Die (SMED), waktu penyiapan harus dikurangi menjadi kurang dari sepuluh menit. Plug'n'Produce mentransfer SMED dari satu stasiun kerja ke seluruh jalur produksi.

*Smart Planner:* Sistem Kanban tradisional dengan jumlah Kanban yang tetap, waktu siklus yang tetap, dan perjalanan pulang pergi yang tetap untuk mengangkut barang berubah menjadi produksi dinamis yang secara otomatis mengadopsi program produksi saat ini melalui sistem ini. Sistem Cyber Physical yang terdesentralisasi dan terintegrasi di stasiun kerja dapat menegosiasikan waktu siklus dan dengan demikian menemukan yang optimal antara pemanfaatan kapasitas tertinggi yang mungkin per stasiun kerja dan aliran barang yang berkelanjutan. Dalam proyek yang didanai negara RES-COM, Pusat Penelitian Jerman untuk Kecerdasan Buatan (DFKI) GmbH, telah menunjukkan bagaimana deskripsi semantik stasiun kerja mendukung pengoptimalan proses produksi dengan berbagai tujuan bisnis, seperti waktu pemrosesan atau efisiensi.

*Sistem Penggantian Cetakan Otomatis:* Di K 2016 di Dusseldorf, Staubli dari Jerman (kantor AS di Duncan, S.C.) menunjukkan penggantian cetakan tanpa campur tangan dalam waktu kurang dari 2 menit, dan juru bicara perusahaan mengatakan sistem dapat mempercepatnya hingga 1 menit. Meja cetakan di atas rel membawa cetakan yang telah dipanaskan terlebih dahulu ke posisi di samping mesin cetak. Sensor di kereta membaca parameter pengaturan cetakan dari chip di dalam cetakan. Untuk cetakan yang sudah ada di dalam mesin cetak, semua sambungan daya dan data terputus secara otomatis dalam waktu 3 detik. Satu kunci manual memutuskan semua saluran air.

Ejektor ditarik secara otomatis, dan pelat magnetik Staubli melepaskan lampu dari cetakan dalam waktu 3 detik. Cetakan tersebut kemudian meluncur keluar dari mesin ke kereta, yang diindeks ke depan sehingga cetakan baru dapat meluncur ke tempatnya, dijepit

secara magnetis, dan membuat semua sambungan utilitas. Langkah terakhir adalah pertukaran otomatis gripper robot untuk pekerjaan baru. Sumber Staubli mengatakan sistem ini sedang digunakan di pabrik Plastic Omnium baru di Meksiko, di mana beberapa meja cetakan yang dipasang di rel menukar cetakan 60 ton dalam mesin pres 3700 ton dalam waktu kurang dari 2 menit. (Url-2).

Selain sistem pasokan material yang fleksibel, WITTENSTEIN AG mendigitalkan Heijunka-Board. Heijunka, yang juga dikenal sebagai levelling, menggambarkan metode untuk mengubah pesanan pelanggan menjadi batch yang lebih kecil dan berulang. Hal ini dapat diwujudkan dengan menggunakan papan yang memegang kartu Kanban untuk mengendalikan program produksi. Alih-alih papan konvensional, tampilan dengan antarmuka pengguna grafis (GUI) yang terhubung ke jalur produksi dan MES telah disiapkan. Dengan ini, arus informasi dan upaya untuk memperbarui papan dapat dipersingkat.

*Pemeliharaan Prediktif:* Pemantauan kondisi, analisis data, dan prediksi awal kegagalan meningkatkan waktu aktif dan efektivitas peralatan secara keseluruhan. Untuk tujuan ini, praktik pemeliharaan prediktif di fasilitas manufaktur telah meningkat. Dalam industri minyak dan gas yang peralatannya berada di lokasi terpencil, ladang minyak telah didigitalkan melalui sensor. Nama platform perangkat lunak tersebut adalah MAPR Distribution Regarding Hadoop®. Dalam arsitektur ini, data yang dikumpulkan oleh sensor dikirimkan ke basis data deret waktu melalui layanan Web. Data dalam basis data dianalisis melalui algoritme prediktif dan ketika tingkat pengukuran kritis terdeteksi, pemeliharaan dijadwalkan.

Selain itu, untuk setiap pabrik manufaktur, motor listrik merupakan elemen penting, dan sebagian besar dipengaruhi oleh kegagalan bantalan. Kegagalan bantalan dapat dideteksi terlebih dahulu melalui sensor yang melacak tren getaran sebagai deret waktu. Tingkat peringatan, peringatan, dan kesalahan kecepatan getaran ditentukan untuk memprediksi lebih awal dan mencegah kegagalan komponen.

## **Kesimpulan**

Pendekatan yang digunakan dalam buku ini menjawab sebagian besar pertanyaan ini, dan menggambarkan bahwa lean manufacturing dan Industri 4.0 tidak saling eksklusif; keduanya dapat diintegrasikan dengan mulus satu sama lain untuk manajemen produksi yang sukses. Dalam buku ini menganalisis penelitian dan publikasi yang terkait dalam bidang Industri 4.0, dan mengidentifikasi bagaimana keduanya bertindak sebagai faktor pendukung untuk penerapan lean manufacturing.

Dalam bab-bab sebelumnya istilah Lean Automation dan Industri 4.0 telah dijelaskan. Contoh-contoh terpilih menunjukkan bahwa integrasi teknologi otomasi inovatif dalam Lean Production merupakan topik terkini dan menjanjikan.

Industri 4.0 tidak akan menyelesaikan masalah sistem manufaktur yang salah urus dan tidak terorganisir dengan baik. Alat-alatnya harus diterapkan pada aktivitas lean yang dilakukan dengan sukses sebelum otomatisasi. Selain itu, aliran informasi yang efektif harus dijaga agar tetap efektif sebelum memperkenalkan TIK. Dalam konteks ini, menjaga data dengan cara yang benar dan terkini merupakan faktor keberhasilan penting dalam Industri 4.0

dan Lean Production.

Ada banyak contoh aplikasi otomasi tingkat tinggi dalam fasilitas produksi yang tidak memerlukan otomasi tingkat ini. Tidak diragukan lagi bahwa tingkat otomasi yang tepat memiliki tempat dalam produksi ramping, tetapi memahami dampak berbagai bentuk otomasi dan desain mesin pada sistem produksi ramping sangat penting untuk menciptakan sistem produksi kelas dunia yang fleksibel dan efisien. Sistem produksi ramping harus dirancang agar mengalir, dan otomasi harus dipilih setelah memutuskan cara terbaik untuk meningkatkan aliran dan menyesuaikannya dengan aliran. Harus dinyatakan bahwa setelah menerapkan peningkatan ramping, otomasi selektif memiliki potensi untuk menambah nilai dan, bagaimanapun, mengurangi variabilitas manusia.

Selain itu, kebiasaan yang salah dan berprasangka buruk serta perilaku karyawan yang terbiasa dengan pemborosan tentang metode kerja merupakan masalah kritis yang harus ditangani dalam desain sistem manufaktur. Dalam konteks ini, strateginya adalah mengubah proses berpikir orang setelah mengubah perilaku mereka dengan bantuan disiplin bisnis yang tidak membuat orang tertekan. Oleh karena itu, Sistem Manajemen Lean termasuk standarisasi kerja dan kontrol visual disarankan untuk mencapai strategi ini.

## **BAB 4**

### **PERMODELAN DAN PERSIAPAN DALAM STRATEGI INDUSTRI 4.0**

Perusahaan yang mentransformasi bisnis dan operasinya sesuai dengan prinsip Industri 4.0 menghadapi proses yang kompleks dan anggaran yang tinggi karena teknologi yang bergantung yang memengaruhi input dan output proses. Selain itu, karena transformasi Industri 4.0 menciptakan perubahan dalam cara berbisnis dan proposisi nilai, hal itu menjadi konsep yang sangat penting yang memerlukan dukungan manajemen puncak untuk proyek dan investasi.

Oleh karena itu, diperlukan perspektif yang luas tentang strategi, organisasi, operasi, dan produk perusahaan. Jadi, model kematangan cocok untuk perusahaan yang berencana untuk mentransformasi bisnis dan operasinya untuk Industri 4.0. Ini adalah teknik yang sangat penting untuk Industri 4.0 dalam hal perusahaan yang berusaha menilai proses, produk, dan organisasi mereka serta memahami tingkat kematangan mereka. Dalam bab ini, model kematangan yang ada untuk transformasi Industri 4.0 ditinjau dan model kematangan Industri 4.0 yang baru diusulkan.

#### **4.1 PENDAHULUAN**

Di dunia saat ini, tantangan ekonomi yang didorong oleh perkembangan teknologi dan masyarakat memaksa perusahaan industri meningkatkan kelincahan dan respons mereka untuk memperoleh kemampuan mengelola seluruh rantai nilai. Oleh karena itu, perusahaan memerlukan bantuan teknologi virtual dan fisik yang menyediakan kolaborasi dan adaptasi cepat untuk bisnis dan operasi mereka.

Implementasi strategi Industri 4.0 memerlukan aplikasi yang luas di perusahaan karena para eksekutif dari beberapa industri tidak yakin tentang hasil proyek Industri 4.0 dan biaya investasi dan mereka kurang memiliki pengetahuan dalam konsep Industri 4.0. Model kematangan menyediakan pengetahuan skala besar tentang keadaan perusahaan saat ini dan jalur yang harus ditempuh untuk implementasi strategi Industri 4.0.

Istilah kematangan mengacu pada kondisi yang sempurna; juga, itu adalah bukti pencapaian dan memberikan panduan untuk memperbaiki atau mencegah masalah. Mettler (2009) mendefinisikan kematangan sebagai pengembangan kemampuan tertentu atau mencapai kesuksesan yang ditargetkan dari tahap awal ke tahap yang diantisipasi. Kematangan dapat digunakan sebagai kriteria evaluasi dan digambarkan sebagai lengkap, sempurna atau siap dan juga digunakan untuk perkembangan dari tahap dasar ke tahap akhir yang lebih maju.

Permodel kematangan merepresentasikan jalur logis yang diinginkan untuk proses dalam beberapa bidang bisnis yang mencakup tingkat kematangan yang berbeda. Selain itu, model kematangan didefinisikan sebagai teknik yang berharga untuk menilai proses atau organisasi dari berbagai perspektif, kerangka kerja model kematangan menjadi sangat penting untuk menilai organisasi.

Model kematangan sebagai alat yang dapat digunakan untuk menggambarkan

perkembangan sempurna menuju perubahan yang diinginkan dengan memanfaatkan beberapa fase atau tingkat progresif. Model kematangan memungkinkan organisasi untuk mengaudit dan melakukan tolok ukur mengenai hasil penilaian, untuk melacak kemajuan menuju tingkat yang diinginkan dan untuk mengevaluasi elemen organisasi seperti kekuatan, kelemahan dan peluang dengan mengurutkan tingkat kematangan dalam urutan dari tahap dasar hingga tahap lanjutan: Awal, Terkelola, Terdefinisi, Terkelola Secara Kuantitatif dan Mengoptimalkan.

Model kematangan diposisikan sebagai alat untuk membandingkan level terkini suatu organisasi atau proses dengan level yang diinginkan dalam hal kematangan melalui konseptualisasi dan pengukuran. Dalam artikel tersebut, perbedaan antara model kesiapan dan kematangan dijelaskan sedemikian rupa sehingga model kesiapan mengklarifikasi apakah organisasi siap untuk memulai proses pengembangan atau tidak; namun, model kematangan menargetkan untuk menunjukkan level kematangan organisasi tersebut.

Model kematangan membantu organisasi untuk memutuskan kapan dan mengapa mereka perlu mengambil tindakan untuk maju; selain itu, mengajarkan organisasi tindakan mana yang harus dipertimbangkan untuk mencapai level kematangan tingkat lanjut. Menurut penulis, organisasi harus membutuhkan informasi yang diperoleh dari model kematangan untuk membandingkan status terkini dengan praktik terbaik di bidang bisnis terkait.

Oleh karena itu, nilai model kematangan diukur berdasarkan kegunaannya pada analisis dan pemosisian. Dalam studi IBM pada tahun 2015, disebutkan bahwa transformasi Industri 4.0 memiliki banyak kesulitan karena ketidakcukupan teknologi TI terkini, kurangnya pengetahuan, dan biaya investasi yang tinggi. Transformasi digital bisnis dan operasi perusahaan didorong oleh investasi dalam teknologi informasi dan telekomunikasi serta mesin-mesin baru. Selain itu, kebutuhan integrasi teknologi terkini, mesin-mesin baru, dan proses kerja otomatis menghambat integrasi horizontal dan vertikal di sepanjang rantai nilai.

Menurut wawancara di seluruh industri, ketika mengimplementasikan Industri 4.0 dalam praktik, masalah-masalah berikut muncul:

- Kurangnya panduan strategis dan masalah persepsi tentang konsep Industri 4.0 yang sangat kompleks.
- Ketidakpastian tentang hasil proyek Industri 4.0 dalam hal manfaat dan biaya.
- Kegagalan menilai kemampuan perusahaan dalam Industri 4.0.

Sehubungan dengan masalah ketiga, model kematangan dan penilaian kematangan Industri 4.0 menjadi sangat penting, karena banyak perusahaan tampaknya kesulitan untuk menginisialisasi transformasi Industri 4.0.

Tujuan bab ini adalah untuk menjelaskan "model kematangan"; membahas masalah yang dihadapi ketika mengimplementasikan strategi Industri 4.0; untuk menjelaskan alasan pemanfaatan model-model ini dan manfaatnya bagi strategi Industri 4.0.

## **4.2 MODEL KEMATANGAN DAN KESIAPAN INDUSTRI 4.0 YANG ADA**

Pada bagian ini, kami melakukan analisis terhadap beberapa model kematangan dan kesiapan Industri 4.0 dan survei penilaian. Dari karya-karya ini, kami memperoleh konsep yang

relevan untuk struktur model kami. Model dan penilaian diberikan di bawah ini:

- IMPULS—Kesiapan Industri 4.0
- Penilaian Mandiri Operasional Industri 4.0/Digital
- Model Kematangan Perusahaan yang Terhubung
- Model Kematangan Industri 4.0.

#### **IMPULS—Kesiapan Industri 4.0**

Mitra proyek lainnya melakukan lokakarya Industri 4.0 dan penelitian literatur untuk mengusulkan model kesiapan Industri 4.0. Model ini berisi enam tingkat kesiapan Industri 4.0 yang diberikan di bawah ini:

- Tingkat 0: Orang Luar
- Tingkat 1: Pemula
- Tingkat 2: Menengah
- Tingkat 3: Berpengalaman
- Tingkat 4: Ahli
- Tingkat 5: Pelaku terbaik.

Dalam studi ini, model kesiapan yang ada didesain ulang dengan kontribusi dari lokakarya dan dibentuk dalam enam dimensi Industri 4.0 dengan menambahkan dua dimensi ke model sebelumnya. Dimensi-dimensi ini adalah “Strategi dan organisasi”, “Pabrik pintar”, “Operasi pintar”, “Produk pintar”, “Layanan berbasis data” dan “Karyawan”. Dimensi dan bidang terkait Industri 4.0 yang terkait dengan model ini diberikan dalam Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Dimensi dan bidang terkait Industri 4.0

<b>Ukuran</b>	<b>Bidang terkait</b>
Strategi dan Organisasi	Strategi Investasi Manajemen Inovasi
Pabrik Pintar	Permodelan Digital Infrastruktur Peralatan Penggunaan Data Sistem TI
Operasi Cerdas	Penggunaan Awan Keamanan TI Proses Otonom Berbagi Informasi
Produk Pintar	Analisis data dalam fase penggunaan fungsi tambahan TIK
Layanan Berbasis Data	Bagian data yang digunakan Bagi Hasil Layanan berbasis data
Karyawan	Akuisisi Keterampilan Keahlian Karyawan

Model kesiapan yang diusulkan digunakan untuk mengukur tingkat kesiapan Industri 4.0 perusahaan dari 0 hingga 5 yang berisi persyaratan minimum yang harus dimiliki perusahaan. Kuesioner model kesiapan ini mengukur karakteristik struktural perusahaan, pengetahuan mereka tentang Industri 4.0, motivasi dan hambatan mereka selama perjalanan

Industri 4.0. Survei penilaian memiliki total 24 pertanyaan untuk dimensi terkait dan beberapa pertanyaan tentang industri, ukuran tenaga kerja domestik, dan pendapatan tahunan. Untuk mengukur dan mendefinisikan kesiapan Industri 4.0, skala Likert lima poin digunakan.

Profil perusahaan dikelompokkan di bawah tiga judul untuk meringkas hasil dengan lebih baik seperti Pendatang Baru (level 0 dan 1), Pembelajar (level 2) dan Pemimpin (level 3 ke atas). Pendatang Baru terdiri dari perusahaan yang belum pernah memulai proyek apa pun atau telah mempelajari beberapa proyek. Pembelajar terdiri dari sekelompok perusahaan yang memulai proyek pertama yang terkait dengan Industri 4.0. Pemimpin adalah kelompok yang berisi perusahaan level 3, 4 atau 5 yang jauh lebih maju dari perusahaan lain dalam implementasi Industri 4.0.

Tingkat kesiapan perusahaan ditentukan berdasarkan level terendah bidang terkait dalam dimensi. Dimensi Industri 4.0 diberi bobot pada skala 100 poin. “Strategi dan organisasi” memiliki 25 poin secara keseluruhan, “Pabrik pintar” memiliki 14 poin secara keseluruhan, “Produk pintar” memiliki 19 poin secara keseluruhan, “Layanan berbasis data” memiliki 14 poin secara keseluruhan, “Operasi pintar” memiliki 10 poin secara keseluruhan dan terakhir “Karyawan” memiliki 18 poin secara keseluruhan.

Sebagai hasil pengukuran, profil perusahaan diidentifikasi dan rintangan utama dalam dimensi dicantumkan. Pada tahap akhir, rencana tindakan dibuat bagi perusahaan untuk membantu mereka mencapai kesiapan Industri 4.0 level 5.

#### **Penilaian Mandiri Industri 4.0/Operasi Digital (2016)**

PwC menerbitkan laporan berjudul “Industri 4.0: Membangun perusahaan digital” untuk memberikan perspektif komprehensif kepada perusahaan tentang Industri 4.0 dengan menyajikan model kematangannya sendiri dan “Cetak Biru untuk Keberhasilan Digital” yang diberikan dalam Tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Cetak biru untuk kesuksesan digital

<b>Langkah – Langkah Praktis</b>					
<b>Langkah 1</b>	<b>Langkah 2</b>	<b>Langkah 3</b>	<b>Langkah 4</b>	<b>Langkah 5</b>	<b>Langkah 6</b>
Petakan strategi Industri 4.0 Anda	Buat proyek percontohan awal	Tentukan kemampuan yang Anda perlukan	Menjadi ahli dalam analisis data	Bertransformasi menjadi perusahaan digital	Secara aktif merencanakan pendekatan ekosistem

Pada langkah pertama “Cetak Biru untuk Keberhasilan Digital”, PwC memberikan perusahaan model kematangan untuk menilai kapabilitas mereka. Model kematangan ini dibentuk dalam empat tahap dan tujuh dimensi. Tahapan ditentukan sebagai berikut:

- Pemula digital
- Integrator vertikal
- Kolaborator horizontal
- Juara digital.

PwC menilai tingkat kematangan perusahaan dengan tujuh dimensi seperti “Model bisnis digital dan akses pelanggan”, “Digitalisasi penawaran produk dan layanan”, “Digitalisasi dan

integrasi rantai nilai vertikal dan horizontal”, “Data dan Analisis sebagai kemampuan inti”, “Arsitektur TI yang tangkas”, “Kepatuhan, keamanan, hukum dan pajak”, “Organisasi, karyawan dan budaya digital”.

PwC memungkinkan perusahaan untuk menilai kematangan Industri 4.0 mereka dan memetakan hasil mereka dengan alat penilaian mandiri daring. Pada tahap akhir penilaian, PwC menyediakan rencana tindakan bagi perusahaan untuk membuat mereka berhasil mencapai tingkat kematangan Industri 4.0 yang tinggi.

Alat penilaian mandiri daring memiliki total 33 pertanyaan untuk dimensi terkait dan beberapa pertanyaan tentang industri, kawasan, negara dan pendapatan tahunan untuk mengklasifikasikan perusahaan. Dalam kuesioner, skala Likert lima poin digunakan untuk setiap pertanyaan dan grafik radar disediakan di akhir penilaian.

### **Model Kematangan Perusahaan Terhubung**

Model Kematangan Perusahaan Terhubung dikembangkan oleh Rockwell Automation pada tahun 2014 dan model ini berisi lima tahap dan empat dimensi yang berfokus pada teknologi. Tahapan dalam model ini diberikan di bawah ini:

- Tahap 1: Penilaian
- Tahap 2: Jaringan dan kontrol yang aman dan ditingkatkan
- Tahap 3: Modal data kerja yang ditetapkan dan diatur
- Tahap 4: Analisis
- Tahap 5: Kolaborasi.

Tahap Penilaian Model Kematangan Perusahaan yang Terhubung mengevaluasi semua aspek jaringan OT/IT (Teknologi Operasional/Teknologi Informasi) yang ada di suatu organisasi dengan empat dimensi seperti “Infrastruktur informasi (perangkat keras dan perangkat lunak)”, “Kontrol dan perangkat (sensor, aktuator, kontrol motor, sakelar, dll.) yang memasukkan dan menerima data”, “Jaringan yang memindahkan semua informasi ini” dan “Kebijakan keamanan (pemahaman, organisasi, penegakan)”. Dinyatakan bahwa tantangan utama selama tahap penilaian adalah potensi keraguan dalam menginvestasikan waktu untuk mempertanyakan praktik yang telah mereka andalkan selama bertahun-tahun.

Pada Tahap 2, organisasi OT/IT dibentuk untuk memberikan konektivitas yang aman dan adaptif antara operasi lantai pabrik dan sistem bisnis perusahaan setelah tahap penilaian. Peningkatan jangka panjang dimulai dan kesenjangan serta kelemahan operasi saat ini diidentifikasi.

Di perusahaan berskala besar, kontrol dan jaringan yang ketinggalan zaman menciptakan tantangan untuk transformasi serta keraguan dari para eksekutif dan teknisi yang merasa bahwa sistem saat ini masih layak. Tahap 3, yang merupakan tahap di mana perbaikan yang dilakukan dengan data saat ini sedang berlangsung di Tahap 2. Pada tahap ini, ditetapkan bagaimana data yang dikumpulkan akan diproses dan bagaimana memperoleh hasil yang optimal dari data tersebut. Tim yang terorganisasi memastikan bahwa alur kerja, bagan, dan tanggung jawab baru ditetapkan sehingga tidak kewalahan oleh kumpulan data perusahaan berkat Working Data Capital.

Pada Tahap 4, titik fokus bergeser ke arah pengembangan berkelanjutan dengan data.

Analisis yang memanfaatkan Working Data Capital akan membantu menentukan kebutuhan terbesar untuk informasi waktu nyata dan memastikan keberlanjutan protokol standar yang dipicu oleh data. Selain itu, analisis ini menyediakan transfer informasi tentang manajemen aset untuk tim pimpinan. Tantangan selama Tahap 4 adalah penggunaan banyak data yang tidak perlu dan ketidakpercayaan terhadap analisis.

Pada Tahap 5, ide utamanya adalah menyediakan kolaborasi antara perusahaan dan lingkungan dengan bantuan analisis dan berbagi data.

#### **Model Kematangan Industri 4.0 (2016)**

Sembilan dimensi dan enam puluh dua item kematangan untuk menilai tingkat kematangan Industri 4.0 perusahaan. Sembilan dimensi dan item kematangan diberikan dalam Tabel 4.3. Tingkat kematangan diperiksa berdasarkan lima tingkat. Menurut model ini, perusahaan tingkat 1 tidak memiliki atribut yang mendukung konsep Industri 4.0 dan perusahaan tingkat 5 dapat memenuhi semua persyaratan Industri 4.0.

**Tabel 4.3** Dimensi dan item kematangan Model Kematangan Industri 4.0

<b>Ukuran</b>	<b>Item jatuh tempo yang patut dicontoh</b>
Strategi	Peta jalan Implementasi 140 (Industri 4.0), Sumber daya yang tersedia untuk realisasi, Adaptasi model bisnis,
Kepemimpinan	Kemauan pemimpin, Kompetensi dan metode manajemen, Adanya koordinasi pusat untuk 140,
Pelanggan	Pemanfaatan data pelanggan, Digitalisasi penjualan/layanan, Kompetensi media digital pelanggan,
Produk	Individualisasi produk, Digitalisasi produk, Integrasi produk ke dalam sistem lain,
Operasi	Desentralisasi proses, Pemodelan dan simulasi, Kolaborasi interdisipliner dan antar departemen,
Budaya	Berbagi pengetahuan, Inovasi terbuka dan kolaborasi lintas perusahaan, nilai TIK di perusahaan,
Rakyat	Kompetensi TIK karyawan, keterbukaan karyawan terhadap teknologi baru, otonomi karyawan,
Tata Kelola	Peraturan ketenagakerjaan untuk 140, Kesesuaian standar teknologi, Perlindungan kekayaan intelektual,
Teknologi	Adanya TIK modern, Pemanfaatan perangkat seluler, Pemanfaatan komunikasi mesin ke mesin,

Dalam model kematangan ini, survei penilaian dilakukan dengan menggunakan skala Likert lima poin untuk setiap pertanyaan tertutup. Setelah hasil survei, poin tertimbang dihitung dan tingkat kematangan perusahaan ditentukan. Untuk menentukan tingkat kematangan perusahaan, persamaan (Persamaan 4.1) digunakan. Dalam persamaan ini, “M” berhubungan dengan “Kematangan”, “D” berhubungan dengan “Dimensi”, “I” berhubungan dengan “Item”, “g” berhubungan dengan “Faktor Pembobotan” dan “n” berhubungan dengan “Jumlah Item Kematangan”. (Persamaan 4.1)

$$M_D = \frac{\sum_{i=1}^n M_{Dli} * g_{Dli}}{\sum_{i=1}^n g_{Dli}}$$

### 4.3 PERBANDINGAN MODEL KEMATANGAN DAN KESIAPAN INDUSTRI 4.0 YANG ADA

Pada bagian ini, tingkat kematangan/kesiapan, dimensi, dan cakupan industri dibandingkan antara model kematangan dan kesiapan Industri 4.0 yang ada. Untuk memudahkan pemahaman, tabel perbandingan diberikan dalam Tabel 4.4.

**Tabel 4.4** Perbandingan model kematangan dan kesiapan industri 4.0 yang ada

Model kematangan/kesiapan	Tingkat dan dimensi kematangan/kesiapan	Ruang lingkup industri
Kesiapan Industri 4.0	Model kesiapan 5 tahap dengan 6 dimensi dan 18 kriteria. Langkah-langkah pengembangan untuk setiap tahap didefinisikan dengan jelas. Rintangan utama, hambatan dan rencana tindakan ditentukan untuk setiap tahap.	Berfokus pada industri manufaktur dan teknik. Area aplikasi terbatas
Industri 4.0/Penilaian mandiri operasi digital	Model kematangan 4 tahap dengan 7 dimensi. Kriteria kematangan tidak ditentukan. Komentar dan rencana tindakan singkat diberikan sebagai hasil penilaian online.	Model kematangan di seluruh industri. Area aplikasi yang luas
Model kematangan perusahaan yang terhubung	Model kematangan 5 tahap dengan 5 dimensi dan fokus teknologi. Kriteria kematangan tidak ditentukan. Kurangnya alat penilaian	Berfokus pada kemampuan IT perusahaan. Kurangnya dimensi organisasi dan operasi. Area aplikasi terbatas.
Model Kematangan Industri 4.0	Model kematangan 5 tahap dengan 9 dimensi dan 62 item kematangan. Rumusan dasar penilaian	Berfokus pada industri manufaktur. Model kematangan dan penilaian yang komprehensif. Area aplikasi terbatas

### 4.4 MODEL KEMATANGAN INDUSTRI 4.0

Untuk memfasilitasi berbagai analisis kematangan Industri 4.0, model yang diusulkan mencakup total 13 bidang terkait yang dikelompokkan menjadi 3 dimensi. Tabel 4.5 memberikan gambaran umum tentang dimensi bersama bidang terkait, terkait Industri 4.0 untuk mendukung pemahaman. Kriteria penilaian model kematangan didasarkan pada prinsip dan teknologi Industri 4.0 yang diberikan dalam Tabel 4.6 untuk setiap bidang terkait.

**Tabel 4.5** Model kematangan industri 4.0 yang diusulkan

Ukuran	Sub-Dimensi	Bidang terkait
Produk Layanan cerdas		Produk dan Layanan cerdas
Proses bisnis yang cerdas	Produksi dan operasi yang cerdas	Produksi, Logistik dan Pengadaan
		R&D Pengembangan Produk
	Operasi pemasaran dan Penjualan yang Cerdas	Layanan Purna jual
		Penetapan Harga/Promosi
Operasi yang Mendukung		Saluran Penjualan dan Distribusi
		Sumber daya manusia
		Teknologi Informasi

Strategi dan Organisasi	Keuangan Cerdas
	Model bisnis
	Kemitraan Strategis
	Investasi Teknologi
	Struktur Organisasi dan Kepemimpinan

Produk pintar dapat melakukan komputasi, menyimpan data, dan terlibat dalam interaksi dengan lingkungannya serta dapat memberikan informasi tentang identitas, properti, status, dan riwayatnya. Fitur-fitur ini menciptakan peluang untuk memperoleh data dari produk dan menginterpretasikan data untuk menawarkan layanan. Dimensi Produk dan Layanan Cerdas dibentuk untuk mengukur fitur-fitur produk perusahaan dan penawaran layanannya yang didorong oleh data produk.

Proses Bisnis Cerdas dibentuk sebagai dimensi yang berisi operasi fungsional perusahaan untuk menilai tingkat kematangan mereka terkait prinsip-prinsip Industri 4.0 dan teknologi pemicu.

Strategi dan Organisasi dapat didefinisikan sebagai "masukan" untuk transformasi Industri 4.0 yang penting untuk membentuk bisnis dan organisasi. Pengembangan produk cerdas baru, layanan berbasis data, dan operasi bisnis cerdas bergantung pada pembuatan model bisnis yang sesuai atau mengubah model bisnis saat ini untuk Industri 4.0, investasi dalam teknologi pemicu, kolaborasi dengan mitra strategis yang memberikan perkembangan cepat dan struktur organisasi serta kepemimpinan.

Untuk mengidentifikasi tingkat kematangan Industri 4.0 suatu perusahaan, empat tahap digunakan dan jawaban survei penilaian dievaluasi terkait dengan tahap-tahap ini seperti "Ketidakhadiran", "Keberadaan", "Kelangsungan Hidup", dan "Kematangan". Setiap pertanyaan bidang terkait diberi bobot antara 0—"Ketidakhadiran" dan 3—"Kematangan" untuk menentukan tingkat kematangan.

**Level 0:** Ketidakhadiran mengidentifikasi tingkat perusahaan yang tidak memenuhi persyaratan apa pun untuk Industri 4.0. Beberapa persyaratan berada pada tingkat rendah.

**Level 1:** Keberadaan adalah tingkat kematangan saat perusahaan memiliki beberapa inisiatif percontohan di departemen fungsionalnya. Perusahaan menyediakan produk, tetapi produk ini tidak mampu menjadi sepenuhnya pintar. Tingkat integrasi dan otomatisasi rendah dan tingkat pengumpulan/penggunaan data tidak cukup untuk mewujudkan transformasi Industri 4.0. Teknologi digital dan cloud belum diterapkan pada semua operasi. Kesiapan infrastruktur peralatan juga berada pada tingkat rendah. Manajemen puncak sedang mempertimbangkan untuk menerapkan strategi Industri 4.0 dengan investasi di beberapa area. Ada inisiatif percontohan untuk menghasilkan model bisnis atau mengubah model bisnis saat ini. Struktur organisasi tidak cukup sesuai.

**Tabel 4.6** Prinsip dan teknologi Industri 4.0

Prinsip	Teknologi
Manajemen data waktu nyata (Pengumpulan/Pemrosesan/Analisis/Inferensi)	Robotika adaptif Analisis data dan kecerdasan buatan

Interoperabilitas	Simulasi
Virtualisasi	Sistem tertanam
Terdesentralisasi	Komunikasi dan Jaringan
Kelincahan	Keamanan siber
Berorientasi layanan	Awan
Proses bisnis yang terintegrasi	Manufaktur aditif
	Teknologi virtualisasi
	Sensor dan Aktuator
	Teknologi RFID dan RTLS
	Teknologi seluler

**Level 2:** Kelangsungan hidup adalah level kematangan di mana produk perusahaan mampu mengelola data secara real time dan dilacak melalui berbagai situs; selain itu, penawaran layanan berbasis data berada pada level menengah. Proses bisnis perusahaan berada pada level menengah dalam hal integrasi, berbagi/pengumpulan/penggunaan data, dan kelincahan. Proses siap untuk desentralisasi dan prinsip interoperabilitas diterapkan di beberapa area di perusahaan dengan dukungan teknologi digital. Kepemimpinan sedang mengembangkan rencana untuk Industri 4.0 dan telah melakukan investasi di beberapa area. Perusahaan sedang mempertimbangkan peluang bisnis baru di level menengah dan menciptakan kemitraan dengan perusahaan lain atau akademisi. Struktur organisasi cocok untuk proyek awal Industri 4.0 dan model bisnis baru sedang dibuat.

**Level 3:** Kematangan adalah level kematangan di mana produk perusahaan didefinisikan sebagai layanan cerdas dan berbasis data yang disediakan pada level tinggi. Proses bisnis perusahaan berada pada level tinggi dalam hal integrasi, berbagi/pengumpulan/penggunaan data, dan kelincahan. Hampir semua proses dapat didesentralisasi dan prinsip interoperabilitas diterapkan di banyak area di perusahaan dengan dukungan teknologi digital canggih. Tim kepemimpinan memberikan dukungan luas untuk Industri 4.0 dan telah melakukan investasi untuk hampir semua departemen. Struktur organisasi cocok untuk mengelola transformasi di seluruh perusahaan. Perusahaan menciptakan banyak kemitraan dengan perusahaan, akademisi, pemasok, dan penyedia teknologi. Model bisnis digital terintegrasi dengan model bisnis perusahaan saat ini dan perusahaan menghasilkan pendapatan dari model-model ini.

Setiap bidang terkait dalam model kematangan ini dinilai dengan pertanyaan survei terkait dengan 0–3 poin. Bagaimanapun, poin yang dihitung dari bidang terkait dikelompokkan di bawah dimensi dan subdimensi untuk mengidentifikasi tingkat kematangan secara individual dan keseluruhan. Persamaan untuk menghitung tingkat kematangan diberikan dalam Persamaan 4.1–4.3.

$M$  = Kematangan

$D$  = Dimensi

$A$  = Bidang Terkait

$Q$  = Nomor Pertanyaan

$O$  = Keseluruhan

$n$  = Jumlah Pertanyaan Total

$m$  = Jumlah Bidang Terkait

persamaan 4.2

$$M_{DAi} = \frac{\sum_{j=1}^n Q_{Aij}}{n}$$

persamaan 4.3

$$M_D = \frac{\sum_{i=1}^n M_{DAi}}{m}$$

persamaan 4.4

$$M_0 = \min(M_1, M_2, M_3)$$

**Tabel 4.7** Nilai batas untuk menentukan tingkat kematangan

Batas Nilai		
Tingkat Kematangan	Rendah	Tinggi
Level 0: Ketidakhadiran	0.00	0.90
Level 1: Keberadaan	0.90	1.80
Level 2: Bertahan Hidup	1.80	2.70
Level 3: Kematangan	2.70	3.00

**Tabel 4.8** Persyaratan tingkat kematangan produk dan layanan pintar

Tingkat kedewasaan	Produk dan layanan cerdas
Level 0: Ketidakhadiran	Perusahaan tidak memenuhi persyaratan apa pun untuk Industri 4.0. Beberapa persyaratan berada pada level rendah
Level 1: Keberadaan	Produk perusahaan mampu berkomunikasi dengan produk/platform, mesin, dan sistem eksternal lainnya serta mengumpulkan data Produk dapat dilacak saat berpindah antara lokasi produksi dan distribusi internal Perusahaan menawarkan layanan/wawasan hanya untuk bisnisnya berdasarkan data yang diperoleh dari produk
Level 2: Kelangsungan hidup	Produk perusahaan mampu berkomunikasi dan mengumpulkan data. Selain itu, produk dapat menyimpan data yang dikumpulkannya di sistem atau di cloud. Produk dapat melakukan analisis data deskriptif, diagnostik, dan prediktif. Produk dapat dilacak saat berpindah dari pabrik ke distribusi hingga mencapai pusat distribusi pelanggan. Perusahaan menawarkan layanan/wawasan untuk bisnis dan pelanggannya menurut data yang diperoleh dari produk.
Level 3: Kedewasaan	Produk perusahaan mampu berkomunikasi dengan sistem lain, mengumpulkan data, dan menyimpannya di sistem mereka atau di cloud. Selain itu, produk memiliki platform tempat produk atau aplikasi cloud bekerja. Produk dapat melakukan analisis data deskriptif, diagnostik, prediktif, dan preskriptif. Produk dapat

	dilacak sepanjang siklus hidupnya. Perusahaan menawarkan layanan/wawasan untuk bisnis, pelanggan, dan mitranya sesuai dengan data yang diperoleh dari peningkatan produk.
--	---

**Tabel 4.9** Persyaratan tingkat kematangan proses bisnis cerdas

<b>Tingkat kedewasaan</b>	<b>Proses bisnis cerdas</b>
<i>Level 0: Ketidakhadiran</i>	Perusahaan tidak memenuhi persyaratan apa pun untuk Industri 4.0. Beberapa persyaratan berada pada level rendah
<i>Level 1: Keberadaan</i>	Proses rantai pasokan terintegrasi antara perusahaan, pemasok, dan pelanggan dalam hal berbagi data dasar dan komunikasi. Ada beberapa sistem perangkat lunak yang digunakan dan sistem produksi sebagian diotomatisasi pada tingkat mesin. Keterlacakan proses operasi disediakan pada tingkat mesin (sebagian) dalam lingkungan digital dan visibilitas ujung ke ujung berada pada tingkat rendah serta tingkat kustomisasi produksi. Penggunaan data dalam pengembangan produk baru berada pada tingkat rendah. Kemampuan manufaktur dan ketentuan penggunaan produk disimulasikan selama pengembangan produk pada tingkat rendah. Dalam proses layanan purnajual, perusahaan mendapat manfaat dari sedikit data dan menawarkan layanan di beberapa area. Teknologi pemicu (misalnya teknologi seluler dan virtualisasi, cloud) tidak digunakan. Beberapa studi analitik dilakukan dan data yang diperoleh dari lingkungan tidak digunakan dalam penetapan harga produk dan penetapan harga dinamis. Sistem kampanye dan saluran penjualan memiliki integrasi tingkat rendah dan alat analitik data tidak digunakan untuk mengukur kinerja kampanye. Integrasi saluran komunikasi dan kolaborasi dengan mitra berada pada tingkat rendah. Dalam operasi Sumber Daya Manusia, data digunakan di beberapa area, tetapi perusahaan tidak berbagi data waktu nyata dengan pekerja lapangan dan pembelajaran elektronik bukanlah suatu pilihan. Solusi keamanan TI direncanakan atau sedang dalam proses untuk data melalui layanan cloud. Dasbor TI tidak digunakan dan mesin/sistem dapat dikontrol melalui TI sampai batas tertentu. Otomatisasi layanan keuangan berada pada level rendah dan analisis umumnya berdasarkan data historis. Teknologi pemicu (misalnya printer 3D, cloud, teknologi seluler dan virtual, dll.) digunakan pada level rendah
<i>Level 2: Bertahan Hidup</i>	Proses rantai pasokan terintegrasi antara perusahaan dan pemasok/pelanggan strategis utama dalam hal transfer data. Ada beberapa sistem perangkat lunak yang digunakan dan sistem produksi diotomatisasi secara tepat pada tingkat mesin atau sebagian diotomatisasi pada tingkat lini produksi/sel. Keterlacakan proses operasi disediakan pada tingkat lini

	<p>produksi/sel dalam lingkungan digital dan visibilitas menyeluruh berada pada tingkat sedang serta tingkat kustomisasi produksi. Penggunaan data dalam pengembangan produk baru berada pada tingkat sedang. Kemampuan manufaktur dan ketentuan penggunaan produk disimulasikan selama pengembangan produk pada tingkat sedang</p> <p>Dalam proses layanan purnajual, perusahaan mendapatkan keuntungan dari beberapa data dan menawarkan layanan di berbagai area. Teknologi pemicu (misalnya teknologi seluler dan virtualisasi, cloud) digunakan. Studi analitik dilakukan dan data yang diperoleh dari lingkungan digunakan dalam penetapan harga produk dan penetapan harga dinamis. Sistem kampanye dan saluran penjualan memiliki integrasi tingkat sedang dan alat analitik data digunakan untuk mengukur kinerja kampanye. Integrasi saluran komunikasi dan kolaborasi dengan mitra berada pada tingkat sedang. Dalam operasi Sumber Daya Manusia, data digunakan di beberapa area, perusahaan berbagi data waktu nyata dengan pekerja lapangan dan pembelajaran elektronik merupakan suatu pilihan. Solusi keamanan TI sedang dalam proses atau diimplementasikan dalam hal komunikasi untuk pertukaran data internal. Dasbor TI sedang digunakan dan komunikasi mesin ke mesin tersedia. Otomatisasi layanan keuangan berada pada level sedang dan analisis umumnya berdasarkan data historis. Teknologi pemicu (misalnya printer 3D, cloud, teknologi seluler dan virtual, dll.) sedang digunakan pada level sedang</p>
Level 3: Kematangan	<p>Sistem rantai pasokan terintegrasi sepenuhnya antara perusahaan, pemasok, dan pelanggan yang menyediakan perencanaan waktu nyata. Ada banyak sistem perangkat lunak yang digunakan dan sistem produksi diotomatisasi secara tepat di tingkat lini produksi/sel atau sebagian diotomatisasi di tingkat pabrik. Keterlacakan proses operasi disediakan di tingkat pabrik dalam lingkungan digital dan visibilitas menyeluruh berada pada tingkat tinggi serta tingkat kustomisasi produksi. Penggunaan data dalam pengembangan produk baru berada pada tingkat tinggi. Kemampuan produksi dan ketentuan penggunaan produk disimulasikan selama pengembangan produk pada tingkat tinggi.</p> <p>Dalam proses layanan purnajual, perusahaan mendapat manfaat dari banyak data dan menawarkan layanan dalam jangkauan luas. Teknologi pemicu (misalnya teknologi seluler dan virtualisasi, cloud) digunakan. Studi analitik dilakukan dan data yang diperoleh dari lingkungan digunakan dalam penetapan harga produk dan penetapan harga dinamis. Sistem kampanye dan saluran penjualan memiliki integrasi tingkat tinggi dan alat analitik data digunakan untuk mengukur kinerja kampanye. Integrasi saluran</p>

	<p>komunikasi dan kolaborasi dengan mitra pada tingkat tinggi. Dalam operasi Sumber Daya Manusia, data digunakan di banyak area, perusahaan berbagi data waktu nyata dengan pekerja lapangan dan e-learning merupakan suatu pilihan. Solusi keamanan TI diterapkan untuk pertukaran data dengan mitra bisnis. Dasbor TI digunakan dan prinsip interoperabilitas diterapkan sepenuhnya. Otomatisasi layanan keuangan berada pada level tinggi dan analisis umumnya berdasarkan data waktu nyata. Teknologi pemicu digunakan pada level tinggi</p>
--	--

**Tabel 4.10** Persyaratan tingkat kematangan strategi dan organisasi

<b>Tingkat kedewasaan</b>	<b>Strategi dan organisasi</b>
<i>Level 0: Ketidakhadiran</i>	Perusahaan tidak memenuhi persyaratan apa pun untuk Industri 4.0. Beberapa persyaratan berada pada level rendah
<i>Level 1: Keberadaan</i>	<p>Produk dan layanan yang ada tidak kompatibel dengan model bisnis digital yang didukung dengan sumber daya pada level rendah</p> <p>Ada kesadaran akan model bisnis "sebagai layanan" dan pendapatan dihasilkan dari layanan berbasis data (0–2,5%)</p> <p>Perusahaan memiliki kemitraan dengan beberapa pemangku kepentingan dan meluncurkan inisiatif percontohan. Tim kepemimpinan sedang menyelidiki potensi manfaat</p> <p>Perusahaan mengalokasikan anggaran tingkat rendah untuk teknologi dan merencanakan investasi dalam beberapa operasi fungsional; tetapi analisis biaya/manfaat tidak dilakukan</p> <p>Struktur organisasi tidak cocok untuk transformasi</p> <p>Hanya area yang berfokus pada teknologi yang memiliki karyawan dengan keterampilan digital yang tidak dialokasikan untuk proyek Industri 4.0 tertentu</p> <p>Departemen TI pusat ada di perusahaan yang tidak memiliki lingkungan kerja tempat unit OT/TI bekerja sama</p> <p>Interaksi antar departemen terbatas</p>
<i>Level 2: Bertahan hidup</i>	<p>Produk dan layanan yang ada kompatibel dengan model bisnis digital yang didukung dengan sumber daya pada tingkat menengah</p> <p>Ada kesadaran tinggi terhadap model bisnis "sebagai layanan" dan pendapatan dihasilkan dari layanan berbasis data (2,5–10%)</p> <p>Perusahaan memiliki kemitraan dengan beberapa pemangku kepentingan dan strategi dirumuskan. Tim kepemimpinan menyadari manfaat finansial dan berencana untuk berinvestasi</p> <p>Perusahaan mengalokasikan anggaran tingkat menengah untuk teknologi dan investasi dilakukan dalam beberapa operasi fungsional; sebagai tambahan, analisis biaya/manfaat tahunan</p>

	<p>dilakukan</p> <p>Struktur organisasi cocok untuk proyek awal</p> <p>Di sebagian besar area bisnis, memiliki keterampilan digital yang dikembangkan dengan baik yang dialokasikan untuk proyek Industri 4.0 tertentu di berbagai unit</p> <p>Departemen TI lokal ada di setiap area tempat terdapat lingkungan kerja tempat unit OT/TI bekerja sama</p> <p>Departemen terbuka untuk kolaborasi lintas perusahaan</p>
<i>Level 3: Kedewasaan</i>	<p>Produk dan layanan yang ada kompatibel dengan model bisnis digital yang didukung dengan sumber daya tingkat tinggi</p> <p>"Sebagai layanan" telah diterapkan dan ditawarkan. Pendapatan dihasilkan dari layanan berbasis data (lebih dari 10%)</p> <p>Perusahaan memiliki kemitraan dengan banyak pemangku kepentingan dan strategi diterapkan atau sedang dilaksanakan. Dukungan luas untuk Industri 4.0 dalam kepemimpinan dan di seluruh bisnis yang lebih luas</p> <p>Perusahaan mengalokasikan anggaran tingkat tinggi untuk teknologi dan berinvestasi di hampir semua operasi fungsional; selain itu analisis biaya/manfaat triwulanan dilakukan</p> <p>Organisasi terstruktur dengan baik untuk transformasi</p> <p>Di seluruh bisnis, keterampilan digital dan analitis mutakhir lazim dan dialokasikan untuk proyek Industri 4.0 tertentu di unit yang sama</p> <p>Pakar TI yang melekat pada setiap departemen di mana terdapat lingkungan kerja tempat unit OT/IT bekerja sama</p> <p>Departemen terbuka untuk kolaborasi lintas perusahaan untuk mendorong peningkatan</p>

Untuk menentukan tingkat kematangan secara keseluruhan, nilai batas untuk setiap tingkat diberikan dalam Tabel 4.7. Tingkat kematangan “produk dan layanan cerdas”, “bisnis cerdas”, dan “strategi dan organisasi” dijelaskan masing-masing dalam Tabel 4.8, 4.9, dan 4.10.

#### 4.5 APLIKASI DI SEKTOR RITEL

Penelitian ini dilakukan di sebuah perusahaan ritel yang beroperasi. Dalam penelitian ini, skor yang terkait dengan bidang dan dimensi yang relevan dihitung menurut Persamaan 4.2–4.4.

**Tabel 4.11** Skor kematangan produk dan layanan pintar

#pertanyaan	Skor
	Produk dan Layanan cerdas
1	3.00
2	3.00
3	1.00
4	3.00

Skor Kedewasaan	2.50
-----------------	------

Skor yang sesuai dengan jawaban yang diberikan untuk pertanyaan-pertanyaan tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.11, 4.12 dan 4.13. Karena perusahaan tersebut beroperasi di sektor ritel, maka perusahaan tersebut telah memutuskan untuk tidak menjawab pertanyaan-pertanyaan tentang bidang “R&D—Pengembangan Produk”. Jadi bidang ini tidak berpartisipasi dalam akun penilaian menurut Persamaan 4.2–4.4.

Menurut persamaan (Persamaan 4.4), tingkat kematangan keseluruhan perusahaan ditentukan oleh tingkat kematangan minimum dimensi-dimensi. Seperti yang dapat kita lihat pada Tabel 4.11, Tabel 4.12 dan Tabel 4.13, skor tingkat kematangan minimum adalah 1,14 yang dihitung untuk dimensi Strategi dan Organisasi. Oleh karena itu, perusahaan ritel berada pada “Level 1: Eksistensi” terkait dengan kematangan Industri 4.0. Ringkasan skor kematangan diberikan pada Tabel 4.14. Bagan radar disediakan pada Gambar 4.1.

**Tabel 4.12** Skor kematangan proses bisnis cerdas

Skor								
#pertanyaan	Produksi, Logistik dan pengadaan	Pengembangan produk R&D	Layanan purna jual	Penetapan harga/promosi	Saluran penjualan dan distribusi	Sumber daya manusia	Teknologi Informasi	Keuangan cerdas
1	1.31	N/A	0.66	3.00	3.00	1.50	3.00	0.00
2	3.00	N/A	N/A	0.00	0.00	3.00	2.00	3.00
3	0.00	N/A	1.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
4	1.50	N/A		3.00	3.00		1.50	2.00
5	1.13	N/A		3.00	1.00			2.00
6	1.00				0.00			
7	0.60				0.00			
8	1.00							
9	0.00							
10	0.00							
<b>Terkait skor lapangan</b>	0.95	N/A	0.83	2.40	1.43	2.50	2.38	2.00
<b>Skor Kematangan</b>	1.60							

**Tabel 4.13** Skor kematangan strategi dan organisasi

Skor				
#pertanyaan	Model bisnis	Kemitraan Strategis	Investasi teknologi	Struktur Organisasi dan Kepemimpinan
1	3.00	1.50	1.75	3.00
2	0.00	1.00	1.00	3.00
3	2.00	0.00	0.00	3.00
4	0.00		0.94	1.00
5	0.00			0.00
6				2.00
7				2.00
8				1.00
9				0.00
10				3.00

Terkait skor lapangan	1.00	0.83	0.92	1.80
Skor Kematangan	1.14			

**Tabel 4.14** Tabel skor dan tingkat kematangan untuk setiap dimensi/subdimensi suatu Perusahaan

Dimensi/Subdimensi	Tingkat kematangan	Skor kedewasaan
Produk dan layanan cerdas	Level 2: Bertahan hidup	2.50
Proses bisnis yang cerdas	Level 1: Keberadaan	1.60
Produksi dan operasi yang cerdas	Level 1: Keberadaan	0.95
Operasi pemasaran dan penjualan yang cerdas	Level 1: Keberadaan	1.55
Operasi yang mendukung	Level 2: Keberadaan	2.29
Strategi dan organisasi	Level 1: Keberadaan	1.14



**Gambar 4.1** Tingkat kematangan dimensi perusahaan dalam diagram radar

### Kesimpulan

Studi yang disajikan di sini bertujuan untuk mengembangkan model kematangan Industri 4.0 dan survei penilaian untuk menyediakan alat bagi perusahaan guna membantu mereka memahami status terkini mereka terkait Industri 4.0. Berbagai bidang aplikasi diusulkan untuk Industri 4.0 seperti keuangan cerdas, pemasaran cerdas, dan sumber daya manusia guna membedakan model dan meningkatkan perspektif perusahaan terhadap aplikasi Industri 4.0. Studi mendatang akan bertujuan untuk mendiversifikasi model kematangan Industri 4.0 guna meningkatkan cakupan industri dengan bidang terkait yang tertimbang untuk setiap industri dan membuat rencana aktivitas sesuai dengan tingkat kematangan perusahaan saat ini.

## BAB 5

### PETA JALAN TEKNOLOGI UNTUK INDUSTRI 4.0

Dari perspektif strategis dan teknologi, peta jalan Industri 4.0 memvisualisasikan setiap langkah selanjutnya dalam perjalanan menuju perusahaan yang sepenuhnya digital. Untuk mencapai keberhasilan dalam proses transformasi digital, peta jalan teknologi perlu dipersiapkan dengan cara yang paling akurat. Maksud dari bab ini adalah untuk menyajikan peta jalan teknologi untuk transformasi Industri 4.0 guna memfasilitasi proses perencanaan dan implementasi.

#### 5.1 PENDAHULUAN

Pemetaan jalan teknologi merupakan metode penting yang telah menjadi bagian integral dalam menciptakan dan menyampaikan strategi serta inovasi di banyak organisasi. Sifat peta jalan yang grafis dan kolaboratif mendukung penyelarasan dan dialog strategis antara fungsi-fungsi dalam perusahaan dan antara organisasi. Proses peta jalan teknologi membahas identifikasi, pemilihan, akuisisi, pengembangan, eksploitasi, dan perlindungan teknologi (produk, proses, dan infrastruktur) yang diperlukan untuk mencapai, mempertahankan, dan mengembangkan posisi pasar dan kinerja bisnis yang sesuai dengan tujuan perusahaan. Rob Phaal adalah pelopor dan pengembang pertama 'peta jalan teknologi T-plan' pada tahun 2000-an.

Pada tahun 2004, Phaal menyimpulkan bahwa seorang spesialis yang berkualifikasi dalam cakrawala perencanaan jangka panjang harus menangani proses pemetaan jalan. Peta jalan sebagai cara untuk mengidentifikasi dan memutuskan lintasan yang harus diikuti untuk mencapai kesuksesan di masa depan, seperti halnya peta tradisional yang memandu wisatawan ke tujuan mereka. Prinsip-prinsip yang mendasarinya biasanya terkait dengan tiga karakteristik khusus, karena peta jalan memberikan gambaran kepada perusahaan tentang keadaan saat ini, keadaan masa depan yang diinginkan, dan strategi untuk mencapai keadaan masa depan. Manfaat utama pemetaan teknologi adalah sebagai berikut:

- Menetapkan keselarasan strategi komersial dan teknis
- Meningkatkan komunikasi antar tim dan organisasi
- Memeriksa strategi kompetitif potensial dan cara menerapkan strategi tersebut
- Manajemen waktu dan perencanaan yang efisien
- Mengidentifikasi kesenjangan antara teknologi, pasar, dan kecerdasan produk
- Memprioritaskan investasi
- Menetapkan target yang kompetitif dan rasional
- Membimbing dan memimpin tim proyek
- Memvisualisasikan keluaran termasuk tujuan, proses, dan kemajuan

Identifikasi delapan jenis peta jalan grafis menurut kebutuhan spesifik, masing-masing merupakan alat yang berguna dan rekursif untuk manajemen strategis. Untuk tujuan studi, dipilih jenis berlapis ganda, yang merupakan format paling umum untuk peta jalan teknologi

untuk studi keadaan saat ini dan masa depan yang terkait dengan tiga tingkat utama: pasar, produk, dan sumber daya.

Tingkat pasar menggambarkan kebutuhan pelanggan saat ini dan masa depan yang disertai dengan strategi kompetitif, lingkungan regulasi, evolusi produk pelengkap, produk pengganti, inovasi disruptif, dan faktor-faktor lainnya. Sasaran strategis dinyatakan sebagai tonggak sejarah atau tanggal target untuk peristiwa tertentu; Tingkat produk mendokumentasikan kinerja dan evolusi fitur produk, produk baru bagi perusahaan (termasuk layanan) dan produk baru bagi dunia, dan; Tingkat teknologi menggambarkan produk R&D yang diharapkan, tanggal ketersediaannya, faktor pendorong untuk R&D, dan informasi terkait.

Peta jalan teknologi dapat digunakan untuk memfasilitasi koordinasi berbagai fungsi staf. Misalnya, ketidakpercayaan yang meluas antara unit R&D dan pemasaran dapat dikurangi melalui peta jalan bersama yang mana R&D memberikan kontribusi faktor teknologi sementara staf pemasaran memberikan perspektif terkait produk. Bidang lain yang terbukti bermanfaat dari peta jalan adalah strategi kompetitif. Dalam hal ini, kelompok kepentingan yang terlibat adalah unit pemasaran perusahaan dan pelanggannya. Pemanfaatan peta jalan yang strategis terutama tercermin dari kebijakan pengumuman organisasi.

Contoh mencolok dari hal ini dapat dikenali dalam industri komputer, di mana Microsoft Corporation secara teratur berhasil menghalangi konsumen untuk membeli produk kompetitif dengan secara eksplisit mengumumkan peluncuran artikel serupa yang akan datang (yang disebut 'vaporware'). Lebih jauh, peta jalan teknologi memungkinkan koordinasi aktivitas R&D antar dan ekstra perusahaan. Fungsi ini terutama muncul ketika kerja sama besar atau pengadaan eksternal tingkat tinggi diharapkan. Akhirnya, masing-masing perusahaan memiliki pilihan untuk bergabung dalam merancang peta jalan teknologi yang mendukung orientasi bersama mereka. Hal ini telah terjadi secara menonjol dalam industri semikonduktor.

Dalam bisnis saat ini, Industri 4.0 didorong oleh transformasi digital dalam rantai nilai vertikal/horizontal dan penawaran produk/layanan perusahaan. Teknologi kunci yang dibutuhkan untuk transformasi Industri 4.0 seperti kecerdasan buatan, internet untuk segala hal, pembelajaran mesin, sistem cloud, keamanan siber, robotika adaptif menyebabkan perubahan radikal dalam proses bisnis organisasi. Tantangan untuk transformasi Industri 4.0 ditentukan sebagai berikut:

- Kurangnya pengetahuan tentang teknologi dan peluangnya
- Ketidakpastian tentang manfaat investasi teknologi pada produk dan proses
- Kurangnya pengetahuan tentang permintaan pelanggan terkait produk baru dan model bisnis dalam visi industri 4.0
- Sumber daya manusia dan keuangan terbatas
- Kesulitan untuk menemukan titik awal dan tonggak cakrawala perencanaan
- Perlunya manajemen portofolio yang efisien untuk investasi teknologi
- Persyaratan untuk memprioritaskan dan menjadwalkan proyek produk dan proses baru
- Mengalokasikan sumber daya yang terbatas untuk proyek dan berkolaborasi dengan mitra yang andal
- Kurangnya komunikasi tentang manfaat proyek transformasi Industri 4.0 melalui

organisasi.

Oleh karena itu, strategi yang diikuti oleh perusahaan saat mengadopsi teknologi baru ke dalam proses dan produknya memiliki kepentingan yang sangat penting. Sebagai langkah pertama, organisasi harus mengembangkan peta jalan yang merupakan instrumen perencanaan jangka panjang yang kompleks yang memungkinkan penetapan tujuan strategis dan estimasi potensi teknologi, produk, dan layanan baru.

## 5.2 KERANGKA PERMODELAN PETA JALAN TEKNOLOGI

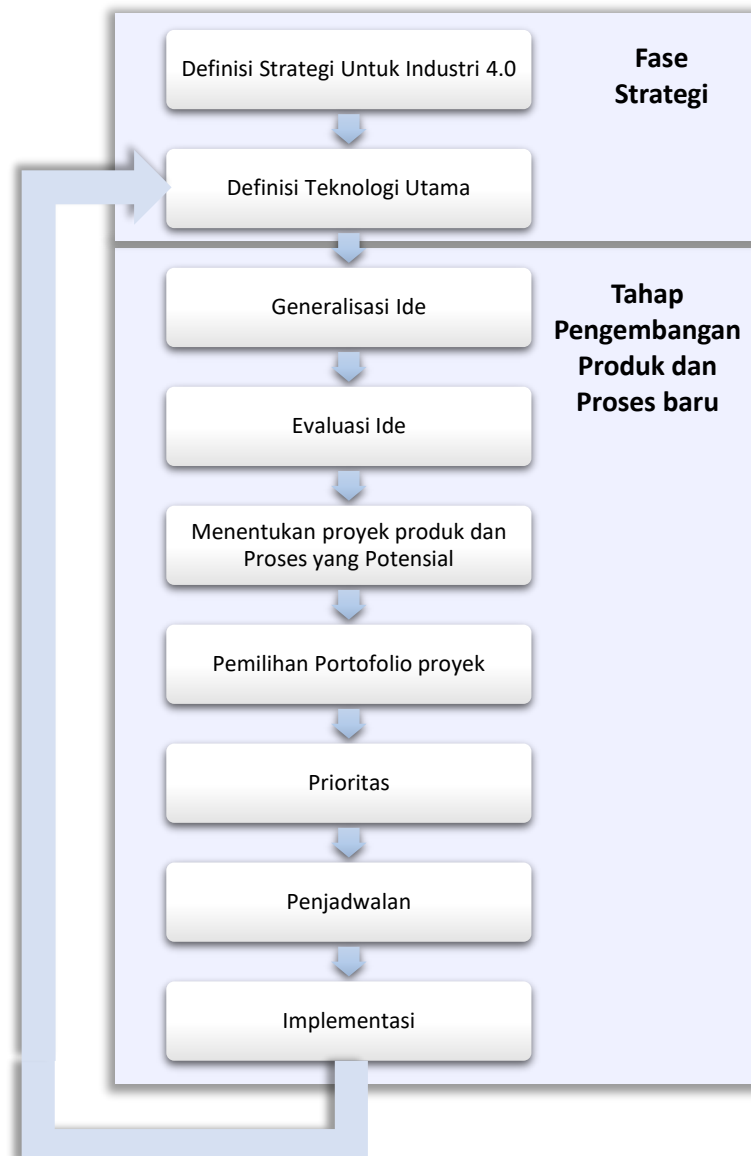
Dalam dunia yang berubah dengan cepat, memvisualisasikan masa depan bukan hanya alat tambahan untuk perencanaan strategis, tetapi juga praktik yang diperlukan bagi setiap perusahaan. Pengakuan awal dan antisipasi visioner terhadap potensi teknologi memainkan peran penting dalam lingkungan bisnis yang dicirikan oleh peningkatan daya saing.

Mereka juga mengamati bahwa mengabaikan perubahan dalam dunia globalisasi sering kali mengakibatkan hilangnya peluang atau kegagalan dalam menanggapi ancaman. Peran memvisualisasikan masa depan adalah untuk menyediakan berbagai cara bagi para manajer dan pembuat kebijakan pemerintah untuk memahami masa depan dan membantu mereka memiliki persepsi menyeluruh tentang kemungkinan implikasi perubahan sosial dan teknologi.

Sebuah "peta jalan" memberdayakan siapa pun dalam industri untuk memahami setiap langkah dan keputusan apa yang perlu dilakukan, siapa yang perlu membuatnya, dan kapan. Prosedur ini didekodekan menjadi rencana proyek, yang menentukan karakteristik pekerjaan di setiap tahap pembentukan terkait. Dalam kerangka kerja yang kami usulkan pada Gambar 5.1, strategi dan teknologi utama ditetapkan pada fase pertama peta jalan, selanjutnya, pada fase kedua, pengembangan produk dan proses baru dilakukan.

Pada fase pengembangan produk dan proses baru, ide-ide dihasilkan terlebih dahulu, ide-ide yang dihasilkan dievaluasi dan beberapa ide potensial dipilih untuk diimplementasikan. Dengan mempertimbangkan kendala alami seperti batasan anggaran, kebijakan kemitraan, dan sumber daya manusia yang tidak memadai, hanya beberapa ide yang dipilih yang dapat diproyeksikan dalam bentuk satu atau beberapa portofolio. Prioritas proyek biasanya dilakukan berdasarkan manfaat dan nilai tambahnya. Penjadwalan yang merupakan kerangka kerja peta jalan Industri 4.0 yang berjangka waktu telah memvisualisasikan teknologi, target, proses, dan tingkat kemajuan.

Langkah terakhir dari pemetaan jalan adalah implementasi, yaitu menetapkan proyek produk dan proses yang ditentukan, dan ditinjau secara dinamis dibandingkan dengan ide-ide yang diperbarui, produk-produk baru, teknologi utama baru, dan proses-proses yang lebih baik. Semua langkah alur pemetaan jalan yang diusulkan akan dijelaskan secara rinci melalui bagian-bagian berikut.



**Gambar 5.1** Usulan peta jalan teknologi untuk Industri 4.0

### Tahap Strategi

Strategi didefinisikan dalam rencana berbasis waktu dan menggambarkan posisi industri, arah yang harus dituju, dan cara mencapainya. Tahap strategi dari peta jalan merupakan prosedur kolaboratif untuk perencanaan. Dalam tahap strategi, evaluasi kematangan digital perusahaan untuk menetapkan target yang jelas untuk tahun-tahun mendatang (berdasarkan cakrawala waktu) merupakan langkah pertama yang harus diperhitungkan selama mempersiapkan peta jalan Industri 4.0. Banyak kapabilitas industri telah mulai mendigitalkan bisnis mereka, tetapi seringkali prosesnya dimulai di level bawah organisasi. Meluangkan waktu untuk mengevaluasi tingkat kematangan di semua area Industri 4.0 dapat membantu memahami kekuatan apa yang mungkin dibangun saat ini, dan sistem/proses mana yang perlu digabungkan menjadi solusi masa depan.

Bersamaan dengan memikirkan ke mana organisasi ingin melangkah di masa depan, seseorang harus mempertimbangkan apa yang dapat diperoleh organisasi dengan bekerja

sama dengan klien, pemasok, mitra teknologi, dan bahkan pesaing, tanpa membatasi visi berdasarkan keterbatasan saat ini. Fokusnya harus melampaui rincian teknis dan memperkirakan dampak aplikasi baru pada rantai nilai organisasi. Peta jalan perlu mempertimbangkan perubahan perilaku pelanggan di masa mendatang dan bagaimana hubungan organisasi dengan mereka akan berubah. Beralih dari keadaan saat ini ke keadaan yang diinginkan di masa mendatang akan menuntut langkah-langkah yang tepat dan prioritas yang jelas.

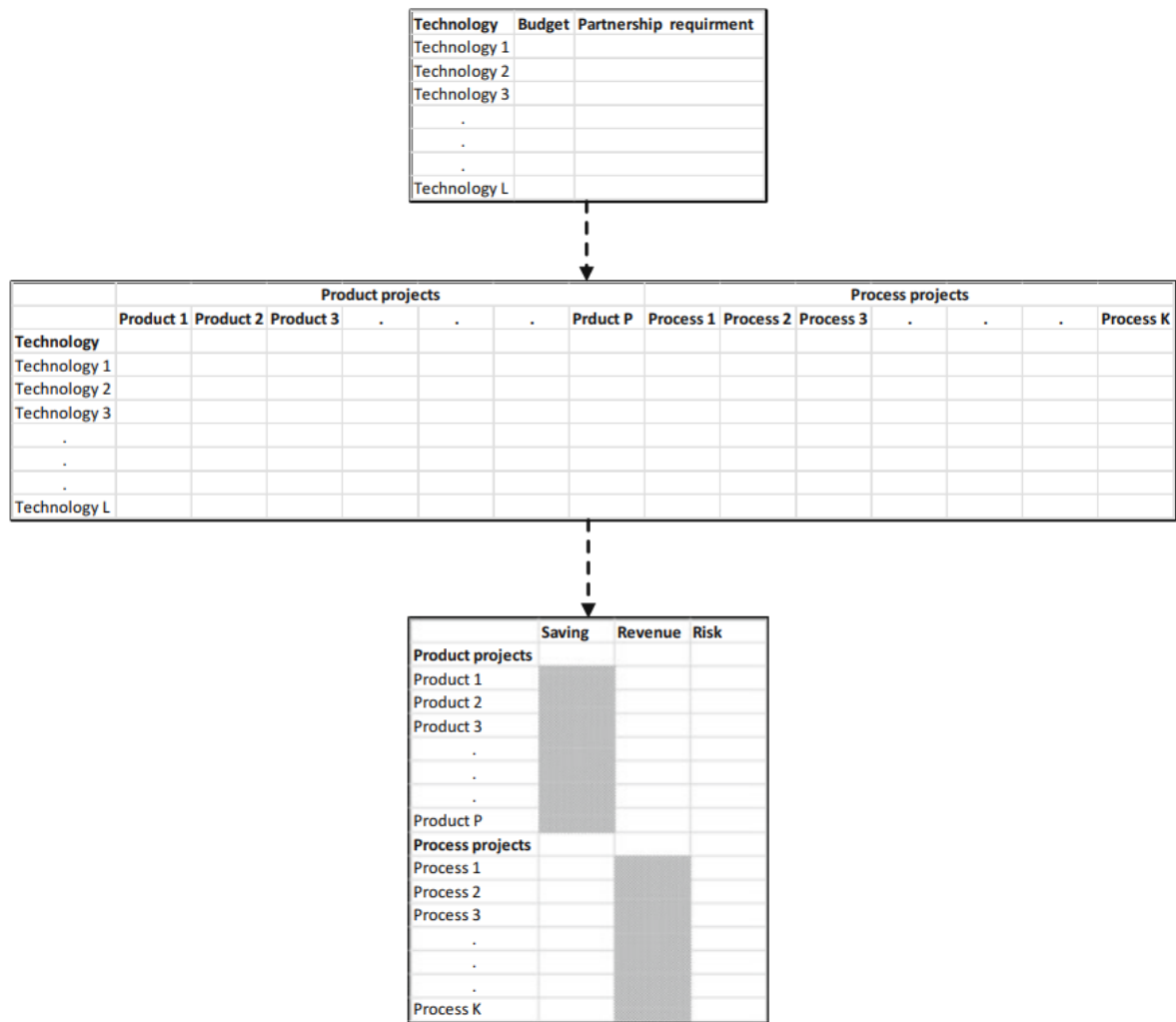
Strategi menjawab pertanyaan tentang apa yang harus dilakukan untuk mencapai hasil yang diinginkan. Di sisi lain, perkembangan teknologi dan permintaan pasar mempercepat perubahan di dunia. Dari perspektif strategis, sering ditemukan bahwa inovasi teknologi merupakan faktor utama yang menguntungkan bagi peningkatan kinerja dan kelangsungan hidup perusahaan, selain itu merupakan faktor penentu bagi pertumbuhan ekonomi berkelanjutan suatu negara dan peningkatan kualitas hidup masyarakatnya.

Perusahaan mengalami kebutaan yang disebabkan oleh fokus yang lebih besar pada bagian dalam perusahaan dan memperkuat praktik yang membuat perusahaan sukses di masa lalu. Dengan demikian, menjadi jelas bahwa perusahaan perlu mendedikasikan upaya untuk melihat ke luar perusahaan dan menyadari perubahan yang akan datang. Dengan kata lain, kapasitas untuk memberikan nilai kepada pelanggan sangat terkait dengan pengembangan teknologi. Lebih jauh, sebelum fase pengembangan produk dan proses baru, teknologi utama yang memiliki kepentingan strategis bagi perusahaan harus ditentukan dengan cermat.

#### **Tahap Pengembangan Produk dan Proses Baru**

Tahap pengembangan produk dan proses baru memungkinkan penggambaran tujuan dan proyek dengan mempertimbangkan berbagai prinsip dan kendala pada lapisan terpisah terhadap visi bersama. Untuk tujuan kami, kami menggunakan perbedaan menjadi tiga perspektif teknis: kendala teknologi (anggaran dan kemitraan), tujuan (penghematan, pendapatan, risiko) dan proyek. Tiga lapisan mewakili perspektif ini. Gambar 5.2 menggambarkan tiga lapisan pemilihan portofolio dan penentuan prioritas proyek.

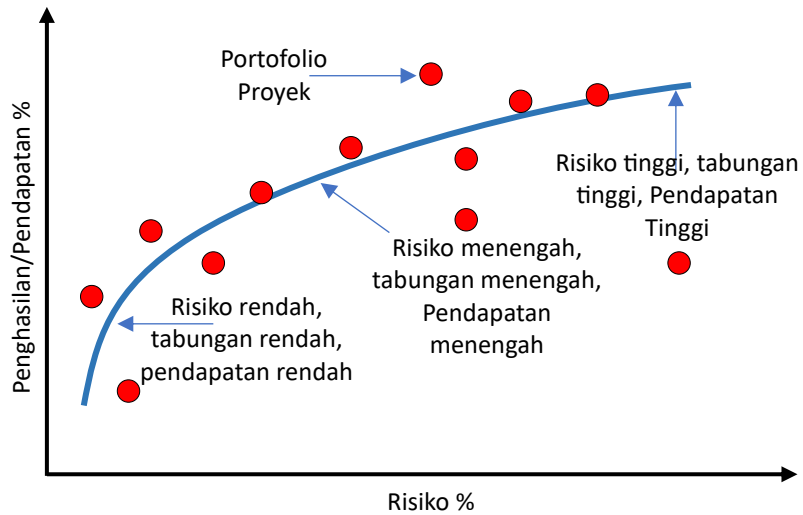
Pada saat ini, ide-ide yang dihasilkan dipilih oleh para ahli berdasarkan dimensi kelayakan produk dan proses. Setelah membuat daftar proyek potensial, tahap pemilihan portofolio proyek terpenuhi. Tahap penentuan prioritas dilakukan dengan mempertimbangkan faktor penghematan dan risiko untuk proyek pengembangan proses baru, juga faktor pendapatan dan risiko untuk proyek pengembangan produk baru. Gambar 5.2 menggambarkan aliran matriks dalam hal pemilihan proyek dan pembentukan portofolio.



**Gambar 5.2** Matriks prioritas untuk proyek produk dan proses

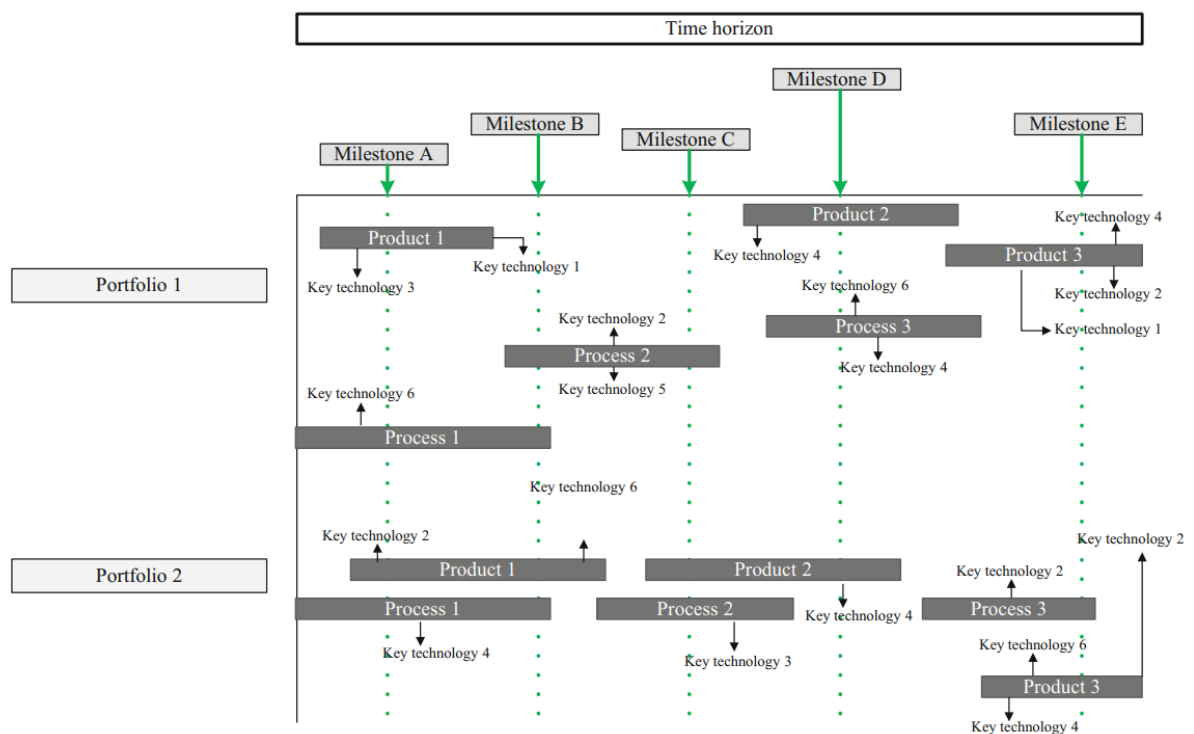
Perlu dicatat bahwa portofolio optimal harus berada pada kurva Batas Efisien yang merupakan penghematan dan pendapatan sebagai dimensi vertikal sedangkan dimensi horizontal mencerminkan risiko. Bagan yang ditunjukkan pada Gambar 5.3 menunjukkan bagaimana portofolio optimal terbentuk. Portofolio risiko optimal biasanya ditetapkan berada di sekitar pusat kurva karena semakin tinggi kurva, semakin besar risiko yang ditanggung untuk pengembalian tambahan yang lebih rendah. Portofolio risiko rendah/pengembalian rendah yang berlawanan tidak ada gunanya karena Anda bisa mendapatkan pengembalian yang sama dengan berinvestasi pada aset bebas risiko.

Anda dapat memilih seberapa besar volatilitas yang dapat Anda tanggung dalam portofolio Anda dengan memilih titik lain yang jatuh pada batas efisien. Jadi portofolio pilihan Anda yang sebenarnya akan memberi Anda penghematan dan pendapatan maksimum untuk persentase risiko yang Anda rencanakan untuk diterima. Singkatnya, portofolio di atas kurva batas efisien tidak mungkin dan portofolio di bawah batas efisien tidak efisien karena untuk risiko yang sama seseorang dapat memperoleh pengembalian yang lebih besar.



**Gambar 5.3** Kurva frontier efisien untuk pemilihan portofolio

Penjadwalan merupakan tahap selanjutnya dari pemetaan yang mendefinisikan tonggak sejarah dan status proyek. Keluaran dari tahap ini adalah peta yang teratur tepat waktu dan multiperspektif dari pendekatan menyeluruh terhadap konsep Industri 4.0 yang dibayangkan yang membangun kerangka strategis untuk tindakan konkret. Cakrawala waktu untuk pencapaian visi Industri 4.0 menentukan apakah perusahaan mengambil strategi revolusioner atau strategi evolusioner. Gambar 5.4 mengilustrasikan contoh peta jalan terjadwal untuk dua belas proyek dalam bentuk dua portofolio dengan tonggak sejarah tertentu dan melibatkan teknologi kunci dalam cakrawala waktu yang ditetapkan secara strategis.



**Gambar 5.4** Contoh peta jalan Industri 4.0 terjadwal untuk dua portofolio

Setiap kotak dalam peta jalan mewakili status atau proyek dalam perjalanan menuju visi Industri 4.0 utama. Selain itu, strategi untuk mencapai tujuan dibentuk menjadi tonggak sejarah. Tonggak sejarah adalah persentase kemajuan penghematan, penggunaan anggaran, proyek yang dihentikan, teknologi yang diterapkan, dll. Teknologi kunci yang dibutuhkan terwakili pada setiap kotak proyek. Dimensi waktu ditunjukkan dengan kerangka waktu kasar atau tanggal konkret tergantung pada keseluruhan cakrawala waktu perusahaan.

### **Kesimpulan**

Mengingat dunia yang mengglobal, kebutuhan untuk menerapkan strategi pengembangan yang dapat menjamin daya saing perusahaan secara berkelanjutan merupakan isu utama. Dalam konteks inilah peta jalan Industri 4.0 menampilkan dirinya sebagai jalur yang jelas dan tergambar secara visual untuk meningkatkan daya saing perusahaan. Peta jalan Industri 4.0 memberikan gambaran umum tentang situasi perusahaan saat ini dan situasi perspektif yang akan dicapai dalam cakrawala waktu. Prediksi Industri 4.0 yang sesungguhnya telah menciptakan ide-ide unik yang membentuk produk, proses, dan peluang dalam hal target dan tonggak sejarah yang ditetapkan.

Dalam hal ini, teknologi dan solusi utama yang terus berkembang merupakan bagian yang tidak dapat disangkal dari pemenuhan visi peta jalan yang dirancang. Bab ini mencoba menyajikan kerangka kerja peta jalan Industri 4.0 yang komprehensif yang mencakup strategi, produk baru, dan fase pengembangan proses. Alur desain peta jalan yang diusulkan mencakup berbagai perencanaan strategis hingga implementasi visi yang ditetapkan untuk memfasilitasi pembuatan peta jalan Industri 4.0 bagi produsen. Dengan mengingatkan pentingnya konsep tinjauan dan umpan balik dari struktur dinamis siklus antara tahap pembuatan ide dan langkah implementasi, bab ini menyimpulkan bahwa penting bagi manajer perusahaan untuk memahami dan mengikuti prinsip-prinsip inti yang disajikan di atas agar tidak menghadapi keputusan penggantian yang sulit.

## **BAB 6**

### **PORTOFOLIO PROYEK DI ERA TRANSFORMASI DIGITAL**

Dengan menyatukan berbagai kemajuan teknologi, Industri 4.0 menjanjikan sistem produksi yang akan meningkatkan produktivitas. Transformasi sistem produksi yang ada menjadi pabrik Industri 4.0 merupakan usaha strategis dan jangka panjang yang membutuhkan investasi modal besar, pelatihan personel, serta perubahan lingkungan dan budaya di hampir semua fungsi rantai nilai. Oleh karena itu, perusahaan perlu merencanakannya dengan baik.

Agar berhasil di era Industri 4.0, perusahaan tidak hanya harus menjalankan proyek yang saling bergantung secara bersamaan, tetapi juga harus melakukan tugas pemilihan portofolio proyek di lingkungan multidimensi dengan ketidakpastian yang tinggi. Karena menentukan portofolio proyek yang optimal untuk transformasi digital di antara berbagai alternatif proyek menuntut pertimbangan berbagai kendala dan saling ketergantungan, model pemrograman integer diusulkan untuk mengatasi masalah ini dalam bab ini. Untuk menunjukkan keefektifan dan kepraktisannya, model optimasi yang diusulkan diterapkan pada alternatif proyek Industri 4.0 dari produsen otomotif.

#### **6.1 PENDAHULUAN**

Penting untuk mengelola investasi teknologi demi kelangsungan hidup perusahaan guna menghadapi persaingan yang ketat, pelanggan yang menuntut, waktu tunggu yang lebih singkat, dan kebutuhan akan fleksibilitas yang lebih tinggi dalam lingkungan bisnis saat ini. Industri 4.0 menjanjikan sistem produksi otonom di pabrik pintar yang menghasilkan peningkatan efisiensi.

Manusia, mesin, dan sumber daya dapat berkomunikasi satu sama lain secara langsung, produk menjadi pintar dan tahu bagaimana cara memproduksinya, dan seluruh rantai nilai terintegrasi. Untuk mencapai keadaan lingkungan manufaktur masa depan yang dibayangkan ini, industri tradisional perlu melakukan program transformasi terstruktur sedangkan transisi Industri 4.0 memiliki banyak tantangan teknis, ekonomi, organisasi, dan hukum. Manajemen portofolio proyek yang efektif untuk menghadapi tantangan ini dalam transisi Industri 4.0 dapat menjadi inisiatif utama bagi keberhasilan perusahaan di masa depan.

Manajemen portofolio proyek (PPM) melampaui manajemen proyek dengan tidak hanya berfokus pada mengerjakan proyek dengan benar tetapi juga mengerjakan proyek yang tepat. Organisasi umumnya mengerjakan banyak proyek. Memilih dan memprioritaskan serangkaian proyek sangat penting karena sebagian besar proyek saling terkait melalui saling ketergantungan dan mereka perlu berbagi sumber daya yang langka. Selain itu, perspektif strategis diperlukan karena proyek berfungsi sebagai sarana untuk mencapai implementasi strategi organisasi. PPM strategis diharapkan dapat melampaui penentuan prioritas, pemilihan, dan evaluasi proyek serta mencapai penyelarasan struktural dan transformasi organisasi yang diperlukan. Isu-isu yang dipertimbangkan selama PPM secara umum adalah

evaluasi kesesuaian strategis semua proyek dalam suatu perusahaan, analisis ketidakpastian bagi perusahaan yang direpresentasikan sebagai risiko, penilaian potensi pasar (finansial), perubahan dalam operasi perusahaan, pemodelan saling ketergantungan antara serangkaian proyek, mengidentifikasi kendala sumber daya yang dibagi antara proyek, pemilihan dan penentuan prioritas proyek, serta optimalisasi portofolio. PPM bertujuan untuk memaksimalkan manfaat ekonomi dari investasi teknologi baru dalam kerangka Industri 4.0 sambil mempertimbangkan tantangan teknis, organisasi, dan hukum.

Hal ini dapat dibandingkan dengan manajemen investasi dana di pasar saham yang tujuannya adalah untuk memaksimalkan nilai portofolio serta pengembalian atas pengeluaran. Portofolio yang seimbang terutama dicirikan oleh keuangan bersama dengan pertimbangan staf, peralatan dan bangunan yang terspesialisasi, kekayaan intelektual, anggaran, dan sejumlah hubungan yang diwariskan dengan berbagai unit dan fungsi perusahaan. Industri 4.0 melambungkan revolusi yang perlu dilakukan oleh industri tradisional dengan menggunakan teknologi canggih dan model bisnis yang inovatif, khususnya dalam sistem manufaktur. Beberapa istilah lain yang digunakan untuk Industri 4.0 adalah internet untuk segala hal, sistem fisik siber, sistem pintar, dan pabrik digital.

Hal ini hanya dapat dimungkinkan dengan penerapan berbagai teknologi yang akan memastikan akses informasi secara real-time, integrasi data, fleksibilitas proses, pemeliharaan prediktif, dan keamanan. Transformasi menyeluruh dari lingkungan manufaktur yang sedang berlangsung tersebut dapat dicapai dengan manajemen program proyek yang efektif karena proyek-proyek ini berbagi sumber daya yang sama, memiliki saling ketergantungan dan hubungan prioritas serta potensi risiko dan manfaat yang berbeda. Dengan demikian, portofolio proyek yang dioptimalkan diperlukan untuk memodelkan hubungan yang kompleks antara proyek, proyek, dan organisasi/lingkungan untuk mencapai hasil keuangan terbaik dalam ketidakpastian.

Dalam bab ini, penulis menggunakan tiga tahap utama pendekatan PPM: (i) definisi proyek, (ii) manajemen proyek, (iii) optimalisasi portofolio. Pada langkah definisi, kami mendefinisikan proyek-proyek yang mungkin dibutuhkan oleh perusahaan tradisional untuk transisi Industri 4.0. Kemudian, estimasi biaya dan manfaat tingkat tinggi serta hubungan prioritas antara proyek-proyek dilakukan. Pada langkah manajemen proyek, risiko terperinci, biaya, dan ukuran investasi finansial diukur serta kendala dan batasan ditetapkan.

Selanjutnya, pada langkah optimalisasi, kami menyeimbangkan dan mengoptimalkan portofolio proyek Industri 4.0. Penulis mengusulkan pendekatan optimalisasi berbasis simulasi di mana ketidakpastian dapat direpresentasikan menggunakan distribusi probabilitas dan dimasukkan ke dalam model optimalisasi melalui simulasi. Tujuan dari model optimalisasi ditetapkan sebagai formulasi nilai sekarang bersih. Dalam bab ini juga mempertimbangkan prioritas, anggaran, dan kendala tenaga kerja. Selain itu, bab ini menetapkan tujuan yang sulit seperti peningkatan target berbagai jenis biaya (misalnya, biaya logistik).

## **6.2 TRANSFORMASI DIGITAL**

Seiring dengan kemajuan ekonomi berbasis pengetahuan, manajemen proyek telah

diadopsi sebagai bentuk organisasi dan teknik manajemen. Di perusahaan multiproyek, mengingat keterbatasan sumber daya keuangan dan manusia, adalah mungkin untuk memprioritaskan dan memilih proyek menggunakan kriteria pengoptimalan yang berbeda. Metode yang sistematis dan rasional untuk tujuan ini adalah manajemen portofolio yang asal-usulnya berasal dari tahun 1950-an.

Manajemen portofolio dapat membantu perusahaan dengan cara berikut: (1) menyelaraskan portofolio dengan strategi perusahaan; (2) menggunakan sumber daya perusahaan dengan cara yang lebih baik; (3) menghentikan proyek yang berkinerja buruk atau ketinggalan zaman; dan (4) untuk memantau aktivitas utama secara terus-menerus guna mengambil tindakan yang diperlukan. Ada banyak sekali literatur yang membahas berbagai aspek pengoptimalan dan pengelolaan portofolio proyek (PPOM). Di bagian ini, kami memberikan tinjauan literatur terkait yang berfokus pada aspek kontekstual dan metodologis topik ini.

Ada banyak penelitian yang menyelidiki implikasi dari berbagai dimensi kontekstual (misalnya lingkungan, jenis bisnis, dll.) pada PPOM. Dampak ketidakpastian pada pengelolaan portofolio proyek (PPM) dalam lingkungan yang dinamis. Dengan menggunakan empat portofolio dalam dua perusahaan multidivisi besar, mereka mengidentifikasi beberapa jenis dan sumber perubahan selain kinerja portofolio dan perubahan strategi bisnis. Perusahaan TI umumnya juga menjalankan banyak proyek dalam lingkungan yang dinamis.

Dengan demikian, mereka sering menggunakan teknik PPOM. Pengelolaan portofolio proyek TI yang baik dapat menghasilkan pengurangan biaya, alokasi sumber daya yang lebih baik, kelincahan yang lebih besar, peningkatan komunikasi dan kolaborasi dalam investasi TI, dan peningkatan peran TI dalam organisasi. Peran faktor lunak seperti komunikasi, budaya proyek, dan tingkat kepercayaan di antara para pemangku kepentingan dalam kegagalan proyek TI.

Terinspirasi dari teori sistemik sosiolog Jerman Niklas Luhmann, penulis mengusulkan pendekatan untuk mengidentifikasi akar kegagalan yang sebenarnya dengan memperlakukan proyek sebagai konstruksi sosial. Perusahaan perangkat lunak—di mana manajemen portofolio yang efektif sangat penting—terutama beroperasi berdasarkan manajemen proyek. Manajemen portofolio tradisional telah diadaptasi untuk perusahaan perangkat lunak yang gesit dan ramping. Penulis menemukan bahwa perusahaan yang gesit dan ramping mengandalkan dan menggunakan alat dan metode yang meminta umpan balik dan keterlibatan pelanggan.

Selain itu, Kanban ditemukan sebagai faktor signifikan dalam hal membatasi jumlah penawaran dalam portofolio dan penyelarasan strategisnya. Mengenai prioritas proyek iteratif (siklus), perlunya pendekatan baru alih-alih memperlakukan proyek tersebut sebagai asiklikal. Mereka memeriksa beberapa aturan prioritas yang mempertimbangkan lebih dari 55.000 proyek iteratif dan menemukan bahwa kepadatan jaringan, intensitas iterasi, profil pemuatan sumber daya, dan jumlah perebutan sumber daya merupakan faktor paling signifikan yang menyusun aturan prioritas terbaik.

Setelah meninjau keadaan terkini tentang metode bantuan keputusan, penulis

menerapkan kerangka kerja prioritas dan pemilihan proyek yang mereka usulkan dalam industri otomotif. Mengenai manajemen inovasi, manajemen portofolio inovasi dapat dilihat sebagai komponen kapabilitas dinamis menggunakan data survei dari sampel lebih dari 900 perusahaan. Cara untuk mengintegrasikan pemikiran keberlanjutan ke dalam PPM pada tahap penyaringan dan pemilihan portofolio optimal.

Kriteria proyek keberlanjutan digunakan pada tahap penyaringan untuk memperhitungkan ketidakpastian dan kemudian batas efisien dikembangkan untuk memilih portofolio optimal. Industri 4.0 dibayangkan akan mencakup hampir setiap jenis bisnis yang dapat beroperasi dalam berbagai jenis pengaturan. Oleh karena itu, dimensi-dimensi yang disebutkan di atas yang dipertimbangkan dalam literatur terkait akan sangat membantu perusahaan dalam PPM yang diperlukan untuk transformasi digital bisnis.

Sebuah proyek memiliki empat dimensi: spesifikasi, garis waktu, sumber daya, dan risiko. Dalam mengadaptasi konsep manajemen risiko ke dalam PPM untuk mencapai dua tujuan terpentingnya: maksimalisasi nilai portofolio dan penyelarasan proyek dengan tujuan strategis organisasi. Kerangka kerja mereka mempertimbangkan hubungan sumber daya, pengetahuan, dan strategi.

Portofolio berhasil jika nilainya dimaksimalkan, selaras dengan strategi bisnis, dan diimbangi dengan sinergi. Dalam upaya untuk menyelidiki hubungan antara manajemen risiko portofolio dan keberhasilan portofolio, kerangka kerja konseptual berdasarkan tinjauan literatur yang komprehensif dan menegaskan bahwa organisasi, proses, dan budaya adalah komponen manajemen risiko portofolio yang paling relevan untuk mencapai keberhasilan portofolio. Manajemen risiko formal di tingkat proyek dan integrasi informasi risiko di tingkat portofolio berhubungan positif dengan keberhasilan proyek secara keseluruhan. Indikator kinerja strategis utama untuk mengukur kinerja strategis portofolio secara keseluruhan, dengan mempertimbangkan kumpulan kinerja masing-masing proyek dan saling ketergantungan strategisnya.

Berfokus pada tujuan penyelarasan strategis dalam PPM, dampak perubahan strategis fundamental pada pemilihan proyek dan struktur organisasi melalui studi kasus di industri konstruksi Jerman. Mereka memberikan kontribusi signifikan terhadap literatur terkait dengan teori substantif mereka yang mengintegrasikan implementasi strategi, pemrosesan informasi organisasi, dan adaptasi struktural. Eksplorasi evaluasi nilai strategis portofolio proyek dan khususnya dimensi nonkomersialnya. Berbeda dari penelitian sebelumnya, mereka berfokus pada nilai yang dihasilkan sebagai hasil dari proyek-proyek dalam portofolio perusahaan.

Adanya penekanan perlunya penelitian di masa mendatang untuk mengukur nilai strategis dalam PPM, termasuk ekologi, sosial, kesehatan dan keselamatan, pengaruh sosial, pembelajaran dan pengembangan pengetahuan, dan nilai bisnis jangka panjang. Kemungkinan interaksi di antara variabel proyek individual seperti jadwal, risiko, dan arus kas dan menunjukkan bahwa mereka memiliki efek signifikan pada komposisi portofolio secara strategis, finansial, dan operasional.

Konstituen manajemen portofolio seperti aktivitas (misalnya penentuan prioritas, pemilihan, kontrol) dan entitas (misalnya manajer/pemimpin, pemangku kepentingan)

memainkan peran signifikan dalam keberhasilan portofolio.

Praktik kontrol portofolio yang berbeda dikaitkan dengan ukuran kinerja manajemen portofolio yang berbeda dan pemilihan portofolio memiliki hubungan positif dengan pencapaian hasil dan pencapaian tujuan. Perbandingan teori dan praktik dalam mengimplementasikan PPM organisasi dan melaporkan kemungkinan jebakan yang mungkin dihadapi organisasi dan membahas cara untuk menghindarinya. Dalam penelitian sebelumnya, tingkat teknis dan strategis yang beroperasi dalam proyek telah diidentifikasi. Manajemen di tingkat kelembagaan berkepentingan dengan menciptakan kondisi untuk mendukung proyek di organisasi induk dan di lingkungan eksternal.

Mereka mengklaim bahwa kepemimpinan penting di ketiga tingkatan. Untuk berhasil dalam manajemen portofolio proyek, keterlibatan pemangku kepentingan dengan memberikan umpan balik pada metrik portofolio, kriteria, prioritas proyek, dan sebagainya sangat penting. Keterlibatan dan perilaku pemangku kepentingan dalam proses PPM menggunakan survei yang terdiri dari lebih dari 200 portofolio proyek dari perusahaan menengah hingga besar.

Ada sejumlah besar penelitian yang menggunakan teknik yang berbeda (bergantian dari pendekatan teknik mean-variance tradisional ke yang berdasarkan kecerdasan komputasional) untuk mengoptimalkan portofolio proyek dengan fitur yang bervariasi. Leong dan Lim (1991) memberikan perluasan teori portofolio keuangan berdasarkan pendekatan "mean-variance" ke domain yang lebih kompleks.

Cara yang sistematis dan ketat untuk membuat keputusan alokasi sumber daya pada portofolio proyek. Penggunaan pendekatan multi-kriteria dalam proses pemilihan portofolio. Mereka mengkritik metode tradisional optimasi portofolio (yaitu kriteria mean-variance) yang hanya didasarkan pada fungsi ekonomi. Mereka lebih menyarankan menggunakan serangkaian kriteria yang lebih mewakili kenyataan. Demikian pula, Smith et al. (2012) mengusulkan metodologi untuk pemilihan portofolio di hadapan banyak pemangku kepentingan dan kendala kompleks menggunakan optimasi multi-objektif.

Teori himpunan fuzzy dan matriks portofolio untuk penilaian keseluruhan daya saing portofolio. Mereka merumuskan model pemrograman linier bilangan bulat biner untuk mengalokasikan sumber daya terbatas dan memilih portofolio optimal yang menggabungkan keragaman tingkat keyakinan dan optimisme para pengambil keputusan.

Berdasarkan data survei, Rosacker dan Olson (2008) bertujuan untuk mengidentifikasi dan menggambarkan teknik pemilihan dan evaluasi proyek dalam manajemen proyek TI, yang berkaitan dengan peningkatan pengembalian investasi TI dan penyesuaian keseluruhan TI dengan bisnis. Dengan menggunakan jaringan saraf tiruan. Tahap desain, pengembangan, dan pengujian sistem pendukung keputusan untuk mengklasifikasikan tingkat risiko proyek dengan mempertimbangkan serangkaian faktor keberhasilan kritis dan pengalaman manajer proyek. Menanyakan sejauh mana perusahaan dapat mendiversifikasi total risiko operasionalnya mengingat efisiensi dan risiko proyek serta keberadaan proyek yang berkorelasi silang positif.

Pengembangan model probabilistik berdasarkan nilai sekarang bersih untuk diversifikasi risiko portofolio proyek. Mereka menilai efektivitas proyek investasi modal

representatif yang ditambahkan ke portofolio proyek perusahaan dalam mengurangi total risiko operasionalnya. Untuk menilai ketidakakuratan penilaian evaluator saat menggunakan pendekatan pengambilan keputusan multikriteria dalam PPM. Melalui studi kasus, mereka menerapkan metode entropi informasi untuk memprioritaskan dan memilih sistem informasi manajemen portofolio proyek yang tepat.

Pengembangan dalam permodelan pendukung keputusan, dampak praktik manajemen portofolio pada kinerja pengembangan produk baru dalam lingkungan multi-proyek di bawah ketidakpastian dan menemukan bahwa keterlibatan manajemen puncak, kompetensi manajer, desain dan implementasi proses manajemen portofolio, dan penghentian proyek adalah praktik yang paling penting bagi perusahaan. Transformasi Industri 4.0 akan memerlukan praktik manajemen portofolio yang bertahap dan komprehensif sehingga proyek yang saling terkait dapat dilakukan secara bersamaan dengan mempertimbangkan saling ketergantungan mereka.

Di bawah interelasi dan ketidakpastian yang tinggi tersebut, optimalisasi portofolio tersebut menggunakan pendekatan tradisional yang berasal dari teknik mean-variance tidak dapat menghasilkan hasil yang dapat diandalkan. Studi ini mengusulkan optimasi berbasis simulasi sebagai pendekatan alternatif untuk digunakan dalam lingkungan multi-dimensi dengan adanya ketidakpastian yang tinggi. Dalam bab ini, kami mengembangkan model optimasi berbasis simulasi dengan tujuan memaksimalkan total laba portofolio proyek dalam kerangka transformasi Industri 4.0.

### 6.3 MODEL OPTIMASI PORTOFOLIO PROYEK

Karena penentuan portofolio proyek yang optimal untuk transformasi digital di antara berbagai alternatif proyek memerlukan pertimbangan berbagai kendala dan saling ketergantungan, model pemrograman integer diusulkan untuk mengatasi masalah ini. Dalam konteks pemrograman linier (LP), fungsi tujuan harus merupakan fungsi dari variabel keputusan. LP akan meminimalkan atau memaksimalkan nilai fungsi tujuan.

Akhirnya, keputusan yang harus dibuat tunduk pada persyaratan dan batasan tertentu dari suatu sistem yang disebut kendala. Asumsi berikut dibuat dalam model:

1. Alternatif proyek diketahui.
2. Anggaran investasi proyek diketahui dan ditetapkan.
3. Penghematan untuk setiap proyek bersifat stokastik.
4. Beberapa hubungan (saling eksklusif, prioritas, salah satu atau lainnya) di antara proyek ada.
5. Beberapa proyek bersifat wajib.

Formulasi dan informasi terperinci tentang model optimasi disajikan di bawah ini.

#### Indeks

<i>i</i>	Proyek
<i>m</i>	Hubungan Saling eksklusif
<i>w</i>	Hubungan Ini-Atau

## Parameter

<b><math>B</math></b>	Anggaran untuk portofolio proyek
<b><math>I</math></b>	Jumlah proyek
<b><math>IC_i</math></b>	Biaya investasi untuk proyek $i$
<b><math>ES_i(\mu, \sigma)</math></b>	Nilai sekarang bersih penghematan energi untuk proyek $i$ dengan rata-rata $\mu$ dan simpangan baku $\sigma$
<b><math>LS_i(\mu, \sigma)</math></b>	Nilai sekarang bersih dari penghematan tenaga kerja untuk proyek $i$ dengan rata-rata $\mu$ dan simpangan baku $\sigma$
<b><math>MS_i(\mu, \sigma)</math></b>	Nilai sekarang bersih dari penghematan material untuk proyek $i$ dengan rata-rata $\mu$ dan simpangan baku $\sigma$
<b><math>TES</math></b>	Nilai ambang batas untuk penghematan energi portofolio
<b><math>TLS</math></b>	Nilai ambang batas untuk penghematan tenaga kerja portofolio
<b><math>TMS</math></b>	Nilai ambang batas untuk penghematan material portofolio
<b><math>PR_i</math></b>	Kumpulan pendahulu proyek $i$
<b><math>M</math></b>	Jumlah hubungan eksklusivitas
<b><math>ME_m</math></b>	Himpunan proyek untuk hubungan saling eksklusif $m$
<b><math>W</math></b>	Jumlah hubungan baik-atau
<b><math>EO_w</math></b>	Kumpulan proyek untuk relasi baik-atau $w$
<b><math>MP</math></b>	Kumpulan proyek wajib

## Variabel

$$x_i = \begin{cases} 1; & \text{jika proyek } i \text{ dipilih dalam portofolio} \\ 0; & \text{Lainnya} \end{cases} \quad i = 1, \dots, I \quad (6.1)$$

## Fungsi Objek

$$\text{Maksimal } Z = \sum_{i=1}^I (ES_i(\mu, \sigma) + LS_i(\mu, \sigma) + MS_i(\mu, \sigma) - IC_i) \times x_i \quad (6.2)$$

## Kepada Subject

$$\sum_{i=1}^I IC_i \times x_i \leq B \quad i = 1, \dots, I \quad (6.3)$$

$$\sum_{i=1}^I ES_i(\mu, \sigma) \times x_i \geq TES \quad (6.4a)$$

$$\sum_{i=1}^I LS_i(\mu, \sigma) \times x_i \geq TLS \quad (6.4b)$$

$$\sum_{i=1}^I MS_i(\mu, \sigma) \times x_i \geq TMS \quad (6.4c)$$

$$x_f - x_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, I \quad \forall f: f \in PR_i \quad (6.5)$$

$$\sum_{i \in ME_m} x_i \leq 1 \quad m = 1, \dots, M \quad (6.6)$$

$$\sum_{i \in EO_w} x_i = 1 \quad w = 1, \dots, W \quad (6.7)$$

$$x_i = 1 \quad \forall i: i \in MP \quad (6.8)$$

$$x_i \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, I \quad (6.9)$$

Fungsi tujuan (Persamaan 6.2) memaksimalkan total laba (total penghematan-total biaya investasi) dari portofolio proyek. Kendala (Persamaan 6.3) menyiratkan bahwa anggaran portofolio tidak dapat dilampaui. Kendala (Persamaan 6.3) memenuhi bahwa portofolio memberikan penghematan energi, tenaga kerja, dan material sehubungan dengan nilai ambang batas yang telah ditentukan sebelumnya.

Mengenai ketergantungan di antara proyek, kendala (Persamaan 6.5) memastikan hubungan prioritas di antara proyek. Kendala (Persamaan 6.6) memungkinkan paling banyak satu proyek dimasukkan ke dalam portofolio untuk setiap set hubungan saling eksklusif. Kendala (Persamaan 6.7) memverifikasi bahwa tepat satu proyek dipilih untuk setiap hubungan salah satu atau lainnya. Kendala (Persamaan 6.8) menyediakan penyertaan proyek wajib. Kendala (Persamaan 6.9) mendefinisikan domain untuk variabel.

#### 6.4 APLIKASI

Model ini diterapkan pada alternatif proyek hipotetis dari produsen otomotif selama jangka waktu perencanaan 5 tahun. Rincian proyek diberikan dalam Tabel 6.1. Perhatikan bahwa unit moneter adalah Rupiah (Rp) dan penghematan proyek didistribusikan secara normal. Masalah yang dirumuskan diselesaikan melalui Crystal Ball Versi 7.2.1. Selain itu, model disimulasikan untuk 1000 kali percobaan dan 1000 kali percobaan dilakukan pada setiap simulasi untuk meminimalkan kemungkinan kesalahan yang timbul dari variabel acak. Anggaran portofolio dianggap sebesar Rp. 750.000.000 untuk periode perencanaan 5 tahun. Nilai ambang batas untuk penghematan energi, tenaga kerja, dan material masing-masing adalah Rp. 140.000.000, Rp. 220.000.000, Rp. 60.000.000. Aplikasi ini dirumuskan sebagai berikut.

Tabel 6.1 Rincian proyek

No	Proyek	Biaua Investasi (Rp. X.000)	Parameter Penghematan Energi ( $\mu, \delta$ )	Parameter Penghematan Tenaga Kerja ( $\mu, \delta$ )	Parameter Penghematan Material ( $\mu, \delta$ )	Pernyataan
1	IOT untuk konsumsi energi	90.000	(120.000, 12.000)	(10.000, 2000)	(12.000, 1200)	Didahului oleh proyek 5
2	AR dalam logistik (Sistem Pengambilan Pesanan)pilih berdasarkan visi	100.000	(50.000, 5000)	(70.000, 14.000)	(10.000, 1000)	Saling eksklusif 3, 4
3	AR dalam pemeliharaan	80.000	(70.000, 7000)	(10.000, 2000)	(10.000, 1000)	Saling eksklusif 2, 4
4	AR dalam kontrol proses	65.000	(25.000, 2500)	(40.000, 8000)	(30.000, 3000)	Saling eksklusif 2, 3
5	Ketertelusuran proses manufaktur (Sensor/RFID)	120.000	(15.000, 1500)	(90.000, 18.000)	(60.000, 6000)	Wajib
6	Proyek analitik data untuk pemeliharaan prediktif	25.000	(30.000, 3000)	(6000, 1200)	(5000, 500)	Didahului oleh proyek 5
7	Sistem simulasi virtual	35.000	(15.000, 1500)	(25.000, 5000)	(7000, 700)	Didahului oleh proyek 5
8	Robotika untuk pengemasan	60.000	(15.000, 1500)	(55.000, 11.000)	(6000, 600)	Mandiri
9	Manufaktur aditif untuk prototipe eksperimental	90.000	(15.000, 1500)	(20.000, 4000)	(80.000, 8000)	Mandiri
10	Lokalisasi dalam ruangan untuk memindahkan aset	55.000	(30.000, 3000)	(10.000, 2000)	(35.000, 3500)	Didahului oleh proyek 5
11	Robotika untuk kitting	65.000	(25.000, 2500)	(45.000, 9000)	(10.000, 1000)	dan atau dengan proyek 13
12	Robotika untuk pengujian dan inspeksi	75.000	(14.000, 1400)	(54.000, 10.800)	(22.000, 2200)	Mandiri
13	Robotika untuk bongkar muat material	70.000	(45.000, 4500)	(50.000, 10.000)	(5000, 500)	Dan atau dengan proyek 11
14	Manufaktur aditif untuk desain alat	55.000	(20.000, 2000)	(25.000, 5000)	(40.000, 4000)	Mandiri
15	Pembuatan aditif produk yang sangat disesuaikan	60.000	(19.000, 1900)	(21.000, 4200)	(32.000, 3200)	Mandiri
16	Integrasi mesin analitik dalam platform cloud produk	55.000	(0, 0)	(72.000, 14.400)	(0, 0)	Wajib

$$\begin{aligned}
\text{Maximize } Z = & [ES_1(120000, 12000) + LS_1(10000, 2000) + MS_1(12000, 1200) - 90000] * x_1 + [ES_2(50000, 5000) \\
& + LS_2(70000, 14000) + MS_2(10000, 1000) - 100000] * x_2 + [ES_3(70000, 7000) + LS_3(10000, 2000) \\
& + LS_2(70000, 14000) + MS_2(10000, 1000) - 100000] * x_2 + [ES_3(70000, 7000) + LS_3(10000, 2000) \\
& + [ES_5(15000, 1500) + LS_5(90000, 18000) + MS_5(60000, 600) - 120000] * x_5 \\
& + [ES_6(30000, 3000) + LS_6(6000, 1200) \\
& + MS_6(5000, 500) - 25000] * x_6 + [ES_7(15000, 1500) + LS_7(25000, 5000) \\
& + MS_7(7000, 700) - 35000] * x_7 \\
& + [ES_8(15000, 1500) + LS_8(55000, 11000) + MS_8(6000, 600) - 60000] * x_8 \\
& + [ES_9(15000, 1500) + LS_9(20000, 4000) \\
& + MS_9(80000, 8000) - 90000] * x_9 + [ES_{10}(30000, 3000) + LS_{10}(10000, 2000) \\
& + MS_{10}(35000, 3500) - 55000] * x_{10} \\
& + [ES_{11}(25000, 2500) + LS_{11}(45000, 9000) + MS_{11}(10000, 1000) - 65000] * x_{11} \\
& + [ES_{12}(14000, 1400) \\
& + LS_{12}(54000, 10800) + MS_{12}(22000, 2200) - 75000] * x_{12} \\
& + [ES_{13}(45000, 4500) + LS_{13}(50000, 10000) \\
& + MS_{13}(5000, 500) - 70000] * x_{13} \\
& + [ES_{14}(20000, 2000) + LS_{14}(25000, 5000) + MS_{14}(40000, 4000) - 55000] * x_{14} \\
& + [ES_{15}(19000, 1900) + LS_{15}(21000, 4200) + MS_{15}(32000, 3200) - 60000] * x_{15} \\
& + [ES_{16}(0, 0) + LS_{16}(72000, 14400) \\
& + MS_{16}(0, 0) - 55000] * x_{16}
\end{aligned}$$

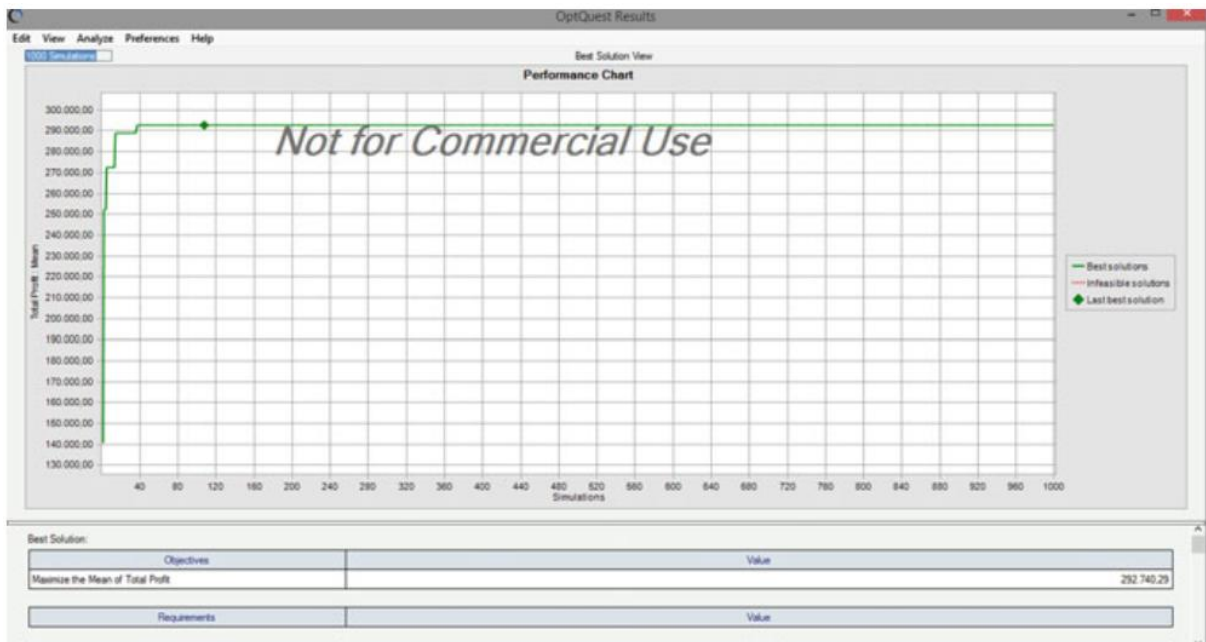
subject to

$$\begin{aligned} &90000 * x_1 + 100000 * x_2 + 80000 * x_3 + 65000 * x_4 + 120000 * x_5 + 25000 * x_6 + 35000 * x_7 \\ &+ 60000 * x_8 + 90000 * x_9 + 55000 * x_{10} + 65000 * x_{11} + 75000 * x_{12} + 70000 * x_{13} + 55000 * x_{14} \\ &+ 60000 * x_{15} + 55000 * x_{16} \leq 750000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &ES_1(120000, 1200) * x_1 + ES_2(50000, 5000) * x_2 + ES_3(70000, 7000) * x_3 + ES_4(25000, 2500) * x_4 \\ &+ ES_5(15000, 1500) * x_5 + ES_6(30000, 3000) * x_6 + ES_7(15000, 1500) * x_7 + ES_8(15000, 1500) * x_8 \\ &+ ES_9(15000, 1500) * x_9 + ES_{10}(30000, 3000) * x_{10} + ES_{11}(25000, 2500) * x_{11} \\ &+ ES_{12}(14000, 1400) * x_{12} + ES_{13}(45000, 4500) * x_{13} \\ &+ ES_{14}(20000, 2000) * x_{14} + ES_{15}(19000, 1900) * x_{15} + ES_{16}(0, 0) * x_{16} \geq 140000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &LS_1(10000, 2000) * x_1 + LS_2(70000, 14000) * x_2 + LS_3(10000, 2000) * x_3 + LS_4(40000, 8000) * x_4 \\ &+ LS_5(90000, 18000) * x_5 + LS_6(6000, 1200) * x_6 + LS_7(25000, 5000) * x_7 \\ &+ LS_8(55000, 1100) * x_8 + LS_9(20000, 4000) * x_9 + LS_{10}(10000, 2000) * x_{10} \\ &+ LS_{11}(45000, 9000) * x_{11} + LS_{12} + (154000, 10800) * x_{12} + LS_{13}(50000, 10000) * x_{13} \\ &+ LS_{14}(25000, 5000) * x_{14} + LS_{15}(21000, 4200) * x_{15} + LS_{16}(72000, 14400) * x_{16} \geq 220000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &MS_1(12000, 1200) * x_1 + MS_2(10000, 1000) * x_2 + MS_3(10000, 1000) * x_3 + MS_4(30000, 3000) * x_4 \\ &+ MS_5(60000, 6000) * x_5 + MS_6(5000, 500) * x_6 + MS_7(7000, 700) * x_7 + MS_8(6000, 600) * x_8 \\ &+ MS_9(80000, 8000) * x_9 + MS_{10}(35000, 3500) * x_{10} + MS_{11}(10000, 1000) * x_{11} \\ &+ MS_{12}(22000, 2200) * x_{12} + MS_{13}(5000, 500) * x_{13} + MS_{14}(40000, 4000) * x_{14} \\ &+ MS_{15}(32000, 3200) * x_{15} + MS_{16}(0, 0) * x_{16} \geq 60000 \end{aligned}$$



Gambar 6.1 Bagan kinerja simulasi

$$x_5 - x_1 \geq 1$$

$$x_5 - x_6 \geq 1$$

$$x_5 - x_7 \geq 1$$

$$x_5 - x_{10} \geq 1$$

$$x_2 + x_3 + x_4 \leq 1$$

$$x_{11} + x_{13} = 1$$

$$x_{16} = 1$$

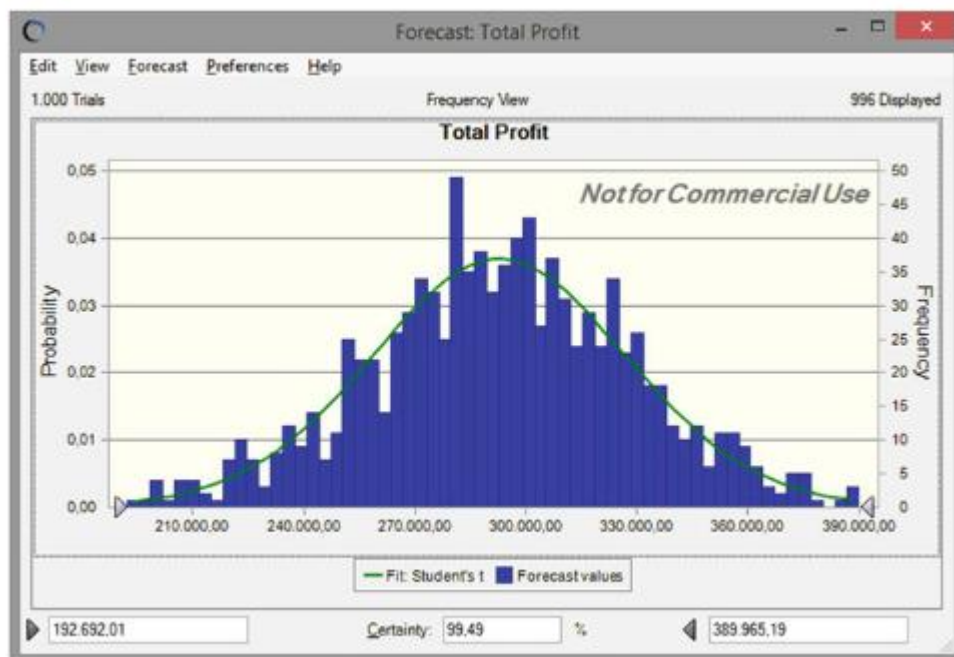
$$x_5 = 1$$

$$x_5$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16} \in \{0,1\}$$

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebelas proyek (Proyek 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14 dan 16) dipilih untuk direncanakan dalam portofolio proyek. Analisis hasil lebih lanjut menunjukkan bahwa total 11 proyek yang dipilih dalam periode tersebut mencakup 96% dari total anggaran. Simulasi menghasilkan nilai fungsi objektif dengan nilai rata-rata Rp. 292.740.290 dan nilai deviasi standar Rp. 35.920.8700. Bagan kinerja simulasi diberikan dalam Gambar 6.1.

Menurut Gambar 6.2, total laba bervariasi antara Rp. 174.968.430 dan Rp. 389.965.190. Lebih lanjut, data total manfaat sesuai dengan distribusi t Student. Seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 6.2, total laba yang diharapkan dalam jangka waktu lima tahun lebih besar dari atau sama dengan Rp. 247.715.440; Rp. 275.133.580; Rp. 293.095.750 dan Rp. 311.651.190 dengan probabilitas masing-masing 0,9, 0,7, 0,5, dan 0,3.



**Gambar 6.2** Histogram total laba

**Tabel 6.2** Batas bawah total laba untuk berbagai probabilitas

Kemungkinan	Total nilai keuntungan (Rp. X.000)
% 100	$\geq 174.968,43$
% 90	$\geq 247.715,44$
% 80	$\geq 264.537,86$
% 70	$\geq 275.133,58$
% 60	$\geq 284.050,57$
% 50	$\geq 293.095,75$
% 40	$\geq 301.577,10$
% 30	$\geq 311.651,19$
% 20	$\geq 323.422,81$
% 10	$\geq 337.629,71$
% 0	$\geq 389.965,19$

### Kesimpulan

Proses yang terkait dengan manajemen portofolio proyek menyatukan fungsi operasi dan proyek untuk memenuhi dan memaksimalkan kontribusi proyek terhadap kesejahteraan dan keberhasilan perusahaan secara keseluruhan. Para eksekutif mengharapkan proyek selaras dengan strategi dan memanfaatkan sumber daya yang terbatas secara efektif, serta memberikan manfaat tertentu. Dalam konteks ini, menentukan campuran proyek yang tepat untuk portofolio dianggap sebagai salah satu komponen terpenting untuk PPM. Untuk mengelola portofolio proyek, organisasi harus menggunakan metode memprioritaskan dan memilih proyek dari kumpulan proyek dengan berbagai kendala dan saling ketergantungan.

Karena biaya investasi yang tinggi dan tingkat keragaman teknologi yang tinggi dalam proyek Industri 4.0, pencapaian ekonomi diberikan melalui transformasi digital dengan syarat pemilihan portofolio proyek dilakukan secara tepat, terutama untuk meningkatkan jumlah proyek dengan keterkaitan.

Dalam bab ini, model pengoptimalan disajikan untuk mengatasi masalah ini. Karena umumnya sulit untuk menentukan nilai pasti untuk penghematan proyek dalam aplikasi kehidupan nyata, kontribusi utama model ini adalah bahwa penghematan energi, material, dan tenaga kerja dianggap stokastik. Untuk menunjukkan keefektifan dan kepraktisannya, model optimasi yang diusulkan diterapkan pada alternatif proyek Industri 4.0 dari produsen otomotif. Karena model tercermin pada lembar kerja dan solusi serta analisis dieksekusi melalui optimasi berbasis simulasi, lingkungan kerja model memberikan kemudahan untuk mengukur portofolio proyek dengan cepat dan beradaptasi dengan perubahan di dalamnya.

Sebagai jalan untuk penelitian di masa mendatang, faktor risiko proyek dapat diintegrasikan ke model yang diusulkan. Selain itu, alternatif proyek dapat dikelompokkan sehubungan dengan fase transformasi digital. Arah penelitian lainnya adalah mempertimbangkan masalah ini sebagai multi-objektif.

## **BAB 7**

### **PENGEMBANGAN BAKAT UNTUK INDUSTRI 4.0**

Dalam lingkungan global saat ini, keberlanjutan dan keunggulan kompetitif perusahaan sangat bergantung pada kemampuan mereka beradaptasi dengan perubahan persyaratan bisnis. Revolusi Industri Keempat, yang didorong oleh kemajuan teknologi digital baru yang secara kolektif dikenal sebagai Industri 4.0, telah mengubah dinamika sebagian besar industri secara mendalam.

Otomatisasi proses bisnis bersama dengan munculnya model bisnis baru memberlakukan persyaratan keterampilan digital baru bagi tenaga kerja. Menciptakan tenaga kerja masa depan tidak hanya melibatkan menarik dan mengembangkan bakat baru yang dibutuhkan, tetapi juga meningkatkan keterampilan karyawan saat ini melalui program pelatihan serta mendesain ulang proses kerja untuk mengurangi ketidaksesuaian keterampilan antara pekerjaan dan karyawan. Bab ini mengkaji bagaimana Industri 4.0 akan mengubah lanskap pengembangan bakat.

#### **7.1 PENDAHULUAN**

Saat ini kita sedang menyaksikan Revolusi Industri Keempat, yaitu era baru industrialisasi yang berasal dari bentuk-bentuk inovatif dari proses produksi yang terdesentralisasi dan kompleks. Industri 4.0 telah digunakan sebagai deskripsi umum untuk proses produksi baru yang sepenuhnya diotomatisasi melalui teknologi, dan perangkat yang berkomunikasi secara otonom satu sama lain di sepanjang aktivitas rantai nilai. Pertukaran data waktu nyata antara mesin dan material, sistem produksi yang secara bertahap lebih otonom, dan teknik manufaktur aditif telah mengubah dinamika sebagian besar industri secara mendalam.

Transformasi ini menghasilkan terciptanya sektor-sektor baru seperti ilmu data, terciptanya model bisnis baru seperti platform, terciptanya jenis perusahaan baru seperti penyedia komputasi awan; dan dimulainya peran organisasi baru seperti manajer akun media sosial. Dengan berinteraksi dengan faktor-faktor sosial-ekonomi dan demografi lainnya, perubahan signifikan dalam model bisnis mengaktifkan gangguan besar di pasar tenaga kerja. Pergeseran yang sedang berlangsung menuju ekonomi berbasis pengetahuan memerlukan pengembangan keahlian digital baru bagi tenaga kerja yang pada akhirnya akan mengubah cara dan tempat orang bekerja.

Perkembangan dalam robotika, kecerdasan buatan, dan pembelajaran mesin sedang disalurkan melalui fase baru otomatisasi proses kerja di mana mesin yang 'pintar' dan bahkan 'lebih pintar' menyamai atau bahkan mengungguli kinerja manusia dalam berbagai aktivitas. Menurut laporan terbaru oleh McKinsey Global Institute (2017) yang berasal dari evaluasi 2000 aktivitas kerja di 800 pekerjaan, dengan hanya mengadopsi teknologi yang mapan hampir 5% dari semua pekerjaan dapat sepenuhnya diotomatisasi sementara 60% dari semua pekerjaan memiliki setidaknya 30% modul yang dapat diotomatisasi oleh teknologi terkini.

Otomatisasi tentu saja meningkatkan produktivitas total bahkan sebagian besar mengungguli kinerja manusia dengan mengurangi kesalahan manusia, meningkatkan kualitas, dan memaksimalkan kecepatan proses. Meskipun demikian, kecepatan dan tingkat otomatisasi semua aktivitas kerja dan pekerjaan tidak akan sepenuhnya sama karena perbedaan dalam kelayakan teknis, potensi keuntungan ekonomi, dan kemungkinan biaya sosial dari adopsi teknologi yang diperlukan dalam dan lintas berbagai industri.

Sementara semua pekerjaan terdiri dari berbagai aktivitas dengan potensi berbeda untuk otomatisasi, aktivitas kerja yang memiliki potensi tertinggi untuk otomatisasi langsung biasanya berisi tugas-tugas yang bergantung pada aktivitas fisik rutin yang telah ditentukan sebelumnya, pengumpulan dan pemrosesan data. Berdasarkan pengalaman masa lalu, dampak inovasi teknologi dan otomatisasi pada pasar tenaga kerja sebagian besar menunjukkan penurunan lapangan kerja dalam pekerjaan intensif rutin— yaitu pekerjaan yang terdiri dari tugas-tugas yang mengikuti serangkaian tindakan yang terperinci dan spesifik sehingga dapat dengan mudah dilakukan oleh algoritma yang kompleks.

Pekerjaan transportasi, administrasi kantor, produksi, dan persiapan makanan memiliki potensi yang relatif lebih tinggi untuk otomatisasi teknis karena rangkaian aktivitasnya terutama didasarkan pada aktivitas fisik yang dapat diprediksi serta administrasi data. Di sisi lain, pekerjaan seperti manajemen, perawatan pribadi, dan penjualan yang aktivitasnya sebagian besar melibatkan pengelolaan dan pengembangan orang, penerapan keahlian pada pengambilan keputusan, perencanaan, dan tugas-tugas kreatif, berinteraksi dengan para pemangku kepentingan, melakukan aktivitas fisik dengan mengoperasikan mesin di lingkungan yang tidak dapat diprediksi memiliki potensi yang lebih rendah untuk otomatisasi teknis.

Pekerjaan jasa juga berisiko tinggi diotomatisasi, terbukti dari meningkatnya penggunaan robot jasa di berbagai sektor. Meskipun demikian, mereka lebih lanjut menyatakan bahwa pekerja manusia masih memiliki keunggulan relatif dalam tugas-tugas yang membutuhkan kreativitas, persepsi, dan kecerdasan sosial. Sebagai hasil dari kemampuan pengenalan pola tingkat lanjut melalui algoritme canggih pada data besar, tugas-tugas kognitif nonrutin juga menjadi layak untuk diotomatisasi. Mereka menyebut mobil tanpa pengemudi milik Google dan Watson milik IBM sebagai bukti seberapa jauh dan seberapa cepat komputer mengalami kemajuan dalam pengenalan pola dan kemampuan komunikasi kompleks yang selama ini dianggap sebagai kemampuan eksklusif manusia.

Berbagai kombinasi teknologi digital memungkinkan terciptanya kecerdasan mesin yang dengannya komputer mulai melakukan tugas-tugas kognitif seperti pengenalan bahasa dan suara yang sebelumnya tidak dapat dilakukan. Perkembangan terkini dalam komputasi, robotika, dan kecerdasan buatan memungkinkan otomatisasi dan sistem digital untuk menembus kelompok tugas yang hingga saat ini hanya dilakukan oleh tenaga manusia melalui kemampuan kognitif seperti penginderaan, penalaran, dan pengambilan keputusan. Kemampuan kognitif komputer tumbuh secara eksponensial bahkan lebih cepat daripada hukum Moore, yaitu tuduhan oleh arsitek mikroprosesor Intel Gordon Moore pada tahun 1965 mengenai penggandaan jumlah transistor dalam sirkuit terpadu berbiaya minimum setiap 12 bulan, dan kelanjutan dari tingkat perbaikan yang sama di masa mendatang.

Perkembangan yang cepat dan signifikan dalam keterampilan dan kemampuan komputer tidak hanya membuat otomatisasi lebih layak untuk menggantikan tenaga kerja manusia dalam berbagai pekerjaan yang lebih luas, tetapi juga mengubah sifat dan ruang lingkup pekerjaan di seluruh industri dan pekerjaan.

Seiring dengan semakin berkembangnya kapasitas kecerdasan mesin, aplikasi kecerdasan buatan seperti pembelajaran mesin, printer 3D, mobil tanpa pengemudi, dan lain-lain kemungkinan akan menghapus lebih banyak pekerjaan yang saat ini dilakukan oleh manusia, tidak hanya di bidang manufaktur tetapi juga di industri jasa, mulai dari tugas-tugas yang membutuhkan keterampilan rendah seperti pengiriman barang ke rumah hingga tugas-tugas profesional yang membutuhkan keterampilan tinggi seperti membeli dan menjual saham di pasar saham.

Sementara beberapa peneliti dan ahli menyatakan bahwa otomatisasi pada akhirnya akan menggantikan tenaga kerja manusia secara luas, beberapa yang lain mengklaim bahwa tidak mungkin untuk mengganti tenaga kerja manusia secara besar-besaran melalui otomatisasi, sehingga sistem digital hanya akan digunakan untuk membantu tenaga kerja manusia bahkan dalam platform digital yang lebih canggih.

Kemajuan yang terus berlanjut dalam teknologi sensor dan identifikasi frekuensi radio (RFID) membuat pelacakan data waktu nyata semakin mudah, dan memfasilitasi pertumbuhan eksponensial "Internet of Things". Diproyeksikan bahwa pada tahun 2020 hampir 50 miliar item akan terhubung satu sama lain. Akibatnya, semakin banyak sistem dapat didigitalisasi secara lebih efisien. Dalam konteks ini, cepat atau lambat lebih banyak pekerjaan akan tergantikan oleh otomatisasi; tetapi pada saat yang sama pekerjaan dan jabatan baru akan muncul serta konfigurasi hibrida akan terbentuk melalui integrasi manusia-mesin. Ketika transformasi digital meningkat dan menjadi jauh lebih layak, mereka akan menghasilkan model bisnis baru.

Dengan berinteraksi dengan faktor-faktor sosial-ekonomi lainnya, perubahan signifikan dalam model bisnis memicu gangguan di pasar tenaga kerja dengan menciptakan deskripsi pekerjaan baru dan peran pekerjaan baru. Beberapa kemungkinan peran pekerjaan baru di masa depan meliputi; koordinator robot, manajer produk digital, pengembang bisnis digital, petugas perlindungan data, manajer proyek web, integrator web, perencana komunikasi digital, copywriter digital, desainer pengalaman pengguna, fasilitator inovasi kerumunan, manajer media sosial, kurator konten, ahli pengalaman kerja digital, dan manajer pembelajaran desain, dll.

Oleh karena itu, meskipun kemajuan terkini dalam teknologi digital dapat menimbulkan sejumlah potensi pemindahan pekerjaan dan hilangnya pekerjaan, terutama pada industri-industri di mana otomatisasi dapat dengan mudah menggantikan tugas-tugas dan kegiatan-kegiatan yang secara tradisional dilakukan oleh manusia, namun bangkitnya digitalisasi juga akan memberikan dampak positif yang cukup besar pada ketenagakerjaan dengan menciptakan pekerjaan-pekerjaan dan peran-peranan baru dalam berbagai industri.

Seiring dengan peningkatan teknologi dan otomatisasi yang semakin memungkinkan untuk menggantikan tenaga kerja manusia, pekerja yang akan kehilangan pekerjaan karena

sistem digital perlu dipindahkan ke tugas-tugas yang tidak berisiko diotomatisasi—yaitu, tugas-tugas yang membutuhkan kecerdasan sosial dan teknologi tinggi. Pekerja yang sebelumnya memiliki pekerjaan yang melibatkan tugas-tugas rutin secara progresif melakukan pekerjaan yang lebih analitis dan interaktif setelah industri mereka mengalami digitalisasi yang cepat.

Otomatisasi yang ekstensif terhadap aktivitas-aktivitas rutin akan mengurangi permintaan untuk pekerjaan-pekerjaan yang membutuhkan keterampilan rendah dan pekerjaan yang membutuhkan rutinitas, sementara itu akan meningkatkan kebutuhan akan pekerja-pekerja berketerampilan tinggi dengan keterampilan-keterampilan baru. Dengan meningkatnya otomatisasi, pekerja perlu lebih fokus pada aktivitas-aktivitas yang tidak dapat diselesaikan dengan mudah oleh mesin, seperti aktivitas-aktivitas yang membutuhkan kemampuan kognitif.

Industri 4.0 telah membawa perubahan-perubahan transformasional dan besar-besaran di semua lapisan struktur industri, termasuk yang baru saja dimulai dalam lanskap ketenagakerjaan. Pergeseran dalam dinamika tenaga kerja akan sangat besar ketika penyesuaian terjadi sepenuhnya. Memenuhi kebutuhan untuk mengembangkan tenaga kerja masa depan membawa beberapa persyaratan bagi perusahaan, pemimpin bisnis, dan pemerintah. Sementara karyawan saat ini perlu ditingkatkan keterampilannya untuk persyaratan ekonomi digital, calon karyawan yang merupakan generasi termuda saat ini, perlu dididik sesuai dengan persyaratan pekerjaan dan keterampilan masa depan.

Untuk bersiap menghadapi perubahan yang akan segera terjadi ini, dan memastikan produktivitas dan daya saing mereka dalam era Industri 4.0, organisasi perlu mengembangkan tenaga kerja masa depan mereka sambil mengadopsi model bisnis dan struktur organisasi baru. Menciptakan tenaga kerja masa depan tidak hanya melibatkan menarik, merekrut, dan mengembangkan bakat baru yang dibutuhkan, tetapi juga meningkatkan keterampilan karyawan saat ini melalui program pelatihan serta mendesain ulang proses kerja untuk mengurangi ketidaksesuaian keterampilan antara pekerjaan dan karyawan. Bab ini mengkaji pengembangan bakat dalam Industri 4.0, yang telah muncul sebagai salah satu kebutuhan paling mendesak bagi organisasi sejalan dengan kemajuan teknologi transformasional terkini.

## **7.2 PERSYARATAN KETERAMPILAN DI DUNIA DIGITAL**

Seiring dengan terus berkembangnya teknologi yang mengubah permainan, adopsi teknologi untuk sistem digital akan menjadi lebih murah dan lebih layak untuk area yang lebih luas. Hasilnya, akan ada lebih banyak peluang bagi sistem robotik dan otomatisasi berbasis komputer untuk menggantikan serta melengkapi pekerja manusia baik dalam industri produksi maupun jasa.

Untuk mendorong peluang transformasional yang dijanjikan oleh Industri 4.0 dan menciptakan nilai dari otomatisasi, organisasi perlu mempertimbangkan untuk mengembangkan tenaga kerja masa depan mereka dengan kompetensi yang selaras dengan persyaratan khusus industri. Otomatisasi proses bisnis yang cepat dan ekstensif bersama dengan munculnya model bisnis baru memberlakukan persyaratan keterampilan baru bagi tenaga kerja.

Memang, adopsi sistem digital lebih lanjut bersama dengan implementasi Industri 4.0 yang sukses membutuhkan keterampilan karyawan yang lebih luas karena meningkatnya kompleksitas lingkungan kerja dengan struktur operasional dan organisasi baru. Akibatnya, peran karyawan akan berubah dalam hal konten dan proses kerja, dan perubahan ini akan membutuhkan transformasi signifikan dalam pekerjaan dan profil keterampilan karyawan. Laporan Future of Jobs mengungkapkan bahwa pada tahun 2020 lebih dari sepertiga dari keahlian yang diinginkan dari sebagian besar pekerjaan akan terdiri dari keterampilan yang belum dianggap penting saat ini.

Yang lebih mengejutkan, 65% anak-anak saat ini akan melakukan pekerjaan yang bahkan belum dikembangkan. Prediksi World Economic Forum tahun 2020, tenaga kerja masa depan diharapkan memiliki sebagian besar kemampuan kognitif (52%), keterampilan sistem (42%), dan keterampilan pemecahan masalah yang kompleks (40%). Selain keterampilan tersebut, pekerja diharuskan memiliki keterampilan dasar untuk teknologi informasi dan komunikasi (TIK). Sesuai dengan peningkatan otomatisasi dan digitalisasi proses kerja, organisasi lebih bergantung pada karyawan dengan spesialisasi TIK yang dapat menganalisis Big Data, membuat pengkodean, mengembangkan aplikasi, dan mengelola jaringan basis data yang kompleks.

Memang, keterampilan TIK tidak hanya mendukung infrastruktur yang diandalkan perusahaan untuk menjalankan bisnisnya, tetapi juga memungkinkan inovasi dalam ekonomi digital berkembang pesat. Keterampilan TIK menjadi kebutuhan bagi semua karyawan, bahkan bagi pekerja yang memiliki pekerjaan dengan keterampilan rendah. Misalnya, di restoran, pelayan harus menerima pesanan melalui iPad, atau pekerja kerah biru harus bekerja di pabrik pintar bersama dengan sistem otomatis; dan dengan demikian, karyawan ini memerlukan keterampilan TIK dasar agar dapat melakukan pekerjaan mereka dalam struktur bisnis hibrida yang baru ini.

TIK dan keterampilan 'keras' lainnya yang dibutuhkan untuk Industri 4.0 memiliki karakter yang lebih interdisipliner daripada literasi dasar dan pengetahuan profesional. Karyawan perlu menggabungkan pengetahuan teknis tentang pekerjaan tertentu dengan kumpulan keterampilan TIK yang bervariasi dari literasi TIK dasar hingga kemampuan pemrograman tingkat lanjut.

Namun, pelaksanaan keterampilan keras yang lebih interdisipliner ini memerlukan kemampuan kolaborasi, komunikasi, dan kemampuan beradaptasi; dengan kata lain, dalam lingkungan kerja yang terus berubah saat ini, keterampilan 'lunak' menjadi lebih penting daripada sebelumnya. Oleh karena itu, agar dapat bekerja secara efektif dan memadai dalam situasi kerja Industri 4.0, karyawan harus membiasakan diri untuk terus belajar, tidak hanya dalam profesi mereka sendiri tetapi dalam sudut pandang yang lebih luas dengan perspektif interdisipliner.

Sementara organisasi perlu berinvestasi dalam keterampilan tenaga kerja masa depan mereka untuk dapat memanfaatkan manfaat kemajuan teknologi, pekerja saat ini harus mengembangkan kemampuan teknologi mereka serta memperoleh keterampilan baru untuk bertahan di pasar kerja. Dalam hal ini, memiliki kemampuan beradaptasi dengan kemajuan

teknologi yang konstan sangat penting bagi karyawan dan organisasi. Sistem kerja Industri 4.0 jelas mengharuskan karyawan memiliki gelar di bidang yang terkait dengan sains, teknologi, teknik, dan matematika (STEM) sehingga karyawan ini akan memiliki keterampilan inti yang dibangun di atas ilmu-ilmu dasar yang dibutuhkan untuk inovasi berbasis teknologi.

Kompetensi STEM didefinisikan sebagai serangkaian keterampilan kognitif, pengetahuan, dan kemampuan yang terkait dengan pekerjaan STEM, dan telah menjadi penting untuk daya saing ekonomi karena pengaruhnya yang positif terhadap inovasi, pertumbuhan teknologi, dan pembangunan ekonomi. Menurut laporan dari Pusat Pendidikan dan Tenaga Kerja Universitas Georgetown, perkembangan terbaru dalam inovasi berbasis teknologi telah menyebabkan permintaan akan kompetensi STEM bahkan melampaui pekerjaan STEM tradisional.

Saat ini, kompetensi STEM telah dibutuhkan untuk pekerjaan terutama di industri yang tumbuh cepat, seperti layanan kesehatan dan bisnis. Sementara tingkat pekerjaan keseluruhan pekerja berketerampilan rendah di industri seperti manufaktur, utilitas dan transportasi menurun karena meningkatnya otomatisasi dan digitalisasi proses kerja, pekerja berketerampilan tinggi di industri ini perlu mengembangkan kompetensi STEM untuk mengamankan pekerjaan mereka di masa depan.

Oleh karena itu, pendidikan STEM, dari sekolah menengah hingga tingkat pascasarjana, akan diperlukan untuk menumbuhkan jalur bakat yang dibutuhkan untuk pekerjaan yang memanfaatkan kompetensi STEM untuk meningkatkan kapasitas inovatif. Ketika otomatisasi dan digitalisasi proses kerja meningkat, pekerja akan diminta untuk mengambil alih tugas yang kurang dapat diotomatisasi dan lebih kompleks, yang penyelesaiannya memerlukan keterampilan literasi, numerasi, pemecahan masalah, dan TIK yang solid bersama dengan keterampilan lunak otonomi, koordinasi dan kolaborasi.

Secara keseluruhan, akan ada permintaan yang lebih tinggi yang diberikan kepada semua anggota angkatan kerja dalam hal mengelola kompleksitas, pemecahan masalah, dan tingkat abstraksi yang lebih tinggi untuk memperoleh representasi yang disederhanakan dari keseluruhan yang lebih besar. Selain itu, akan ada kebutuhan untuk mengoordinasikan antara mesin virtual dan nyata serta antara sistem manual dan robotik, oleh karena itu karyawan diharapkan untuk bertindak lebih atas inisiatif mereka sendiri, memiliki keterampilan komunikasi yang sangat baik, dan mampu mengatur pekerjaan mereka sendiri.

Akibatnya, lingkungan Industri 4.0 akan memungkinkan karyawan untuk memiliki lebih banyak peluang untuk tanggung jawab individu, kepemimpinan yang terdesentralisasi, dan keterlibatan dalam pengambilan keputusan, yang semuanya memicu pergeseran dalam pengorganisasian tugas-tugas kerja dari pendekatan Taylorist ke metode yang lebih holistik dan socio-teknis yang merangkul interaksi antara orang dan teknologi.

Karena pergeseran lebih lanjut dalam struktur organisasi terus terjadi dari perintah-dan-kontrol ke yang lebih cair, keterampilan interpersonal dan komunikasi bersama dengan keterampilan sosial lainnya seperti kecerdasan emosional dan persuasi akan sangat diminati sebagai keterampilan tenaga kerja masa depan. Dengan munculnya sistem korporat yang berjejaring, interaksi dengan pelanggan, pemasok, dan pemangku kepentingan lainnya

menjadi jauh lebih tersebar, akibatnya penyalarsan berbagai tujuan strategis dan membangun konsensus di antara berbagai pihak menjadi lebih sulit dari sebelumnya.

Selain itu, sistem korporat yang berjejaring ini menyatukan berbagai organisasi dari berbagai geografi, tidak selalu secara fisik tetapi juga secara digital, karenanya kecerdasan budaya, kemampuan beradaptasi dan memahami berbagai persyaratan budaya, muncul sebagai keterampilan yang penting. Mengingat hal itu, dalam dunia digital saat ini, keterampilan keras seperti pengetahuan teknis dan keahlian profesi tertentu perlu dilengkapi dengan keterampilan sosial.

Dalam konteks bisnis saat ini, meskipun inovasi pada intinya masih memerlukan landasan pengetahuan yang kuat dalam sains, teknologi, teknik, dan matematika, memperoleh nilai ekonomi dari setiap inovasi memerlukan pengembangan aplikasi dan sistem penggunaan yang disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan individu dan sosial yang kritis. Misalnya, iPod Apple adalah contoh yang baik untuk memahami tren baru ini dalam memperoleh nilai ekonomi dari inovasi produk. Sebagai sebuah inovasi produk, keberhasilan iPod didasarkan pada fondasi yang kokoh dalam ilmu pengetahuan, matematika, dan teknik, namun, sebagian besar nilai tambahnya berasal dari pemasaran kreatif Apple serta inovasi bisnis dalam menanggapi kebutuhan dan harapan konsumen global.

Demikian pula, keberhasilan Google dalam inovasi produk baru sebagian besar bersumber dari kapasitasnya dalam pengembangan teknologi menggunakan ilmu pengetahuan, teknik, dan matematika, namun keberhasilan pasar dari produk-produk baru ini menjadi mungkin ketika konsumen mengevaluasi mereka sebagai memiliki nilai yang layak dibayar. Sebuah inovasi produk mengeksploitasi nilai pasar setiap kali konsumen merasa bahwa itu memenuhi salah satu kebutuhan mereka bahkan yang belum mereka sadari sebelumnya. Oleh karena itu, dalam lingkungan bisnis saat ini untuk inovasi yang sukses, yang paling penting tidak pernah hanya kemahiran dalam pengetahuan ilmiah, tetapi apa yang membuat perbedaan sebagian besar berasal dari memiliki pemahaman tentang kebutuhan dan harapan dasar manusia.

Perubahan sifat inovasi saat ini juga mengarah pada persyaratan keterampilan yang lebih luas bagi tenaga kerja saat ini. Secara eksplisit, persyaratan keterampilan untuk bekerja di Industri 4.0 membutuhkan lebih dari sekadar keterampilan keras inti, meskipun itu merupakan campuran keterampilan yang cukup luas termasuk keterampilan lunak seperti keterampilan komunikasi, koordinasi, dan otonomi.

Oleh karena itu, bukan hanya mengembangkan 'tenaga kerja digital' untuk masa depan, tetapi juga mampu mengembangkan tenaga kerja masa depan yang mampu melihat 'gambaran besar' dengan mewujudkan organisasi mereka secara keseluruhan, bersama dengan mengidentifikasi dinamika industri mereka, selain bagaimana berbagai industri dan organisasi saling berhubungan dalam hal rantai nilai mereka. Menurut proyeksi Forum Ekonomi Dunia, pergeseran persyaratan keterampilan karyawan kemungkinan akan terus berlanjut di masa depan.

Pada tahun 2015 sepuluh keterampilan teratas yang dibutuhkan dari karyawan berdasarkan urutan kepentingannya adalah sebagai berikut:

- 1) Pemecahan masalah yang kompleks,
- 2) Koordinasi dengan orang lain,
- 3) Manajemen sdm,
- 4) Berpikir kritis,
- 5) Negosiasi,
- 6) Pengendalian mutu,
- 7) Orientasi layanan,
- 8) Penilaian dan pengambilan keputusan,
- 9) Mendengarkan secara aktif, dan
- 10) Kreativitas.

Namun, diproyeksikan bahwa pada tahun 2020, akan ada pergeseran dalam persyaratan keterampilan karyawan, dan sepuluh keterampilan teratas menurut urutan kepentingannya adalah sebagai berikut: (1) pemecahan masalah yang kompleks, (2) berpikir kritis, (3) kreativitas, (4) manajemen SDM, (5) koordinasi dengan orang lain, (6) kecerdasan emosional, (7) penilaian dan pengambilan keputusan, (8) orientasi layanan, (9) negosiasi, dan (10) fleksibilitas kognitif.

Menurut prediksi Forum Ekonomi Dunia yang didasarkan pada data yang diperoleh dari para kepala sumber daya manusia dan pejabat strategi dari para pemberi kerja global terkemuka tentang apa arti pergeseran saat ini khususnya bagi ketenagakerjaan, keterampilan, dan perekrutan di seluruh industri dan geografi, telah terlihat bahwa keterampilan nonteknis termasuk manajemen SDM, koordinasi dengan orang lain, kecerdasan emosional, dan negosiasi akan menjadi sangat penting baik untuk keberhasilan perusahaan maupun karyawan perorangan.

### **7.3 PRAKTIK PENGEMBANGAN BAKAT UNTUK INDUSTRI 4.0**

Inovasi produk merupakan penggerak ekonomi masa kini. Namun, untuk menghasilkan uang dari inovasi produk ini, organisasi perlu mencapai eksploitasi pasar yang hanya terjadi ketika konsumen mengaitkan nilai dengan produk yang layak dibeli. Oleh karena itu, dalam konteks kerja yang kompetitif dan penuh sumber daya saat ini, organisasi membutuhkan karyawan yang tidak hanya memiliki kecakapan dalam pengetahuan ilmiah untuk dapat membuat inovasi produk, tetapi juga memiliki pemahaman tentang sifat manusia yang akan membantu mereka mengenali kebutuhan konsumen sehingga inovasi ini akan memiliki pasar untuk dijual. Artinya, untuk memanfaatkan manfaat Industri 4.0 dan beradaptasi dengan perubahan sifat inovasi, organisasi membutuhkan karyawan yang dapat memahami, menggunakan, dan mengembangkan desain kerja baru.

Transformasi digital terkini menghadirkan berbagai peran baru dalam organisasi, yang memerlukan serangkaian keterampilan karyawan baru, seperti yang dijelaskan di bagian sebelumnya. Oleh karena itu, bukan hanya mengembangkan 'tenaga kerja digital' untuk masa depan, tetapi juga mampu mengembangkan tenaga kerja masa depan yang mampu melihat 'gambaran besar', beradaptasi dengan segera, serta berpikir dan bekerja secara inovatif, sehingga kontribusinya akan menciptakan keunggulan kompetitif bagi organisasi.

Sejalan dengan peningkatan sistem kerja yang semakin meningkat, kebutuhan untuk menciptakan tenaga kerja masa depan dengan keterampilan yang diperlukan menjadi semakin mendesak. Dengan menjadi yang pertama, tetapi bukan yang terakhir, perusahaan manufaktur mengalami kesulitan untuk mengisi pekerjaan dengan karyawan yang memiliki keterampilan yang dibutuhkan.

Meskipun ada tingkat pengangguran yang relatif tinggi di seluruh dunia, keahlian karyawan saat ini mungkin tidak cukup memadai untuk desain pekerjaan dan peran pekerjaan yang muncul. Masalahnya sebagian besar disadari sebagai menemukan bakat yang tepat untuk pekerjaan yang tepat. Akibatnya, ada persaingan yang semakin ketat untuk mendapatkan bakat dalam berbagai industri, terutama di bidang manufaktur sebagai sektor yang secara tradisional dipandang tidak menawarkan prospek karier profesional yang paling menguntungkan dan menarik bagi generasi muda selama ini.

Menurut laporan PwC (2015) berdasarkan survei CEO Global Tahunan ke-8, 73% CEO menyebutkan kekurangan keterampilan sebagai ancaman bagi bisnis mereka, dan 81% mengatakan mereka mencari keterampilan yang jauh lebih luas saat merekrut daripada sebelumnya. Sejalan dengan kesenjangan keterampilan digital yang semakin melebar, persaingan atas karyawan berbakat, tidak hanya untuk ekonomi saat ini tetapi juga untuk bisnis yang lebih digital di masa depan, saat ini semakin meningkat.

Menghadapi tantangan menciptakan tenaga kerja yang adaptif dalam pasar tenaga kerja yang tidak memiliki jumlah bakat digital yang memadai, semakin banyak perusahaan telah berupaya merumuskan strategi pengembangan bakat mereka bersama dengan strategi digital mereka. Jelas terlihat oleh semua orang, apa yang benar-benar dibutuhkan perusahaan bukan hanya strategi bisnis, tetapi lebih tentang memiliki bakat yang tepat yang akan berhasil menerapkan strategi itu.

Konsep bakat dan manajemen bakat telah cukup populer sejak awal 90-an, bersama dengan artikel terkenal 'The war for talent' oleh konsultan McKinsey & Co. Studi mereka menyoroti peran penting karyawan dalam mencapai kinerja perusahaan yang luar biasa, juga memvalidasi dampak signifikan karyawan terhadap keunggulan kompetitif perusahaan.

Selanjutnya, konsep 'perang memperebutkan bakat' mengacu pada situasi di mana para pemberi kerja bersaing satu sama lain untuk merekrut dan mempertahankan karyawan yang berharga. Mengenai manajemen strategis, pentingnya praktik manajemen bakat berasal dari fakta bahwa karyawan berbakat memiliki kemampuan strategis yang dapat meningkatkan produktivitas, efisiensi, dan keunggulan kompetitif organisasi di berbagai industri.

Hal ini sejalan dengan pernyataan pandangan berbasis sumber daya perusahaan, yang mengklaim bahwa "nilai modal manusia secara inheren bergantung pada potensinya untuk berkontribusi pada keunggulan kompetitif atau kompetensi inti perusahaan". Oleh karena itu, pengembangan bakat suatu perusahaan harus diposisikan sebagai keputusan tingkat strategis, dan praktik manajemen bakat perlu diselaraskan dengan strategi keseluruhan perusahaan bersama dengan semua proses bisnis strategis.

Secara umum, 'bakat' terutama merujuk pada individu yang memiliki keterampilan, kecerdasan, dan kemampuan dalam beberapa profesi yang memungkinkan melakukan

tindakan tertentu pada tingkat yang lebih tinggi. Namun, sebagai sebuah konsep, bakat mencakup berbagai makna, dan dengan demikian, tampaknya cukup masuk akal untuk tidak adanya definisi yang konsisten untuk bakat dalam literatur manajemen bakat saat ini.

Di antara berbagai definisi bakat dalam literatur, yang oleh Ulrich dan Smallwood (2012) menonjol karena cakupannya yang lebih luas, yaitu: "Bakat = kompetensi [pengetahuan, keterampilan, dan nilai yang dibutuhkan untuk pekerjaan saat ini dan masa depan; keterampilan yang tepat, tempat yang tepat, pekerjaan yang tepat, waktu yang tepat] × komitmen [bersedia melakukan pekerjaan] × kontribusi [menemukan makna dan tujuan dalam pekerjaan mereka]".

Di sisi lain, proses manajemen bakat melibatkan tindakan identifikasi, menarik, mengembangkan, memberi penghargaan, dan mempertahankan karyawan dengan atribut kritis yang dengannya karyawan ini akan berkontribusi pada keberlanjutan keberhasilan organisasi serta pengembangan organisasi. Praktik manajemen bakat memungkinkan perusahaan untuk memanfaatkan, mengembangkan, dan mengelola karyawan berbakat.

Seperti di masa lalu, saat ini perusahaan juga membutuhkan karyawan berbakat untuk mencapai kinerja organisasi dan daya saing yang unggul; namun, identifikasi kompetensi strategis yang mencirikan 'siapa karyawan berbakat' telah berubah seiring dengan model kerja baru yang berasal dari digitalisasi oleh Industri 4.0. Selain itu, globalisasi bersama dengan transformasi digital menyebabkan hilangnya batas-batas secara bertahap antara negara, ekonomi, dan organisasi, yang melaluinya karyawan mulai mengembangkan 'karier tanpa batas', yang menyiratkan peluang kerja yang kurang terstruktur di luar batas dan struktur.

Mobilitas karyawan yang dihasilkan yang menjadi mungkin tidak hanya di seluruh organisasi tetapi juga di seluruh pekerjaan, industri, geografi, dan kontrak kerja membawa peluang kerja yang berbeda bagi karyawan, sementara itu juga menantang organisasi dengan memperluas cakupan persaingan mereka untuk mendapatkan bakat. Struktur organisasi yang lebih fleksibel bersama dengan peningkatan mobilitas karyawan menyebabkan hilangnya jenjang karier yang terdefinisi dengan baik secara bertahap. Dari sudut pandang pengusaha, mengingat mereka tidak lagi bersedia atau mampu memberikan jaminan pekerjaan berkelanjutan kepada karyawan mereka karena perubahan cepat untuk keterampilan karyawan yang dibutuhkan dan transformasi dalam struktur organisasi ke formasi yang lebih fleksibel dan datar, mereka telah mendukung inisiatif karyawan untuk mengambil kendali atas karier mereka sendiri.

Mengingat hal itu, fokus praktik pengembangan bakat secara bertahap bergeser dari yang hanya internal menjadi yang mengintegrasikan sumber eksternal dan internal (misalnya, Piore 2002). Karena persaingan untuk mendapatkan bakat semakin ketat karena semakin meluasnya kekurangan bakat global akibat meningkatnya ketidaksesuaian keterampilan antara pasokan dan permintaan keterampilan di pasar tenaga kerja, kemampuan untuk menarik, memotivasi, dan mempertahankan bakat, secara bertahap menjadi lebih penting bagi keberlanjutan keberhasilan organisasi.

Dalam lanskap bakat kompetitif baru ini, ada ketidakpastian baik dalam permintaan maupun pasokan bakat. Di era Industri 4.0, perusahaan perlu memulai proses pengembangan

bakat mereka dengan pertanyaan mendasar tentang ‘keterampilan apa yang akan sangat dibutuhkan sekarang dan di masa depan khususnya untuk bisnis mereka, di industri mereka dan di seluruh ekonomi global?’.

Untuk dapat menjawab pertanyaan ini, perusahaan harus mulai dengan melakukan pengumpulan data dan analisis data yang komprehensif pada desain pekerjaan mereka saat ini dan masa depan, sehingga mereka dapat memahami peran mana yang akan diotomatisasi dalam industri mereka, sementara peran baru mana yang akan dibutuhkan sejalan dengan otomatisasi yang sedang berlangsung? Setelah itu, untuk setiap peran pekerjaan, keahlian yang diperlukan perlu diidentifikasi melalui studi perbandingan yang melibatkan praktik masa lalu dan aplikasi tolok ukur di dalam dan lintas sektor. Hasilnya, perusahaan mengidentifikasi kompetensi strategis yang mencirikan ‘siapa karyawan berbakat’ untuk industri dan bisnis mereka, dan dengan demikian mereka akan tahu keterampilan apa yang harus mereka cari serta melatih karyawan mereka saat ini.

Perencanaan pengembangan bakat harus dibuat dengan panduan analisis data yang komprehensif dari desain pekerjaan dan hasil kinerja sehingga mereka akan memverifikasi pekerjaan mana yang membuat perbedaan bagi keberhasilan organisasi. Dengan kata lain, untuk ‘pekerjaan strategis’, yaitu pekerjaan yang lebih penting bagi kinerja organisasi dibandingkan pekerjaan lainnya, perusahaan harus mencurahkan lebih banyak sumber daya untuk pekerjaan-pekerjaan di mana kinerja individu memiliki potensi terbesar untuk memengaruhi kinerja perusahaan.

Sebagai langkah berikutnya dalam proses pengembangan bakat, perusahaan harus membuat konversi rencana pengembangan bakat mereka menjadi serangkaian kegiatan terintegrasi dengan mengambil langkah-langkah yang diperlukan untuk menggabungkan orang yang tepat yang memiliki keterampilan yang diperlukan dengan pekerjaan yang sangat penting. Dalam hal itu, untuk praktik pengembangan bakat saat ini memutuskan cara menarik dan mempertahankan karyawan dengan keahlian yang dibutuhkan memerlukan fokus khusus. Bersama dengan meningkatnya mobilitas karyawan melalui globalisasi dan digitalisasi, menarik dan mempertahankan bakat tinggi menjadi sangat menantang bagi organisasi.

Sebagai hasil dari perubahan demografi di pasar tenaga kerja di seluruh dunia yang sebagian besar dibentuk oleh pintu masuk baru ke kumpulan bakat dari generasi Milenial dan Gen Z, serangkaian prinsip baru muncul untuk menarik dan mempertahankan bakat. Dalam waktu kurang dari satu dekade, Milenial bersama dengan Gen Z akan mendominasi tenaga kerja masa depan, dan tidak seperti generasi sebelumnya, mereka lebih suka memiliki fleksibilitas dan otonomi yang lebih besar daripada kontrak kerja tetap.

Menurut survei Forum Ekonomi Dunia, kemajuan karier (48%), budaya perusahaan (38%) dan peluang pelatihan/pengembangan (32%) adalah hal yang dicari oleh generasi milenial dari pemberi kerja mereka. Oleh karena itu, untuk menarik dan mempertahankan talenta muda ini, perusahaan harus fokus memposisikan diri sebagai pemberi kerja pilihan dengan menjadi dan mencitrakan diri sebagai tempat yang hebat untuk bekerja.

Hal ini memerlukan penerapan kontrak kerja yang lebih fleksibel karena status pekerjaan tetap bukan lagi satu-satunya pilihan, tetapi kontrak berbasis sementara atau

berbasis proyek juga meningkat sebagai metode kontrak alternatif.

Selain menawarkan alternatif pekerjaan yang fleksibel, perusahaan dapat menarik dan mempertahankan talenta digital dengan meningkatkan budaya perusahaan mereka dan menawarkan insentif yang relevan di era digital. Menciptakan tempat kerja yang menarik karyawan berbakat memerlukan budaya organisasi yang progresif dan berwawasan ke depan yang didorong oleh kepemimpinan yang kuat dan visioner.

Definisi kepemimpinan yang efektif saat ini beralih dari pendekatan top-down yang otokratis menuju gaya yang lebih autentik dan kolaboratif. Para pemimpin harus mampu menanamkan budaya perusahaan di mana sistem digital dapat berkembang lebih jauh, disertai dengan visi perusahaan yang berasal dari pengetahuan yang kuat tentang teknologi dan bagaimana teknologi tersebut mengganggu bisnis mereka. Pendekatan kepemimpinan yang terbuka dan visioner seperti itu sangat cocok bagi generasi milenial karena mereka tumbuh dalam lingkungan di mana data dan orang-orang sangat mudah diakses.

Generasi baru ini terbiasa menjadi bagian dari media sosial yang sangat terintegrasi dan untuk berbagi dan menerima data instan tentang diri mereka sendiri, individu, perusahaan, dan produk. Mereka menyesuaikan diri dengan teknologi karena mereka semua lahir sebagai penduduk asli digital. Oleh karena itu, perusahaan dapat mempertimbangkan untuk lebih memanfaatkan media sosial dan platform daring untuk menarik bakat-bakat baru ini. Dengan cara yang sama, organisasi harus mencoba mengintegrasikan teknologi terkini ke dalam cara kerja sehari-hari mereka dengan preferensi alat dan perangkat keras. Selain itu, perusahaan harus menciptakan lingkungan kerja yang sesuai bersama dengan desain kerja baru di mana manusia dan robot dapat bekerja sama dengan sukses. Jika perlu, proses kerja harus dirancang ulang untuk mengurangi ketidaksesuaian keterampilan antara pekerjaan dan karyawan.

Untuk memastikan keberlanjutan proses pengembangan bakat ini, perusahaan perlu memperhatikan pengembangan tenaga kerja mereka secara terus-menerus termasuk bakat yang baru diperoleh bersama dengan karyawan mereka yang sudah ada. Memberikan pelatihan dan kesempatan belajar yang berkelanjutan serta menyelaraskan indikator kinerja utama organisasi dengan rencana insentif karyawan akan menjaga manfaat praktik pengembangan bakat. Sejalan dengan preferensi generasi baru, penting untuk mengambil pandangan praktis dan jangka panjang dalam praktik pelatihan mereka dengan menawarkan opsi pelatihan kontemporer seperti kursus daring massal (MOOC).

## **Kesimpulan**

Di dunia global, faktor keberhasilan yang paling penting bagi keberlanjutan ekonomi dan keunggulan kompetitif organisasi adalah kapasitas mereka untuk beradaptasi terhadap perubahan. Otomatisasi proses bisnis bersama dengan munculnya model bisnis baru yang disebabkan oleh inovasi terkini dalam teknologi digital telah mengubah dinamika sebagian besar industri secara drastis. Sejalan dengan transformasi ini, 'cara melakukan' pekerjaan juga berubah, dan sistem serta desain kerja baru ini memberlakukan persyaratan keterampilan baru bagi karyawan.

Bersama dengan pasar yang sudah ketat untuk bakat, pengembangan tenaga kerja masa depan dan kesiapan menghadapi perubahan mendatang dalam lanskap ketenagakerjaan semakin hadir dalam prioritas perencanaan strategis perusahaan. Untuk perencanaan tenaga kerja strategis, perusahaan perlu memulai dengan memahami perubahan cakupan dan isi persyaratan kerja serta kebutuhan keterampilan tenaga kerja. Selanjutnya, mereka perlu mengevaluasi ketersediaan karyawan berbakat dengan keterampilan dan kapabilitas yang tepat yang dibutuhkan untuk masa depan dalam konten organisasi mereka saat ini. Pada saat yang sama, mereka perlu mengetahui cara menarik dan merekrut bakat baru dengan keterampilan yang diperlukan.

Era Industri 4.0 mengharuskan semua karyawan, bahkan pekerja dengan pekerjaan berketerampilan rendah, untuk memiliki kumpulan keterampilan TIK. Namun, Industri 4.0 membutuhkan keterampilan karyawan yang penting untuk mencakup lebih dari sekadar keterampilan inti; memang, untuk keberhasilan pelaksanaan keterampilan keras, karyawan harus memiliki keterampilan lunak seperti kolaborasi, komunikasi, dan otonomi untuk dapat melaksanakan pekerjaan mereka dalam sistem operasi hibrida. Dalam dunia kerja yang kompleks saat ini, kemampuan beradaptasi menjadi kemampuan yang paling penting bagi karyawan, itulah sebabnya, untuk menjadi sukses dalam pekerjaan mereka, karyawan perlu membiasakan diri untuk belajar terus-menerus, tidak hanya dalam profesi mereka sendiri tetapi dalam sudut pandang yang lebih luas melalui perspektif interdisipliner.

Selain itu, kapasitas inovatif sangat penting untuk keunggulan kompetitif organisasi, dan untuk memfasilitasi inovasi yang sukses meskipun kemahiran dalam pengetahuan ilmiah merupakan persyaratan dasar, namun apa yang membuat perbedaan sebagian besar berasal dari memiliki pemahaman tentang harapan konsumen yang hanya mungkin dengan memahami kebutuhan dasar manusia. Mengingat hal itu, bukan hanya mengembangkan 'tenaga kerja digital' untuk masa depan, tetapi juga mampu mengembangkan tenaga kerja masa depan yang mampu melihat 'gambaran besar' dengan mengenali hubungan timbal balik antara berbagai pemangku kepentingan termasuk pelanggan, organisasi, dan industri serta berbagai rantai nilai yang berkembang dalam Industri 4.0.

Akibatnya, pengembangan tenaga kerja masa depan untuk Industri 4.0 tidak hanya memerlukan upaya menarik dan merekrut bakat baru yang dibutuhkan, tetapi juga meningkatkan keterampilan karyawan saat ini melalui program pelatihan, dan, jika perlu, mendesain ulang proses kerja untuk menghilangkan ketidaksesuaian keterampilan antara pekerjaan dan karyawan. Akibatnya, organisasi harus berupaya menawarkan pengalaman belajar baru, menciptakan peluang pengembangan baru, dan membangun sistem keterlibatan yang kuat untuk digunakan dalam praktik pengembangan bakat mereka.

## BAB 8

### PERUBAHAN PERAN PENDIDIKAN TEKNIK DI ERA INDUSTRI 4.0

Era industri 4.0 yang baru membutuhkan peran lintas fungsi baru dengan pengetahuan dan keterampilan berbeda yang menggabungkan pengetahuan TI dan produksi. Universitas dan departemen tekniknya memiliki peran penting dalam memenuhi kebutuhan ini. Ada sejumlah departemen yang menawarkan persyaratan pendidikan teknik baru ini, tetapi karakteristik departemen ini dan bagaimana mereka menyatu dan menyimpang satu sama lain belum terungkap melalui evaluasi objektif.

Evaluasi tersebut harus didasarkan pada klasifikasi yang tepat dari bidang pengetahuan dan keterampilan yang ditawarkan di departemen ini. Oleh karena itu, penting untuk memahami karakteristik pengetahuan dan keterampilan yang disediakan di departemen ini untuk menentukan pola yang muncul dalam penyampaian persyaratan pendidikan baru Industri 4.0. Tujuan utama bab ini adalah untuk mendefinisikan persyaratan pendidikan baru yang dimasukkan ke dalam Industri 4.0, dan mengungkap pola dan kesamaan yang muncul dalam pendidikan teknik untuk memenuhi kebutuhan ini. Untuk mengatasi masalah ini, kami mempelajari sampel dari 124 departemen teknik.

#### 8.1 PENDAHULUAN

Revolusi industri keempat akan membuat proses bisnis lebih efisien dan produktif. Di sisi produk, revolusi ini juga akan mengekstraksi nilai yang lebih besar dari data untuk desain berbasis penggunaan dan kustomisasi massal, yang pada gilirannya akan membuka jalan menuju pasar baru. Namun, adopsi Industri 4.0 akan mengakibatkan penghapusan pekerjaan dengan keterampilan rendah melalui otomatisasi dan digitalisasi. Transformasi ini akan memerlukan perubahan signifikan dalam keterampilan tenaga kerja, struktur organisasi, mekanisme kepemimpinan, dan budaya perusahaan.

Lima parameter penting untuk kualifikasi yang dibutuhkan pekerja terampil dalam industri 4.0:

- Integrasi komprehensif dan transparansi informasi
- Peningkatan otomatisasi sistem produksi
- Manajemen mandiri dan pengambilan keputusan berdasarkan objek
- Komunikasi digital dan fungsi manajemen interaktif
- Fleksibilitas penggunaan staf.

Era baru akan menciptakan banyak peran lintas fungsi baru yang membutuhkan pengetahuan TI dan produksi bagi para pekerja. Oleh karena itu, sistem pendidikan harus bertransformasi dengan menyediakan keahlian yang lebih luas dan kemampuan khusus pekerjaan, menutup kesenjangan keterampilan TI, dan menawarkan format baru untuk pendidikan berkelanjutan. Tidak hanya konten pendidikan tetapi juga metode pengembangan keterampilan harus memenuhi persyaratan karyawan generasi baru. Visi baru untuk masa depan pendidikan sebagai “Pendidikan 4.0” dalam lingkup yang lebih luas:

- Yang menanggapi kebutuhan industri 4.0, tempat manusia dan mesin selaras untuk memungkinkan kemungkinan baru
- Memanfaatkan potensi teknologi digital, data yang dipersonalisasi, konten sumber terbuka, dan kemanusiaan baru dari dunia yang terhubung secara global dan didukung teknologi ini
- Menetapkan cetak biru untuk masa depan pembelajaran—pembelajaran seumur hidup—dari sekolah anak-anak hingga pembelajaran berkelanjutan di tempat kerja, hingga pembelajaran untuk memainkan peran yang lebih baik dalam masyarakat.

Karakteristik baru pendidikan masa depan sebagai pendidikan yang dipersonalisasi, dikemas ulang, peer-to-peer, dan berkelanjutan. Proses pembelajaran akan mengubah pola pikir lama dalam waktu dekat, baik di ruang kelas atau tempat kerja, daring atau luring, terstruktur atau tidak terstruktur, diajarkan atau dipelajari, terstandarisasi atau tidak, bersertifikat atau tidak.

Universitas juga akan memiliki peran penting dalam transformasi tenaga kerja di era baru. Untuk mendorong pengetahuan dan komunikasi lintas fungsi, mereka harus mengubah program teknik yang ada. Pendidikan teknik membutuhkan kolaborasi disiplin akademis dengan pengembangan sistem sosio-teknis yang sangat kompleks. Insinyur masa depan membutuhkan keterampilan untuk beradaptasi dengan siklus inovasi dengan cepat, dan TI adalah pendorong utama inovasi dalam konteks industri masa depan.

Dalam hal ini, universitas harus fokus pada pengembangan kemampuan khusus untuk peran baru dan mengadaptasi kurikulum mereka untuk memenuhi harapan perusahaan akan keterampilan Industri 4.0. Mereka juga perlu mendorong keterampilan lunak yang memungkinkan pekerja terbuka terhadap pengembangan kemampuan yang berkelanjutan, kolaborasi antardisiplin, dan inovasi. Karena data besar, komputasi awan, analisis data, kecerdasan buatan, pembelajaran mesin, sistem IoT, robotika adaptif, virtualisasi, dan manufaktur adaptif adalah komponen teknologi utama Industri 4.0, semua mata pelajaran ini harus dimasukkan dan diajarkan secara komprehensif dalam program pendidikan teknik.

Program universitas harus direstrukturisasi sehingga keterampilan manajemen inovasi dan kewirausahaan para insinyur akan dikembangkan. Selain itu, teknologi e-learning seperti gamifikasi, laboratorium virtual, dan analitik pembelajaran harus mendukung proses pendidikan teknik.

Pertanyaan utama bagi universitas adalah bagaimana struktur dan isi kursus dari berbagai program teknik seperti komputer, elektronik, industri dan manufaktur akan diubah di era baru. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki persyaratan baru untuk program pendidikan teknik universitas di era industri 4.0.

## **8.2 PERSYARATAN PENDIDIKAN BARU**

Dalam subbagian ini, persyaratan pendidikan baru untuk Industri 4.0 dirangkum dalam tiga kelompok. Pertama, persyaratan konten untuk pendidikan di era Industri 4.0 diberikan, kemudian pada tahap kedua persyaratan dan kemajuan dalam teknologi pendidikan dirangkum dan akhirnya peran kemampuan untuk bekerja dalam tim interdisipliner ditekankan.

## Konten Pendidikan

Persyaratan konten untuk pendidikan di era Industri 4.0 dapat diklasifikasikan ke dalam empat kelompok utama. Kelompok pertama terdiri dari teknologi pengumpulan, penyimpanan, dan pemrosesan data. Kelompok kedua berfokus pada operasi otomatis bernilai tambah. Kelompok ketiga terdiri dari pengetahuan domain, yang mencakup aplikasi mutakhir dalam domain tertentu dan kelompok terakhir adalah inovasi dan kewirausahaan.

## Teknologi Data dan Komputasi

Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai teknologi baru telah muncul untuk mengumpulkan, menyimpan, dan memproses data guna menghasilkan aplikasi yang bermanfaat. Beberapa kemajuan teknologi terpenting yang terkait dengan pendidikan Industri 4.0 dapat dicantumkan sebagai berikut:

- *Pemodelan data dan Bigdata*: Data sangat penting untuk banyak aplikasi TI, jadi pemodelan data yang berkaitan dengan penyimpanan data yang efisien untuk sumber data tradisional merupakan topik penting. Baru-baru ini, big data yang merujuk pada volume besar data terstruktur dan tidak terstruktur telah menjadi area penting dengan teknologi spesifiknya.
- *Analisis Data*: Analisis Data adalah proses mengekstraksi makna dari data mentah menggunakan sistem komputer khusus. Ada tiga kelompok utama analisis data, analisis deskriptif menangani pemrosesan data untuk mempertahankan ringkasan data historis guna menghasilkan informasi yang berguna. Analisis prediktif berfokus pada mengidentifikasi kemungkinan hasil masa depan dari tindakan potensial menggunakan algoritme spesifik dan data historis. Terakhir, analisis preskriptif mencoba menemukan jalur terbaik ke depan berdasarkan kendala dan tujuan suatu masalah.
- *Komputasi awan*: Komputasi awan didefinisikan sebagai pengiriman daya komputasi, sumber daya penyimpanan data, perangkat lunak, dan sumber daya TI lainnya sesuai permintaan melalui platform melalui internet. Komputasi awan memungkinkan informasi terpusat untuk aplikasi industri 4.0 dan menawarkan kolaborasi platform untuk memajukan dan menyempurnakan penelitian demi keuntungan seluruh industri.
- *Pembelajaran Mesin*: Pembelajaran Mesin adalah subbidang ilmu komputer yang memberi "komputer kemampuan untuk belajar tanpa diprogram secara eksplisit". Pembelajaran mesin penting untuk industri 4.0 karena memungkinkan otonomi perangkat lunak.

## Operasi Otomatisasi Bernilai Tambah

Operasi otomatis bernilai tambah melibatkan bidang penelitian seperti robotika & otomatisasi, sistem cerdas dan tertanam, dan manufaktur aditif.

- *Otomatisasi*: Otomatisasi adalah penggunaan beberapa sistem kontrol untuk mengoperasikan peralatan. Otomatisasi industri dalam manufaktur mengacu pada pemanfaatan mesin cerdas di pabrik untuk meminimalkan campur tangan manusia dalam proses manufaktur.
- *Robotika*: Robotika adalah cabang teknik yang melibatkan konsepsi, desain, manufaktur, dan pengoperasian robot. Robotika diperlukan untuk Industri 4.0 karena

penggunaan robot industri untuk produksi memberikan efisiensi dan fleksibilitas yang tinggi.

- *Sistem cerdas dan tertanam*: Internet of things (IOT) adalah jaringan entitas fisik yang memungkinkan mereka untuk mengumpulkan dan bertukar data menggunakan elektronik, perangkat lunak, sensor, aktuator, dan konektivitas jaringan.
- *Manufaktur aditif*: Manufaktur aditif mengacu pada proses yang digunakan untuk membuat objek tiga dimensi di mana lapisan material terbentuk. Ini adalah komponen kunci dalam Industri 4.0 karena memungkinkan produksi komponen yang diinginkan lebih cepat, lebih fleksibel, dan lebih tepat.

Selain itu, konten teknologi yang disebutkan di atas harus dibekali dengan pengetahuan domain yang spesifik dan terkini. Para siswa harus mengetahui aplikasi industri 4.0 terkini dan persyaratan bisnis terkini dalam industri seperti energi, perawatan kesehatan, dan layanan.

### **Inovasi dan Kewirausahaan**

Inovasi dan kewirausahaan sangat penting bagi pembangunan ekonomi. Di era Industri 4.0, peran ini menjadi lebih penting, dan pendidikan perlu diselaraskan dengan perubahan ini. Perusahaan perlu menerapkan manajemen proses inovasi untuk mengatasi persaingan dan bertahan dari krisis keuangan. Di sisi lain, seiring siklus inovasi menjadi lebih cepat, kebutuhan akan lebih banyak perusahaan muncul.

Inovasi dibagi menjadi dua kategori; inovasi evolusioner adalah kemajuan berkelanjutan dan bertahap dalam teknologi atau proses. Sebaliknya, inovasi revolusioner adalah perubahan yang sama sekali baru dan disruptif dalam teknologi dan proses. Di masa revolusi industri, inovasi revolusioner mendominasi yang berarti teknologi dan proses disruptif diciptakan. Dalam cakupan bagian ini, pertanyaannya adalah bagaimana cara mengajar siswa agar mereka menjadi inovator. Inovasi dan kewirausahaan dapat diklasifikasikan ke dalam dua bidang penelitian sebagai berikut:

- *Material dan alat inovatif*: Inovasi dan kewirausahaan dapat dikaitkan dengan material/alat baru yang memungkinkan pengembangan produk baru. Material baru seperti material Nano-teknologi merupakan inti dari Industri 4.0.
- *Model bisnis Inovasi/Kewirausahaan*: Manajemen inovasi telah berubah. Akhir-akhir ini, inovasi terbuka dan crowdsourcing menjadi sangat populer. Inovasi terbuka menyarankan bahwa perusahaan harus menggunakan ide eksternal ketika mereka mencari kemajuan teknologi. Pendidikan baru untuk Industri 4.0 harus fokus pada konsep-konsep baru ini. Selain keterampilan kewirausahaan klasik, siswa perlu dibekali dengan keterampilan baru seperti pemikiran bisnis baru, kolaborasi dengan berbagai pihak, dan komunikasi dengan berbagai pemangku kepentingan. Pengambilan risiko dan pengambilan keputusan dalam ketidakpastian, kreativitas, dan kemampuan beradaptasi terhadap perubahan cepat juga merupakan keterampilan penting wirausahawan di era Industri 4.0.

### **Teknologi E-Learning**

Teknologi yang berkaitan dengan pendidikan Industri 4.0 dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok utama. Kelompok pertama terkait dengan laboratorium virtual dan

realitas ditambah untuk pendidikan. Kelompok kedua menggunakan gamifikasi untuk pendidikan dan kelompok ketiga berfokus pada analisis pembelajaran.

- *Laboratorium Virtual dan Realitas Tertambah*: Laboratorium virtual merujuk pada perangkat lunak untuk pembelajaran interaktif berdasarkan simulasi fenomena nyata. Hal ini memungkinkan siswa untuk mengeksplorasi suatu topik dengan membandingkan dan mengontraskan berbagai skenario, untuk menjeda dan memulai kembali aplikasi untuk refleksi dan pencatatan, untuk mendapatkan pengalaman eksperimen praktis melalui Internet. Realitas ditambah, di sisi lain, adalah tampilan langsung atau tidak langsung dari lingkungan fisik dunia nyata yang elemen-elemennya ditambah dengan masukan sensorik yang dihasilkan komputer seperti suara, video, grafik, atau data GPS. Kedua teknologi tersebut dapat digunakan untuk tujuan pendidikan yang memberdayakan interaktivitas antara sistem dan pelajar. Khususnya dalam kasus di mana membangun laboratorium Industri 4.0 yang sesungguhnya mahal atau tidak mungkin, interaktivitas yang dipertahankan oleh sistem ini dapat mendorong pembelajaran yang efektif.
- *Gamifikasi*: Gamifikasi adalah penerapan elemen desain permainan dan prinsip permainan dalam konteks non-permainan. Biasanya, gamifikasi mencoba meningkatkan keterlibatan pengguna dan produktivitas organisasi. Gamifikasi juga penting untuk sistem pembelajaran karena menarik perhatian pelajar melalui prinsip-prinsip permainan seperti; narasi, umpan balik instan, peningkatan level, dan indikator kemajuan. Dengan gamifikasi, tantangan kehidupan nyata dapat ditiru dengan tingkat kesulitan yang meningkat dan pembelajaran sosial dapat dipertahankan dengan mempromosikan interaksi dan kompetisi sosial.
- *Analisis Pembelajaran*: Analisis pembelajaran (LA) adalah penerapan analisis data ke dalam lingkungan pembelajaran elektronik. LA mengukur dan mengumpulkan data tentang pelajar dan konteks mereka untuk memahami tingkat pembelajaran dan mengoptimalkan tindakan di masa mendatang. Dengan aplikasi analisis pembelajaran, proses pembelajaran dapat dipersonalisasi, konten adaptif dapat diproduksi, pencapaian pelajar dapat ditingkatkan, dan guru menjadi lebih efektif. Karena Industri 4.0 mencakup berbagai bidang penelitian dan bidang aplikasi yang berbeda, pembelajaran yang adaptif dan efisien menjadi sangat penting. Dengan sistem pembelajaran yang dipersonalisasi, siswa dapat memperoleh pengetahuan terperinci tentang bidang tertentu yang ingin mereka fokuskan.

#### **Bekerja dalam Tim Interdisipliner**

Meskipun Industri 4.0 dikaitkan dengan teknologi canggih, perspektif manusia juga penting dan membawa tantangan penting. Industri 4.0 melibatkan banyak bidang penelitian termasuk, teknik mekatronik, teknik industri, dan ilmu komputer. Sifat Industri 4.0 ini membawa kebutuhan untuk bekerja dalam tim interdisipliner, mewujudkan tugas interdisipliner, dan menyediakan pemikiran interdisipliner. Di universitas tradisional, yang berfokus pada satu disiplin teknik, tidak mudah untuk membekali siswa dengan keterampilan interdisipliner yang dibutuhkan untuk Industri 4.0. Struktur program dan/atau silabus kursus

dapat diperbarui untuk meningkatkan keterampilan interdisipliner.

### 8.3 PERSYARATAN PENDIDIKAN TEKNIK BARU

Berdasarkan persyaratan pendidikan baru, kami meninjau bidang penelitian dari sampel yang meliputi teknik industri, teknik mesin, teknik listrik dan elektronik, dan disiplin ilmu teknik komputer. Kami menganalisis bidang penelitian dari disiplin ilmu ini berkenaan dengan pendidikan utama dan sub baru yang didefinisikan dalam Bab 8.2. Kami mengikuti pendekatan dua tahap. Pertama, kami mengidentifikasi program sampel dan mengumpulkan bidang penelitian dari program ini. Kami ingin mengungkap perbedaan bidang penelitian dalam budaya yang berbeda.

Oleh karena itu, sampel yang beragam dipilih. Meskipun beberapa bidang penelitian menggabungkan lebih dari satu persyaratan pendidikan, dengan mempertimbangkan konten, kami menetapkan bidang penelitian ke dalam salah satu kelompok. Kami menganalisis total 124 program yang meliputi teknik industri, teknik mesin, teknik listrik dan elektronik, dan disiplin ilmu teknik komputer yang disampaikan di 32 universitas (lihat Tabel 8.1) di delapan negara, yaitu AS (19 universitas), Turki (lima universitas), Tiongkok (dua universitas), Jerman, Singapura, Korea Selatan, Jepang, dan Belanda. Kami mengklasifikasikan program berdasarkan kedekatannya dengan disiplin ilmu.

Di universitas, nama departemen menunjukkan keragaman yang tinggi, kami mengklasifikasikan program berdasarkan kedekatannya dengan disiplin ilmu. Misalnya, departemen Riset operasi & rekayasa keuangan Universitas Princeton diklasifikasikan di bawah disiplin ilmu rekayasa industri. Daftar lengkap departemen diberikan dalam Lampiran A. Pada tahap kedua, kami mengklasifikasikan bidang penelitian menurut persyaratan pendidikan baru yang ditetapkan dalam Bab 8.2. Setelah kami menentukan persyaratan pendidikan yang ditawarkan program, kami dapat memastikan konfigurasi program dan perbedaan di antara disiplin ilmu. Kami menyediakan klasifikasi bidang penelitian universitas ke dalam tiga persyaratan pendidikan baru yang telah kami tentukan dari literatur. Kami juga memperoleh persyaratan sub-pendidikan dari analisis kami.

**Tabel 8.1** Daftar universitas

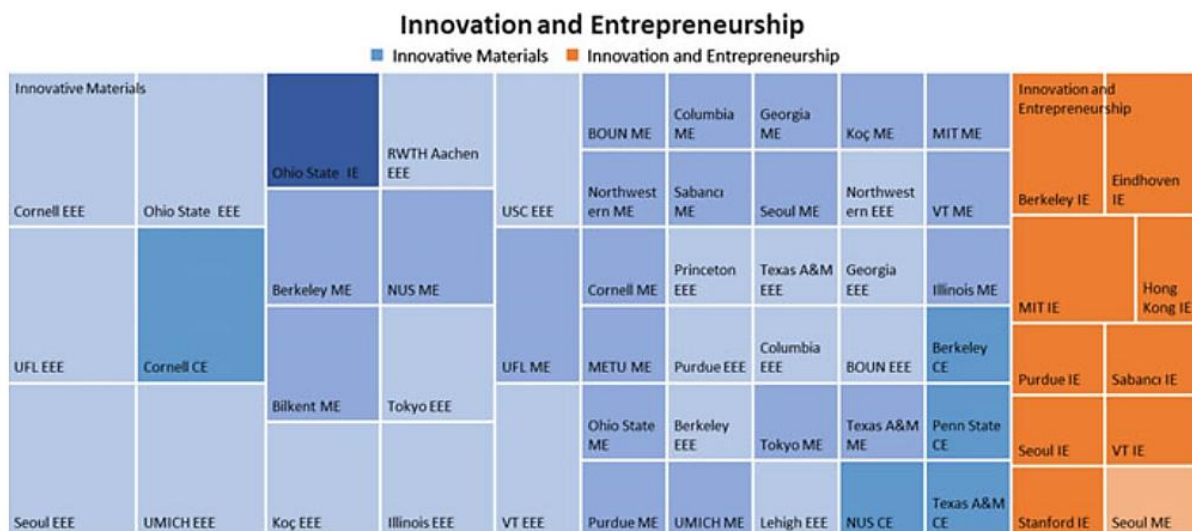
<b>Kota</b>	<b>Universitas</b>	<b>Kota</b>	<b>Universitas</b>
Berkeley	Universitas California, Berkeley	Princeton	Universitas Princeton
Bilkent	Universitas Bilkent	Purdue	Universitas Purdue
BOUN	Universitas Bogazici	RWTH	Universitas RWTH Aachen
Kolumbia	Universitas Kolombia	Sabancı	Universitas Sabancı
Cornell	Universitas Cornell	Seoul	Universitas Nasional Seoul
Eindhoven	Universitas Teknologi Eindhoven	Stanford	Universitas Standford
Georgia	Institut Teknologi Georgia	Texas A&M	Universitas A&M Texas
Hongkong	Universitas Sains dan Teknologi Hong Kong	Texas Austin	Universitas Texas di Austin
Koç	Universitas Sains dan Teknologi Koç	Tokyo	Insttut Teknologi Tokyo
Lehigh	Universitas Koç	Tsinghua	Universitas Tsinghua

MIT	Institut Teknologi Massachusetts	UFL	Universitas Florida
Northwestern	Universitas Northwestern	Illinois	Universitas Illinois Urbana-Champaign
NUS	Universitas Nasional Singapura	UMICH	Universitas Michigan-Ann Arbor
METU	Universitas Teknik Timur Tengah	USC	Universitas California Selatan
Ohio State	Universitas Negeri Ohio	Wisconsin	Universitas Wisconsin-Madison
Penn State	Universitas Negeri Penn	VT	Teknologi Virginia

**Inovasi/Kewirausahaan**

Persyaratan pendidikan baru yang pertama adalah kewirausahaan dan inovasi. Persyaratan pendidikan ini terutama terdiri dari dua persyaratan yang berbeda. Persyaratan pertama berfokus pada penggunaan material inovatif dalam pengembangan teknologi baru sedangkan persyaratan kedua berfokus pada inovasi dan kewirausahaan dengan perspektif bisnis. Pada Gambar 8.1, kami memberikan departemen yang memiliki area penelitian khusus yang mempertimbangkan inovasi dan kewirausahaan.

Disiplin teknik yang berbeda ditandai dengan warna yang berbeda seperti disiplin teknik industri diwakili dengan warna paling gelap sedangkan teknik listrik dan elektronik diwakili dengan warna paling terang. Setiap departemen yang memiliki fokus pada area sub-pengetahuan diwakili dengan persegi panjang. Ukuran persegi panjang sebanding dengan jumlah area penelitian di lapangan.



**Gambar 8.1** Inovasi dan kewirausahaan

Menurut Gambar 8.1, bidang pengetahuan inovasi dan kewirausahaan dengan perspektif bisnis didominasi oleh disiplin ilmu teknik industri. Sembilan departemen teknik industri berfokus pada bidang ini. Bidang pengetahuan material inovatif didominasi oleh teknik mesin dan teknik listrik dan elektronik. Dari 32 departemen teknik mesin di 20 departemen,

terdapat program yang terkait dengan material inovatif. Hanya empat program teknik komputer yang memiliki bidang penelitian tentang material inovatif.

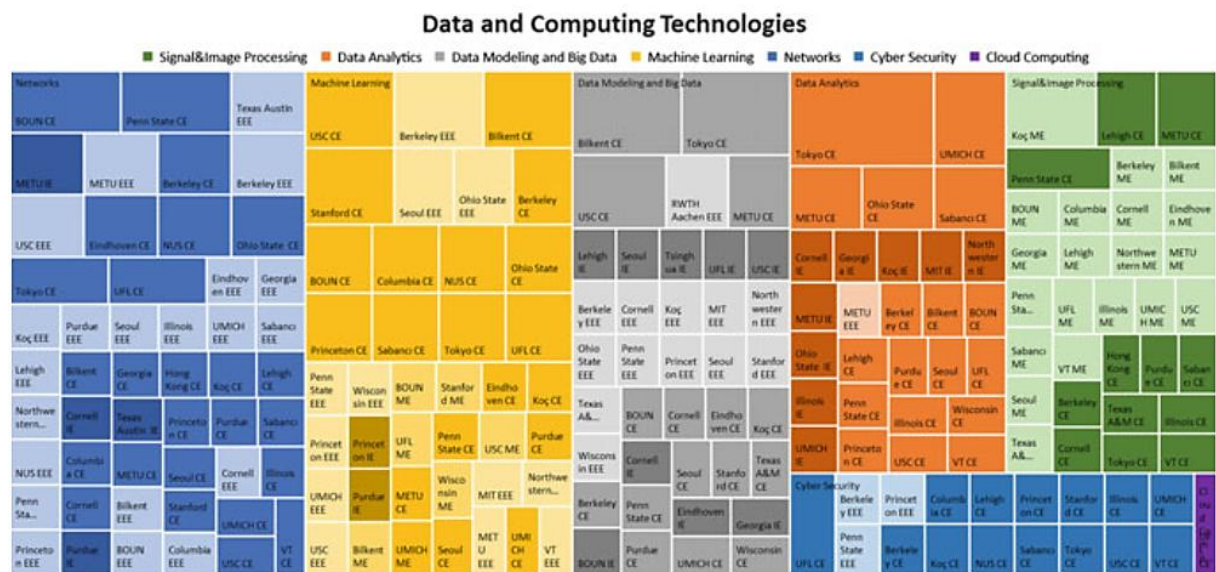
**Teknologi Data dan Komputasi**

Teknologi data dan komputasi melibatkan analitik data, pemrosesan sinyal dan gambar, pemodelan data dan big data, pembelajaran mesin, jaringan, keamanan siber, dan persyaratan subpendidikan komputasi awan.

Pada Gambar 8.2, kami memberikan departemen yang memiliki bidang penelitian khusus yang mempertimbangkan teknologi data dan komputasi. Mirip dengan Gambar 8.1, disiplin ilmu teknik yang berbeda ditandai dengan corak yang berbeda. Bidang subpengetahuan diwarnai dengan warna yang berbeda. Setiap departemen yang memiliki fokus pada bidang subpengetahuan diwakili oleh persegi panjang. Ukuran kotak tersebut proporsional dengan jumlah area penelitian di lapangan. Gambar 8.2 menunjukkan bahwa hampir setiap disiplin ilmu memiliki minat pada data dan teknologi komputasi. Sub-area pengetahuan jaringan dan desain jaringan didominasi oleh disiplin ilmu teknik listrik dan elektronika serta teknik komputer.

Namun, beberapa program teknik industri tertarik pada bidang ini. Demikian pula, sub-area pembelajaran mesin didominasi oleh disiplin ilmu teknik listrik dan elektronika serta teknik komputer. Enam departemen teknik mesin dan dua departemen teknik industri berfokus pada area pengetahuan pembelajaran mesin. Area pengetahuan pemodelan data dan big data merupakan bidang yang beragam di mana teknik komputer, teknik industri, dan teknik listrik dan elektronika memiliki dampak yang hampir sama. Disiplin ilmu teknik komputer dan teknik industri mendominasi analitik data.

Disiplin ilmu teknik komputer memiliki dampak yang tinggi pada semua teknologi komputasi data termasuk keamanan siber. Pemrosesan sinyal dan gambar merupakan satu-satunya sub-area pengetahuan di mana disiplin ilmu teknik mesin memiliki dampak yang lebih kuat.

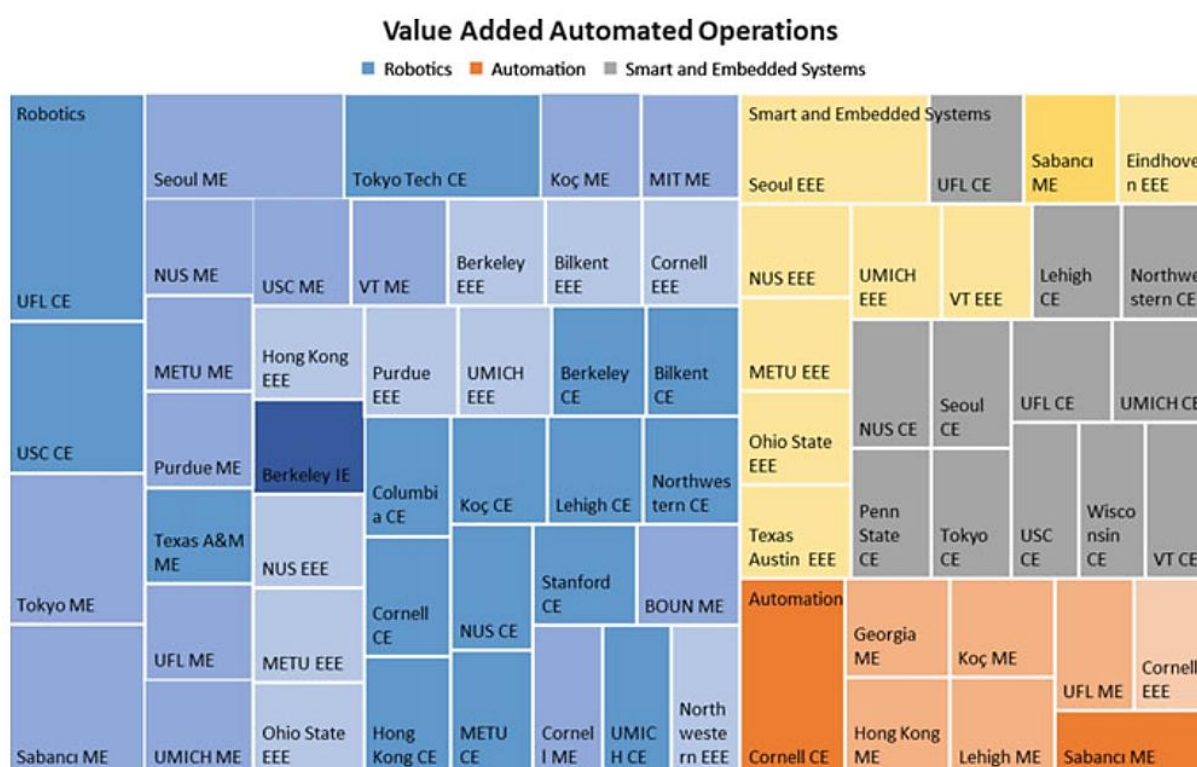


**Gambar 8.2** Teknologi data dan komputasi

## Operasi Otomatis Bernilai Tambah

Persyaratan pendidikan operasi otomatis bernilai tambah mencakup perolehan pengetahuan tentang manufaktur aditif, otomatisasi, robotika, dan sistem cerdas dan tertanam. Pada Gambar 8.3, kami memberikan departemen yang memiliki area penelitian khusus yang mempertimbangkan operasi otomatis bernilai tambah. Pada gambar ini, disiplin ilmu teknik yang berbeda ditandai dengan corak yang berbeda dan area sub-pengetahuan diwarnai dengan warna yang berbeda. Setiap departemen yang memiliki fokus pada area sub-pengetahuan diwakili oleh sebuah kotak. Ukuran kotak tersebut proporsional dengan jumlah area penelitian di lapangan.

Gambar 8.3 menunjukkan bahwa setiap disiplin ilmu menerima bahwa teknik industri memiliki minat dalam operasi otomatis bernilai tambah. Bidang robotika dicakup oleh ketiga disiplin ilmu ini. Teknik komputer dan teknik listrik dan elektronik mendominasi area pengetahuan produk cerdas dan tertanam. Bidang otomatisasi sebagian besar didominasi oleh teknik mesin. Hanya satu teknik komputer, satu departemen teknik listrik, dan elektronik yang berfokus pada area ini.



**Gambar 8.3** Operasi otomatis bernilai tambah

Ketika kita mempertimbangkan semua departemen teknik, mereka menunjukkan berbagai macam bidang penelitian. Meskipun memiliki beberapa karakteristik umum, sifat departemen teknik dalam persyaratan pendidikan baru ini berubah pada anggota fakultas. Perbedaan budaya antar negara tidak ada di sekolah teknik.

## Kesimpulan

Kekurangan persyaratan pendidikan teknik baru ditutupi oleh sejumlah alternatif

pendidikan teknik seperti disiplin ilmu industri, komputer, listrik & elektronik, dan teknik mesin. Meskipun ada beberapa karakteristik umum, bidang penelitian teknik tampaknya dirancang secara ad hoc, tergantung pada ketersediaan fakultas dan bidang penelitian mereka. Hal ini menyebabkan representasi persyaratan pendidikan baru yang tidak seimbang karena sumber daya yang tersedia cenderung terbatas.

Pengajaran era Industri 4.0 yang baru mencakup berbagai disiplin ilmu dan menggunakan semakin banyak metode yang menunjukkan kompleksitas yang terkait dengan disiplin ilmu yang berkembang ini. Ada hubungan yang kuat antara persyaratan pendidikan baru industri 4.0. Oleh karena itu, untuk memperoleh informasi dan pengetahuan praktis yang dapat diaplikasikan pada lingkungan bisnis, berbagai disiplin ilmu harus dapat bekerja sama. Mendesain program rekayasa terpadu yang mencakup persyaratan pendidikan rekayasa baru ini dapat menutup kesenjangan antara universitas dan lingkungan bisnis.

Kontribusi penelitian ini terletak pada pendekatan objektifnya terhadap departemen dan proses komprehensif dan terbuka yang digunakan dalam status terkini persyaratan rekayasa baru. Bab kami menganalisis departemen rekayasa dari perspektif bidang pengetahuan dan keterampilan dan mengelompokkannya sehubungan dengan bidang penelitian yang ditawarkan. Penelitian ini dapat menjadi panduan dalam proses desain program rekayasa baru yang memenuhi kebutuhan era Industri 4.0.

## BAB 9

### ANALISIS DATA DALAM MANUFAKTUR

Perkembangan teknologi telah memunculkan konsep baru, Industri 4.0. Konsep ini hadir dengan dua peningkatan teknologi, *Cyber-Physical System (CPS)* dan *Internet of Things (IoT)* yang mendorong perusahaan manufaktur untuk melakukan Analisis Data dengan menghasilkan data dalam jumlah besar.

Dalam hal Industri 4.0, analisis data berfokus pada "apa yang akan terjadi" daripada "apa yang telah terjadi". Masalah-masalah ini disebut sebagai analisis prediktif dan bertujuan untuk membangun model untuk memperkirakan kemungkinan masa depan atau kejadian yang tidak diketahui. Tujuan dari makalah ini adalah untuk memberikan wawasan tentang teknik-teknik ini, menyediakan aplikasi dari literatur dan menunjukkan studi kasus dunia nyata dari sebuah perusahaan manufaktur.

#### 9.1 PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi telah mengawal industri dari sistem mekanis ke pabrik-pabrik yang sangat otomatis dan cerdas yang di dalamnya terdapat mesin-mesin cerdas dan jaringan sensor. Dengan perkembangan teknologi ini, sebuah konsep baru, Industri 4.0 diperkenalkan oleh Jerman selama acara Hannover Fair pada tahun 2011, yang melambungkan dimulainya revolusi industri ke-4.

Tiga revolusi industri pertama telah menghasilkan perubahan radikal dalam manufaktur yaitu mekanisasi, penggunaan listrik dan penggunaan teknologi informasi (TI). Industri 4.0 hadir dengan dua peningkatan teknologi, Sistem Siber-Fisik (CPS) dan Internet of Things (IoT) yang maju dalam dekade terakhir. Sistem Siber-Fisik (CPS) didefinisikan sebagai teknologi transformatif untuk mengelola sistem yang saling terhubung antara aset fisik dan kemampuan komputasinya.

Kerangka kerja interkoneksi antara sensor dan mesin jaringan ini disebut sebagai Internet of Things (IoT). Dengan menggunakan IoT, berbagai sinyal seperti getaran, tekanan, konsumsi bahan bakar, dll. dapat diekstraksi. Akibatnya, penggunaan sensor dan mesin jaringan yang semakin meningkat telah menghasilkan produksi data bervolume tinggi, berkecepatan tinggi, dan kompleks secara terus-menerus yang juga dikenal sebagai Big Data. Oleh karena itu, analisis data menjadi lebih penting bagi pabrik karena perkembangan pesat pada domain data ini.

Dalam industri saat ini, cara memanfaatkan data untuk memahami kondisi terkini dan mendeteksi kesalahan dianggap sebagai topik penelitian yang penting. Penggunaan analisis data untuk meningkatkan kinerja sistem manufaktur telah banyak dipertimbangkan dalam literatur. Faktanya, pemodelan dan analisis data merupakan bagian integral dari hampir semua pengambilan keputusan berbasis data. Sistem manufaktur Industri 4.0 mencakup begitu banyak sensor, perangkat dan mesin yang saling terhubung yang memfasilitasi pengumpulan sejumlah besar data. Dengan demikian, perusahaan manufaktur memiliki banyak peluang

untuk meningkatkan kinerja proses manufaktur mereka. Oleh karena itu, karena tren Industri 4.0, teknologi big data bergeser dari pengumpulan data ke analisis dan hasil data.

Analisis Data membantu perusahaan manufaktur untuk mendapatkan wawasan yang dapat ditindaklanjuti yang menghasilkan keputusan yang lebih cerdas dan hasil bisnis yang lebih baik. Karena alasan ini, analisis data menjadi topik yang sangat menarik bagi hampir setiap perusahaan manufaktur di era Industri 4.0.

Analisis data secara umum tercakup dalam tiga subtopik. Yang pertama adalah Analisis Deskriptif yang merangkum data dan melaporkan masa lalu. Analisis ini menjawab pertanyaan "Apa yang telah terjadi?" dan mengekstrak informasi dari data mentah. Ada juga perluasan dari analisis deskriptif yang disebut "analisis diagnostik" yang melaporkan masa lalu tetapi mencoba menjawab pertanyaan seperti "Mengapa itu terjadi?".

Subtopik kedua adalah Analisis Prediktif yang dianggap sebagai fase peramalan. Analisis ini mencakup keluaran analisis deskriptif serta beberapa algoritma dan teknik pembelajaran mesin (ML) untuk membangun model akurat yang memprediksi masa depan. Analisis ini menjawab pertanyaan "Apa yang akan terjadi?" dan "Mengapa itu akan terjadi?" di masa depan.

Akhirnya, tujuan dari Analisis Preskriptif adalah untuk memberikan nilai bisnis melalui keputusan strategis dan operasional yang lebih baik. Ini semua tentang memberikan saran. Secara umum, analisis preskriptif juga merupakan analisis prediktif yang menentukan beberapa tindakan dan menunjukkan kemungkinan hasil atau pengaruh dari setiap tindakan. Ini menjawab pertanyaan "Apa yang harus saya lakukan?" dan "Mengapa saya harus melakukannya?".

## 9.2 MANUFAKTUR DALAM LITERATUR

Pada bagian ini, kami bertujuan untuk menjelaskan beberapa studi kasus analitik data berorientasi manufaktur dalam literatur. Aplikasi yang kami fokuskan diterapkan di area manufaktur dan semuanya mencakup beberapa teknik analitik prediktif. Studi kasus dipilih untuk memastikan bahwa analitik data digunakan dalam Industri 4.0 dan menekankan dampak signifikan pada efektivitas operasional perusahaan manufaktur.

### Konsumsi Daya dalam Manufaktur

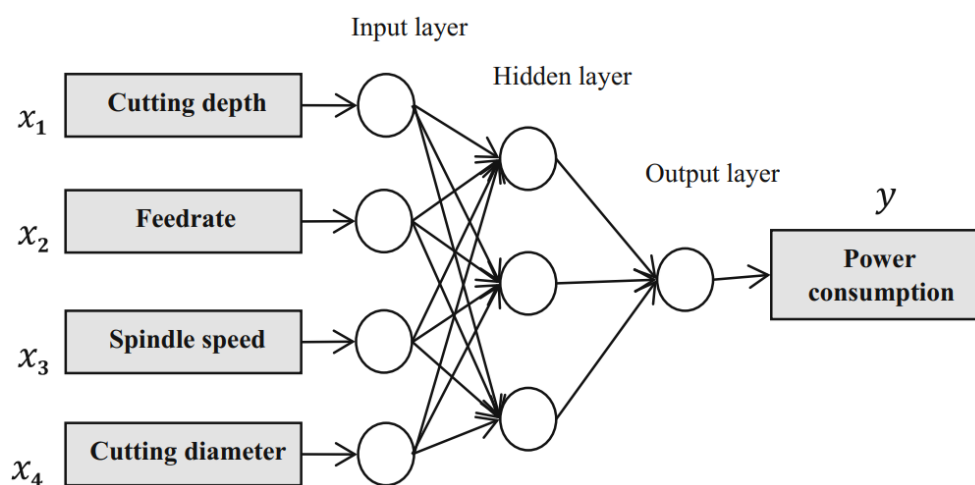
Model analitik prediktif dalam industri pemotongan logam. Ditekankan bahwa penggunaan pembelajaran mesin dan analitik prediktif mendorong perusahaan manufaktur untuk membuat keputusan yang lebih baik. Mereka mengadopsi pendekatan pemodelan analitik berbasis data yang mengklasifikasikan operasi pemesinan di mana perusahaan manufaktur dapat menggunakan faktor penyebab (perencanaan) dan akibat (pemantauan).

Dalam model tersebut, aliran fungsional dibagi menjadi bagian praproduksi, produksi, dan pascaproduksi. Desain model analitik prediktif, pemodelan, dan pengoptimalan dicantumkan sebagai langkah pascaproduksi.

Setelah persiapan set data pelatihan, model pembelajaran mesin disediakan yang melibatkan pembelajaran terbimbing dan menganalisis set pasangan pelatihan dan menyimpulkan suatu fungsi. Algoritma jaringan saraf propagasi balik dipilih untuk

mengembangkan model analitik unit untuk pembelajaran, karena algoritma tersebut memiliki kekuatan untuk mencari tahu hubungan yang kompleks karena banyaknya set masukan pembelajaran (Gambar 9.1).

Tiga model analitik unit diturunkan untuk Baja, Aluminium, dan Titanium dalam hal material benda kerja. Sistem pembelajaran mesin menghasilkan tiga model prediktif untuk setiap jenis material dari set pelatihan. Hasilnya, Root Mean Square Error (NRMSE) yang Dinormalkan untuk 'baja' mencapai 17%, 'aluminium' 21%, dan 'titanium' masing-masing 11%. Karena rentang data masukan pembelajaran terlalu sempit, akurasi tidak begitu bagus. Di sisi lain, metode ini dapat menemukan pola data yang berlaku dalam korelasi data yang tidak diketahui dengan rentang set data pelatihan yang tersusun dengan baik.



Gambar 9.1 Struktur jaringan saraf

### Deteksi Anomali pada Pendingin Udara

Kerangka kerja untuk Prognostik dan Manajemen Kesehatan (PHM). Sistem dijelaskan dengan fokus pada tiga agen interaktif: Agen Sistem (SA), Agen Pengetahuan (KA), dan agen eksekutif (EA). SA bertanggung jawab atas pengelolaan sumber daya perangkat keras, papan akuisisi data, dan koneksi. KA bertanggung jawab atas pengelolaan aturan pengetahuan, algoritma, model luring, pembuatan dan pelaporan EA. Terakhir, tanggung jawab EA tercantum sebagai pengelolaan data daring, pelaksanaan analisis prognostik, dan pengelolaan komunikasi eksternal.

Ditegaskan bahwa, waktu henti dari kompresor udara dapat menyebabkan kerugian besar dalam produktivitas di pabrik manufaktur. Deteksi dini lonjakan pada kompresor udara dan mengintegrasikan metode deteksi dengan sistem kontrol untuk menghindari terjadinya lonjakan.

Banyak sensor dipasang untuk memantau kompresor, akhirnya ada 20 variabel yang diukur dan dihitung. Tiga di antaranya disediakan sebagai variabel kunci untuk mendeteksi kondisi lonjakan.

Algoritma klasifikasi mesin vektor pendukung asimetris (ASVM) digunakan untuk menentukan kondisi kompresor secara otomatis. Disebutkan bahwa metode ASVM tidak akan

melewatkan deteksi apa pun, tetapi akan membuat alarm palsu. Tentu saja, deteksi yang terlewat lebih berisiko dan mahal daripada alarm palsu. Batasan klasifikasi yang dilatih dapat digunakan untuk menyediakan deteksi dini kondisi lonjakan dalam pemantauan waktu nyata. Algoritma tersebut menghasilkan rasio klasifikasi 100%.

Jika agen interaktif dianalisis yang dijelaskan dalam kerangka kerja di atas, KA tampaknya hanya digunakan satu kali untuk memuat batasan klasifikasi yang dilatih dan parameter model untuk algoritma ASVM. Pekerjaan EA dapat dicantumkan untuk melakukan sebagian besar perhitungan dengan menggunakan sinyal yang dipantau dan algoritma klasifikasi yang dilatih dan untuk menyediakan deteksi dini kondisi lonjakan. Terakhir, SA akan berinteraksi dengan sistem kontrol untuk dengan cepat menghindari kondisi lonjakan jika masalah terdeteksi.

Terakhir, disebutkan dalam penelitian bahwa pabrik manufaktur bekerja sama dengan produsen peralatan asli kompresor udara untuk akhirnya menanamkan model ini ke dalam sistem kontrol kompresor.

### **Sistem Perawatan Mesin Jarak Jauh Cerdas dengan Komatsu**

Pada era Industri 4.0, transformasi pabrik dan manajemen produksi diharapkan mencapai tingkat baru dengan analitik data dan sistem siber-fisik. Untuk pengambilan keputusan yang lebih cerdas dalam proses manufaktur, kerangka Sistem Siber-Fisik untuk mesin yang sadar diri dan melakukan perawatan diri.

Dalam lingkup penelitian, ruang fisik dianggap sebagai armada mesin dan tindakan manusia. Bagian mesin mencakup data yang dikumpulkan, parameter kontrol, kinerja mesin, konfigurasi mesin, informasi model, dan riwayat tugas, sedangkan bagian manusia terdiri dari aktivitas perawatan dan parameter operasional.

Ada tiga langkah untuk ruang siber (perhitungan). Pertama, format data dan informasi diharapkan terdefinisi dengan baik untuk merekam dan mengelola informasi yang dikumpulkan dari ruang fisik. Kedua, desain ruang siber diharapkan dapat meringkas dan mengumpulkan pengetahuan tentang degradasi mesin yang dapat digunakan untuk kondisi kesehatan mesin baru. Akhirnya, hasilnya harus diumpungkan kembali ke ruang fisik untuk diambil tindakan yang tepat.

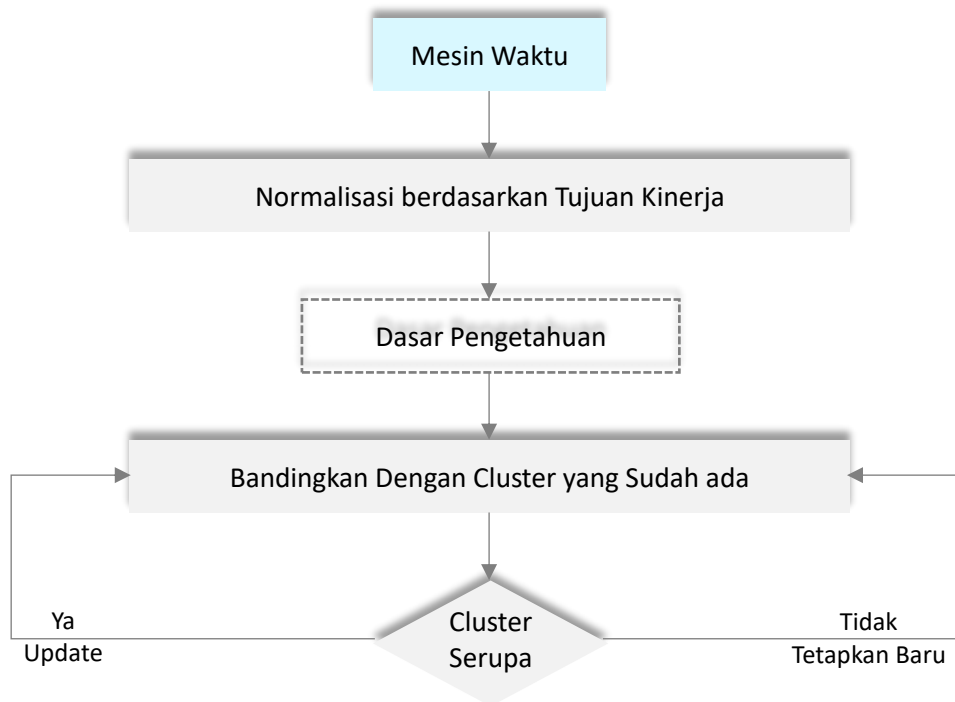
Dalam penelitian di bab ini, mekanisme yang memungkinkan berbagai perilaku kinerja mesin dapat diakumulasikan dan digunakan untuk penilaian kesehatan di masa mendatang telah disediakan. Algoritme pembelajaran tanpa pengawasan disarankan untuk membuat kluster secara otomatis untuk berbagai rezim kerja dan kondisi mesin (Gambar 9.2).

Aplikasi juga disediakan untuk memprediksi kesehatan mesin diesel kendaraan alat berat yang digunakan dalam pertambangan dan konstruksi. Parameternya meliputi tekanan, laju aliran bahan bakar, suhu, dan kecepatan putar mesin.

Untuk langkah praproses data, pendekatan rata-rata bergerak regresi otomatis digunakan untuk memprediksi nilai deret waktu beberapa langkah ke depan guna mengganti nilai yang hilang.

Setelah praproses data, langkah berikutnya adalah mengembangkan metodologi untuk mengklasifikasikan berbagai pola mesin dalam data. Teknik klasifikasi Bayesian Belief Network

(BBN) digunakan. BBN didasarkan pada pengalaman produsen terkait masalah terkait mesin, beserta riwayat pola data untuk membangun model. Model klasifikasi ini mampu menafsirkan perilaku mesin yang tidak normal dalam data dan mengidentifikasi penyebab utama masalah pada tahap awal degradasi.



**Gambar. 9.2** Pembelajaran adaptif untuk pengelompokan mesin

Terakhir, algoritma berbasis logika fuzzy digunakan untuk prediksi sisa masa pakai. Fungsi keanggotaan fuzzy didasarkan pada pengalaman teknik serta fitur yang diekstraksi dari pola data. Pendekatan hibrida ini memperhitungkan ketidakpastian dalam data dan menggabungkan pengetahuan berbasis data dan pengetahuan ahli untuk pendekatan yang lebih tangguh.

#### **Prediksi Kualitas dalam Pembuatan Baja**

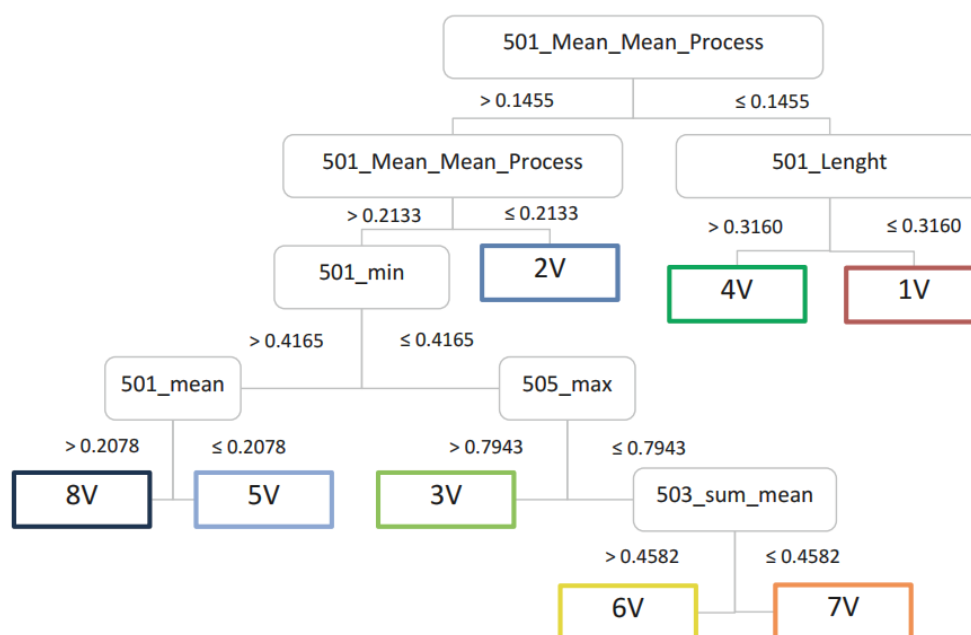
Dalam industri baja, penyimpangan kualitas produk dapat tinggi karena proses pembuatan yang saling terkait, rumit, dan memakan banyak sumber daya. Bergantung pada situasi ini, perusahaan manufaktur mencoba memprediksi kualitas fisik produk dalam proses pembuatan sedini mungkin.

Dalam studi ini, setelah berbagai jenis pengukuran sensor seperti gaya penggulangan, kecepatan, dan suhu, data diproses terlebih dahulu dan prosedur ekstraksi fitur diimplementasikan. Untuk setiap batang baja, label kualitas seperti "OK" dan "NOK" ditetapkan. Karena fakta bahwa, proses yang mengarah ke kualitas produk yang rendah sangat dekat dengan proses yang mengarah ke kualitas yang tinggi, dimensi akhir dari produk akhir digunakan sebagai pengganti label kualitas.

Metode nearest neighbor digunakan untuk menilai seberapa baik kedua kelas dapat dipisahkan secara kuantitatif. Oleh karena itu, tujuh fitur yang mencakup waktu pemanasan di

tungku perapian, gaya penggulangan, kecepatan, dan suhu dipilih.

Sebagai hasilnya, metode pohon keputusan dan k-NN digunakan dengan fitur rol akhir pertama. Akurasi metode pohon keputusan dihitung sebesar 90%, sedangkan k-NN ( $k = 11$ ) mencapai sekitar 97%. Selain itu, posisi rol (saluran 501) ditemukan sebagai fitur yang paling penting untuk pengambilan keputusan, karena menentukan tinggi produk akhir (Gambar 9.3).



**Gambar. 9.3** Pohon keputusan untuk mendeteksi dimensi akhir produk akhir

### Memprediksi Efisiensi Pengeboran

Kasus lain yang menggunakan teknik pembelajaran mesin dalam manufaktur adalah karya Hegde dan Gray (2017). Mereka menggunakan regresi dan bootstrap dalam karya mereka sebelumnya untuk memprediksi laju penetrasi (ROP) selama pengeboran. Dalam kasus ini, teknik random forest lebih disukai untuk memprediksi ROP.

Weight on bit (WOB), rotasi per menit mata bor (RPM), laju aliran lumpur pengeboran, kekuatan batuan (UCS) digunakan sebagai parameter input dalam model pembelajaran mesin. Di sisi lain, disebutkan dalam artikel bahwa meningkatkan jumlah parameter input yang relevan dapat menghasilkan model dengan akurasi yang lebih tinggi. Variabel lain seperti sifat lumpur, konfigurasi rangkaian bor, log, dan rakitan dasar lubang tidak disertakan dalam karya ini.

Pada langkah eksplorasi data, beberapa outlier dihilangkan dari data. Plot berpasangan digunakan untuk menentukan korelasi antara parameter input dan ROP. Korelasi ini dapat berguna untuk konstruksi model dan pemilihan fitur penting. Setelah menganalisis plot, beberapa fitur input dapat dibuang.

Seperti banyak teknik analisis data, data dibagi menjadi beberapa set; pelatihan dan pengujian. Operasi ini membantu menghindari overfitting. Hasilnya, teknik random forest telah memprediksi ROP dengan kesalahan yang lebih rendah daripada regresi linier dalam formasi batupasir tertentu.  $R^2$  untuk random forest adalah 0,96 dan regresi linier adalah 0,42.

RMSE menggunakan algoritma random forest adalah 7,36 ft/h, kurang dari setengah RMSE untuk regresi linier (18,43 ft/h).

Kesalahan rata-rata untuk random forest (%5) memiliki hasil yang baik dibandingkan dengan regresi linier yang menunjukkan kesalahan ternormalisasi sebesar 14%. Akhirnya, hasil prediksi digunakan untuk mengubah parameter permukaan pada rig, sehingga ROP diharapkan meningkat selama pengeboran. Selain itu, algoritma brute force digunakan untuk memodifikasi parameter permukaan guna mencapai ROP maksimum. WOB, RPM, dan laju aliran dioptimalkan untuk panjang sumur guna mencapai peningkatan ROP.

### Estimasi Biaya Manufaktur Komponen Mesin Jet

Perkiraan biaya manufaktur komponen mesin jet sipil selama fase paling awal dari proses desain. Berbagai metode analisis data disediakan dalam makalah ini dan peningkatan akurasi perkiraan dijelaskan langkah demi langkah.

Set data berisi 254 titik data, 6 kovariat, dan biaya manufaktur untuk tahun 2012 sebagai variabel keluaran model yang akan dijelaskan. Pengamatan dibagi secara tidak merata di antara 5 jenis mesin besar yang berbeda dari lima produsen teratas di seluruh dunia dan 2 kategori komponen: bilah kompresor tekanan menengah (IPC) dan tekanan tinggi (HPC). 6 kovariat primer telah diusulkan dalam kasus ini. Yang pertama adalah kategori komponen (IPC, HPC), yang kedua terkait dengan geometri (bentang, tali busur), dua terkait dengan sifat material (kemampuan mesin, tingkat biaya), dan satu terkait dengan ekonomi produk (volume produksi terakumulasi).

Lima model prediktif diterapkan pada estimasi biaya produksi komponen mekanis. Model-model tersebut adalah Multiple Linear Regression (MLR), Artificial Neural Networks (ANN), Generalized Additive Models (GAM) yang merupakan perluasan dari model regresi linier, Support Vector Machines (SVM) dan Gradient Boosted Trees (GBT) yang merupakan jenis pohon keputusan regresi. Yang terbaik ditunjukkan sebagai Gradient Boosted Trees yang menyajikan peningkatan dramatis atas Multiple Linear Regression dan Support Vector Machines dalam akurasi prediksi. Pengukuran akurasi semua model telah disediakan dan perbandingan karakteristik umum model juga telah dicantumkan dalam hal kebaikan kecocokan, akurasi prediksi, interpretabilitas, kemudahan untuk menyesuaikan dan melatih, nilai ekstrem, keterjangkauan komputasi.

Model pohon keputusan telah memberikan hasil terbaik dengan 0,96 R<sup>2</sup> dan 6,40% MAPE sedangkan regresi linier adalah yang terburuk dengan 0,62 R<sup>2</sup> dan 18,07% MAPE. Jika kita melihat karakteristik modelnya, GBT dan SVM adalah yang terbaik untuk kesesuaian sementara GBT adalah yang terbaik untuk akurasi. Karena regresi linier adalah model yang paling sederhana, interpretabilitas dan kemudahan telah ditemukan sebagai yang terbaik menurut model lainnya.

**Tabel 9.1** Matriks korelasi untuk batuan kapur

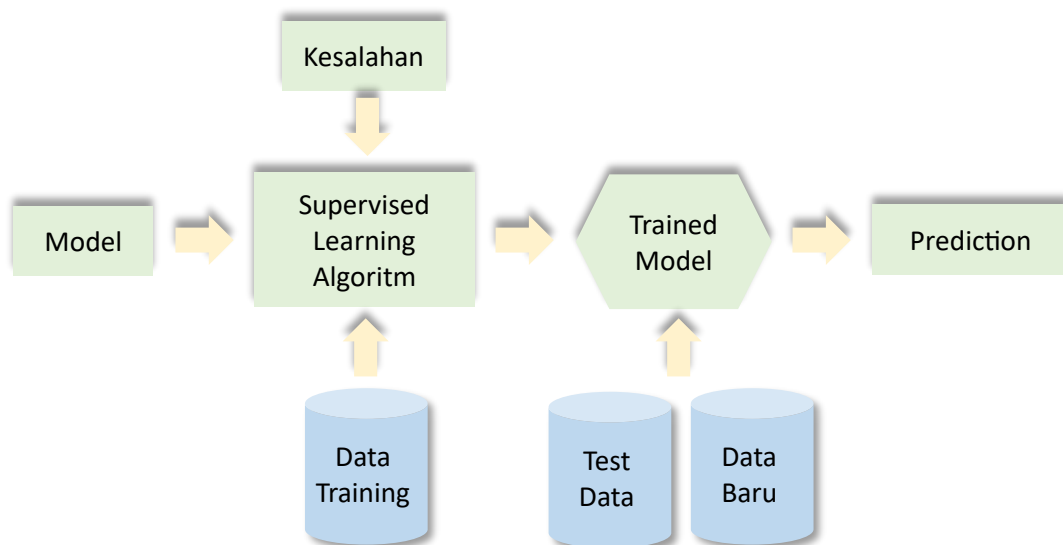
ROP	0.80	0.47	0.082	0.39	0.83
	Kedalaman				
0.44	0.095	0.42	0.80		

RPM	0.07	0.14	0.37	
	WOB	0.36	0.019	
		Flow Rate	0.46	
			UCS	

### 9.3 ANALISIS PREDIKTIF DALAM MANUFAKTUR

Tujuan dari bagian ini adalah untuk meringkas teknik-teknik yang digunakan untuk analisis prediktif dan memberikan wawasan tentang cara membandingkan berbagai model yang digunakan untuk prediksi.

Pemodelan analisis prediktif adalah tugas membangun model konsep yang menyatakan variabel target (tergantung) sebagai fungsi dari variabel penjelas (bebas). Meminimalkan kesalahan, perbedaan antara nilai prediksi dan nilai riil, dianggap sebagai tujuan pemodelan prediktif. Skema pemodelan prediktif direpresentasikan dalam Gambar 9.4. Model prediktif terdiri dari serangkaian parameter yang merupakan atribut, operator, dan konstanta. Pemodelan prediktif adalah proses penyetelan atau pelatihan parameter model ini menggunakan algoritma pembelajaran terbimbing agar sesuai dengan serangkaian contoh konsep sebaik mungkin. Contoh yang digunakan untuk membangun model tersebut selanjutnya disebut set data pelatihan. Suatu model dapat memiliki struktur statis yang telah ditentukan sebelumnya atau dapat dikembangkan secara dinamis selama pelatihan.



**Gambar 9.4** Pemodelan prediktif

#### Teknik yang Digunakan untuk Analisis Prediktif

##### Regresi Linier

Regresi Linier adalah algoritma regresi yang paling dikenal yang bertujuan untuk menemukan kemiringan output terhadap input. Idenya juga menekankan variabel mana yang berkontribusi terhadap variabel target. Setiap atribut diberi faktor  $w_i$  dan satu faktor tambahan digunakan untuk membentuk level dasar atribut yang diprediksi.

$$y_i = w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n \quad (9.1)$$

### Regresi Logistik

Regresi logistik diartikan sebagai teknik klasifikasi linier untuk klasifikasi biner. Rasio probabilitas hasil merupakan inti dari regresi logistik yang disebut rasio peluang.

$$\text{Rasio Peluang} = \frac{P(1)}{1 - P(1)} = \frac{P(1)}{P(0)} = w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n \quad (9.2)$$

Perhitungan probabilitas bahwa hasil yang muncul adalah 1 adalah:

$$\text{Pr}(target = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n)}} \quad (9.3)$$

### Support Vector Machines

Support vector machine (SVM) menentukan support vectors dari sebuah hyperplane yang memisahkan observasi dari dua kelas dengan margin maksimum. SVM menyediakan fungsi kernel yang mengukur kesamaan observasi dalam ruang fitur berdimensi lebih tinggi. Dengan demikian, masalah ini memungkinkan pemisahan observasi nonlinier dalam ruang input asli.

### Neural Networks

Sesuai dengan nama tekniknya, Neural Network adalah jaringan multilayer yang terdiri dari tiga kelas. Lapisan input menerima informasi untuk diproses sementara lapisan output adalah tempat hasil pemrosesan ditemukan. Terakhir, lapisan tersembunyi terjadi di antara lapisan yang diketahui.

Struktur jaringan neural umumnya digambarkan sebagai grafik yang simpulnya adalah neuron dan setiap tepi (terarah) dalam grafik menghubungkan output dari beberapa neuron ke input neuron lain. Setiap neuron menerima input berupa jumlah tertimbang dari output neuron yang terhubung ke tepi masuknya. Jaringan umpan maju adalah jenis NN yang paling banyak digunakan di mana grafik yang mendasarinya tidak mengandung siklus.

### K-Nearest Neighbor

Algoritma nearest neighbor adalah algoritma non-parametrik yang termasuk di antara algoritma paling sederhana yang tersedia untuk klasifikasi. Algoritma ini menyimpan serangkaian observasi berlabel. Observasi baru diklasifikasikan berdasarkan suara mayoritas dari k tetangga terdekat.

### Pohon Keputusan

Pohon keputusan adalah salah satu teknik pemodelan prediksi yang paling populer dalam industri analitik. Pohon keputusan mudah dipahami dan dibangun selain menangani input nominal dan kontinu. CHAID (Chi-square Automatic Interaction Detection), C5.0 (Quinlan algorithm), CART (Classification and Regression Trees) adalah algoritma pohon keputusan yang paling dikenal.

Pohon keputusan mengklasifikasikan observasi dengan mengurutkannya ke dalam wilayah persegi panjang sejajar sumbu dari ruang input. Metode ini secara rekursif menentukan fitur yang nilainya dapat digunakan untuk mengurutkan observasi ke dalam wilayah yang berisi sebanyak mungkin titik dari kelas yang sama. Klasifikasi aktual kemudian dilakukan dengan pengujian pada fitur yang dipilih dan nilainya, di sepanjang jalur dari akar ke daun pohon.

### Naïve Bayes

Metode Naïve Bayes menggunakan pengetahuan tentang probabilitas dan statistik berdasarkan penerapan teorema Bayes, yang dapat memprediksi probabilitas keanggotaan kelas. Parameter  $c$  menunjukkan variabel kelas positif dan negatif,  $F = (f_1, f_2, \dots, f_n)$  mewakili objek dan  $(f_1, f_2, \dots, f_n)$  mewakili variabel fitur.  $P(c)$  merupakan probabilitas prior atau probabilitas marginal,  $P(F)$  bersifat konstan untuk semua kelas,  $P(c|F)$  dan  $P(F|c)$  masing-masing menyatakan probabilitas posterior dan probabilitas kondisional.

$$P(c|F) = \frac{P(F|c)P(c)}{P(F)} \quad (9.4)$$

$$P(F|c) = \prod_i^n P(f_i|c) \quad (9.5)$$

$$f_{nb}(F) = \frac{P(c = +)}{P(c = -)} \prod_i^n \frac{P(f_i|c = +)}{P(f_i|c = -)} \quad (9.6)$$

## 9.4 PERHITUNGAN AKURASI PRAKIRAAN

### Set Pelatihan dan Pengujian

Akurasi prakiraan diukur dari seberapa baik kinerja model pada data baru. Oleh karena itu, sebagian data yang tersedia umumnya digunakan untuk pengujian, dan sisanya digunakan untuk melatih model. Kemudian, data pengujian dapat dianggap digunakan untuk mengukur seberapa baik model tersebut kemungkinan akan meramalkan data baru. Ukuran data pengujian biasanya ditetapkan sekitar 20% dari total sampel. Saat menentukan data pelatihan dan pengujian, masalah berikut harus dipertimbangkan:

- Jika model cocok dengan data, model tersebut tidak menjamin prakiraan yang baik.
- Agar model benar-benar pas, diperlukan parameter yang cukup.
- Selain gagal, overfitting juga merupakan situasi yang buruk bagi model.

### Ukuran Akurasi Prakiraan

Kesalahan prakiraan adalah perbedaan antara nilai aktual dalam set pengujian dan prakiraan yang dihasilkan hanya menggunakan data dalam set pelatihan.

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (9.7)$$

### Kesalahan yang bergantung pada skala

Kesalahan ini berada pada skala yang sama dengan data. Dua ukuran yang bergantung pada skala yang paling umum digunakan adalah yang didasarkan pada kesalahan absolut atau kesalahan kuadrat.

$$\text{Mean Absolute Error (MAE)} = \text{mean}(|e_i|) \quad (9.8)$$

$$\text{Root Mean Squared Error} = \sqrt{\text{mean}(e_i^2)} \quad (9.9)$$

### Kesalahan persentase

Kesalahan persentase memiliki keuntungan karena tidak bergantung pada skala dan karenanya sering digunakan untuk membandingkan kinerja prakiraan antara kumpulan data yang berbeda.

$$p_i = 100 \frac{e_i}{y_i} \quad (9.10)$$

Ukuran yang paling dikenal adalah MAPE.

$$\text{Mean Absolute Percentage Error (MAPE)} = \text{mean}(|p_i|) \quad (9.11)$$

### Kesalahan berskala

Jenis kesalahan ini dianggap sebagai alternatif penggunaan kesalahan persentase saat membandingkan akurasi prakiraan lintas seri pada skala yang berbeda (Hyndman dan Koehler 2006). Kesalahan berskala dihitung sebagai  $q_i = e_i/Q$  di mana  $Q$  adalah statistik skala yang dihitung pada data pelatihan. Untuk seri waktu musiman dan non-musiman, perhitungan  $Q$  berbeda. Hasilnya, MASE ditentukan sebagai berikut:

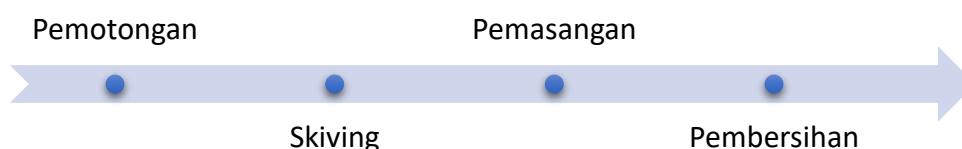
$$\text{Mean Absolute Error (MAE)} = \text{mean}(|q_i|) = \frac{MAE}{Q} \quad (9.12)$$

## 9.5 CONTOH ADAPTASI PREDIKTIF

Sebagian besar perusahaan dalam industri manufaktur perlu memperkirakan waktu produksi untuk memastikan kepuasan pelanggan. Sebagai contoh situasi ini, kasus perusahaan produksi sepatu akan diberikan dalam bab ini.

Langkah-langkah utama produksi sepatu adalah: pemotongan, penipisan, pemasangan, dan pembersihan. Setiap langkah membutuhkan waktu yang berbeda dan jenis produk juga dapat membedakan waktu produksi. Di pabrik, lima jenis sepatu yang berbeda yaitu sepatu kets, sepatu bot, sepatu bot atas, sandal, dan sandal selop sedang diproduksi. Ada beberapa langkah berbeda yang harus diikuti saat sepatu diproduksi menurut jenis produk, bahan, jenis kelamin, dan musim. Misalnya, sepatu harus dipotong dengan tangan sementara yang lain dapat dipotong dengan mesin pemotong kulit. Selain itu, jenis pemasangan dapat

diubah secara manual atau dengan mesin. Oleh karena itu, perusahaan perlu memperkirakan waktu produksi untuk setiap produk baru (Gambar 9.5).



**Gambar 9.5** Langkah-langkah produksi sepatu

### Pengumpulan dan Pembersihan Data

Langkah pertama analisis data dianggap sebagai pengumpulan data. Dalam sebagian besar kasus manufaktur, data dikumpulkan oleh sensor atau mesin jaringan. Di sisi lain, dalam beberapa kasus, data harus dikumpulkan secara manual. Dalam kasus kami, data dikumpulkan menggunakan perangkat lunak seluler yang digunakan oleh karyawan. Oleh karena itu, waktu produksi dikumpulkan oleh karyawan dan variabel independen diperoleh dari perangkat lunak ERP saat ini. Langkah pertama analisis data dianggap sebagai pengumpulan data. Dalam sebagian besar kasus manufaktur, data dikumpulkan oleh sensor atau mesin jaringan. Di sisi lain, dalam beberapa kasus, data harus dikumpulkan secara manual. Dalam jenis kasus seperti yang disebutkan di atas, data umumnya dikumpulkan oleh pekerja. Oleh karena itu, perusahaan sepatu ingin karyawannya mencatat waktu produksi dan variabel independen untuk mendapatkan data model yang diperlukan.

**Tabel 9.2** Kumpulan data produksi Sepatu

Bahan	Jenis Kelamin	Musim	Jenis Proses	Jenis Produk	Jenis Pemotongan	Jenis Pemasangan
Kulit	Wanita	Musim Dingin	Pemotongan	Sepatu	Tangan	Tangan
Imitasi	Pria	Musim Panas	Skiving	Sepatu Bot	Mesin	Mesin
Tekstil			Pemasangan	Sepatu Bot Atas	Press	
			Pembersihan	Sandal		
				Slipper		

Setelah eliminasi outlier dan data yang hilang, diperoleh kumpulan data yang mencakup tujuh variabel independen dan waktu produksi sebanyak 57.600 sepatu. Variabel independen dan nilainya disediakan dalam Tabel 9.2. Waktu produksi dicatat dalam detik dalam kumpulan data.

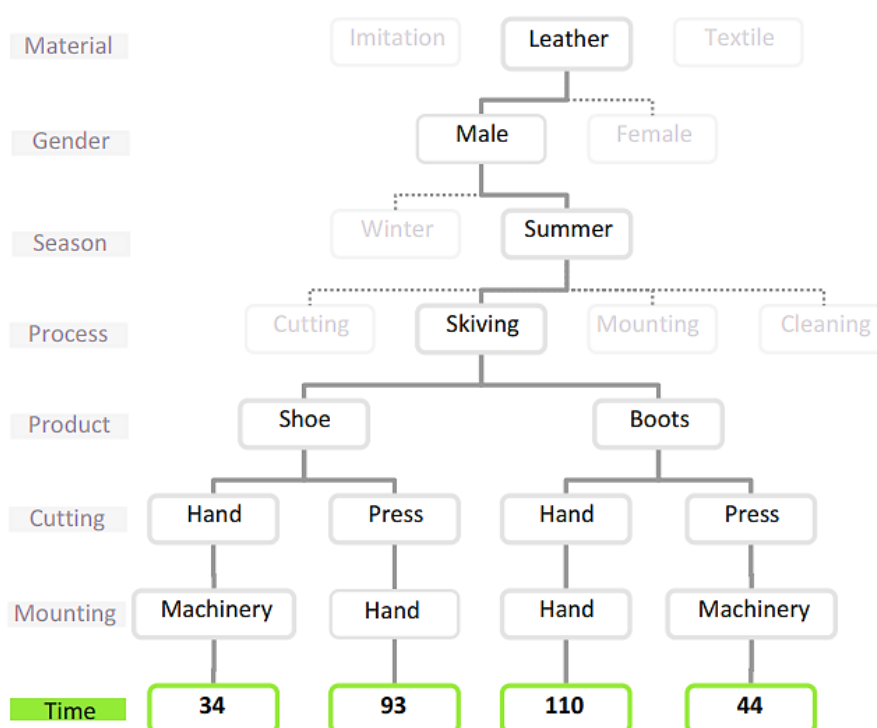
### Aplikasi dan Perbandingan Model

Setelah langkah pengumpulan dan pembersihan data, data dibagi menjadi kumpulan data pelatihan dan pengujian. Teknik Decision Tree, K-nearest neighborhood (k-NN) dan jaringan saraf tiruan (ANN) digunakan untuk melatih model dan model pelatihan diterapkan pada kumpulan data pengujian. Akurasi model dibandingkan menggunakan metrik Mean Absolute Percentage Error (MAPE) dan Mean Absolute Error (MAE). Menurut hasil, kinerja terbaik diperoleh dengan model pohon keputusan CHAID dan variabel terpenting ditemukan sebagai jenis proses.

Model ini adalah metode klasifikasi untuk membangun pohon keputusan dengan menggunakan statistik chi-square untuk mengidentifikasi pemisahan optimal dan membagi waktu produksi ke dalam bin sebagai variabel dependen yang membedakan sehubungan dengan variabel independen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model Pohon Keputusan memberikan prediksi terbaik untuk masalah yang disebutkan di atas. Tabel 9.3 menunjukkan hasil model lain selain model pohon keputusan (Gambar 9.6).

**Tabel 9.3** Perbandingan algoritma prediktif

Model	MAPE (%)	MAE
CHAID	3.20	5.64
k-NN	3.47	6.16
Neural Network	6.77	7.25



**Gambar 9.6** Bagian dari pohon keputusan yang dihasilkan untuk produksi sepatu

## Kesimpulan

Dengan kemajuan teknologi dan penggunaan sensor yang intensif, produsen harus berurusan dengan data yang lebih intensif dan lebih kompleks. Kasus baru ini membuat analisis data menjadi lebih penting bagi pabrik. Di era Industri 4.0, analisis data lebih berfokus pada analisis prediktif daripada analisis deskriptif. Analisis prediktif mencoba membangun model yang memprediksi variabel target dari serangkaian variabel independen. Dalam model tersebut, banyak algoritma terbimbing termasuk algoritma klasifikasi dan regresi dapat digunakan. Metrik kesalahan digunakan untuk menentukan algoritma mana yang menghasilkan hasil yang lebih baik dan kinerja model.

Studi terkini dalam literatur menunjukkan bahwa analisis prediktif digunakan di banyak titik manufaktur. Sebagai studi kasus nyata yang diberikan dalam makalah ini, perusahaan manufaktur mencoba memprediksi waktu produksi berbagai jenis produk dan proses. Setelah langkah praproses data, metode pembelajaran terbimbing digunakan untuk menemukan hasil terbaik untuk masalah tersebut. Teknik pohon keputusan CHAID memberikan hasil terbaik untuk kasus produksi sepatu. Sebagai proses pembelajaran berkelanjutan, perusahaan manufaktur dapat membuat model prediktif dinamis yang memperbarui dirinya sendiri sesuai dengan perubahan dalam kumpulan data. Selain itu, perubahan faktor manusia dan mesin dapat ditambahkan ke kumpulan data. Dengan penggunaan teknik yang diperluas yang disertai dengan penggunaan algoritma pembelajaran mesin yang terus berkembang dapat memberikan hasil yang lebih baik untuk kasus analitik manufaktur.

## **BAB 10**

### **INTERNET OF THINGS DAN PROPOSISI NILAI BARU**

Internet of Things (IoT) adalah gelombang baru dalam inovasi teknologi yang secara fundamental mengubah dinamika bisnis di seluruh dunia. Berlawanan dengan kepercayaan umum, IoT bukan hanya tentang sensor atau kecerdasan mesin yang tertanam dalam berbagai hal yang menjadi bagian dari bisnis atau kehidupan pribadi kita, tetapi ini adalah alat yang menyediakan basis utama untuk menjalankan bisnis dengan cara yang baru dan terintegrasi dengan "menciptakan nilai" sebagai pengembalian sosial, pribadi, dan ekonomi. Penciptaan nilai yang dipicu oleh IoT melalui penyediaan berbagai data adalah inti dari sistem bisnis baru ini.

Secara bertahap setiap industri akan terganggu oleh munculnya data baru yang menjadi mudah tersedia melalui IoT dan berbagai aplikasinya. Teknologi baru ini tidak hanya akan menghasilkan perangkat keras baru, aplikasi baru, dan layanan baru; tetapi juga akan secara fundamental mengubah proses atau cara melakukan pekerjaan. Bab ini membahas bagaimana IoT memungkinkan terciptanya nilai baru dalam kehidupan bisnis dengan memeriksa aplikasi IoT kehidupan nyata dalam berbagai sektor.

#### **10.1 PENDAHULUAN**

Era internet, yang dimulai pada paruh kedua abad ke-20, memperkenalkan paradigma komunikasi yang sama sekali baru yang disebabkan oleh peralihan dari teknologi analog ke digital, dan munculnya internet dan World Wide Web (www). Revolusi digital bersama dengan globalisasi yang semakin meluas membuka pintu bagi Revolusi Industri Ketiga, dan pencapaian terbarunya dicapai melalui penciptaan jejaring sosial, seperti Facebook, Twitter, dan LinkedIn.

Selain itu, jenis teknologi komunikasi baru yang murah telah memungkinkan benda sehari-hari menjadi bagian dari jejaring sosial ini melalui perangkat baru. Sementara itu, kemajuan berkelanjutan dalam teknologi sensor dan identifikasi frekuensi radio (RFID) membuat pelacakan data waktu nyata menjadi jauh lebih mudah, dan dengan demikian memungkinkan pertukaran data waktu nyata yang konstan antara mesin.

Kemajuan ini menghasilkan terciptanya sistem yang terdiri dari mesin, material, atau benda yang mampu berkomunikasi secara mandiri satu sama lain di sepanjang aktivitas rantai nilai dengan menciptakan sejumlah besar data yang tersedia untuk analisis lebih lanjut, yang semuanya disebut sebagai Internet of Things (IoT).

Peningkatan lebih lanjut dalam jumlah pertukaran data waktu nyata antara 'benda-benda' ini, bersama dengan perluasan digitalisasi dalam industri manufaktur, dan kemajuan yang dipercepat dalam perangkat siber-fisik yang canggih telah bersama-sama mengubah sifat pasar penawaran dan permintaan di berbagai industri. Inovasi dalam teknologi digital telah mengubah sisi penawaran pasar dengan membuat sumber pasokan lebih mudah diakses dan ekonomis, sementara mereka telah mengubah sisi permintaan pasar dengan menggeser permintaan pelanggan dengan menyediakan informasi yang tidak terdistorsi tentang pasar dan

produk.

Akibatnya, model bisnis baru telah muncul dengan memaksa industri untuk mendefinisikan ulang proposisi nilai mereka yang telah mengganggu dinamika pasar serta posisi dominan perusahaan-perusahaan lama. Sebagai akibat dari kemajuan teknologi dan transformasi bisnis ini, Revolusi Industri Keempat telah dimulai pada awal abad kedua puluh satu.

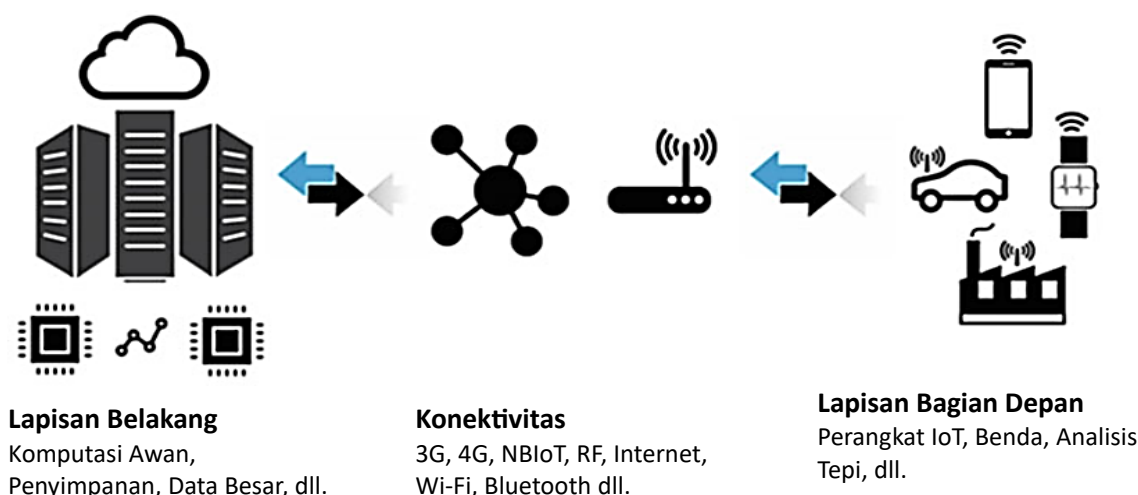
Sementara fase pertama Revolusi Industri Keempat selama periode waktu 1995–2005 dibentuk oleh pengembangan halaman web dan aplikasi perusahaan terkait secara berturut-turut, fase kedua yang terjadi dari tahun 2005 hingga sekarang adalah era di mana kita telah menyaksikan eksploitasi pasar yang intens terhadap ponsel pintar dan aplikasi seluler. Mulai sekarang, kita akan hidup hingga gelombang ketiga Revolusi Industri Keempat yang kemungkinan akan menjadi semacam tsunami dengan mempertimbangkan besarnya gangguan saat ini dalam berbagai industri dan bisnis. Dalam hal ini, perubahan prospektif mungkin besar melalui transformasi ekstensif proses bisnis dan pengembangan model bisnis yang sepenuhnya baru, namun semuanya menandakan potensi penciptaan nilai yang diperkuat melalui sistem berbasis IoT dan berbagai aplikasi bisnisnya.

Dalam lingkungan bisnis saat ini, wajar untuk menyimpulkan bahwa teknologi tidak hanya membentuk strategi, tetapi juga mendefinisikannya secara mendasar. Dalam hal ini, aplikasi IoT telah secara mendasar mengubah cara organisasi menciptakan nilai. Seperti yang dinyatakan oleh Deloitte Digital, “IoT tidak hanya memiliki implikasi untuk penawaran yang berhadapan dengan konsumen, tetapi juga dapat mengungkap wawasan mendalam tentang aliran bisnis-ke-bisnis di seluruh rantai pasokan, yang memberikan wawasan yang jauh lebih dalam dan lebih bernuansa tentang bagaimana modal digunakan”. Mengingat hal itu, IoT akan mengubah industri yang siap berteknologi dengan cepat sementara itu juga akan memiliki efek yang signifikan serta lebih transformatif pada industri yang saat ini belum berbasis teknologi.

## 10.2 INTERNET OF THINGS (IOT)

Apa itu Internet of Things (IoT), dan mengapa hal itu penting bagi bisnis saat ini dan masa depan? IoT memang digunakan sebagai slogan untuk hal-hal yang terotomatisasi dan terhubung dalam berbagai komponen ekonomi. Meskipun berbagai pihak mungkin menyebutnya secara berbeda, yaitu Internet of Everything, atau Internet of Your Things, dll., semua konsep ini dirujuk untuk menunjukkan makna yang sama, yang dinyatakan oleh kamus sumber terbuka Wikipedia sebagai berikut, “Internet of things (IoT) adalah inter-jaringan perangkat fisik, kendaraan (juga disebut sebagai “perangkat yang terhubung” dan “perangkat pintar”), bangunan, dan barang-barang lainnya—yang tertanam dengan elektronik, perangkat lunak, sensor, aktuator, dan konektivitas jaringan yang memungkinkan objek-objek ini untuk mengumpulkan dan bertukar data.” IoT menggambarkan jaringan perangkat yang terhubung ke internet yang mampu mengumpulkan dan bertukar data menggunakan sensor yang tertanam di dalamnya. Konsep ini berkisar pada jaringan sensor pengumpul data dari berbagai sumber daya yang sangat berbeda, mulai dari jam tangan, mobil otonom, dan termostat hingga fasilitas manufaktur yang memproses di edge atau cloud, tergantung pada model

bisnis; dan dengan cara ini menciptakan nilai bagi pengguna, baik perusahaan maupun konsumen, dan biasanya keduanya. Gambar 10.1 menunjukkan Ekosistem IoT dasar dengan berbagai lapisan. Di setiap lapisan, campuran komponen perangkat keras, perangkat lunak, dan layanan menciptakan bagian dari rantai nilai.



**Gambar 10.1** Rantai nilai dan kata kunci Internet of Things

Dengan menjamurnya sensor yang terhubung, yang menciptakan dunia digital yang semakin terukur dan dapat diakses, data yang diperoleh dari perangkat fisik yang saling terhubung secara otonom memungkinkan penerjemahan dunia fisik menjadi dunia digital. Dengan menganalisis 'big data' yang diperoleh dari dunia digital yang begitu besar, pemahaman tren terkini di berbagai pasar dan struktur menjadi mungkin, dan dengan demikian, perusahaan, ekonomi, atau negara dapat membuat proyeksi lebih lanjut tentang berbagai pasar, serta aktivitas sektor publik dan pribadi. Secara singkat, hal itu menjelaskan bagaimana IoT menciptakan nilai bagi bisnis dan ekonomi secara keseluruhan.

Secara umum, ada empat pendorong pasar yang telah memperkuat integrasi IoT dalam sistem ekonomi saat ini, yaitu:

- *Peningkatan penetrasi internet:* Menurut International Telecommunication Union, World Telecommunication/ICT Development Report and Database, serta estimasi Bank Dunia, pada tahun 2015 tingkat penetrasi pengguna internet dunia mencapai lebih dari 40%. Di sebagian besar negara maju, tingkat ini melampaui 70% (misalnya, Finlandia 92,7%, Inggris 92%, Rata-rata UE 79,6%), dan di pasar berkembang tingkat ini bervariasi antara 15% dan 70%, sedangkan rata-rata OECD adalah 77,2%. Mengingat bahwa rata-rata dunia dari tingkat penetrasi pengguna internet adalah 29,15% pada tahun 2010, telah terjadi pertumbuhan yang signifikan antara tahun 2010 dan 2015.
- *Peningkatan adopsi seluler:* Demikian pula, menurut International Telecommunication Union, World Telecommunication/ICT Development Report and Database, dan estimasi Bank Dunia, rata-rata di seluruh dunia dari tingkat langganan seluler melonjak dari 76,5% pada tahun 2010 menjadi 98,6% pada tahun 2015.

- *Sensor berbiaya rendah*: Menurut Statistik Perdagangan Semikonduktor Dunia telah terjadi penurunan yang signifikan dalam harga sensor. Misalnya, akselerometer yang digunakan dalam telepon pintar dan konsol video dihargai Rp. 140.000 pada tahun 2007, sementara dijual dengan harga Rp. 5.000 pada tahun 2015. Demikian pula, LIDAR, sensor yang memberikan "mata" pada kendaraan otonom harganya lebih dari dua kali lipat harga kendaraan itu sendiri pada tahun 2007 dengan harga Rp. 750.000.000, sedangkan dijual hanya dengan harga Rp. 2.500.000 pada tahun 2016; dan diperkirakan harganya akan di bawah 100 USD dalam waktu lima tahun. Ketika sensor mahal, kita menggunakannya dengan hemat. Namun, seiring dengan turunnya harga, kita mulai memasukkannya ke dalam jumlah perangkat yang terus bertambah di berbagai aplikasi.
- *Hukum Moore yang Berkelanjutan dalam CPU*: Hukum Moore menunjukkan bahwa jumlah transistor per inci persegi pada sirkuit terpadu berlipat ganda setiap dua tahun, dengan kinerja yang lebih tinggi, biaya yang lebih rendah, dan sirkuit yang lebih kecil. Usulan Moore kemungkinan akan terus berlanjut untuk CPU saat ini, dan perkembangan dalam ukuran dan ruang CPU yang semakin mengecil menciptakan momentum tidak hanya dalam produk akhir seperti telepon pintar, tetapi juga dalam analisis data besar, komputasi awan, dll.

Meskipun teknologi IoT yang baru muncul telah mengalami ledakan aktivitas dan kreativitas melalui perusahaan rintisan dan perusahaan modal ventura yang sangat bersemangat, namun teknologi tersebut masih dalam tahap awal kemunculannya. Menurut laporan McKinsey Global Institute tahun 2015, dampak potensial dari aplikasi IoT lintas sektoral diharapkan dapat menciptakan nilai sebesar Rp. 39 triliun hingga Rp. 111 triliun per tahun pada tahun 2025.

Demikian pula, analisis pasar yang dilakukan oleh Boston Consulting Group (BCG) menggambarkan bahwa pada tahun 2020 Rp. 2.6 Triliun akan dihabiskan untuk teknologi, produk, dan layanan IoT. Komponen pasar IoT dengan potensi perolehan pendapatan tertinggi adalah aplikasi IoT, dan investasi untuk layanan yang mendukung sistem berbasis IoT. Penciptaan nilai yang disebabkan oleh IoT tidak terbatas pada satu atau dua industri, penciptaan nilai ini memang terjadi di berbagai sektor bahkan lintas sektor.

Misalnya, sementara Industri 4.0 adalah penerapan IoT di sektor manufaktur, teknologi yang dapat dikenakan adalah refleksi dari penggunaannya dalam industri pakaian. Sebuah laporan terkini oleh McKinsey Global Institute berjudul "Internet of Things: Memetakan Nilai Melampaui Hype" memberikan pandangan lintas sektor tentang dampak potensial IoT dan aplikasinya menjadi Rp. 39 triliun hingga Rp. 111 triliun per tahun pada tahun 2025. Dengan demikian, operasi pabrik dan optimalisasi peralatan diharapkan menciptakan nilai sekitar Rp. 12 triliun hingga Rp. 37 triliun, sementara aplikasi IoT di kota-kota (yaitu, kota pintar), kesehatan publik dan transportasi publik memiliki potensi penciptaan nilai sebesar Rp. 9.3 Triliun hingga 1,7 triliun. Proyeksi berbasis industri BCG menunjukkan bahwa 50% dari pengeluaran IoT diharapkan hanya didorong oleh industri manufaktur, utilitas, transportasi dan logistik pada tahun 2020.

### 10.3 CONTOH PENCIPTAAN NILAI IOT DI BERBAGAI INDUSTRI

Ada berbagai cara menciptakan nilai melalui aplikasi IoT, yang sebagian besar dibentuk oleh dinamika spesifik industri. Di bawah ini Anda akan menemukan berbagai contoh yang digambarkan dari konteks bisnis yang menggambarkan bagaimana sistem berbasis IoT dan aplikasinya mengubah cara berbisnis. Perlu dicatat, ini semua tentang menangkap data yang telah kita ketahui, tetapi tidak dapat dikumpulkan karena ketidakmampuan di masa lalu. Dengan memanfaatkan produk perangkat keras dan perangkat lunak yang lebih canggih secara teknologi, dan kemudian mengubah data menjadi nilai dengan memanfaatkan berbagai aplikasi telah memulai munculnya penciptaan nilai baru ini.

#### **Pertanian Cerdas**

Ada berbagai contoh tentang bagaimana IoT mengubah berbagai vertikal dan menciptakan nilai bisnis. Namun, 'pertanian cerdas' sebenarnya adalah contoh yang baik mengingat pertanian memiliki dampak langsung pada kehidupan manusia melalui kontribusi terhadap pemenuhan kebutuhan manusia yang paling penting, yaitu kebutuhan untuk makan, sehingga memungkinkan kelangsungan hidup umat manusia. Namun, yang lebih menarik adalah sektor pertanian memiliki potensi besar untuk memanfaatkan IoT dan mengubah cara bekerja melalui aplikasi IoT.

Sebelum revolusi industri, tidak ada kemajuan signifikan yang terlihat di bidang pertanian, tetapi bahkan setelah revolusi industri, kemajuan dibatasi oleh penggunaan elevator biji-bijian, pupuk kimia, dan traktor bertenaga gas pertama, dsb. Setelah mengalami periode stabil selama 20 tahun, metode pertanian berubah drastis dengan integrasi aplikasi IoT.

Menurut Organisasi Pangan dan Pertanian PBB (FAO), dunia perlu memproduksi 70% lebih banyak makanan pada tahun 2050 daripada yang diproduksi pada tahun 2006 untuk memenuhi kebutuhan pangan penduduk Bumi yang terus bertambah. Industri pertanian harus mengatasi kekurangan air yang semakin meningkat, keterbatasan lahan, biaya yang sulit dikelola, sekaligus memenuhi permintaan dan konsumsi yang terus meningkat. Itulah sebabnya produksi pertanian di seluruh dunia melangkah menuju desain sistem baru melalui 'pertanian cerdas'. Pertanian cerdas terdiri dari berbagai implementasi teknologi.

Aplikasi ini menggantikan teknik pertanian tradisional yang sulit, tidak dapat diandalkan, dan memakan waktu dengan pertanian cerdas yang efisien, andal, dan berkelanjutan. Dengan demikian, IoT dan aplikasinya membawa industri pertanian ke tingkat berikutnya. IoT dalam pertanian cerdas mencakup sensor yang membantu petani memantau kelembapan tanah, mineral, dan menyesuaikan penyiraman yang diperlukan untuk mendapatkan hasil panen yang maksimal.

Di sisi lain, komputasi yang sadar konteks membantu petani untuk memprediksi waktu terbaik untuk panen sejalan dengan perubahan meteorologi atau dapat membantu petani untuk memanfaatkan teknologi rantai dingin untuk mengangkut produk pertanian dengan cara yang paling sehat dan ekonomis. Sebagai contoh konkret, John Deere yang merupakan produsen peralatan pertanian terkemuka telah mulai menghubungkan traktornya ke internet dan telah menciptakan metode untuk menampilkan data tentang hasil panen petani. BI

Intelligence yang merupakan layanan penelitian premium Business Insider, memperkirakan bahwa pemasangan perangkat IoT di dunia pertanian akan meningkat dari 30 juta pada tahun 2015 menjadi 75 juta pada tahun 2020, dengan tingkat pertumbuhan tahunan gabungan sebesar 20%.

Demikian pula, OnFarm, yang telah menciptakan platform IoT pertanian yang terhubung, memperkirakan pertanian rata-rata akan menghasilkan rata-rata 4,1 juta titik data per hari pada tahun 2050, naik dari 190.000 pada tahun 2014. AS saat ini memimpin dunia dalam pertanian pintar IoT, karena menghasilkan 7340 kg sereal (misalnya gandum, beras, jagung, jelai, dll.) per hektar (2,5 hektar) lahan pertanian, dibandingkan dengan rata-rata global sebesar 3851 kg sereal per hektar.

Menurut laporan PwC yang dirilis pada tahun 2016, pasar global untuk aplikasi komersial teknologi drone bernilai lebih dari Rp. 127 Triliun sementara solusi bertenaga drone di bidang pertanian adalah Rp. 324 Triliun. Untuk memahami bagaimana sejumlah besar nilai yang dihasilkan dapat dimungkinkan oleh solusi bertenaga drone, ada baiknya untuk meninjau kemungkinan cara penggunaan drone berbasis udara dan darat di seluruh siklus panen di bidang pertanian. Dalam hal ini, enam alternatif penggunaan berikut dapat diberikan sebagai contoh:

1. *Analisis Tanah dan Lahan:* Drone dapat menghasilkan peta 3-D untuk analisis lahan, berguna dalam merencanakan pola penanaman benih.
2. *Penanaman:* Sistem penanaman drone menyuntikkan polong berisi benih, nutrisi tanaman, dan bahan kimia ke dalam tanah. Berbagai perusahaan rintisan mengklaim bahwa drone dapat menanam lebih dari 500 benih per jam, dibandingkan dengan petani yang menanam sekitar 800 benih per hari.
3. *Pemantauan Tanaman:* Drone memberikan perkembangan tanaman yang tepat dan mengungkap inefisiensi produksi, sehingga memungkinkan pengelolaan tanaman yang lebih baik dalam siklus hidup.
4. *Penyemprotan:* Drone dapat memindai tanah dan menyemprotkan jumlah cairan yang tepat dengan memanfaatkan berbagai sensor yang menghasilkan peningkatan efisiensi sekaligus mengurangi jumlah bahan kimia yang meresap ke dalam air tanah. Diperkirakan penyemprotan drone dapat diselesaikan hingga lima kali lebih cepat daripada penyemprotan dengan mesin tradisional. Penyemprotan drone yang dikendalikan oleh sensor juga lebih efisien daripada penyemprotan pesawat pertanian yang berantakan.
5. *Irigasi:* Drone yang dilengkapi dengan berbagai sensor (misalnya sensor multispektral atau termal) dapat mengidentifikasi kebutuhan tanah tergantung pada komputasi visual. Komputasi ini juga memungkinkan penghitungan indeks vegetasi yang memberikan informasi tentang kesehatan tanaman.
6. *Penilaian kesehatan:* Perangkat yang dibawa drone dapat mengidentifikasi infeksi bakteri atau jamur pada pohon dengan memindai tanaman menggunakan lampu tampak dan inframerah dekat, dan menganalisis gambar multispektral yang melacak perubahan pada tanaman dan menunjukkan kesehatannya. Respons yang cepat dapat

menyelamatkan seluruh kebun.

Semua teknologi drone yang disebutkan di atas merupakan bagian dari praktik pertanian cerdas yang dipadukan dengan sensor, teknologi komputasi visual dan kontekstual yang mengumpulkan berbagai informasi berbeda untuk menciptakan nilai bisnis dalam pertanian. Perbandingan negara dapat membantu memvisualisasikan penciptaan nilai bisnis melalui pertanian cerdas; misalnya, Belanda adalah negara yang memanfaatkan inovasi teknologi terkini termasuk teknologi IoT dan mempekerjakan sekitar 900.000 petani serta mengekspor produk pertanian senilai Rp. 900 Triliun, sedangkan Turki mempekerjakan 17 juta petani dan mengekspor Rp. 200 Triliun dengan memanfaatkan metode pertanian yang sangat tradisional.

### **Kota Cerdas**

Sebuah studi oleh McKinsey Global Institute menunjukkan bahwa 600 kota dengan pertumbuhan tercepat di dunia akan menyumbang 60% pertumbuhan ekonomi global antara tahun 2010 dan 2025. Dalam kehidupan modern saat ini, kota mengonsumsi sebagian besar energi global, menyumbang sebagian besar konsumsi sumber daya alam dunia, dan menghasilkan sebagian besar emisi karbon dunia. Jadi, kebutuhan akan kelancaran pengoperasian wilayah perkotaan dengan menggunakan teknologi terkini merupakan kebutuhan, bukan kemewahan.

Menurut firma riset global Gartner, kota cerdas akan menampung hampir 10 miliar perangkat IoT pada tahun 2020, dengan lebih banyak vendor dari sebelumnya yang mengeksplorasi peluang bisnis baru dalam pengembangan kota cerdas, mulai dari keamanan rumah/gedung, lampu jalan, transportasi, dan perawatan kesehatan. Ke-10 miliar perangkat IoT di kota-kota ini akan menciptakan nilai secara global melalui aplikasi transportasi IoT senilai lebih dari Rp. 80 Triliun per tahun, penghematan kesehatan publik senilai hampir Rp. 70 Triliun per tahun, dan meteran pintar yang mengurangi hilangnya listrik di saluran distribusi bersama dengan sensor yang mendeteksi kebocoran air senilai hingga Rp. 6 Triliun per tahun. Secara keseluruhan, nilai aplikasi IoT di kota-kota tersebut dapat mencapai dampak ekonomi sebesar Rp. 93 Triliun hingga Rp. 160 triliun per tahun pada tahun 2025.

Penciptaan nilai di kota-kota pintar dapat dianalisis secara praktis dari dua perspektif yang berbeda; satu dari sektor publik, dan yang lainnya dari perspektif warga negara. Melalui pembentukan kota pintar, sektor publik dapat melayani warganya dengan biaya yang lebih rendah karena peningkatan efisiensi dalam layanan melalui digitalisasi. Namun, bukan hanya penghematan biaya yang penting, tetapi juga peningkatan kualitas layanan serta rentang waktu layanan 24/7 yang tidak terputus membuat perbedaan terkait penciptaan nilai kota pintar dari perspektif sektor publik. Penciptaan nilai lain melalui pembentukan kota pintar berasal dari keberadaan indikator kualitas hidup, seperti memiliki indikator yang diperlukan untuk emisi karbon dan tingkat gas metana, serta sensor air.

Secara paralel, pengelolaan sumber daya terbarukan melalui solusi IoT juga berkontribusi pada penciptaan nilai dari perspektif sektor publik. Di sisi lain, dari perspektif warga, penciptaan nilai melalui aplikasi IoT di kota akan membantu mereka menghemat waktu dan uang. Misalnya, solusi parkir pintar dapat membantu pengemudi menghemat waktu dan uang dengan menghemat waktu mereka untuk bekerja, yang jika tidak akan terbuang sia-sia

di jalan.

### **Kehidupan Cerdas—Teknologi yang Dapat Dikenakan**

Dekade terakhir, teknologi menjadi bagian integral dari kehidupan sosial dan pribadi kita, namun baru-baru ini bersamaan dengan transformasi dalam teknologi IoT dan sensor, teknologi menjadi lebih cerdas dan lebih personal melalui penggunaan sehari-hari berbagai perangkat dengan sensor seperti jam tangan pintar dan sepatu.

Pada awal tahun 2016, proyeksi pasar tentang masa depan teknologi yang dapat dikenakan oleh perusahaan riset pasar CCS Insight menunjukkan bahwa 411 juta perangkat pintar yang dapat dikenakan, senilai Rp. 34 Triliun, akan terjual pada tahun 2020. Diharapkan bahwa perangkat berbasis pergelangan tangan, seperti jam tangan pintar dan pelacak kebugaran akan terus mendominasi pasar teknologi yang dapat dikenakan. Smart Glass diharapkan akan mencapai 25% dari total pasar pada tahun 2020.

Penggunaan teknologi sebagai komponen yang dapat dikenakan telah dimulai dengan logika yang sama seperti yang terjadi di industri lain; menciptakan nilai, baik bisnis maupun pribadi, dan sebagian besar waktu keduanya. Misalnya gelang pengaman yang menyediakan informasi berbasis lokasi menciptakan nilai pribadi yang solid dan signifikan. Berbagai jenis tombol panik yang dapat dikenakan, yang dapat dikenakan sebagai gelang, gantungan kunci, atau aksesoris jenis apa pun lainnya, memberikan solusi keamanan khususnya bagi anak-anak dan wanita. Dengan berbagai aplikasi yang dihasilkan untuk berbagai skenario darurat yang ditata dalam berbagai bentuk dan model penggunaan, berbagai IoT yang dapat dikenakan dapat dihasilkan untuk penggunaan pribadi.

Contoh mencolok lainnya dapat diberikan dari olahraga, misalnya, seorang pemain tenis mungkin tidak lagi menilai raket tenis hanya berdasarkan kekakuan rangka, ketegangan senar, serta berat dan keseimbangannya, yang semuanya mewakili poin penilaian tradisional untuk raket yang bagus; tetapi dengan teknologi yang lebih cerdas yang terintegrasi dalam raket tenis saat ini, seorang pemain tenis juga dapat memanfaatkan raket tenis sebagai sumber informasi yang berharga tentang pukulan tenis seseorang serta cara meningkatkan kinerja dan kesuksesan pribadi.

Teknologi yang dapat dikenakan tidak terbatas untuk penggunaan pribadi saja, misalnya kacamata pintar memberikan nilai bisnis di sektor logistik dengan membantu menemukan lokasi paket tertentu dengan memberikan rincian yang diperlukan untuk layanan kurir. Contoh lain dapat diberikan dari sektor perawatan kesehatan, yaitu, terdapat berbagai model penggunaan kacamata pintar dalam aplikasi klinis dan bedah di industri Perawatan Kesehatan.

Agar para profesional medis dapat menggunakan kacamata pintar dalam praktik mereka, produk-produk ini harus disesuaikan agar sesuai dengan berbagai kebutuhan subspecialisasi medis dan bedah. Argumen ini juga dapat tercermin untuk vertikal lainnya, seperti, untuk memfasilitasi penggunaan kacamata pintar atau gawai pintar apa pun di vertikal mana pun, kacamata pintar tersebut perlu disesuaikan agar sesuai dengan kebutuhan vertikal tertentu tersebut.

## Kesehatan Cerdas

IoT dan berbagai aplikasinya juga mendesain ulang sistem perawatan kesehatan kontemporer dan layanannya dengan menawarkan prospek teknologi, ekonomi, dan sosial yang optimis. Memang, perawatan medis dan layanan kesehatan merupakan salah satu area aplikasi IoT yang paling menarik. IoT mendefinisikan ulang cara aplikasi, perangkat, dan orang berinteraksi dan terhubung satu sama lain dalam memberikan dan menerima solusi perawatan kesehatan.

Pemantauan kesehatan jarak jauh, program kebugaran, pengendalian penyakit kronis, dan perawatan lansia merupakan beberapa aplikasi medis berbasis IoT dalam perawatan kesehatan. Saat ini, penyedia layanan kesehatan telah mendesain ulang layanan perawatan di rumah mereka dengan memanfaatkan aplikasi IoT untuk meningkatkan kepatuhan terhadap perawatan dan pengobatan yang diberikan di rumah.

Oleh karena itu, berbagai instrumen medis digital, sensor, dan perangkat pencitraan digital dapat dilihat sebagai "perangkat pintar" atau "benda" yang merupakan bagian inti dari layanan perawatan kesehatan berbasis IoT. Aplikasi ini diharapkan dapat mengurangi biaya dalam industri perawatan kesehatan sekaligus meningkatkan kualitas hidup pasien. Menurut para ahli industri, aplikasi IoT di pasar layanan kesehatan diproyeksikan tumbuh dari Rp. 41,22 Triliun pada tahun 2017 menjadi Rp. 158,07 Triliun pada tahun 2022 dengan memanfaatkan dampak IoT berikut:

1. Biaya yang Lebih Rendah: Pemantauan pasien jarak jauh dapat dilakukan secara real time dengan memanfaatkan konektivitas solusi layanan kesehatan, sehingga secara signifikan mengurangi kunjungan dokter yang tidak perlu. Yang terpenting, melalui fasilitas perawatan di rumah yang canggih, rawat inap dan rawat inap ulang akan berkurang, sehingga akan membantu mengurangi biaya.
2. Hasil Perawatan yang Lebih Baik: Ketersediaan informasi pasien secara real time melalui konektivitas solusi layanan kesehatan jarak jauh melalui komputasi awan atau infrastruktur virtual lainnya memberi kemampuan kepada perawat untuk membuat keputusan yang tepat berdasarkan bukti yang kuat. Dengan demikian, layanan kesehatan dapat diberikan tepat waktu yang mungkin akan meningkatkan hasil perawatan.
3. Peningkatan Manajemen Penyakit: Akses terhadap data pasien secara real-time dan berkelanjutan memberikan informasi yang lebih baik kepada penyedia layanan kesehatan tentang manajemen penyakit dan membantu mereka mengambil tindakan prediktif atau pencegahan untuk mengendalikan penyakit.
4. Pengurangan Kesalahan, Pemborosan, dan Biaya: Pengumpulan data yang akurat dalam aliran proses memungkinkan pengurangan biaya dan pemborosan sistem serta meminimalkan kesalahan sistem yang disebabkan manusia.
5. Pengalaman Pasien yang Lebih Baik: Tingkat akurasi yang lebih tinggi dalam perawatan dengan layanan kesehatan yang tepat waktu kemungkinan akan meningkatkan pengalaman pasien.
6. Manajemen Obat yang Lebih Baik: IoT membantu mengelola obat dengan lebih baik

dan dengan demikian menurunkan tingkat pengeluaran utama dalam industri perawatan kesehatan.

#### 10.4 HAMBATAN IMPLEMENTASI IOT

Meskipun IoT secara mendasar mengubah model bisnis dan meningkatkan hasil industri, ada beberapa hambatan yang memperlambat penetrasi IoT dalam proses penciptaan nilai dalam berbagai industri. Tiga hambatan utama dalam meningkatkan adopsi IoT dalam bisnis adalah standar, privasi, dan masalah keamanan (Gambar 10.2).



**Gambar 10.2** Tiga hambatan dalam penskalaan bisnis IoT

Meskipun penggunaan IoT dalam proses bisnis menjadi semakin populer, perangkat IoT juga semakin menjadi subjek yang menarik bagi target kejahatan dunia maya. Lebih dari separuh dari semua serangan IoT global berasal dari Tiongkok dan AS. Ada potensi eksponensial dari serangan ini mengingat semakin banyak perangkat yang terhubung, semakin banyak kemungkinan serangan oleh peretas.

Menurut perusahaan keamanan siber global Symantec, 2015 merupakan tahun rekor tren serangan IoT dengan munculnya delapan keluarga malware baru. Yang lebih penting, bukan hanya perangkat IoT yang diserang, tetapi juga digunakan untuk menjadi sumber serangan lain ke sistem lain melalui serangan penolakan layanan terdistribusi (DDoS). AT&T mensurvei lebih dari 5000 perusahaan di seluruh dunia dan menemukan bahwa 85% perusahaan mempertimbangkan, mengeksplorasi, atau menerapkan strategi IoT. Di sisi lain, menurut survei yang sama, 88% dari organisasi ini kurang yakin dengan keamanan perangkat terhubung milik mitra bisnis mereka.

Menurut laporan oleh perusahaan sistem tertanam global WindRiver, alasan utama serangan ke perangkat IoT adalah fakta bahwa sistem ini tidak mendapatkan pembaruan firmware atau dibiarkan dengan pengaturan awal dengan parameter default. Oleh karena itu, mereka menjadi target yang relatif mudah bagi para peretas. Namun, saat ini tidak mudah atau sering kali praktis untuk mengintegrasikan prosedur pembaruan perangkat lunak untuk setiap aplikasi IoT. Misalnya, pengendali logika terprogram (PLC) tertanam yang digunakan secara luas dalam otomatisasi pabrik seperti sistem robotik, biasanya diintegrasikan sebagai bagian dari infrastruktur TI perusahaan, dan masalah sistem ini berasal dari tidak adanya struktur yang tepat untuk menerima pembaruan perangkat lunak atau patch keamanan secara tepat waktu

tanpa mengganggu keselamatan fungsional atau menimbulkan biaya sertifikasi ulang yang signifikan setiap kali patch diluncurkan.

### **Masalah Privasi**

Masalah privasi merupakan hambatan besar lainnya dalam adopsi IoT. Banyak IoT atau perangkat pintar mengirimkan informasi melalui jaringan tanpa enkripsi, yang menimbulkan risiko privasi yang besar. Sebagai contoh, Anda mungkin berpikir tentang termostat pintar di rumah Anda; dalam hal itu, bagaimana Anda dapat yakin bahwa Anda akan menjadi satu-satunya orang yang memantau gawai pintar ini di rumah Anda, tetapi bukan pencuri, dan bagaimana perusahaan akan menjamin otorisasi privasi untuk layanan ini.

Demikian pula, penggunaan kacamata pintar menimbulkan pertanyaan khusus di benak kita, yaitu, bagaimana privasi Anda akan terjamin sementara orang lain merekam video pandangan Anda tanpa sepengetahuan atau persetujuan pribadi Anda melalui kacamata pintar mereka? Pertanyaan mencolok lainnya mungkin terkait dengan penggunaan IoT dalam layanan kesehatan, khususnya, bagaimana jika peretas dapat mengumpulkan data kesehatan pribadi Anda dari aplikasi jam tangan pintar atau perangkat pelacak kesehatan yang Anda gunakan, apa kemungkinan hasil dari jenis pelanggaran ini bagi individu terkait keselamatan pribadi mereka.

Apa saja aturan dan regulasinya, dan yang lebih penting, apa saja yang seharusnya dicakup secara khusus? Berikut ini adalah beberapa contoh pertanyaan yang mungkin muncul, dan ada kebutuhan penting bagi setiap orang untuk mengembangkan jawaban masing-masing guna menemukan solusi untuk kemungkinan kekurangan penggunaan IoT ini.

### **Standardisasi**

Standarisasi merupakan hambatan penting lainnya untuk adopsi IoT, dan telah menghambat potensi penciptaan nilai pasar. Meskipun ada upaya dari berbagai pemangku kepentingan di pasar untuk mengembangkan standar umum aplikasi IoT, baru-baru ini muncul upaya konsolidasi oleh beberapa pemangku kepentingan untuk menyetujui standar umum, yang membantu pasar IoT untuk berkembang pesat.

Misalnya, konglomerasi perusahaan teknologi terkemuka, termasuk ARM, Huawei, Philips, dan Vodafone telah mendirikan Internet of Things Security Foundation yang misinya dinyatakan sebagai "untuk membantu mengamankan Internet of Things, guna membantu adopsi dan memaksimalkan manfaatnya."

### **Kesimpulan**

IoT, lebih dari teknologi lainnya yang pernah ada, telah menjadi sumber inspirasi yang luar biasa bagi para pengusaha di dunia saat ini. Cakupan inovasi yang luas yang didasarkan pada IoT serta digitalisasi yang diperkuat di berbagai industri telah memicu popularitas IoT, yang dapat disaksikan oleh preferensi model bisnis utama dari sebagian besar perusahaan rintisan terkini. Memang, yang membuat IoT sangat berharga bagi perekonomian adalah kemampuannya dalam pengumpulan data yang dihasilkan oleh perangkat yang terhubung bersama dengan kemampuannya untuk mengubah data ini menjadi nilai bisnis dengan membuat proyeksi masa depan yang lebih akurat berdasarkan tren terkini dalam bisnis dan ekonomi.

Selama 5–10 tahun ke depan, jumlah mesin dan sensor yang terhubung ke internet diperkirakan akan meledak, yang akan menyebabkan munculnya penggunaan dan model bisnis baru. Seiring meluasnya adopsi sistem berbasis IoT, perusahaan pada dasarnya perlu memikirkan kembali pandangan mereka yang diterima dan tradisional tentang strategi penciptaan nilai di pasar. Dalam hal ini, IoT bukan hanya tentang perangkat pintar baru, tetapi yang lebih penting lagi adalah peningkatan produktivitas serta konektivitas ekonomi tanpa gangguan di seluruh dunia.

Meningkatnya permintaan IoT berakar pada pergeseran yang terjadi saat ini di berbagai industri dan bisnis yang dapat diungkapkan melalui dua pertanyaan dasar berikut: Bagaimana bisnis dapat menciptakan nilai, dan bagaimana mereka dapat menangkapnya dalam dinamika ekonomi saat ini yang dibentuk oleh perubahan yang terjadi di sisi permintaan dan penawaran pasar. Penciptaan nilai dapat berupa pengembangan perangkat keras, pengembangan perangkat lunak, layanan, atau inovasi model bisnis di ruang IoT.

Dalam E2E, nilai terkait bisnis sangat penting untuk aplikasi IoT guna mendapatkan daya tarik data dalam industri tertentu. Sedangkan untuk aplikasi kehidupan cerdas atau teknologi yang dapat dikenakan, desain ruang IoT atau fitur khusus industri yang mengarah pada nilai pribadi menjadi hal yang benar-benar penting. Meskipun bagi perusahaan, rumus utama untuk strategi kompetitif masih bergantung pada posisi kompetitif dan keunggulan kompetitif dalam industri mereka, namun dalam dinamika pasar baru saat ini, rumus ini perlu dibentuk kembali oleh informasi yang disediakan oleh "benda" cerdas yang menyelaraskan kembali sisi permintaan dan penawaran pasar di berbagai industri.

Namun, ada juga beberapa hambatan yang memperlambat adopsi teknologi IoT. Keamanan yang tidak memadai akan menjadi penghalang penting bagi penyebaran IoT skala besar, dan juga interoperabilitas akan menjadi salah satu faktor yang membatasi skala ini dalam waktu dekat. Privasi dan standar hukum juga menahan kemungkinan pertumbuhan pasar IoT. Oleh karena itu, menjadi sangat penting bagi berbagai pemangku kepentingan di pasar IoT untuk bersatu dan bekerja sama mengidentifikasi serta mengatasi faktor-faktor penghambat penetrasi pasar IoT. Perusahaan baru saja mulai mengeksplorasi apa arti IoT bagi mereka. Sementara beberapa perubahan yang dibawa oleh teknologi IoT ini bersifat bertahap dan relatif mudah diadopsi, beberapa lainnya lebih transformatif sehingga memerlukan kemauan untuk mempertanyakan beberapa asumsi yang dipegang teguh tentang cara berbisnis tradisional. Terbukti dari contoh-contoh sebelumnya, perusahaan yang berhasil melewati gelombang tsunami kemungkinan besar akan berkembang pesat.

## **BAB 11**

### **KEMAJUAN DALAM ROBOTIKA DI ERA INDUSTRI 4.0**

Robot industri di pabrik-pabrik baru-baru ini dirancang dan digunakan untuk menangani tugas-tugas berbahaya bagi manusia, untuk mencapai proses produksi yang lebih cepat dan lebih akurat, dan untuk mengurangi biaya produk. Karena daya saing dalam lingkungan bisnis saat ini meningkat, produsen membutuhkan sistem yang lebih cerdas untuk membuat keputusan yang lebih cerdas. Mengingat revolusi Industri 4.0, kemajuan dalam teknologi informasi seperti kecerdasan buatan, cloud, dan Big Data mengubah penggunaan dan desain robot dalam industri. Aplikasi robot industri yang potensial dan robot generasi berikutnya yang direncanakan untuk digunakan di pabrik-pabrik Industri 4.0 dibahas.

#### **11.1 PENDAHULUAN**

Di pabrik, pekerja manusia tidak lagi efektif karena berbagai alasan seperti kemampuan dan kapasitas fisik mereka yang memengaruhi kinerja produksi, biaya produksi, dll. Oleh karena itu, robot industri yang merupakan mesin dengan kecerdasan dan kemampuan otomatis dan tertanam diperlukan untuk meningkatkan proses manufaktur. Untuk mencapai produksi yang lebih akurat dalam waktu yang lebih singkat tanpa cedera dalam industri yang kompetitif baru-baru ini, pola pikir produsen telah beralih dari tenaga kerja manusia ke robot. Meskipun demikian, kerja sama manusia dan robot diperlukan untuk manufaktur yang efisien dan tangguh.

Dalam industri kompetitif modern, perusahaan perlu memfasilitasi robot industri tidak hanya karena alasan keselamatan untuk mengurangi cedera tenaga kerja selama produksi, tetapi juga karena kebutuhan produksi yang lebih cepat dan lebih akurat dengan mempertimbangkan keuntungan ekonomis.

Namun, teknologi robotik baru-baru ini tidak memberikan prediktabilitas hasil dan kinerja proses manufaktur secara real-time, dan tidak membantu dalam mengelola dan mengoptimalkan biaya dan waktu proses ini secara mandiri. Selain itu, robot tidak mampu memantau dirinya sendiri terkait masalah kesehatan sebagai bagian dari kemampuan pemeliharaan dirinya, dan tidak mampu beradaptasi dengan proses produksi baru dari produk baru dengan sifat yang berbeda karena mereka dirancang dan dibangun berdasarkan produk khusus, misalnya dalam industri otomotif.

Robot industri tradisional ditempatkan di tempat yang ditentukan dan diprogram untuk berulang kali dan terus-menerus melakukan urutan tindakan yang telah ditentukan/disematkan selama bertahun-tahun. Oleh karena itu, robot dirancang, dibangun, dan diperlengkapi untuk urutan tindakan tertentu, yang membuatnya sulit untuk mengkonfigurasi ulang robot industri untuk jalur produksi baru. Namun, ada juga masalah penggunaan robot dalam industri seperti kurangnya orang yang memiliki keahlian dan keterampilan untuk mengeksplorasi robot, kesulitan mengkonfigurasi ulang robot untuk mengadaptasi proses produksi baru, moral pekerja manusia, ketidakmampuan kerja

kolaboratif di tempat yang sama, dll. Selain itu, biaya robot masih tinggi meskipun terus menurun. Istilah Industri 4.0 yang mewakili revolusi baru dalam industri didasarkan pada tujuan cerdas untuk menanamkan ilmu data ke dalam industri untuk menghasilkan pabrik pintar untuk perbaikan produksi/manufaktur.

Selain itu, banyak produsen berpikir bahwa proses produksi membutuhkan lebih banyak kerja kolaboratif antara robot dan manusia di mana robot adalah asisten kerja industri yang cerdas bagi manusia. Untuk menyediakan kerja kolaboratif seperti itu, masalah keselamatan bagi manusia harus dipecahkan, sehingga menjadi alasan lain bagi pabrik pintar untuk menjamin keselamatan manusia dengan mengendalikan perilaku robot karena risiko melukai manusia mungkin terjadi karena kolusi. Robot industri dalam revolusi Industri 4.0 dirancang lebih efisien dan kolaboratif dengan manusia dan dengan robot lain melalui jaringan yang memungkinkan mereka untuk sadar diri dan beradaptasi sendiri pada produk dan proses manufaktur baru.

Dengan demikian, masa depan industri karena teknologi terkini yang memanfaatkan Internet of Things (IoT) seperti untuk mengendalikan dan memantau robot industri dari jarak jauh, Cloud Computing, memproses Big Data dan analitik informasi tingkat lanjut akan menyediakan banyak robot seperti itu bagi pabrik pintar. Selain itu, robot mampu secara otonom mendeteksi penurunan kinerja produk, dan menerapkan pengoptimalan untuk mengatasinya. Saat ini, kurangnya alat analisis informasi prediktif merupakan masalah umum untuk memproses Big Data untuk masalah industri guna meningkatkan transparansi dan kualitas produksi.

Oleh karena itu, kerangka kerja yang mengintegrasikan jaringan nirkabel industri, cloud, dan IoT dengan artefak cerdas seperti mesin robotik sangat penting untuk menerapkan pabrik cerdas yang fleksibel dan dapat dikonfigurasi ulang. Selain itu, model proses yang menggabungkan robot baru disajikan untuk memandu perusahaan yang membutuhkan solusi cerdas, dalam visi Industri 4.0 mereka, dan diterapkan pada berbagai proyek dunia nyata guna menunjukkan perlunya dukungan terarah.

Industri 4.0 juga merupakan evolusi dari manufaktur berbasis sistem tertanam otomatis ke manufaktur berbasis Sistem Siber-Fisik (CPS), yang merupakan tantangan dan persyaratan terkini bagi industri manufaktur. CPS dirancang untuk dilengkapi dengan kemampuan cerdas seperti penginderaan, komunikasi, pengambilan keputusan dan pergerakan ke dunia fisik, karena sistem tersebut membuat produksi terdesentralisasi menggabungkan dunia virtual dan fisik bersama-sama menggunakan jaringan untuk memungkinkan robot dan manusia berkomunikasi satu sama lain dan berbagi Big Data industri yang dikumpulkan dari sensor.

Otonomi robot dicapai dengan memanfaatkan komponen-komponen baru dari teknologi informasi, karena komponen-komponen ini memungkinkan robot untuk merasakan dan memantau proses produksi, lingkungan kerja, dan bahkan robot itu sendiri; yang diperlukan untuk memprediksi sendiri, memulihkan kegagalan, membuat keputusan yang diarahkan pada tujuan, memodelkan dan mengendalikan proses, penilaian sendiri, dll. Salah satu manfaat dari sistem ini adalah untuk membuat bekerja dengan robot lebih mudah dan

aman bagi manusia.

Oleh karena itu, pengembangan teknologi sensor dan jaringan sangat penting untuk menyediakan kemampuan tersebut. Saat ini, beberapa tantangan teknis untuk CPS seperti menangani ketidakpastian dan dinamika di dunia nyata, mengukur kinerja sistem, kurangnya kompetensi penuh pada interaksi manusia-mesin, dll., yang sebagian besar juga merupakan tantangan ilmiah, telah diatasi dan peningkatan yang signifikan telah dicapai.

## **11.2 KOMPONEN TEKNOLOGI ROBOT TERKINI**

Teknologi robotika dan perkembangannya sangat bergantung tidak hanya pada biaya bahan, tetapi juga pada kemajuan komponen teknologi untuk membangun robot yang membuatnya lebih murah, memiliki sensor dengan kualitas lebih tinggi, prosesor yang lebih cepat dan lebih murah, ketergantungan pada perangkat lunak dan aplikasi robotika sumber terbuka, mengonsumsi lebih sedikit energi dan terhubung di mana-mana. Selain itu, dalam robotika, ada banyak tantangan ilmiah seperti memproses Big Data, menangani ketidakpastian, persepsi dalam lingkungan nyata, pengambilan keputusan kognitif secara real time, dll.

Dengan demikian, Industri 4.0 didasarkan pada kemajuan ini dan juga karya ilmiah di akademisi untuk mengatasi masalah proses pengambilan keputusan robot otonom yang lambat dan tidak efisien, kesulitan menggunakan robot, mengadopsi robot ke dalam proses manufaktur, dll. Solusi yang diusulkan baik dari akademisi maupun industri terdiri dari komponen perangkat keras dan perangkat lunak baru dari robot zaman baru.

### **Teknologi Sensor Canggih**

Bagi pabrik-pabrik industri 4.0, kemajuan teknologi sensor memiliki peran penting, karena teknologi ini digunakan dalam pemrosesan, berbagi, dan pengumpulan data. Selain itu, jaringan yang tetap menjadi inti IoT dan Cloud Computing untuk mengalirkan data bergantung pada peningkatan teknologi sensor nirkabel. Dalam dekade terakhir, banyak sensor untuk persepsi visual, persepsi pendengaran, penginderaan gaya, deteksi rintangan, penginderaan jarak, dll., telah dikembangkan untuk digunakan dengan robot untuk tugas-tugas industri dengan mendukung persepsi robot seperti yang digunakan dalam pengambilan otomatis, penanganan keselamatan, deteksi komponen, dll.

Kemajuan dalam teknologi kamera penting untuk kinerja pemrosesan gambar, yang merupakan kemampuan penting robot untuk memperoleh informasi yang menentukan tentang tugas-tugas industri. Beberapa teknik penglihatan, seperti fotogrametri, penglihatan stereo, cahaya terstruktur, waktu terbang, dan triangulasi laser, yang digunakan untuk proses inspeksi dan kontrol kualitas di lingkungan industri untuk memberikan panduan robot dievaluasi dan dibandingkan dalam hal akurasi, jangkauan, dan berat sensor, keamanan, waktu pemrosesan, dan pengaruh lingkungan.

Buku ini juga menyelidiki sensor penglihatan yang akan digunakan dalam sistem penglihatan, karena penglihatan mesin merupakan kemampuan penting untuk banyak tugas industri seperti menghindari rintangan di ruang kerja dan melacak pekerja manusia yang bekerja sama dengan mesin. Teknologi ini berkembang pesat dengan membuat kamera lebih

kecil, lebih terjangkau dengan kinerja tinggi, dan menciptakan serta meningkatkan aspek-aspek baru untuk akuisisi gambar seperti penglihatan 3 dimensi (3D), pencitraan hiperspektral yang mengambil sejumlah gambar dari pemandangan yang sama dalam rentang panjang gelombang yang berbeda, lalu menggabungkannya untuk memberikan informasi kedalaman.

Ada berbagai sensor yang menghasilkan informasi kedalaman Merah, Hijau, dan Biru (RGB) dan titik awan 3D, yang meliputi proyektor inframerah dan kamera seperti Microsoft Kinect<sup>TM</sup>, Asus Xtion<sup>TM</sup>, dll. Selain itu, sensor yang mencakup beberapa sensor laser seperti Velodyne<sup>TM</sup> digunakan untuk masalah deteksi objek 3D. Visi 3D tersebut memberi robot kemampuan untuk mencapai tugas manufaktur kedirgantaraan seperti mengeluarkan sealant yang dirancang yang masih ditangani oleh operator manusia, dengan memproses data RGB-D dari Asus Xtion<sup>TM</sup> untuk menggunakan kedalaman setiap piksel dengan informasi warnanya. Selain itu, dengan menggunakan sensor kedalaman untuk solusi tanpa penanda untuk pengenalan niat manusia, pendekatan kontrol multi-moda dikembangkan untuk kerja sama robot manusia dan komunikasi intuitif untuk menangani tugas pengencangan secara kolaboratif.

Selain itu, untuk menyediakan kolaborasi yang aman antara robot industri dan operator selama produksi, di mana perangkat yang dapat dikenakan dan pemindai digunakan. Dalam bab ini, kacamata Epson Moverio BT-200<sup>TM</sup> digunakan untuk memperoleh informasi dari lingkungan, fasilitas produksi, dan robot melalui Wi-Fi, sambil memungkinkan manusia bekerja dengan kedua tangan.

Pemindai keselamatan S300<sup>TM</sup> dari Sick digunakan untuk memperkirakan kedekatan dengan manusia untuk menyesuaikan kecepatan robot dengan kecepatan manusia. Sensor gaya juga digunakan dalam industri untuk mendapatkan umpan balik taktil saat melepaskan dan mengambil material, memasang bagian produk atau merakit bagian yang rumit dan menguji produk untuk mendeteksi tabrakan dan untuk memberikan panduan tangan untuk gerakan keselamatan.

Selain itu, umpan balik memungkinkan manusia mengendalikan robot secara manual. Dalam studi ini, untuk tugas perakitan, robot KUKA 7-DoF ringan (LWR) yang dilengkapi dengan sensor gaya-torsi enam sumbu (ATI Mini45<sup>TM</sup>) digunakan untuk mengukur gaya interaksi yang dihasilkan, saat memegang dan menggerakkan meja kayu dan manusia mengencangkan kaki. Di pabrik pintar, operator akan dilengkapi dengan jam tangan pintar, misalnya yang digunakan untuk lean manufacturing, untuk menerima pesan kesalahan dan lokasi kesalahan selama produksi.

### **Kecerdasan Buatan**

Robot industri di pabrik pintar harus mampu fokus pada pemantauan, pemahaman, dan pengoptimalan proses produksi, konfigurasi ulang produk baru, diagnosis, dan pemulihan kesalahan. Dengan demikian, robot dirancang dan dikembangkan untuk memiliki kemampuan kesadaran diri, pemeliharaan diri, dan prediksi diri. Kemampuan tersebut merupakan kemampuan penting di pabrik pintar untuk meningkatkan produksi dengan misalnya memastikan pemantauan kesehatan robot itu sendiri seperti mendeteksi kesalahan yang ada pada torsi, atau dengan memperkirakan parameter konfigurasi selama produksi.

Namun, kemampuan tersebut belum sepenuhnya diterapkan dalam proses produksi yang sebenarnya. Teknologi terkini membuat robot mampu mendengarkan perintah dan menjalankannya tanpa menilai kelayakan, kebutuhan, atau rasionalitasnya, dan tanpa mempertanyakan dampak dari proses tersebut, sehingga kemampuan penilaian diri yang dimaksudkan masih jauh dari terwujud, dan hal itu berlaku untuk yang lainnya.

Dengan memanfaatkan fasilitas Cloud Computing dan analitik Big Data, sistem manufaktur prediktif memungkinkan mesin dan sistem memiliki kemampuan yang sadar diri, dan CPS digunakan untuk industri masa depan demi peningkatan efisiensi dan produktivitas. Kemampuan cerdas berdasarkan penginderaan penglihatan diberikan kepada robot industri untuk mengatur posisinya sendiri secara akurat di bawah ketidakpastian di lingkungan eksternal seperti kesalahan kalibrasi, ketidaksejajaran benda kerja, dll., dan pada robot industri seperti ketidaksesuaian dinamika, cacat mekanis seperti serangan balik.

Robot industri otonom memiliki peran penting dalam pabrik pintar tidak hanya untuk membantu pekerja manusia, tetapi juga berkat CPS, untuk memantau segala sesuatu tentang proses produksi karena memiliki kemampuan prediksi, pengambilan keputusan, konfigurasi ulang proses manufaktur, optimalisasi jalur produksi dan minimalisasi konsumsi energi untuk meningkatkan fleksibilitas dan efisiensi produksi, keuntungan ekonomis, pemulihan kegagalan, masalah kesehatannya sendiri, dll. Untuk pabrik Industri 4.0, beberapa penelitian diusulkan tentang kerangka kerja cerdas untuk negosiasi multi-agen, karya kolaboratif dengan interaksi manusia-robot, dan memprediksi konsumsi energi untuk optimalisasinya.

Dalam studi lain, platform middleware modular dikembangkan, yang mencakup robot, cloud, aktuator dan sensor menggunakan Robot Operating System (ROS) dan sistem pembelajaran berbasis Jaringan Syaraf Tiruan (ANN) untuk mengendalikan Kuka Youbot TM, yang merupakan robot pabrik yang melakukan tindakan terprogram. Kemampuan cerdas yang dikembangkan untuk robot industri adalah kemampuan beradaptasi sendiri untuk memantau proses dan beradaptasi dengan gangguan yang terdeteksi, pengorganisasian diri untuk memaksimalkan otonomi dan meningkatkan responsivitas, fleksibilitas, konfigurasi ulang, dan otonomi sistem.

### **Internet of Robotic Things**

Fasilitas IoT untuk manufaktur memungkinkan komunikasi dan interaksi antar perangkat, mesin, dan manusia untuk memperoleh, memproses, menganalisis, mengumpulkan, dan berbagi pengetahuan tentang lingkungan, material, mesin, dan proses selama produksi. Ray mengusulkan arsitektur Internet of Robotic Things yang dibagi menjadi lima lapisan:

- (1) lapisan perangkat keras/robotic things yang terdiri dari berbagai benda fisik seperti robot, sensor, perangkat, kendaraan, dll., untuk mengirim informasi ke lapisan jaringan,
- (2) lapisan jaringan yang menyediakan berbagai jenis opsi jaringan seperti Wi-Fi, Bluetooth, jaringan area global pita lebar, dll.,
- (3) lapisan internet, yang memiliki peran penting untuk menyediakan seluruh komunikasi,
- (4) lapisan infrastruktur yang menyediakan kerangka kerja termasuk pendekatan cloud robotik berbasis IoT, Big Data, middleware, dan proses bisnis, dan

(5) lapisan aplikasi.

Ada berbagai karya yang didasarkan pada pencarian aplikasi robotik yang memanfaatkan fasilitas IoT, untuk mengendalikan robot industri, dan memantau konsumsi energi dan air menggunakan infrastruktur middleware yang mengandalkan teknologi IoT untuk mengintegrasikan sensor dan perangkat industri melalui koneksi nirkabel.

Pendekatan untuk mengendalikan robot industri lengan ganda dari jarak jauh dengan menggunakan teknologi IoT yang tersedia secara komersial, ioBridge, untuk membuat modul monitor dan kontrol, io-2014 yang terhubung ke papan I/O pengontrol robot, berkomunikasi satu sama lain.

### **Robotika Awan**

Di pabrik pintar, pengumpulan data di sepanjang tugas industri, analisis Big Data untuk mengekstrak informasi yang bermakna, mentransfer data ke robot lain di pabrik pintar berbeda yang mengerjakan tugas serupa dengan sensor serupa adalah tantangan penting Komputasi Awan dan jaringan. Lebih jauh lagi, robot otonom memerlukan pengetahuan untuk menjalankan operasinya atau untuk kemampuannya seperti penilaian mandiri, konfigurasi mandiri, pemeliharaan mandiri, dll., untuk mencapai tugas dan meningkatkan kualitas produksi.

Akan tetapi, pengetahuan yang diperoleh dari sensornya dan akibatnya pengalaman yang diperlukan untuk kemampuan ini tidak cukup dalam konsep pabrik pintar. Oleh karena itu, kecerdasan robot didukung oleh teknologi Big Data dan Cloud Computing yang memungkinkan robot mengakses pengetahuan dari basis data, publikasi, model, tolok ukur, alat simulasi, kompetisi terbuka untuk desain dan sistem, dan perangkat lunak sumber terbuka.

Sistem berbasis cloud diusulkan untuk menyediakan perencanaan gerakan dan kontrol robot industri yang fleksibel dengan memungkinkan robot untuk mengkonfigurasi ulang modul kontrolnya dengan cepat, dan dievaluasi menggunakan manipulator robot dalam hal kinerja kontrol, ketersediaan, dan skalabilitas. Dalam karya ini, telah ditunjukkan bahwa keuntungan dari sistem berbasis cloud adalah untuk mentransfer algoritma yang membutuhkan waktu komputasi tinggi atau penggunaan memori ke cloud, untuk menggunakan sistem terdesentralisasi dengan akses Internet, dan untuk dapat menggunakan berbagai layanan perencanaan jalur pada saat yang bersamaan.

Selain itu, aplikasi robotika berbasis cloud dikembangkan untuk menghubungkan sumber daya fisik seperti robot, perangkat, dan sensor di cloud melalui server lokal, dan dievaluasi oleh dua studi kasus: Pada yang pertama, dengan menerapkan deteksi tabrakan menggunakan titik awan 3D dari robot dan manusia yang ditangkap oleh kamera kedalaman untuk kontrol robot secara online, lingkungan yang aman dan terlindungi bagi operator manusia disediakan.

Kedua, konsumsi energi dari pergerakan robot industri diminimalkan dengan memperkirakan konfigurasi sambungan yang paling hemat energi. Pada bab ini, server penghindaran tabrakan lokal di cloud digunakan yang memungkinkan komunikasi antara robot, kamera, dan server lokal untuk menyempurnakan parameter robot yang paling optimal,

seperti perkiraan tensor inersia yang efisien dari sambungan robot.

Sistem manufaktur kustomisasi yang mencakup tiga lapisan; (1) lapisan perangkat manufaktur untuk memungkinkan berbagai perangkat seperti robot industri memperoleh keputusan tentang produksi di cloud, (2) lapisan sistem layanan cloud, tempat konsep CPS dikualifikasi, dan (3) lapisan sistem seluler untuk menyediakan terminal guna mengakses cloud dirancang. Platform yang mencakup sejumlah perangkat fisik yang terhubung ke cloud melalui jaringan nirkabel, yang merupakan sabuk konveyor, beberapa robot industri, dan berbagai sensor diimplementasikan. Cloud menyediakan data yang diperlukan yang ditanyakan dari pelanggan tentang produksi, untuk diproses dan untuk membuat keputusan terkait dengan manufaktur kustomisasi.

### **Arsitektur Kognitif untuk Robotika Siber-Fisik**

Sistem siber-fisik adalah sistem tertanam yang dilengkapi dengan sistem dan lingkungan fisik melalui kombinasi modul komputasi. Area aplikasi sistem ini tidak hanya mencakup mesin dan pabrik pintar, tetapi juga transportasi pintar, gedung pintar, kota pintar, teknologi medis pintar, dll., sehingga integrasi sistem tersebut dengan teknologi seperti IoT, analitik Big Data, Cloud Computing, dan jaringan sensor nirkabel merupakan inti dari revolusi Industri 4.0. Komponen utama infrastruktur sistem adalah aktuator untuk berinteraksi dengan dunia ini, sensor untuk merasakan lingkungan fisik, dan pemrosesan informasi, oleh karena itu, kemajuan teknologi terkait ini akan menentukan pengembangan CPS.

Arsitektur 5C yang mencakup 5 level, yaitu (1) Koneksi sebagai level untuk mengelola sistem akuisisi data seperti sensor, sumber data, dan protokol transfer, (2) Konversi, tempat data diproses dan diubah menjadi pengetahuan yang berharga dan dapat digunakan, (3) Siber sebagai hub informasi utama untuk membangun ruang siber menggunakan informasi yang diperoleh dari setiap sumber, (4) Kognisi untuk optimalisasi keputusan, dan (5) Konfigurasi sebagai kontrol pengawasan untuk memberikan mesin konfigurasi diri dan adaptif sendiri, dirancang untuk mengintegrasikan sistem siber-fisik dengan mesin pintar untuk digunakan dalam industri manufaktur. Dengan demikian, sistem tersebut merupakan inti dari pabrik pintar karena penggabungan IoT dan Big Data dengan dunia industri fisik.

Ada banyak studi CPS dalam tugas-tugas industri seperti di mana sistem siber-fisik terintegrasi diusulkan dengan membangun layanan berbasis awan untuk pemantauan, perencanaan proses produksi, pemesanan dan perakitan dalam lingkungan yang terdesentralisasi, untuk mengakses dan mengendalikan peralatan yang digunakan dalam produksi seperti mesin dan robot Computer Numerical Control (CNC). Perangkat lunak CPS memainkan peran paling penting dalam pengembangan sistem semacam ini; isu-isu terkait seperti analisis, desain, pengembangan, verifikasi dan validasi, dan jaminan kualitas perangkat lunak CPS perlu diperhitungkan.

Selain itu, CPS dalam kolaborasi robot manusia juga disebut Collaborative Robotic CPS (CRCPS) mencakup tiga entitas terintegrasi utama; (1) Komponen Manusia (HC) yang terhubung melalui berbagai teknologi adaptor, misalnya teknologi pelacakan posisi manusia yang akurat, (2) Komponen Fisik (PC) dan (3) Komponen Komputasi (CC). CRCPS dikembangkan dengan mempertimbangkan langkah-langkah keselamatan dan perlindungan untuk

meningkatkan produktivitas. Sistem semacam itu mampu memanfaatkan berbagai sensor dan aktuator, dan dimaksudkan untuk menyediakan interaksi antara HC, CC, dan PC, misalnya sistem penglihatan untuk deteksi, pelacakan, dan pengenalan gerakan pekerja manusia.

### **11.3 APLIKASI ROBOT INDUSTRI**

Robot industri dengan berbagai kemampuan cerdas dan sensorik digunakan dalam proses manufaktur. Di pabrik Industri 4.0, robot yang diberkahi dengan kemampuan canggih karena teknologi informasi, jaringan, dan sensor mampu bekerja sama dengan pekerja manusia dan bekerja sama dengan robot lain dalam jalur perakitan. Aplikasi kerja kolaboratif dan kooperatif dari robot, praktik pemeliharaan, dan aplikasi jalur perakitan menggunakan robot membentuk pabrik masa depan.

#### **Manufaktur**

Industri manufaktur konvensional diubah menjadi manufaktur dengan sistem cerdas untuk meningkatkan kinerja produksi dan manfaat ekonomi di banyak negara maju. Mesin seperti robot industri sebagai pengganti manusia telah digunakan beberapa dekade lalu untuk memungkinkan produksi yang lebih cepat dan lebih akurat daripada menggunakan pekerja manusia. Namun, dalam industri baru-baru ini, manufaktur tidak memadai karena ketidakmampuan robot dan kesulitan implementasi pengembangan teknologi saat ini. Karena manfaat dari teknologi informasi dan sensor, peningkatan interaksi antara mesin robotik dan pekerja manusia serta robot itu sendiri akan meningkatkan kualitas manufaktur.

#### **Manufaktur Kolaboratif Manusia-Robot**

Dalam manufaktur industri terkini, kebutuhan robot industri dan pekerja manusia untuk bekerja sama melalui jaringan komunikasi terus berkembang, dan komunikasi tersebut tercapai berkat kemajuan aspek Industri 4.0. Selain itu, diyakini juga bahwa mengintegrasikan robot industri ke dalam ruang kerja manusia membuat proses produksi lebih ekonomis, dan memungkinkan banyak aplikasi kolaboratif di pabrik. Akan tetapi, robot dan manusia tidak begitu mampu bekerja sama dengan lancar di ruang kerja yang sama karena masalah keselamatan.

Meskipun robot dirancang untuk berhati-hati di sekitar pekerja manusia, robot ini bertujuan untuk mencapai kemampuan bergerak yang lebih fleksibel dan lincah, yang sangat dibutuhkan untuk memberikan efisiensi lebih dalam bekerja sama dengan manusia. Robot kolaboratif masih belum dikembangkan secara matang untuk mengerjakan tugas-tugas kompleks di ruang yang sama dengan manusia di jalur perakitan dan pusat distribusi. Konsep pabrik pintar, yang memungkinkan aksi bersama manusia dan robot industri, di mana robot memahami lingkungan mereka dengan berbagai modalitas sensor yang dirancang untuk merakit barang modal secara kolaboratif.

Selain itu, ada banyak penelitian yang bertujuan untuk kolaborasi manusia dan robot sambil mempertimbangkan keselamatan pekerja manusia di mana sistem interaksi manusia-robot diusulkan untuk menjamin keselamatan dengan melacak dan memperkirakan kedekatan pekerja dengan robot, dan dengan mengaktifkan strategi yang mempertimbangkan kedekatan.

Sensor dipilih dengan mempertimbangkan konsep keselamatan, seperti pemantauan

gaya, pemantauan kecepatan dan jarak, dan isolasi lengkap. Selain itu, dalam studi ini, kolaborasi diformalkan dengan mempertimbangkan jumlah sensor, laju data dari sensor untuk menghitung indikator kinerja utama, dan mempertimbangkan kecepatan pekerja manusia di ruang kerja yang sama yang mendekati tabrakan dengan robot, dan akhirnya waktu tindak lanjut robot untuk berhenti sepenuhnya dengan menghitung jarak aman untuk memberikan keselamatan pekerja manusia.

Untuk memproses dan mengekstrak informasi yang berarti tentang tugas tertentu dari Big Data yang dihasilkan oleh komunitas kolaboratif yang mencakup banyak robot dan manusia membuat robot mampu mengatasi dan menjelaskan ketidakpastian, dan membuat keputusan yang lebih baik. Big Data industri semacam ini mungkin tidak hanya terdiri dari pengetahuan yang diperoleh dari komunitas ini, tetapi juga pengetahuan yang ditransfer dari robot lain di pabrik yang berbeda melalui internet.

Salah satu tantangan terpenting dalam kerja sama manusia dan robot adalah bagaimana mentransfer informasi karena robot harus mampu mengetahui terlebih dahulu di mana manusia berada dan apa yang mereka lakukan di ruang kerja bersama. Namun, tidak ada alat analitik dan prediktif yang cerdas untuk mengumpulkan, memproses, dan mentransfer Big Data. Di masa mendatang, untuk menyediakan kolaborasi tingkat lanjut antara pekerja manusia dan robot industri, CPS akan dikembangkan untuk perencanaan tugas yang dinamis, penghindaran tabrakan aktif, dan pengendalian robot melalui ucapan, gerakan, dan tanda.

#### **Robot yang Bekerja Sama dalam Manufaktur**

Selain kerja sama antara mesin dan manusia, di pabrik pintar, robot harus mampu bekerja sama dengan robot lain yang terhubung dalam komunitas kolaboratif, dan berbagi informasi yang dikumpulkan dari pekerjaan mereka sendiri melalui komunitas ini. Pembagian tersebut bergantung pada peningkatan jaringan nirkabel, dan bertujuan untuk meningkatkan kemampuan robot dalam pembelajaran, prediksi, fleksibilitas, dan pengambilan keputusan pada proses produksi.

Untuk pabrik Industri 4.0, beberapa penelitian diajukan tentang kerangka kerja cerdas yang mengintegrasikan kerangka kerja pabrik pintar dengan beberapa agen otonom dengan sistem berbasis Big Data yang terdiri dari lapisan sumber daya fisik, lapisan jaringan industri, lapisan awan, dan lapisan terminal kontrol pengawasan, untuk pengambilan keputusan mandiri yang terdistribusi dan mekanisme negosiasi cerdas para agen untuk menerapkan sistem manufaktur yang terorganisasi sendiri guna mencegah kebuntuan.

Selain itu, kerja sama dua lengan robot industri diperlihatkan, di mana satu digunakan untuk tugas sensorik, yaitu memindai benda kerja seperti pin dan memberi tahu yang lain yang menangani tugas tersebut, dengan membuat titik awan dan memodifikasinya selama gerakan.

Sejumlah robot serial untuk tugas pemuatan dan robot Cartesian untuk tugas pemesinan dan pengujian, dan sistem pengangkutan seperti rel kereta api digunakan. Robot serial melayani dua robot Cartesian yang dilengkapi dengan manipulator untuk mencapai tugas yang berbeda. Robot serial meletakkan produk pada robot Cartesian, yang dibawa dari sistem pengangkutan, dan sebaliknya. Robot ini juga mampu mengendalikan posisi dan kecepatannya secara otonom, dan mampu menghindari tabrakan. Selain itu, robot dilengkapi

dengan pengontrol dan perangkat pintar yang diperlukan untuk menjadikannya komponen pabrik pintar. Perangkat lunak ini menyediakan kemampuan untuk komputasi awan dan analitik Big Data, dan memvirtualisasikan jaringan server sebagai superkomputer platform, tempat robot menjadi klien.

Dengan menggunakan arsitektur jaringan ini, pabrik pintar dibangun tempat robot dapat berkomunikasi satu sama lain, data besar yang diperoleh dari tugas dan pengalaman dapat dikumpulkan dan ditransfer ke awan, dan melalui awan, big data dapat ditransfer ke robot lain. Selain itu, kerangka kerja berbasis ROS untuk sistem produksi siber-fisik diusulkan untuk mengembangkan dan meningkatkan strategi koordinasi bagi robot yang bekerja sama dengan mempertimbangkan keterlambatan jaringan, ketidakakuratan lokalisasi, dan ketersediaan daya komputasi tertanam. Kerangka kerja seperti itu membuat robot lebih adaptif dan kooperatif karena menggabungkan deteksi dan penghindaran tabrakan menggunakan keputusan lokal berdasarkan pengamatan dari lingkungan.

### **Pemeliharaan**

Di pabrik, pemeliharaan proses produksi merupakan salah satu item perencanaan yang paling penting untuk mendiagnosis masalah kesehatan mesin dan mengurangi waktu henti proses akibat masalah tersebut. Manusia masih bertanggung jawab atas tugas ini dalam teknologi terkini, tetapi beberapa sistem diusulkan untuk memungkinkan mesin memiliki kemampuan pemeliharaan mandiri.

Misalnya, Prognostik dan Manajemen Kesehatan (PHM) merupakan disiplin ilmu bagi mesin dan robot untuk menilai kesehatan sistem guna mendiagnosis anomali menggunakan sensor, dan guna memprediksi kinerja selama masa pakai mesin. Pengembangan IoT memberikan peluang bagi disiplin ilmu PHM untuk digunakan secara efisien dalam manufaktur, seperti kecepatan pengambilan keputusan, peningkatan keandalan dan akuntabilitas melalui cloud, peningkatan tanggung jawab dan kompetensi tenaga kerja.

Untuk melacak dan menilai kesehatannya sendiri dan penurunan kinerja produksi secara keseluruhan, kesadaran diri dan pemeliharaan mandiri merupakan kemampuan yang dibutuhkan robot. Dengan memproses informasi dari Big Data, robot industri mampu mengelola kesehatan dan perawatannya. Dalam studi terkini (Pedersen et al. 2016), ditunjukkan bagaimana keterampilan robot untuk manufaktur dan tugas-tugas baru dapat diperoleh dengan mentransfer informasi dari pengetahuan pekerja pabrik untuk mengembangkan kemampuan menegaskan diri sendiri.

Untuk perawatan robot dan diagnosis kesalahan, getaran pada robot industri diukur menggunakan akselerometer dan dievaluasi dengan menerapkan Fast Fourier Transform untuk analisis spektrum pendengaran getaran. Selain itu, kegagalan gigi roda gigi pada robot industri seperti lecet, retak, makro dan mikro-pitting, keausan, kelelahan tekukan, dan fraktur didiagnosis menggunakan Discrete Wavelet Transform dan Artificial Neural Networks.

### **Perakitan**

Lini perakitan modern konvensional sangat otomatis, tetapi tidak adaptif secara dinamis terhadap persyaratan produksi baru. Akan tetapi, sangat sulit untuk membuat robot mudah dikonfigurasi ulang dan diprogram ulang sesuai dengan perubahan di jalur produksi.

Produsen merasakan perlunya proses perakitan, di mana manusia dan robot bekerja sama, dan optimalisasi proses produksi dan pengurangan waktu henti dicapai secara otonom dengan memantau tugas perakitan dan membuat keputusan. Sistem cerdas seperti itu dimungkinkan di pabrik-pabrik Industri 4.0.

Mengadaptasi paradigma produksi baru dan mengonfigurasi ulang otomatisasi, tugas-tugas di jalur perakitan selama produksi merupakan persyaratan lain bagi robot industri di pabrik pintar. Dalam kerangka Industri 4.0, Pfeiffer menjelaskan bagaimana pekerjaan perakitan akan berubah dengan berfokus pada pekerjaan-pekerjaan yang tidak rutin dan terabaikan dalam tugas-tugas perakitan inti, dan apa peran manusia dan robot dalam tugas perakitan dengan mempertimbangkan kemampuan interaktif mereka untuk memastikan kinerja tinggi, kualitas, dan aliran material yang lancar.

Selain itu, perlu memanfaatkan teknologi Industri 4.0, seperti IoT, dalam pengembangan robot untuk semua jenis tugas jalur perakitan seperti tugas konveyor perakitan di mana robot dikembangkan untuk dapat mencapai tugas manufaktur guna menyinkronkan robot bergerak industri dengan objek bergerak yang digunakan dalam proses ini. Dalam studi ini, ada dua sistem untuk mencapai sinkronisasi, untuk mengendalikan platform bergerak, untuk melokalisasi objek, di mana tiga LED perlu dipasang, serta platform bergerak dengan mengandalkan sensor optik untuk memperkirakan posisi setiap LED.

Sejumlah CPS terdistribusi dan kolaboratif dirancang dan digunakan untuk membuat proses manufaktur berbasis fitur sebagai aplikasi robot siber-fisik. Proses ini digunakan untuk kontrol peralatan robot dan mencocokkan sumber daya dan tugas guna mencapai tugas perakitan dengan menggabungkan fitur perakitan produk dan blok fungsi berbasis peristiwa. Fitur-fitur tersebut terdiri dari koordinasi dan kontrol serangkaian gerakan dan tindakan robot seperti pemrosesan sinyal, logika program, pengambilan keputusan, dan komunikasi. Berkat CPS, manipulasi komponen-komponen suatu produk saling terkait dan metode perakitan diterapkan pada produk dengan mempertimbangkan fitur-fitur perakitan dalam skenario tugas perakitan ini.

## **Kesimpulan**

Dalam bab ini, dirangkum bagaimana fasilitas teknologi Industri 4.0 yang meliputi sensor, jaringan, dan teknologi informasi digabungkan ke dalam robot industri untuk tugas-tugas manufaktur, bagaimana fasilitas-fasilitas ini memengaruhi produksi, dan apa saja persyaratan produsen terhadap teknologi-teknologi tersebut. Pekerjaan eksperimental menggunakan sistem robot industri untuk pabrik-pabrik pintar dalam tugas-tugas perakitan, jaringan, kerja sama dan kolaborasi dengan manusia disurvei. Sebagai hasil dari integrasi sensor-sensor canggih dengan teknologi Kecerdasan Buatan, IoT, dan Komputasi Awan, yang akan lebih umum digunakan di pabrik-pabrik, robot-robot industri yang memiliki kemampuan pengambilan keputusan, prediksi, dan pemeliharaan yang cerdas dengan perilaku otonom yang canggih akan lebih berkontribusi pada produksi dengan membantu dan bekerja bersama dengan pekerja manusia.

## **BAB 12**

### **PERAN AUGMENTED REALITY DI ERA INDUSTRI 4.0**

Augmented Reality (AR) telah meningkatkan popularitasnya di industri dan akademis sejak diperkenalkan dua dekade lalu. AR telah membawa cara mengakses dan memanipulasi informasi ke tingkat lain dengan meningkatkan persepsi dunia nyata dengan informasi virtual. Dalam bab ini, komponen teknis dasar AR diperkenalkan serta penggunaan praktisnya dalam industri terutama dalam manufaktur, pemeliharaan, perakitan, pelatihan, dan operasi kolaboratif. Setelah menjelaskan sistem perangkat keras dan perangkat lunak yang mendasari pembentukan AR, aplikasi AR terkini dalam industri ditinjau.

#### **12.1 PENDAHULUAN**

Manusia mempersepsikan lingkungan mereka sejauh kemampuan panca indera mereka memungkinkan. Manusia tidak dapat melihat apa yang tidak ada di lingkungan mereka atau tidak dapat menyentuh objek yang tidak ada secara fisik.

Oleh karena itu, interaksi dengan dunia luar dan akses ke informasi yang relevan tentang tugas apa pun agak terbatas. Misalnya, seorang insinyur muda yang memperbaiki mesin mobil tidak dapat memecahkan masalah kerusakan yang tidak diketahuinya tanpa berkonsultasi dengan ahli atau buku panduan. Singkatnya, kita membutuhkan cara lain ketika kita membutuhkan informasi tambahan tentang barang-barang yang kita gunakan dalam kehidupan sehari-hari. Cara ini bisa berupa internet, buku panduan berbasis kertas, kolega, dll.

Cara mengakses cara-cara ini juga memengaruhi kualitas interaksi atau pengalaman dengan objek. Untuk interaksi yang lebih baik, manusia perlu mendapatkan informasi yang tidak terlihat terkait dengan objek yang berinteraksi secepat mungkin dan dalam bentuk yang dapat dipahami. Teknologi Augmented Reality (AR) telah dianggap sebagai cara interaksi yang inovatif untuk tujuan ini. Berkat AR, manusia dapat menjelajahi lebih dari yang dapat dirasakan oleh kelima indranya.

Tujuan utama AR adalah untuk meningkatkan persepsi manusia tentang lingkungan dengan melapisi informasi visual tambahan yang dihasilkan komputer ke dalam penglihatan pengguna melalui perangkat tertentu, seperti kamera telepon pintar, head-mounted display (HMD), perangkat proyeksi, dll. Informasi visual yang dihasilkan komputer dapat berupa gambar, video, model 3D, teks, suara, instruksi ucapan, dll. Dengan melapisi jenis augmentasi ini ke dalam penglihatan nyata pengguna, pengguna dapat memperoleh informasi tersembunyi tentang objek yang berinteraksi atau lingkungan, yang menjadikan AR sebagai teknologi yang efisien untuk beberapa bidang, seperti permainan, olahraga, periklanan, belanja, pendidikan, layanan militer, operasi medis, serta keperluan industri, dll.

Tiga properti utama AR didefinisikan sebagai penyajian objek virtual dan nyata bersama-sama dalam lingkungan nyata, memungkinkan interaksi dengan objek virtual dan nyata secara real time, dan mendaftarkan (menyelaraskan) objek virtual dengan objek nyata. Informasi tambahan yang dibawa oleh augmentasi dapat membantu pengguna saat

melakukan tugas-tugas dunia nyata. Dengan berbagai keunggulannya ini, AR dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kebutuhan industri. Selain itu, berkat kemajuan dalam sistem perangkat keras dan perangkat lunak, AR telah menarik lebih banyak perhatian dari industri daripada sebelumnya.

## 12.2 TEKNOLOGI PERANGKAT KERAS DAN PERANGKAT LUNAK AR

Secara umum, sistem AR berisi empat komponen perangkat keras; (1) komputer, (2) perangkat tampilan, (3) perangkat pelacak, dan (4) perangkat input (Wiedenmaier et al. 2003). Komputer tidak hanya bertanggung jawab untuk memodelkan augmentasi dan mengendalikan semua perangkat yang terhubung, tetapi juga menyesuaikan posisi augmentasi dalam adegan nyata sehubungan dengan posisi pengguna dengan menggunakan informasi yang dikumpulkan dari perangkat pelacak. Perangkat tampilan diperlukan untuk menampilkan augmentasi di atas penglihatan nyata pengguna. Pilihan perangkat tampilan bergantung pada jenis interaksi.

Teknologi yang paling banyak digunakan adalah Head-Mounted Display (HMD) yang tembus pandang, yang dikenakan pengguna di kepalanya, Hand-Held Display (HHD), seperti tablet atau telepon pintar, atau Spatial Display (SD), yang dirancang menggunakan beberapa proyektor. Perangkat pelacak bertanggung jawab untuk melacak posisi dan orientasi pengguna secara tepat, lalu mendaftarkan penambahan tersebut dengan tepat ke posisi yang diinginkan. Dengan menggunakan perangkat pelacak, komputer memberikan bantuan kepada pengguna dengan memproses gerakan, gestur, dan tindakan pengguna saat pengguna berinteraksi dengan objek di dunia nyata. Perangkat input digunakan untuk memungkinkan pengguna berinteraksi dengan sistem.

Beberapa contoh perangkat input adalah mikrofon, touchpad, perangkat nirkabel, mouse, dan perangkat haptik. Pilihan setiap komponen bergantung pada skenario aplikasi. Jika aplikasi dirancang untuk teknisi yang bekerja di pabrik, masuk akal untuk memilih HMD nirkabel yang tembus pandang, karena dalam sebagian besar tugas mereka memerlukan kedua tangan untuk menyelesaikan pekerjaan; jadi HHD tidak efisien dalam kasus ini. Selain itu, HMD yang tembus pandang memberikan mobilitas dan dianggap lebih cocok untuk aplikasi luar ruangan. Namun, perangkat HMD yang tersedia saat ini kurang nyaman karena bobot, dimensi, dan resolusinya yang lemah.

Telah dilaporkan berkali-kali bahwa khususnya setelah beberapa waktu penggunaan, perangkat ini dapat menyebabkan sakit kepala dan pusing. Dilaporkan pula bahwa operator perawatan mengalami kesulitan karena HMD yang besar tidak sesuai dengan lingkungan kerja mereka. Di sisi lain, HHD cukup bertenaga dalam hal memiliki kamera beresolusi tinggi dan berbagai sensor, tetapi daya pemrosesannya terbatas. Oleh karena itu, dalam sebagian besar kasus, para peneliti mengembangkan arsitektur klien-server untuk meningkatkan kinerja HHD.

Menumpangkan augmentasi ke dalam pemandangan pengguna dilakukan dengan beberapa cara, yang juga memengaruhi pilihan perangkat. Salah satu caranya adalah augmentasi diproyeksikan langsung ke bidang pandang pengguna, yang disebut kombinasi optik dan diimplementasikan dengan HMD tembus pandang optik. Teknik lain disebut pencampuran video. Dalam metode ini, adegan pengguna ditangkap oleh kamera dan diproses

dengan komputer dan setelah penambahan disisipkan pada adegan yang diproses, hasilnya ditampilkan pada monitor, di mana pengguna mengamati adegan sebenarnya secara tidak langsung. Metode terakhir adalah proyeksi gambar, di mana penambahan diproyeksikan langsung ke objek fisik.

Pelacakan dan registrasi tampaknya merupakan tantangan terpenting dalam aplikasi AR. Hanya dengan pelacakan dan registrasi yang akurat, augmentasi dapat diselaraskan dengan benar. Algoritma pelacakan dan registrasi dikategorikan ke dalam tiga kelas seperti, (1) algoritma berbasis penanda, (2) algoritma berbasis fitur alami (atau tanpa penanda) dan (3) algoritma berbasis model. Dalam algoritma berbasis penanda, penanda 2D yang memiliki pola atau bentuk unik ditempatkan pada objek nyata, di mana augmentasi akan ditumpangkan. Augmentasi ditetapkan untuk setiap penanda di tempat kerja secara terprogram dan setelah kamera perangkat mengenali penanda, augmentasi yang ditetapkan ditampilkan pada penanda.

Dalam beberapa kasus, penggunaan penanda tidak efisien dan karenanya, algoritma praproses berbasis fitur alami yang banyak digunakan dalam visi komputer, seperti, Speeded Up Robust Features (SURF), Scale Invariant Feature Transform (SIFT), Binary Robust Independent Elementary Features (BRIEF) lebih disukai. Terakhir, algoritma berbasis Model membandingkan fitur yang diekstrak dengan daftar model yang telah ditetapkan sebelumnya. Saat ini, ada banyak Kit Pengembangan Perangkat Lunak (SDK) yang secara khusus dikembangkan untuk mempermudah pengembangan aplikasi AR. Metaio, Vuforia, Wikitude, ARToolKit, dan Hololens adalah SDK yang paling populer dan menyediakan fungsionalitas serta dokumentasi terperinci, yang memberikan peluang untuk mengembangkan aplikasi AR bagi pengembang dengan keterampilan dan pengalaman pengkodean yang rendah.

### **12.3 APLIKASI INDUSTRI AR**

AR menyediakan solusi bantuan dalam berbagai bidang industri yang memudahkan pengelolaan proses, membantu mengurangi kesalahan manusia, memungkinkan cara baru untuk mendidik orang, dan meningkatkan kolaborasi. Dalam hal ini, penggunaan AR dalam bidang manufaktur dianalisis dalam bagian ini.

Proses manufaktur berfokus pada pemenuhan kebutuhan manusia dengan menyediakan produk berkualitas menggunakan bahan baku dan pengetahuan. Karena dunia bisnis saat ini bersifat dinamis dan kompetitif, perusahaan menghadapi tantangan dalam mengelola biaya, waktu, kualitas, dan fleksibilitas. Karena perusahaan harus merilis produk inovatif mereka dalam durasi waktu yang singkat dan dengan biaya rendah, proses manufaktur mereka harus lebih responsif dan sistematis. Selain itu, pertukaran informasi waktu nyata antara hampir semua fase siklus hidup pengembangan produk, misalnya, desain, perencanaan, perakitan, pemeliharaan, dll., juga diperlukan untuk mengurangi waktu dan biaya produksi serta kustomisasi besar-besaran produk sesuai dengan kebutuhan pelanggan.

Untuk mengatasi faktor waktu dan biaya ini serta kolaborasi antara fase siklus hidup pengembangan produk, manufaktur digital telah dipertimbangkan. Menggabungkan dukungan komputer dalam sistem manufaktur tidak hanya memudahkan penanganan

kesalahan, tetapi juga meningkatkan proses pengambilan keputusan. Salah satu solusi inovatif dan efektif untuk sistem manufaktur yang didukung komputer adalah teknologi AR.

Teknologi AR telah digunakan untuk meningkatkan proses manufaktur dengan membantu dalam memecahkan masalah kritis, atau dengan mencegah pengerjaan ulang dan modifikasi berikutnya dalam aktivitas, seperti, desain, perencanaan, dll., sebelum proses sebenarnya dilakukan. AR memungkinkan pengguna berinteraksi langsung dengan informasi yang terkait dengan proses manufaktur secara real time dan di lingkungan kerja nyata, yang sangat berguna terutama dalam pemeliharaan, pelatihan, perakitan, desain produk, perencanaan tata letak, dan aktivitas manufaktur lainnya.

### **Pemeliharaan**

Layanan pemeliharaan merupakan salah satu proses manufaktur yang paling penting. Operasi pemeliharaan melibatkan aktivitas seperti analisis, pengujian, servis, penyetaraan, pemasangan, pelepasan, perakitan, perbaikan, atau pembangunan kembali sistem buatan manusia. Karena kuantitas fungsionalitas produk telah meningkat, produk menjadi semakin kompleks, yang mengharuskan bahkan pengguna yang paling berpengalaman untuk berkonsultasi dengan manual, cetakan, atau komputer untuk mengambil informasi tentang keselamatan, prosedur pemeliharaan, atau data komponen.

Dari sudut pandang teknisi, ketika mereka menghadapi masalah di lokasi, mereka biasanya menggunakan manual kertas atau mendapatkan instruksi dari ahli lain melalui panggilan telepon atau di lokasi. Namun, faktanya adalah bahwa menyelesaikan masalah dengan menggunakan manual kertas atau berbicara dengan ahli merupakan cara yang tidak efisien dalam hal biaya dan waktu, yang bahkan dapat mengakibatkan ketidakpuasan pelanggan.

Selain itu, merujuk pada manual kertas atau berkonsultasi dengan ahli memisahkan fokus teknisi dari area perbaikan produk dengan menyaring informasi yang terkait dengan bagian peralatan yang bermasalah dan mencoba mencocokkan informasi tersebut dengan produk sebenarnya, yang juga menambah beban kerja teknisi. Masalah lain dari manual kertas adalah bahwa manual tersebut berubah seiring waktu karena produk dimodifikasi selama siklus hidupnya.

Oleh karena itu, prosedur dan gambar yang disajikan dalam manual kertas harus diperbarui, yang juga menyebabkan masalah biaya dan waktu tambahan. Untuk mengatasi masalah ini, instruksi yang disajikan dalam manual disediakan secara virtual dalam sistem AR dengan informasi terkini tentang produk.

Teknologi AR telah banyak digunakan untuk mendukung aktivitas pemeliharaan. Aktivitas dan fitur pemeliharaan, di mana AR dapat dilibatkan sebagai mekanisme pendukung. Untuk fase analisis, di mana sistem mendeteksi komponen yang memerlukan pemeliharaan, informasi virtual dapat ditumpangkan pada gambar situasi nyata, yang menampilkan langkah-langkah untuk pemeriksaan.

Setelah langkah pemeriksaan, pekerja layanan perlu didukung dengan diagnostik kesalahan dengan menyediakan komunikasi dengan pakar, sehingga, bidang pandang pekerja pada komponen yang rusak dapat ditransmisikan ke pakar jarak jauh. Pakar jarak jauh

kemudian dapat mendukung pekerja dengan menggunakan anotasi teks, panah yang telah disiapkan, atau bentuk geometris lainnya untuk menunjukkan tindakan yang perlu dilakukan pekerja. Akhirnya, pekerja menangani masalah dengan mengikuti instruksi tambahan yang diberikan oleh pakar.

Mendukung tugas pemeliharaan dengan aplikasi AR dapat membuat pengguna tetap berada dalam domain tugas tanpa terus-menerus mengalihkan fokus perhatian mereka antara tugas dan manual terpisah. Menumpangkan informasi yang diperlukan tentang tugas di lingkungan kerja nyata adalah salah satu fitur yang paling berbeda, yang menjadikan AR penting untuk tugas pemeliharaan. Informasi yang ditumpangkan dapat berupa anotasi teks, animasi, video, gambar, atau model 3D yang dihasilkan komputer.

Oleh karena itu, dengan menggunakan aplikasi AR, pengguna diberikan lebih banyak konten daripada dengan manual kertas. Dalam tugas tersebut, pengguna dilengkapi dengan unit komputer yang dapat dikenakan dan mendapatkan informasi yang diperlukan yang ditumpangkan pada objek yang sedang diperiksa, menunjukkan tindakan yang diperlukan langkah demi langkah dan cara melakukannya. Oleh karena itu, jumlah kesalahan dan waktu penyelesaian tugas berkurang.

Selain mengurangi frekuensi peralihan konteks dan waktu untuk tugas pemeliharaan, AR juga memungkinkan kolaborasi waktu nyata. Bidang penglihatan teknisi dapat ditransfer ke ahli melalui jaringan bersama. Sumber video langsung dalam hal ini adalah kamera kepala yang dikenakan oleh teknisi. Data video yang ditransfer memungkinkan pakar jarak jauh untuk memantau masalah dan memberikan instruksi yang diperlukan dengan membagikan augmentasi yang ditransfer kembali ke teknisi melalui jaringan.

Cara kolaborasi waktu nyata ini juga membuat teknisi mengingat cara mereka menangani masalah dengan lebih baik daripada mengingat dengan menggunakan manual terpisah jika mereka menghadapi masalah yang sama di masa mendatang. Perawatan kolaboratif berbasis AR memungkinkan pakar jarak jauh dan teknisi lapangan untuk menggunakan beberapa isyarat spasial yang digunakan dalam kolaborasi tatap muka yang biasanya hilang dalam sistem konferensi jarak jauh, yang menghasilkan kehadiran sosial yang lebih tinggi daripada teknologi lainnya.

Dalam sistem yang dikembangkan, pengguna dapat menunjuk bagian mana pun dari mesin dengan perangkat penunjuk dan melihat informasi augmentasi yang terkait dengan bagian yang ditunjuk dengan mengenakan HMD yang tembus pandang. Augmentasi tersebut berupa teks dan garis sederhana yang menghubungkan teks dengan bagian yang dijelaskannya. Penulis menyatakan bahwa dengan melengkapi anotasi tekstual, pengguna dapat memperoleh informasi tentang tugas dan komponen secara lebih rinci tanpa memisahkan fokus pengguna dari produk. Selain itu, komponen produk yang sangat panas dan beraliran listrik juga dapat disorot untuk mencegah bahaya menyentuhnya.

Proyek ARMAR dikembangkan untuk membantu teknisi dalam tugas perawatan. Sistem melacak posisi kepala pengguna dengan menggunakan perangkat pelacak dan menggunakan HMD yang tembus pandang untuk menampilkan antarmuka, yang menyajikan pelengkap kepada teknisi. Pelengkap tersebut memberi tahu pengguna tentang masalah dan langkah-

langkah yang diperlukan untuk solusinya sebagai teks atau gambar 2D.

Salah satu fitur penting dari proyek ini adalah karena penggunaan HMD menyebabkan beberapa pembatasan, terutama saat teknisi perlu menggunakan tangannya, pengenalan gerakan disediakan menggunakan kamera kedua yang meningkatkan pengalaman pengguna dan menciptakan peluang untuk mendesain antarmuka pengguna termasuk tombol virtual pada tampilan tertambah.

Pemindahan citra langsung dari pandangan teknisi lokal ke pakar jarak jauh telah ditangani dengan menerapkan solusi jaringan. Lingkungan jaringan semacam itu untuk mencapai kolaborasi yang efisien antara teknisi dan pakar yang berlokasi di tempat yang berbeda. Dalam kerangka kerja yang dikembangkan, jika teknisi memerlukan bantuan dengan komponen produk tertentu, ia menempelkan penanda ke komponen ini dan mengajukan pertanyaan perawatan melalui teks atau komunikasi lisan melalui koneksi jaringan. Pandangan teknisi ditangkap oleh kamera dan citra yang ditangkap oleh kamera termasuk informasi penanda dikirimkan ke pakar jarak jauh melalui jaringan secara real time.

Di situs pakar jarak jauh, penanda dikenali dan pakar menambahkan konten virtual, seperti teks, anak panah, model komponen untuk membuat skenario perawatan. Kemudian, pemandangan yang dibangun dikirimkan ke tampilan teknisi sebagai penambahan. Selain itu, penambahan memainkan peran penting bagi pengguna untuk memahami detail produk yang sangat kompleks. Bahkan bentuk penambahan yang paling sederhana pun dapat meningkatkan kualitas dan efisiensi proses perawatan. Pengguna dilengkapi dengan HMD yang tembus pandang, yang mencakup kamera untuk mendeteksi komponen PC desktop.

Jika pengguna memerlukan dukungan untuk komponen tertentu pada PC, ia menempelkan penanda fisik pada komponen ini dan sistem menampilkan penambahan yang dihamparkan pada penanda ini yang melibatkan informasi perawatan. Proses perawatan dimulai dengan mengumpulkan gambar PC desktop dalam realitas dengan menggunakan kamera dan mengirimkan informasi gambar ke komputer terpisah, yang merekonstruksi gambar dengan melapiskan informasi virtual termasuk nama komponen PC pada posisi terkait. Setelah mengirimkan gambar akhir ke tampilan yang dipasang di kepala, pengguna akhirnya dapat melakukan tindakan yang diperlukan dengan bantuan penambahan.

Teknik pelacakan sistem AR sangat penting untuk memastikan penerimaan mereka dalam industri. Penggunaan penanda untuk melacak dan mengidentifikasi bagian-bagian dari produk yang kompleks mungkin tidak efisien dalam beberapa kasus karena penanda menutupi bagian-bagian ruang kerja dan memerlukan garis pandang bebas dengan kamera, yang membatasi pergerakan teknisi. Oleh karena itu, menghilangkan penanda dapat dianggap lebih alami dan ramah pengguna dalam sebagian besar situasi. Contoh pendekatan pelacakan tanpa penanda diterapkan oleh Metaio GmbH untuk operasi pemeliharaan di industri otomotif.

Proyek ini menampilkan tampilan tembus pandang optik yang berkomunikasi secara nirkabel dengan aplikasi AR yang berjalan pada notebook standar. Algoritme pelacakan tanpa penanda yang diusulkan didasarkan pada fitur titik 2D dari gambar video yang diambil dari kamera yang dipasang pada HMD dan model desain berbantuan komputer (CAD) yang telah diproses sebelumnya dari peralatan yang dirawat. Setelah sinyal kamera video dikirimkan ke

notebook, tempat pelacakan dan penambahan terjadi, aliran video lengkap yang ditambah yang menyediakan instruksi perbaikan virtual, pelabelan komponen, dan animasi untuk langkah-langkah pemeliharaan dikirim kembali ke HMD. Sistem ini memungkinkan pengguna untuk melakukan tugas pemeliharaan tanpa intervensi apa pun terhadap lingkungan.

Selain teknik pelacakan sistem AR, pilihan perangkat yang digunakan untuk menampilkan penambahan juga penting untuk pengalaman pengguna. Karena sebagian besar tampilan yang dipasang di kepala berisi berbagai komponen perangkat keras seperti sensor dan kamera, perangkat tersebut merupakan perangkat besar dengan bobot tinggi dan bahkan mungkin memiliki bidang pandang sempit dengan resolusi rendah. Untuk mengatasi masalah ini, lengan robot yang membawa kamera dan proyektor pico untuk menerima tampilan pengguna dan memproyeksikan augmentasi ke ruang kerja pengguna diusulkan.

Pengguna dapat mengarahkan lengan robot ke titik di mana ia secara khusus membutuhkan bantuan dan kamera pada lengan robot mentransmisikan video langsung dari ruang kerja ke pakar jarak jauh melalui jaringan. Setelah menganalisis pemandangan pekerja, pakar jarak jauh dapat menggambar teks, pointer, atau grafik lain yang menyorot instruksi untuk pekerja dan mengirim informasi kembali ke proyektor pada lengan robot untuk ditampilkan ke ruang kerja pengguna.

### **Perakitan**

Operasi perakitan melibatkan manipulasi dan penyambungan bagian-bagian terpisah untuk membentuk suatu kesatuan. Khususnya untuk produk yang kompleks, yang jumlah bagiannya banyak, operasi perakitan dapat menjadi tugas yang agak sulit untuk dikelola. Seperti dalam proses perawatan lainnya, operasi perakitan juga melibatkan beberapa langkah, seperti, (1) analisis, di mana pekerja mengunjungi lokasi dan mengumpulkan semua informasi yang terkait dengan tugas tersebut dan membuat perencanaan untuk perakitan; (2) diagnostik, di mana pekerja menyesuaikan dukungan untuk tugas tersebut dengan keterampilannya; dan (3) terapi, di mana alat pendukung yang telah disiapkan yang mencakup instruksi untuk tugas perakitan diserahkan kepada pekerja.

Fase terapi merupakan langkah yang paling tepat di mana AR dapat memberikan kontribusi. Aplikasi perakitan AR menggabungkan objek virtual dengan lingkungan nyata untuk meningkatkan desain dan proses perencanaan perakitan dengan menggunakan augmentasi waktu nyata dengan teknologi pelacakan dan tampilan di bidang pandang pekerja.

Dengan menumpangkan informasi instruksi berurutan untuk memandu tugas perakitan ke bidang pandang pekerja, waktu penyelesaian perakitan dan jumlah upaya dapat dikurangi. Saat merancang konten virtual untuk instruksi berurutan, tidak perlu memvisualisasikan tugas perakitan yang sangat berulang kecuali jika tugas tersebut dieksekusi dalam konteks yang berbeda atau dengan objek yang berbeda.

Alat pendukung, seperti manual kertas atau elektronik, gambar atau skema, sering kali terpisah dari peralatan. Oleh karena itu, pekerja biasanya harus mengubah fokus mereka antara instruksi dan bagian yang dirakit, yang menyebabkan hilangnya waktu yang berharga, peningkatan kesalahan perakitan, gerakan berulang, dan berkurangnya produktivitas.

Teknologi AR memungkinkan pengintegrasian informasi virtual apa pun ke tempat yang

tepat di mana pekerja melakukan suatu tindakan, yang mengakibatkan tidak ada perubahan fokus pekerja. Jika instruksi dirancang sebagai animasi tiga dimensi, maka pekerja bahkan dapat mengamati tindakan dari berbagai sudut untuk memahami hubungan spasial yang terlibat. AR juga dapat mempercepat pembelajaran tugas perakitan sederhana tanpa merujuk pada materi pelatihan terpisah.

### **Operasi Kolaboratif**

Teknologi AR juga telah digunakan dalam operasi kolaboratif, seperti desain produk, rapat desain kolokasi atau jarak jauh, permainan, dll. Tempat fisik untuk komunikasi tatap muka, perangkat presentasi, materi yang diperlukan seperti dokumen atau buku catatan, dan akses intra- atau internet. Untuk memenuhi kondisi dunia nyata ini dengan skenario AR, persyaratan berikut perlu dipenuhi; akses tanpa batas ke semua data digital, visualisasi konten 3D, kemampuan interaksi dengan data digital, dan kolaborasi jarak jauh. Dalam hal desain, kolaborasi adalah aktivitas teknis yang berpusat pada manusia yang melibatkan lebih dari satu desainer dalam proses mendesain produk.

Demi efektivitas proses desain kolaboratif, lebih baik jika para desainer memiliki kesadaran yang baik satu sama lain bersama dengan interaksi yang intensif di antara mereka sendiri. Para ahli atau desainer di lokasi yang berbeda juga dapat berinteraksi dengan produk atau model 3D yang sama melalui lingkungan berbagi informasi, yang dapat berupa misalnya, video langsung. Karena pengguna dapat melihat dunia nyata saat mengerjakan model virtual, mereka merasa lebih nyaman dan aman.

Kolaborasi diperlukan dalam desain dan pengembangan produk. Misalnya, dalam industri otomotif dan kedirgantaraan, karena proses desain dan pengembangan terdiri dari banyak langkah berulang, bagian-bagian produk harus saling sesuai secara geometris dan fungsional serta dipersiapkan untuk proses produksi dan servis. Langkah-langkah ini melibatkan pertimbangan semua persyaratan proses ini dan menemukan solusi terbaik di mana banyak proses pengambilan keputusan berlangsung yang tidak dapat dilakukan oleh satu orang.

Oleh karena itu, di sebagian besar perusahaan, sering terjadi pertemuan dengan para spesialis untuk membuat keputusan. Dalam pertemuan tersebut, desainer atau pengembang menggunakan data digital (misalnya, model CAD), maket fisik atau prototipe, yang memakan waktu dan mahal untuk dibangun. Selain itu, pengguna harus terikat meja ketika menggunakan solusi CAD dan mereka hampir tidak dapat memeriksa hubungan spasial dalam model 3D dari monitor 2D.

Sistem yang dikembangkan yaitu MagicMeeting menyediakan sistem AR kolaboratif yang dengannya sekelompok ahli membahas desain suatu produk. Dalam sistem yang dikembangkan, versi digital dari objek yang akan dirancang ditampilkan pada pelat dengan spidol dan para ahli dapat berinteraksi dengan objek virtual dengan menggunakan antarmuka pengguna yang nyata. Semua ahli memakai HMD dan melihat gambar yang datang dari kamera eksternal yang menampilkan augmentasi. Salah satu fungsi yang paling menarik dari sistem ini adalah bahwa jumlah desktop 2D virtual yang tidak terbatas dapat ditempatkan di adegan AR yang dengannya seorang ahli dapat melihat representasi 2D dari model 3D seperti dalam

aplikasi desktop 2D tradisional dan membuat perubahan pada model.

AR dapat menawarkan integrasi model 3D item ke dalam lingkungan rapat, yang lebih mudah dimodifikasi dan membuat perubahan radikal tanpa membangun model fisik aktual dari suatu item. Sistem AR kolaboratif untuk desain produk. Dalam sistem ini, setiap pengguna mengenakan perangkat yang dipasang di kepala dan dapat dengan bebas berjalan di sekitar objek untuk mengamati augmentasi dari perspektif yang berbeda. Para pengguna dapat berada di ruangan yang sama atau didistribusikan di lokasi yang berbeda.

Salah satu keuntungan dari sistem ini adalah bahwa dengan menggunakan teknologi AR, modifikasi yang dibuat pada desain bagian dapat ditampilkan secara dinamis sebelum model CAD diperbarui. Dengan augmentasi model 3D, pengguna dapat memutuskan dengan mudah apakah desain yang diperbarui adalah yang mereka inginkan. Model CAD objek hanya akan diperbarui di server setelah desainer sepenuhnya puas dengan modifikasi tersebut.

Namun, memanipulasi model 3D dengan menggunakan sistem AR seperti dalam sistem CAD tradisional merupakan tugas yang lebih sulit karena akurasi pelacakan dan registrasi sistem AR yang rendah saat ini, sehingga seseorang tidak dapat merancang model dengan parameter yang tepat karena keterbatasan perangkat lunak dan perangkat keras. Operasi kolaboratif dan teknologi AR juga telah digabungkan untuk tujuan pendidikan.

Pengguna sistem mengenakan HMD stereoskopik tembus pandang dengan kamera untuk pelacakan dan komputer ransel, sarung tangan jepit untuk input dua tangan. Pengguna dapat memeriksa objek 3D yang diperbesar bersama-sama melalui arsitektur jaringan yang melihat tindakan satu sama lain. Sistem ini menggunakan pelacakan berbasis penanda untuk menampilkan pembesaran. Hasil percobaan yang dilakukan menunjukkan bahwa lingkungan pengajaran semacam ini memiliki banyak keuntungan yang dapat mengubah interaksi tradisional antara siswa dan guru di masa mendatang.

Masalah penting lainnya dalam lingkungan AR jarak jauh atau kolokasi ini adalah sinkronisasi adegan pada tampilan peserta. Proses kolaborasi dimulai dengan visualisasi, di mana setiap pengguna melihat dan memeriksa objek virtual dengan menggunakan, misalnya, perangkat yang dipasang di kepala. Setiap pengguna dapat berinteraksi dengan fitur objek virtual dengan menggunakan, misalnya, perangkat haptik, dan pengguna lain dapat mendiskusikan perubahan yang disarankan. Jika suatu perubahan diterima dalam rapat, perubahan tersebut diterapkan pada objek dan perlu disinkronkan pada tampilan setiap pengguna.

Mekanisme untuk mencegah kemungkinan kebingungan yang disebabkan oleh masalah sinkronisasi. Mekanisme yang diusulkan memungkinkan satu pengguna untuk memodifikasi objek virtual hanya jika pengguna memiliki hak pengeditan. Perubahan yang dilakukan oleh pengguna, yang memiliki hak pengeditan, dibahas lebih lanjut dalam kelompok tersebut.

### **Pelatihan**

Untuk meningkatkan kemampuan, produktivitas, dan kinerja pengguna atau karyawan, tugas pelatihan sangat penting bagi perusahaan. Operasi pelatihan menuntut biaya tinggi bagi perusahaan, terutama ketika komponen yang mahal harus dipelajari atau diperbaiki oleh

pelanggan atau karyawan. Perusahaan menginvestasikan anggaran yang besar untuk mengembangkan model virtual untuk melatih karyawan mereka guna mengurangi waktu pelaksanaan dan mencegah kemungkinan kesalahan. Selain itu, jika peralatan yang sebenarnya terlalu rumit, tidak semua bagian peralatan akan dimodelkan karena pemodelan merupakan tugas yang mahal. Situasi ini dapat meningkatkan risiko menghadapi kejutan yang dapat menyebabkan kebingungan bagi karyawan.

Ada beberapa jenis pelatihan tergantung pada konteksnya, seperti, pelatihan fisik, pelatihan di tempat kerja, pelatihan organisasi, pelatihan berbasis komputer, dll. Dianggap bahwa pelatihan berbasis komputer agak tidak memadai untuk tugas-tugas terkait pekerjaan yang luas dalam sistem pesawat terbang karena mengembangkan materi instruksional terperinci, seperti, skenario, berbagai jenis komponen dan kesalahan pesawat terbang, rumit dan mahal.

Selain itu, teknisi yang berpengalaman biasanya memiliki cara khusus dalam menangani masalah atau menyelesaikan tugas dan selanjutnya memiliki cara yang unik dalam mengajarkan suatu tugas. Faktor-faktor ini mungkin tidak tercakup dalam prosedur pelatihan dan teknisi pemula mungkin dilatih secara berbeda oleh para ahli atau pelatih lainnya. Untuk menyediakan cara menstandarisasi prosedur pelatihan, sistem AR dapat dikembangkan.

Dengan menggunakan dukungan solusi berbasis AR, penyampaian informasi tingkat ahli secara real time kepada pekerja pemula dapat mengurangi kemungkinan kesalahan. Selain itu, alih-alih menciptakan lingkungan simulasi untuk tujuan pelatihan, dengan menggunakan aplikasi AR, pelatihan dapat diterapkan di lingkungan kerja nyata, yang menghemat waktu dan anggaran, dan juga meningkatkan proses pelatihan dengan memungkinkan penyampaian umpan balik daring secara waktu nyata. AR telah digunakan sebagai alat pendukung untuk proses pelatihan di berbagai bidang.

Sistem AR untuk meningkatkan keterampilan pengemudi dalam menangani mobil, dan pengalaman berkendara dengan melatih pengemudi untuk menghadapi kejadian tak terduga atau berbagai kondisi lingkungan yang menimbulkan situasi berbahaya bagi pengemudi. Sistem yang dikembangkan melengkapi berbagai skenario sebagai animasi melalui tampilan yang dipasang di kepala yang dikenakan oleh pelatih dan peserta pelatihan di dalam mobil saat mengemudi.

Konten virtual dikirimkan ke tampilan yang dipasang di kepala oleh komputer notebook yang diletakkan di kursi belakang. Sistem yang dikembangkan dianggap sebagai kontribusi terhadap aplikasi yang ada dan efektif untuk mengilustrasikan pemandangan nyata. Dalam studi lain, sistem pelatihan berbasis komputer dikembangkan dengan menggunakan manfaat AR. Dalam sistem yang dikembangkan, AR digunakan untuk menginstruksikan pengguna dengan langkah-langkah untuk merakit potongan-potongan objek yang membingungkan menjadi satu kotak atau kubus besar.

Kamera digunakan untuk melacak posisi objek dan komputer desktop digunakan untuk menghitung posisi yang benar untuk setiap objek dan menampilkan instruksi seperti teks, ID objek, rangka kawat, gambar untuk mengarahkan pengguna untuk penempatan objek yang benar. Sistem ini juga memperingatkan pengguna jika terjadi penempatan objek yang salah.

Pengguna dapat melihat augmentasi baik dari monitor atau dari tampilan yang dipasang di kepala. Pengujian pengguna terhadap sistem menunjukkan bahwa menggabungkan AR ke dalam pelatihan menghemat hingga 85% untuk pertama kali perakitan dan 61% pada kedua kalinya perakitan. Juga disajikan dalam penelitian bahwa jumlah langkah perakitan berkurang dengan menggunakan pelatihan AR.

Operasi pelatihan jarak jauh juga merupakan area aplikasi penting AR. Pelatihan diberikan kepada teknisi pemula di lokasi oleh para ahli jarak jauh. Praktik pelatihan untuk memperbaiki sakelar ATM dikelola oleh seorang ahli jarak jauh yang memberikan instruksi kepada peserta pelatihan di lokasi yang berbeda. Praktik pelatihan tersebut melibatkan pelepasan papan sakelar dari sakelar ATM dan pemasangan chip pada papan sakelar.

Sementara peserta pelatihan mencoba menangani operasi ini, peserta pelatihan lainnya mengamati tindakan peserta pelatihan lokal melalui stasiun kerja jarak jauh untuk mendapatkan pengalaman. Peserta pelatihan lokal dilengkapi dengan komputer yang dapat dikenakan yang melibatkan kamera dan mikrofon untuk berkomunikasi dengan ahli jarak jauh. Untuk berbagi pandangan peserta pelatihan lokal dengan ahli jarak jauh dan peserta pelatihan lainnya, arsitektur klien-server dibuat. Sistem yang dikembangkan menggunakan pelacakan berbasis penglihatan untuk melapisi penambahan dengan mendeteksi penanda yang spesifik untuk setiap instruksi.

Selain itu, karena proses pelacakan berbasis penglihatan membutuhkan komputasi yang mahal, proses ini ditangani di server untuk mengurangi beban kerja komputer yang dapat dikenakan. Setelah kamera pada komputer yang dapat dikenakan menangkap video langsung dan mengodekannya, kamera tersebut mentransfer video tersebut ke server untuk menganalisis dan menghitung posisi penambahan yang terkait dengan identifikasi penanda, dan akhirnya mengirimkan informasi model 3D terkait ke komputer yang dapat dikenakan, yang menampilkan model di atas penanda.

Model 3D yang ditumpangkan dapat berupa instruksi untuk menarik papan tombol dari ATM atau gambar penunjuk yang menunjukkan di mana tindakan yang diperlukan harus diterapkan. Setelah model 3D ditumpangkan pada penanda fisik, peserta pelatihan melakukan tindakan tersebut dan pakar jarak jauh mengarahkan peserta pelatihan untuk langkah berikutnya atau memberikan instruksi lebih lanjut jika terjadi tindakan yang salah.

## **Kesimpulan**

Dalam bab ini, penulis merangkum status terkini AR dalam operasi industri. Sistem perangkat keras dan perangkat lunak AR telah berkembang pesat, namun, masih ada beberapa masalah terkait dengan teknologi ini seperti pelacakan dan registrasi, resolusi dan bidang pandang sempit di antara HMD, pelacakan objek yang dinamis dan berubah bentuk, penggunaan baterai perangkat yang tinggi, dll. yang perlu dipecahkan agar teknologi AR dapat diadopsi sepenuhnya ke dalam industri dan juga agar dapat diterima oleh masyarakat. Ada juga kebutuhan penting untuk membuat perangkat AR yang lebih kecil, portabel, ringan, dan murah yang juga akan memungkinkan pertumbuhan aplikasi AR yang cepat.

Namun, manfaat AR dalam hal membantu orang di lapangan dengan manual atau

animasi digital yang disajikan ke dunia nyata menjadikannya salah satu teknologi terpenting dalam dekade berikutnya. AR adalah salah satu teknologi unik yang memungkinkan kolaborasi interaktif jarak jauh antara orang-orang, investasi rendah pada manufaktur dan pelatihan, lebih sedikit kesalahan operasional, dan waktu rilis produk yang lebih singkat. Untuk meningkatkan kinerja AR saat ini di industri, alat pembuat konten harus dikembangkan untuk memudahkan persiapan konten digital karena dibutuhkan banyak waktu dan investasi untuk menghasilkan manual digital, model 3D objek, atau jenis augmentasi lainnya.

Selain itu, Realitas Campuran (MR) harus diperhitungkan untuk tujuan industri. MR menambahkan konten virtual ke dalam lingkungan nyata sama seperti AR, tetapi ia menjangkarkan konten virtual ke suatu tempat di lingkungan nyata yang memfasilitasi interaksi pengguna-ke-komputer dan pengguna-ke-pengguna dan memungkinkan mereka untuk diperlakukan sebagai nyata.

Misalnya, dengan perangkat HoloLens sebagai perangkat MR paling canggih di pasar saat ini, seseorang dapat membangun representasi virtual orang lain yang terhubung dari jarak jauh ke sistem dan menampilkannya sebagai augmentasi pada tempatnya. Karena HoloLens dapat melacak posisi dan gerakan pengguna, augmentasi akan memainkan gerakan dan gerakan yang sama dari orang yang berada di jarak jauh. Teknologi ini dapat diterapkan dalam industri. Contoh kasus penggunaan adalah ketika teknisi lapangan bekerja pada mesin mobil dan menggunakan HMD untuk mengakses konten AR, karakter virtual dapat ditambahkan ke adegan yang menunjukkan kepada teknisi demonstrasi tugas atau memberikan instruksi lisan, dsb.

## **BAB 13**

### **TEKNOLOGI DAN APLIKASI MANUFAKTUR ADITIF**

Teknologi Manufaktur Aditif (AM) telah menjadi teknik manufaktur yang sangat populer dalam 30 tahun terakhir. Manufaktur aditif menggunakan model Computer Aided Design (CAD) 3D untuk memproduksi komponen lapis demi lapis dengan menambahkan material. Manufaktur Aditif memungkinkan untuk memproduksi geometri kompleks yang tidak dapat diproduksi menggunakan teknik manufaktur konvensional. Manufaktur aditif memungkinkan desain dan prototipe yang disesuaikan untuk diproduksi dengan mudah.

Selama tiga dekade terakhir, penelitian menyeluruh telah dilakukan untuk mengomersialkan teknik AM di berbagai bidang. Sebagai hasil dari penelitian ini, teknik AM digunakan dalam otomotif, kedirgantaraan, biomedis, kedokteran, energi, dan banyak bidang lainnya. Karena keunggulannya dibandingkan teknik manufaktur tradisional, manufaktur aditif dipandang sebagai salah satu pendorong yang memulai revolusi industri keempat. Dalam bab ini, penulis akan mengulas proses manufaktur aditif dengan memperkenalkan sejarahnya, menyajikan berbagai teknologi AM, memberikan contoh penggunaan AM di berbagai area aplikasi, dan dampaknya terhadap masyarakat kita.

#### **13.1 PENDAHULUAN**

Hingga saat ini, metode yang lazim dalam industri manufaktur adalah metode subtraktif, yang menghasilkan produk dengan presisi tinggi dengan menggiling material atau memotongnya dari blok material padat. Hal ini dapat dilakukan secara manual atau otomatis. Aspek terpenting dari metode subtraktif, terutama yang otomatis, adalah menghasilkan bentuk yang tepat dengan presisi tinggi. Namun, ada metode manufaktur lain yang dapat menantang metode subtraktif tradisional; manufaktur aditif atau dapat juga disebut pencetakan 3D. Teknik manufaktur aditif membangun suatu produk dengan menambahkan lapisan ke lapisan lain menggunakan bahan mentah.

Akar manufaktur aditif dapat ditelusuri kembali ke abad kesembilan belas, dan beberapa peneliti telah membuat definisi manufaktur aditif yang berbeda dari waktu ke waktu. Akar AM berasal dari abad kesembilan belas di bidang topografi dan fotopatung. Pada tahun 1972, Ciraud mendefinisikan manufaktur aditif sebagai membangun suatu produk dengan melelehkan material menggunakan seberkas energi dan meletakkan material yang meleleh di atas lapisan.

Sementara itu, ilmuwan Hideo Kodama dan Alan Herbert mengembangkan teknologi yang relevan dengan manufaktur aditif dan mengujinya pada awal tahun 1980-an. Teknologi ini digambarkan sebagai pembuatan prototipe dengan menambahkan bahan lapis demi lapis. Pada tahun 1986, Chuck Hull menemukan teknik stereolitografi (SL) yang dapat diakui sebagai tonggak sejarah dalam manufaktur aditif. Charles Hull pertama kali menerbitkan penelitiannya tentang mesin stereolitografi pada tahun 1984 kemudian mematenkannya pada tahun 1986. Teknologi lain dalam manufaktur aditif seperti Selective Laser Sintering (SLS) dan Fused

Deposition Modeling (FDM) diperkenalkan pada akhir tahun 1980-an.

Dengan kemajuan teknologi, beberapa perusahaan AM didirikan pada pertengahan tahun 1990-an. Selama lebih dari dua dekade teknologi dan teknik AM dikembangkan untuk menjawab kebutuhan industri. Pada tahun 2005, proyek RepRap (Replication Rapid-Prototyper) diperkenalkan. Proyek RepRap memungkinkan individu untuk memanfaatkan pencetakan 3D dengan menyediakan kode sumber terbuka. Teknologi ini pertama kali diperkenalkan oleh Dr. Adrian Bowyer dari University of Bath, Inggris.

RepRap memiliki kemampuan untuk memproduksi hampir semua komponennya, dengan kata lain, ia dapat memproduksi dirinya sendiri. Proyek ini membantu teknologi tersebut menjadi penting dan merevolusi pembuatan prototipe cepat, perbaikan, dan manufaktur pribadi. Sejak penemuan manufaktur aditif, teknologi AM telah digunakan di banyak bidang industri seperti otomotif, manufaktur, penerbangan, medis, perhiasan.

### 13.2 TEKNOLOGI MANUFAKTUR ADITIF (AM)

Selama lebih dari 30 tahun terakhir, para peneliti dan perusahaan industri telah mengembangkan beberapa teknik untuk manufaktur aditif dan pembuatan prototipe cepat. Kami akan mengulas beberapa teknik ini di sub-bagian berikut. Teknologi AM yang umum melibatkan tiga fase:

1. Model padat 3D dirancang dalam perangkat lunak CAD dan diubah ke dalam format Standard Tessellation Language (STL) atau format file AM yang lebih baru.
2. Mesin AM memanipulasi file untuk menyesuaikan posisi dan orientasi komponen.
3. Mesin AM memproduksi komponen berdasarkan lapisan berurutan.

#### **Stereolitografi**

Stereolitografi (SL) adalah teknik pembuatan prototipe cepat pertama yang dikembangkan dan dipatenkan oleh Charles (Chuck) W. Hull pada tahun 1986. Kemudian 3D Sytems Inc didirikan untuk mengomersialkan patennya. Prinsip kerja SL adalah memadatkan polimer cair fotosensitif dengan menggunakan laser ultraviolet.

Komponen yang dimodelkan 3D dalam perangkat lunak CAD diubah menjadi file STL. Dalam file STL, komponen yang dimodelkan dibagi menjadi beberapa penampang melintang, yang berisi informasi tentang setiap lapisan. Ketebalan lapisan menentukan resolusi, yang bergantung pada peralatan yang digunakan. Struktur pendukung diperlukan untuk membangun bagian tersebut. Sinar laser menelusuri informasi penampang yang disediakan oleh berkas STL untuk membangun bagian tersebut lapis demi lapis. Ketika proses selesai, polimer cair berlebih dikeringkan dan disimpan untuk digunakan kembali.

#### **3DP**

Pencetakan tiga dimensi (3DP) dipatenkan pada tahun 1993. Dalam teknik 3DP, bubuk polimer dilebur menggunakan pengikat cair berbasis air yang dipasok dari nosel jet. Partikel bubuk direkatkan lapis demi lapis. Berbagai macam polimer dapat digunakan untuk proses ini. Keuntungan dari proses ini adalah; cepat dan biaya material rendah. Di sisi lain, permukaan akhir kasar dan ukuran bagian terbatas.

### **Fused Deposition Modeling**

Dalam teknik Fused Deposition Modelling (FDM), kepala cetak mencairkan material termoplastik dan mengendapkannya dalam lapisan pada substrat. Ketebalan lapisan biasanya 0,25 mm. Teknik FDM dipatenkan pada tahun 1992.

Material dipanaskan secukupnya hingga menjadi kental sehingga dapat langsung memadat. Berbagai jenis material dapat digunakan seperti lilin, logam, dan keramik. Biaya perawatan yang rendah dan ukurannya yang ringkas merupakan atribut positif dari teknik FDM. Di sisi lain, fluktuasi suhu menyebabkan delaminasi dan waktu pencetakan menjadi lama.

### **Selective Laser Sintering**

Teknik Selective Laser Sintering (SLS) adalah suatu proses di mana material cetak (polimer, logam, keramik, dan kaca) disatukan dengan menggunakan sinar laser karbon dioksida. Teknologi ini dipatenkan pada tahun 1989. Material serbuk disatukan lapis demi lapis sesuai dengan desain yang ditentukan.

Material serbuk yang disinter akan membentuk desain 3D sementara material yang tidak disinter akan dibersihkan untuk digunakan kembali setelah komponen dibuat. SLS digunakan untuk mencetak komponen kompleks secara 3D dengan cepat dan memberikan daya tahan yang lebih baik dibandingkan dengan teknologi manufaktur aditif lainnya. Kerugian dari SLS adalah banyaknya parameter yang perlu disetel untuk mendapatkan hasil akhir permukaan yang lebih baik.

### **Pembuatan Objek Laminasi**

Teknik Pembuatan Objek Laminasi (LOM) dikembangkan pada tahun 1988. LOM merupakan gabungan dari teknik pembuatan subtraktif dan aditif. Dalam proses LOM, selebar material mewakili setiap lapisan. Pemotongan laser digunakan untuk membuat setiap lembar material sesuai dengan informasi file STL.

Lembaran material selanjutnya disatukan dengan menggunakan panas dan tekanan. Material seperti kertas, plastik, logam, dan material komposit dapat digunakan sebagai material bangunan. LOM merupakan teknik pembuatan aditif yang murah, tetapi dapat menciptakan rongga internal, yang dapat menurunkan kualitas produk. LOM juga menyebabkan pemborosan dengan mengurangi material.

### **Pembentukan Jaring Rekayasa Laser**

Pembentukan Jaring Rekayasa Laser (LENS) merupakan proses pembuatan aditif di mana bubuk logam cair disuntikkan ke lokasi tertentu untuk membuat komponen 3D. Teknologi ini dikembangkan di Sandia National Labs dan dipatenkan pada tahun 2000. Selain membangun komponen 3D, LENS juga dapat digunakan untuk memperbaiki komponen yang rusak.

## **13.3 KEUNTUNGAN DAN KERUGIAN MANUFAKTUR ADITIF**

Berikut ini adalah beberapa keunggulan yang membuat manufaktur aditif lebih unggul dibandingkan teknik manufaktur konvensional:

- Pengurangan limbah: Dalam teknik manufaktur subtraktif tradisional, sejumlah besar

bahan baku dipotong dan dibuang untuk memproduksi komponen. Di sisi lain, AM hanya menggunakan bahan baku yang dibutuhkan untuk memproduksi komponen dan bahan baku yang tersisa dapat digunakan kembali.

- Peningkatan waktu: Dengan teknik konvensional, produksi prototipe dapat memakan waktu beberapa hari atau bahkan minggu, sementara teknologi AM dapat menyediakan prototipe yang berfungsi sebagian besar dalam hitungan jam.
- Fleksibilitas produksi: Sebagian besar komponen memerlukan beberapa langkah manufaktur dan bengkel perakitan yang memengaruhi kualitas produk secara keseluruhan. Teknik AM memproduksi komponen dalam satu proses dan menghilangkan pengaruh operator terhadap kualitas produk.
- Peningkatan variasi: Karena komponen yang rumit dapat diproduksi dengan biaya persiapan yang rendah (mengubah desain dalam perangkat lunak CAD), produk yang dirancang khusus dapat dengan mudah diproduksi dengan biaya yang rendah.
- Beberapa kendala: Apa pun yang dapat dirancang dalam perangkat lunak CAD dapat diproduksi.
- Penurunan keterampilan tenaga kerja: Produksi otomatis memerlukan sedikit atau tidak ada keterampilan operator.

Meskipun teknologi AM merupakan industri yang berkembang pesat, beberapa kekurangannya menghalangi AM untuk bersaing dengan teknik manufaktur tradisional. Berikut ini adalah beberapa tantangan tersebut:

- Keterbatasan dimensi: Pada sebagian besar proses AM, polimer cair atau material bubuk digunakan untuk memproduksi lapisan. Karena kekuatan material ini rendah, komponen berukuran besar tidak dapat diproduksi menggunakan proses AM.
- Permukaan Kasar: Memproduksi komponen lapis demi lapis sering kali menghasilkan permukaan akhir yang tidak sempurna dan komponen yang sudah jadi sering kali memerlukan pascaproduksi.
- Produksi Massal: Proses AM tidak cocok untuk produksi massal karena kecepatannya yang rendah untuk memproduksi satu komponen.

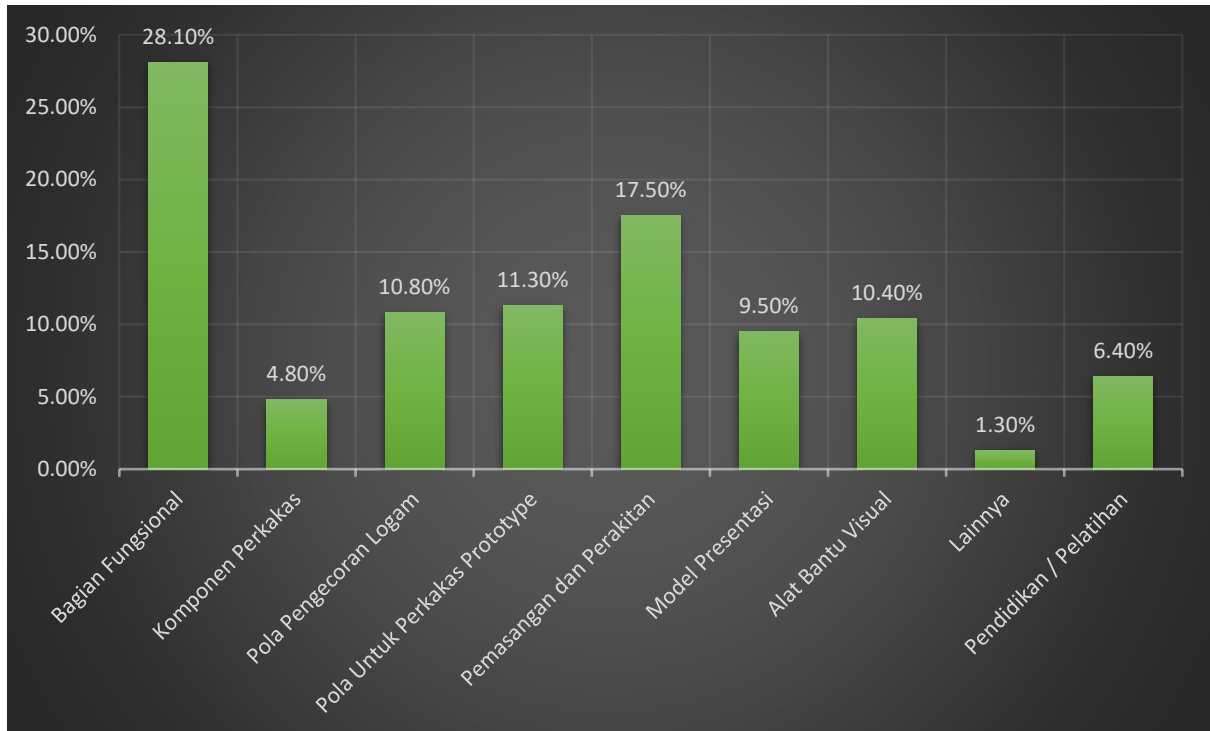
#### **13.4 BIDANG APLIKASI MANUFaktur ADITIF**

Keuntungan yang disebutkan pada bagian sebelumnya menjadikan AM penting bagi industri dalam lingkungan yang kompetitif. Selain itu, penelitian terus dilakukan untuk menyempurnakan proses AM guna menghilangkan kekurangannya. Teknologi AM digunakan dalam berbagai bidang aplikasi, seperti kedirgantaraan, otomotif, kedokteran, energi, dll.

Organisasi terutama menggunakan AM untuk komponen fungsional dan prototipe untuk pemasangan dan perakitan. Survei tersebut mengajukan pertanyaan "Bagaimana pelanggan Anda menggunakan komponen yang dibuat pada sistem AM Anda?" dengan pilihan jawaban berikut:

- Alat bantu visual (untuk teknisi, desainer, profesional medis, dll.)
- Model presentasi (termasuk arsitektur)
- Prototipe untuk pemasangan dan perakitan

- Pola untuk perkakas prototipe (termasuk cetakan karet silikon)
- Pola untuk pengecoran logam
- Komponen perkakas (dibuat langsung pada sistem AM)
- Komponen fungsional (untuk produksi jangka pendek, produksi seri, pembuatan prototipe, dll.)
- Pendidikan/penelitian
- Lainnya.



**Gambar 13.1** Penggunaan manufaktur aditif dalam industri [Diadaptasi dari

Gambar berikut menunjukkan persentase tujuan penggunaan lainnya (Gambar. 13.1). Laporan Wohlers menunjukkan bahwa teknologi AM sangat cocok untuk produk kompleks bervolume rendah seperti prototipe fungsional. Kami akan mengulas beberapa aplikasi ini di berbagai bidang di bagian berikut.

### Medis

Meskipun pembuatan prototipe cepat telah digunakan sejak lama dalam industri manufaktur, pembuatan prototipe ini baru mulai dilakukan dalam aplikasi perawatan kesehatan. Dalam hal ini, pembuatan prototipe cepat telah digunakan dalam berbagai aplikasi medis, seperti perawatan pasien perorangan, penelitian, dan sebagai alat pendidikan dan pelatihan selama beberapa tahun terakhir.

### Perencanaan Bedah

Di bidang bedah, pembuatan prototipe cepat telah dilibatkan untuk meningkatkan pemahaman akan kompleksitas, sehingga kualitas diagnostik dan perencanaan prabedah menjadi lebih berkembang. Selain itu, kegunaannya dalam bedah kraniofasial, bedah maksilofasial, bedah panggul, bedah saraf, bedah tulang belakang, bedah kardiovaskular dan

bedah viseral dibuktikan oleh penelitian di area yang tercantum, karena tidak hanya meningkatkan tahap diagnosis tetapi juga perawatan sebagai konsekuensi dari pra-perencanaan yang maju dan akurat yang menggambarkan langkah-langkah bedah sebelumnya dan meramalkan kemungkinan komplikasi dengan penilaian 3d.

Akibatnya, selain pengurangan waktu operasi dan penggunaan ruang operasi dengan cara yang hemat biaya, hal ini juga meningkatkan proses perencanaan radioterapi dan produksi pelindung radiasi untuk individu.

#### **Perancangan Implan dan Jaringan**

Teknik pembuatan prototipe cepat juga digunakan dalam prostesis medis dan perancangan implan yang memungkinkan prostesis disesuaikan, tidak seperti prostesis berukuran standar yang tersedia untuk memenuhi persyaratan banyak prosedur bedah, tetapi tidak semuanya. Dalam hal ini, kebutuhan implan yang disesuaikan terletak pada pasien yang tidak berada dalam kisaran standar dalam hal penyakit yang mereka derita atau ukuran implan yang mereka butuhkan, dan hasil pembedahan yang lebih berhasil sebagai hasilnya dengan pemasangan dan pemenuhan kebutuhan tubuh.

Teknik pembuatan prototipe cepat telah digunakan dalam merekonstruksi banyak struktur anatomi termasuk mandibula dan restorasi gigi dalam bedah wajah dan lainnya seperti rekonstruksi pinggul, femoralis, sendi hemi-lutut yang mana biokeramik, logam biokompatibel dan keramik lebih disukai sebagai pengganti tulang.

Selain manfaat teknik ini dalam merekonstruksi tulang, pembuatan prototipe cepat dapat digunakan untuk penggantian jaringan lunak dan membuat perancah jaringan untuk pertumbuhan sel juga, sehingga memungkinkan penerapan produksi organ buatan bagi pasien di masa mendatang dengan penelitian lebih lanjut.

#### **Penelitian Medis**

Pembuatan prototipe cepat juga menciptakan area baru untuk penelitian ilmiah. Seperti yang sudah jelas, penelitian yang didasarkan pada hantu daripada objek yang diproduksi oleh pembuatan prototipe cepat hanya akan menghasilkan tingkat pemahaman yang tidak memuaskan untuk kedua proses fisiologis dan patologi kompleks. Karena model padat 3D akan menggambarkan kompleksitas lebih baik daripada visual yang 2D atau 3D. Dalam hal ini, berbagai jenis bahan seperti silikon atau logam dapat dipilih untuk digunakan dalam pembuatan berbagai model sesuai dengan kebutuhan pasien di bidang hemodinamik atau aerodinamik.

#### **Pendidikan dan Pelatihan Medis**

Prosedur dalam pembedahan mengharuskan anatomi manusia dan hubungan berbagai struktur ini untuk diketahui secara lengkap. Oleh karena itu, sekolah kedokteran mencoba memberikan pengetahuan terperinci kepada para mahasiswanya melalui mayat manusia pada tahap awal, kemudian mengintensifikannya dengan pembedahan sungguhan agar para mahasiswa memperoleh kebijaksanaan, karena memperoleh pengalaman di bidang yang akan dipilih kemudian, diinginkan sebelum menangani pasien sungguhan, karena pelatihan prosedur ini sebelumnya tidak hanya akan meningkatkan kemampuan dokter bedah, tetapi juga hasil tanpa risiko komplikasi.

Untuk memperoleh pengetahuan ini, meskipun visualisasi 2D atau 3D digunakan secara luas, secara umum visualisasi tersebut tidak cukup untuk menciptakan pemahaman yang memadai tentang struktur anatomi manusia. Oleh karena itu, pembuatan prototipe cepat diperkenalkan untuk meningkatkan pembelajaran mereka.

Baik dokter bedah muda maupun yang berpengalaman, setelah berlatih secara efisien pada model daripada mengoperasi pasien terlebih dahulu, merasa lebih percaya diri untuk operasi yang sebenarnya karena mereka memiliki kesempatan untuk mempraktikkan berbagai langkah bedah untuk memutuskan apakah salah satunya lebih baik daripada metode perawatan lainnya atau tidak, untuk menentukan strategi mereka untuk operasi yang sebenarnya.

### **Otomotif**

CRP Technology (Italia) untuk memproduksi komponen olahraga bermotor telah berhasil menerapkan berbagai teknik AM. Beberapa komponen yang diproduksi menggunakan teknik AM oleh CRP Technology adalah; kotak udara MotoGP 250R, penutup poros bubungan untuk mesin MotoGP, kotak roda gigi F1, penyangga sepeda motor, dan dasbor (CRPTechnology).

Teknik AM memberikan banyak keuntungan dalam pembuatan komponen MotoGP. Misalnya, teknik AM mengurangi berat kotak roda gigi F1 sebesar 20%–25% dan volume sebesar 20%. Selain itu, kemampuan untuk memproduksi desain yang rumit menghasilkan kekakuan torsi dua kali lipat, penyerapan daya yang lebih sedikit, dan keausan roda gigi yang lebih sedikit. Optomec menggunakan teknik LENS untuk memproduksi komponen mobil Red Bull Racing, seperti drive shaft spider dan braket suspensi gunung yang terbuat dari Ti6Al4V (paduan titanium) (Optomec).

Dengan menggunakan teknik AM, LENS, menghasilkan penghematan bahan baku lebih dari 90% dan mengurangi waktu dan biaya produksi secara signifikan. Prometal menggunakan versi modifikasi dari teknik 3DP, proses Prometal, untuk membangun komponen mesin mobil penumpang dan mobil balap, seperti kepala silinder, blok mesin, dan intake manifold. Dengan menggunakan teknik AM, waktu produksi mesin mobil berkurang secara signifikan. Misalnya, blok mesin dengan saluran pendingin dan saluran resirkulasi oli dapat diproduksi sepenuhnya hanya dalam waktu satu minggu.

### **Dirgantara**

Salah satu divisi perakitan dengan prospek tinggi untuk pencetakan 3D adalah industri produksi dirgantara. Potensi dana investasi bahan bakar karena lebih banyak komponen yang lebih ringan yang dibuat melalui pencetakan 3D merupakan manfaat yang paling menarik bagi bisnis avionik. Selain itu, pembangkitan dalam penerbangan mungkin dapat mengurangi emisi CO<sub>2</sub> terkait penghentian operasional dan permintaan pasokan energi primer total (TPES).

Industri ini bekerja berdasarkan 2 persyaratan pedoman penting—bobot ringan dan kesejahteraan tinggi. Pencetakan 3D telah memiliki kapasitas untuk membantu mengurangi bobot melalui produksi bentuk yang tidak dapat diprediksi dan bersih dengan jumlah sambungan yang lebih sedikit dan geometri banyak sisi. Namun, dari sudut pandang keselamatan, hal ini masih jauh dari menjadi standar yang solid.

Banyak kesulitan, misalnya desain pencetakan, porositas yang terbentuk, dan aliran cetak yang tidak merata, harus dipecahkan dan dihilangkan sepenuhnya. Ini hanya masalah waktu. Setelah itu terjadi, pencetakan 3D akan menggantikan metode perakitan yang semakin konvensional yang saat ini digunakan sebagai bagian dari bisnis avionik dan pasti akan mengalami penyesuaian dan pengembangan yang terkelola.

Di antara berbagai prosedur manufaktur aditif, yang memenuhi kebutuhan bisnis pesawat terbang adalah Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM), dan Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM).

Sejumlah besar penelitian sedang dilakukan untuk memanfaatkan berbagai jenis logam dan amalgam logam untuk manufaktur aditif. Polimer, komposit yang dibakar, senyawa aluminium, baja, dan artikel titanium dapat dicetak dengan ketebalan lapisan dasar 20–100  $\mu\text{m}$ , bergantung pada strategi manufaktur aditif yang digunakan dan kondisi fisik material.

Namun, dari perspektif perdagangan aeronautika, lebih banyak signifikansi diberikan terhadap amalgam berbasis Ti dan Ni. Komposit berbasis nikel disukai dalam penerbangan karena sifatnya yang mudah dibentuk, ketahanan terhadap kerusakan, dan ketahanan terhadap konsumsi/oksidasi. Karena Kombinasi Ti, Ti-6Al-4V, karena laju pendinginan beragam untuk bentuk SLM dan EBM, struktur mikro segmen Ti6Al4V yang dihasilkan bersifat khas yang menghasilkan berbagai kekerasan dan kelenturan untuk kedua prosedur ini.

Meskipun sedang mengalami kemajuan dalam pekerjaan penelitian yang serius, tingkat penerimaan pencetakan 3D dalam industri produksi penerbangan masih moderat. Hal ini dapat dikaitkan dengan beberapa alasan. Kekhawatiran utama adalah persyaratan sertifikasi yang ketat yang tidak dapat dipisahkan dari keamanan udara dan ruang angkasa. Pengujian dan langkah-langkah keamanan untuk manufaktur aditif dalam penerbangan masih dalam proses. Selain itu, sulit untuk membedakan susunan prinsip sertifikasi mengingat inovasi manufaktur aditif yang khas masih dalam tahap pengembangan penuh.

### **Pendidikan**

Lembaga pendidikan di semua tingkatan mulai menyadari pentingnya inovasi pencetakan 3D dan telah mulai menggabungkan mesin-mesin ini ke dalam fasilitas penelitian mereka. Printer 3D mendorong pedoman cerdas dalam ide-ide dan kerangka kerja khusus yang andal dengan fokus negara pada kegiatan pembelajaran sains, teknologi, teknik, dan matematika (STEM). Printer 3D memungkinkan guru untuk memberikan model fisik yang dapat disentuh, dirasakan, dan akhirnya diuji oleh peserta didik dalam berbagai keterbatasan fisik. Misalnya, kelas dapat mencetak ekstensi dan menguji karakteristik beban diferensial dari berbagai kerangka dasar

Printer 3D dapat membuat berbagai macam mesin sederhana seperti peralatan atau katrol dan bahkan sekrup. Rincian peralatan, katrol, dan kerangka terpadu dari berbagai peralatan atau banyak katrol dapat dibahas di kelas sebelum disampaikan. Prosedur ini memberikan perspektif yang lebih masuk akal kepada peserta didik tentang kerangka dan periode pembuatan perakitan, jika dilakukan dengan benar, prosedur ini dapat memicu minat ilmiah peserta didik dengan membuat perhitungan antara waktu komponen diuji dan waktu komponen tersebut benar-benar muncul. Kemudian, susunan peralatan atau katrol dapat

dirakit dan digunakan dalam praktik laboratorium kelas.

Pencetak 3D juga dapat meningkatkan kelas yang didasarkan pada perangkat lunak pemodelan 3D. Sebagian besar kelas pemodelan 3D diajarkan di laboratorium komputer dan jarang menghasilkan produksi model fisik. Hal ini dapat menyebabkan pemisahan antara manifestasi dalam domain digital dengan kebutuhan yang dialami di dunia fisik. Jika komponen hanya digariskan dalam perangkat lunak pemodelan 3D, peserta didik tidak memahami kerumitan yang muncul saat mengubah model tersebut menjadi komponen fisik. Pencetak 3D dapat membuat komponen yang digariskan dengan sangat baik yang dapat dipelajari secara fisik oleh peserta didik. Tinjauan ini akan secara langsung memengaruhi penanganan desain keseluruhan.

Pembelajar akan memiliki kapasitas untuk melihat kesalahan mereka pada bagian tersebut, membuat modifikasi pada model lanjutan mereka, dan mencetak bagian lain untuk memeriksa apakah penyesuaian yang mereka buat pada model tersebut memadai.

Kantor instruksi inovasi dan perancangan menarik siswa dalam berbagai macam latihan pembelajaran. Terlepas dari apakah siswa mempelajari tentang kerangka kerja mekanis, desain dan pembuatan item, atau kerangka kerja listrik, kemampuan beradaptasi printer 3D dapat meningkatkan latihan ini.

Kerangka kerja listrik biasanya memerlukan semacam papan kerja atau tempat khusus. Tempat yang telah dirakit sebelumnya untuk tugas mungkin sulit dipahami, tetapi printer 3D dapat digunakan untuk membuatnya. Printer 3D dapat menghasilkan lembaran nonkonduktif yang dimodifikasi atau tempat untuk sirkuit listrik. Lembar proyek dasar untuk proyek pengaturan dan sirkuit paralel dapat dengan mudah dibuat dengan printer 3D.

Printer sangat berharga untuk aktivitas yang lebih tidak terduga. Di Illinois State College, sekelompok mahasiswa menggunakan printer 3D untuk mengirimkan sebagian besar segmen penginapan khusus untuk stereo yang dikendalikan sinar matahari. Percetakan 3D dapat mengubah inovasi dan instruksi perancangan.

Gagasan "berpikir global, berproduksi lokal" tidak pernah lebih jelas. Inovasi pencetakan 3D telah membuat kemajuan besar dalam beberapa tahun terakhir dan sekarang lebih masuk akal daripada sebelumnya. Fleksibilitas mesin ini memberi instruktur inovasi dan perancangan kapasitas untuk menarik siswa mereka dengan berbagai latihan berbasis STEM yang membantu memenuhi pedoman pengajaran.

### **Bioteknologi**

Pencetakan 3D telah memengaruhi pencitraan restoratif secara signifikan di bidang ilmu hukum, dengan mempertimbangkan perbaikan anatomi luka substansial dari pemeriksaan CT dan X-ray. Misalnya, model cedera internal dan eksternal telah direproduksi yang mempertimbangkan klarifikasi temuan hukum yang lebih baik, sekaligus menghindari kebutuhan untuk menghadirkan bukti yang memberatkan di hadapan keluarga korban.

Sistem pencetakan 3D digunakan untuk mereproduksi potongan tengkorak dari cedera kepala yang memaksa dan membantu identifikasi senjata dan kepastian komponen cedera yang menyebabkan kematian. Pemanfaatan pencetakan 3D yang serupa melihat perbaikan tengkorak setelah cedera traumatis untuk mengetahui penyebab cedera, dengan hasil yang

sama dengan yang dicapai dengan menggunakan teknik tradisional untuk memisahkan tulang dari korban.

Penilaian terukur terhadap tengkorak yang terdistorsi dari abad kedelapan belas menghasilkan reproduksi wajah berdasarkan cetakan 3D dari tengkorak tersebut, yang darinya para pembuatnya menduga alasan terjadinya perubahan bentuk.

### **Elektronik**

Ada banyak sekali aplikasi yang berkaitan dengan rekonsiliasi pencetakan 3D dan perangkat keras, dan mengingat bahwa hubungan ini masih dalam tahap awal, pendirian yang telah dibangun sejauh ini menjanjikan untuk upaya di masa mendatang. Baterai partikel litium telah dicetak 3D dengan saran dalam penyimpanan vitalitas.

Inovasi pencetakan 3D telah digunakan untuk membuat sel elektrokimia yang dapat digunakan. Model model konduktif listrik dibuat dengan mencetak 3D struktur berbasis mortar yang mengandung serat nano karbon. Pencetakan 3D berbasis inkjet yang tepat dari tembaga konduktif telah dicapai, dengan biaya rendah dan limbah material yang rendah, dan memiliki aplikasi dalam penerapan material konduktif khususnya untuk pembuatan papan sirkuit.

### **Desain**

Model Pencetakan 3D digunakan untuk peralatan representasi dalam desain. Meskipun demikian, mereka melaporkan masalah dalam mereplikasi elemen halus yang mewah dan struktur yang tidak didukung, misalnya, tumpukan dan pagar. Solusi mereka adalah membuat bagian atas kecil di sekitar detail ini untuk memastikannya bertahan dari tahap penghilangan serbuk. Membangun bidang tanah juga memperkuat struktur dan memastikan detail di permukaan tanah.

Masalah lain dengan model desain adalah bahwa model 3D struktur tidak dapat diskalakan secara konsisten sehingga cukup kecil untuk volume produksi Printer 3D standar. Ketebalan dinding akan terlalu kecil. Ini berarti model desain berbantuan komputer harus dirancang khusus untuk tahap pembuatan prototipe. Ini tidak efektif dan ada risiko tambahan dalam interpretasi manusia dari informasi desain berbantuan komputer pertama ke dalam informasi desain berbantuan komputer model sehingga data akan hilang atau tertukar secara keliru.

### **Oseanografi**

Karena biaya yang lebih rendah dan kemampuan yang lebih luas dari kemajuan pencetakan 3D, peluang luar biasa dalam bidang penelitian oseanografi juga sedang dibuat. Beberapa contoh mencakup komponen cetak 3D yang digunakan dalam kendaraan bawah air (atau permukaan) yang mandiri; salinan bentuk kehidupan laut cetak 3D yang digunakan untuk mempertimbangkan biomekanik, hidrodinamika, dan kemajuan; dan tiruan terumbu karang cetak 3D yang digunakan untuk membangun kembali terumbu karang yang rusak.

## **13.5 DAMPAK TEKNIK MANUFAKTUR ADITIF TERHADAP MASYARAKAT**

Meskipun memiliki kekurangan, teknologi AM berkembang pesat dan memainkan peran yang semakin penting dalam manufaktur dan kehidupan sehari-hari kita.

### **Dampak terhadap Layanan Kesehatan**

Teknologi AM digunakan untuk menyediakan layanan kesehatan berkualitas tinggi dan murah yang dibuat khusus untuk memenuhi kebutuhan spesifik pasien. Pendekatan yang disesuaikan ini mencakup perawatan jangka panjang yang dipersonalisasi untuk orang tua hingga mengoptimalkan jalannya teori menggunakan data biologis historis pasien.

Teknologi AM dapat digunakan untuk menghasilkan implan bedah yang dipersonalisasi. Implan bedah yang diproduksi oleh proses AM dilaporkan akurat, berfungsi dengan baik, dan menarik secara estetika. Selain itu, AM dapat memperpendek siklus desain dan manufaktur serta mengurangi waktu tunggu pengiriman. Aplikasi implan dapat dicantumkan sebagai implan tengkorak, siku, sendi, sendi panggul, dan kedokteran gigi.

Area aplikasi lain dari proses AM dalam perawatan kesehatan adalah untuk memproduksi peralatan keselamatan dan pakaian pelindung yang disesuaikan. Peralatan yang dibuat khusus ini memberikan perlindungan yang sangat baik dan meningkatkan kinerja pengguna.

Meskipun belum dikomersialkan, penelitian tentang rekayasa jaringan dan perangkat pengiriman obat menunjukkan potensi yang besar. Salah satu proyek yang menjanjikan ini adalah CUSTOM-FIT, yang bertujuan untuk membangun sistem yang akan mengintegrasikan desain, produksi, dan penyediaan produk medis yang dipersonalisasi.

### **Dampak terhadap Lingkungan**

Untuk menganalisis dampak dari setiap proses manufaktur terhadap lingkungan, kita perlu melihat waktu proses, penggunaan energi, aliran utama material benda kerja, dan aliran sekunder katalis. Dalam literatur, ada dua metode penilaian utama untuk mengukur dampak suatu proses terhadap lingkungan, yaitu analisis siklus hidup (LCA) dan penilaian dampak lingkungan (EIA).

Karena proses AM hanya menggunakan bahan baku yang cukup untuk membuat komponen, massa material siklus hidup dan energi yang dikonsumsi berkurang dibandingkan dengan proses manufaktur subtraktif tradisional. Cairan pemotong yang digunakan dalam proses manufaktur subtraktif merupakan sumber bahaya utama. Proses AM tidak menggunakan cairan pemotong sehingga mengurangi limbah bahaya lingkungan.

### **Dampak pada Manufaktur dan Rantai Pasokan**

Dalam rantai pasokan tradisional, material berpindah dari pemasok ke pelanggan, sementara dana dan informasi berpindah mundur dari pelanggan ke pemasok. Reeves (2008) melaporkan bahwa proses AM dapat mengurangi jumlah rantai dalam rantai pasokan tradisional. Hal ini dapat dicapai dengan:

1. mengurangi komponen produk dengan mendesain ulang.
2. menempatkan area manufaktur di dekat pelanggan.

Inovasi yang disebutkan sebelumnya yang dibawa oleh proses AM akan mengurangi kebutuhan pergudangan, pengemasan, dan transportasi.

Teknologi AM ideal untuk rantai pasokan ramping dan manufaktur Just in Time (JIT). Dengan bantuan AM, waktu penyiapan dan pergantian akan berkurang dan proses perakitan akan dipersingkat. Hal ini akan menghilangkan sebagian besar proses yang tidak bernilai

tambah seperti penanganan material dan manajemen inventaris yang akan meminimalkan biaya rantai pasokan.

Selain itu, rantai pasokan yang responsif dapat dibangun menggunakan proses AM. Strategi yang dibuat berdasarkan pesanan dapat diterapkan untuk menghilangkan kehabisan stok dan inventaris. Kustomisasi produk akan memastikan strategi yang dibuat berdasarkan pesanan akan diterapkan dengan sukses dan meningkatkan responsivitas.

Rantai pasokan suku cadang menghadapi tantangan yang signifikan saat memberikan layanan perawatan dan perbaikan yang cepat. Sebagian besar suku cadang jarang dibutuhkan tetapi untuk memberikan layanan perawatan yang andal, suku cadang harus disimpan dalam stok yang akan meningkatkan inventaris dan biaya pengiriman. Tantangan lainnya adalah ukuran batch. Agar mendapatkan manfaat dari skala ekonomi, suku cadang harus diproduksi dalam jumlah besar, yang akan meningkatkan biaya inventaris. Teknologi AM dapat menjadi solusi yang layak untuk masalah ini dengan memproduksi suku cadang kapan dan di mana suku cadang tersebut dibutuhkan .

### **Kesimpulan**

Dalam 30 tahun, AM telah menjadi proses manufaktur yang layak dari sekadar teknik pembuatan prototipe cepat. Beberapa perusahaan menggunakan proses AM untuk tujuan komersial. Beberapa penelitian masih terus dilakukan untuk menyempurnakan proses AM, yang akan berdampak besar pada masyarakat dalam waktu dekat. Bahkan saat ini AM memiliki dampak besar pada masyarakat dalam banyak aspek. AM merevolusi pembuatan prototipe cepat yang membuat desain produk baru menjadi lebih mudah.

Produk yang disesuaikan dapat dengan mudah diproduksi menggunakan AM, yang akan meningkatkan kesehatan dan kualitas hidup. Teknologi baru seperti rekayasa jaringan akan membantu mencegah kematian akibat kegagalan organ. Penurunan biaya dalam memproduksi produk perawatan kesehatan akan membuat kualitas hidup menjadi terjangkau. Proses AM mengurangi limbah dan tidak menggunakan bahan berbahaya seperti cairan pendingin, dan dengan demikian mengurangi polusi. AM akan dengan mudah menyediakan rantai pasokan dan memungkinkan manufaktur JIT, yang akan sangat mengurangi biaya penanganan material dan inventaris.

## **BAB 14**

### **APLIKASI PABRIK VIRTUAL**

Simulasi merupakan alat yang ampuh untuk mengamati kinerja sistem manufaktur dalam permintaan variabel dan kondisi pabrik yang dinamis dalam lingkungan virtual. Baru-baru ini, pemodelan dan analisis objek pabrik dalam perangkat lunak Simulasi 3 dimensi muncul yang disebut Pabrik Virtual (VF). VF menyediakan model simulasi terintegrasi dengan merepresentasikan semua aspek utama pabrik. Ini membantu untuk mempertimbangkan pabrik secara keseluruhan dan menyediakan dukungan keputusan.

Dengan kata lain, Kerangka Kerja VF merupakan lingkungan perangkat lunak virtual canggih yang bertujuan membantu desain dan pengelolaan semua entitas pabrik fisik selama semua fase siklus hidup pabrik. Dalam bab ini, proyek penelitian dan makalah akademis yang berfokus pada Pabrik Virtual ditinjau. Selain itu, perangkat lunak VF komersial diteliti, aspek pembedanya dinilai, dan keterbatasannya dibahas. Terakhir, saran kerja masa depan disajikan.

#### **14.1 PENDAHULUAN**

Internet of things (IoT) adalah paradigma yang mencakup komunikasi dan integrasi banyak objek yang dapat berinteraksi satu sama lain melalui teknologi informasi untuk mencapai tujuan sistem tertentu. Objek-objek ini adalah tag Identifikasi Frekuensi Radio (RFID), sensor, aktuator, ponsel, bahkan barang elektronik yang semuanya dapat terhubung ke jaringan nirkabel melalui skema pengalamatan yang unik. Munculnya paradigma IoT juga telah memicu konsep Pabrik Cerdas. Pabrik Cerdas bermaksud penerapan Sistem Siber-Fisik dan teknologi informasi sehingga mesin, robot, dan sumber daya manufaktur lainnya menjadi cerdas dalam arti bahwa mereka dapat berkomunikasi, berkolaborasi, dan bekerja lebih efisien dan tangguh.

Istilah Industri 4.0 yang menyiratkan revolusi industri keempat juga digunakan sebagai istilah sinonim dari Pabrik Cerdas. Dalam lingkungan pasar yang kompetitif dan berubah dengan cepat saat ini, perusahaan harus fleksibel, modular, adaptif, terukur, dan berbasis pengetahuan serta harus menggunakan teknologi informasi dan komunikasi dengan sangat baik. Oleh karena itu, untuk beradaptasi dengan perubahan teknologi dan fluktuasi permintaan, sebelum membuat keputusan desain pabrik yang besar, pemodelan simulasi pabrik dapat memberikan wawasan yang hebat.

Simulasi adalah alat yang ampuh untuk mengamati kinerja sistem manufaktur dalam permintaan variabel dan kondisi pabrik yang dinamis dalam lingkungan virtual. Penulis menunjukkan bahwa pemodelan Simulasi sistem manufaktur telah dipelajari secara ekstensif. desain dapat dikategorikan sebagai desain tata letak fasilitas umum, desain sistem penanganan material termasuk desain MHS dari sistem manufaktur fleksibel dan desain sistem manufaktur semikonduktor.

Selain itu, banyak penelitian yang menggunakan simulasi saat merancang sistem manufaktur hibrida, sistem manufaktur seluler dan sistem manufaktur fleksibel. Perencanaan

dan Penjadwalan aktivitas Produksi dan Pemeliharaan, simulasi waktu nyata dan kontrol sistem manufaktur adalah aliran penelitian lain dalam literatur simulasi.

Baru-baru ini, pemodelan dan analisis objek pabrik dalam lingkungan perangkat lunak simulasi 3 dimensi juga telah muncul yang disebut Pabrik Virtual.

Ini menyediakan model simulasi terpadu dengan merepresentasikan semua aspek utama sebuah pabrik. Ini membantu untuk mempertimbangkan pabrik secara keseluruhan dan menyediakan dukungan keputusan. Model yang dikembangkan harus mampu menilai kinerja pada beberapa tingkatan dan menghasilkan data serealistik mungkin sesuai dengan kondisi pabrik yang sebenarnya. Ini membantu untuk mempertimbangkan pabrik secara keseluruhan dan menyediakan dukungan keputusan. Konsep pabrik virtual memungkinkan untuk fokus pada satu proses/peralatan, satu departemen/lini produksi atau pabrik secara keseluruhan. Dengan kata lain, skala pabrik virtual meluas dari tingkat pabrik ke tingkat perangkat.

Pabrik Virtual dapat didefinisikan sebagai “Model simulasi terpadu dari subsistem utama di sebuah pabrik yang mempertimbangkan pabrik secara keseluruhan dan menyediakan kemampuan dukungan keputusan tingkat lanjut.”

Kerangka Kerja Pabrik Virtual sebagai lingkungan perangkat lunak canggih virtual yang bertujuan membantu desain dan pengelolaan semua entitas pabrik fisik termasuk semua produk, sumber daya manufaktur, dan bahkan jaringan perusahaan selama semua fase siklus hidup pabrik. Penulis menyarankan bahwa manajemen siklus hidup pabrik termasuk perencanaan dan pengoptimalan pabrik harus dilakukan dalam lingkungan virtual, dengan mempertimbangkan "pabrik sebagai produk".

Tingkat akurasi yang meningkat dari model subsistem fasilitas memberikan peluang penggunaan Pabrik Virtual untuk mendukung keputusan seperti pembandingan proses bisnis alternatif dan pemilihan arsitek jaringan komunikasi. Meskipun istilah Pabrik Digital dan Pabrik Virtual terdengar mirip satu sama lain, keduanya tidak memiliki arti yang sama. Pabrik Digital adalah gambaran statis dari kondisi pabrik saat ini yang ditunjukkan dengan menggunakan alat dan teknik pemodelan serta manufaktur digital.

Namun, Pabrik Virtual adalah "proyeksi ke masa depan" pabrik melalui teknik Virtualisasi dan Simulasi 3-D dalam lingkungan perangkat lunak. Dengan kata lain, istilah pabrik virtual mengacu pada simulasi semua sumber daya produksi termasuk operator manusia secara terpadu dan paling realistis dalam lingkungan perangkat lunak, untuk menilai berbagai alternatif tata letak pabrik, jalur produksi, sel, atau desain proses di masa mendatang.

Pabrik virtual dapat memberikan beberapa peluang untuk menguji berbagai kasus fasilitas nyata dalam kasus berikut:

- Sistem manufaktur terlalu mahal untuk dibangun atau berisiko untuk melakukan pengujian langsung.
- Perubahan desain dalam sistem yang besar atau kompleks sedang dipertimbangkan atau
- memprediksi variabilitas proses sistem penting dilakukan.
- Ketika ada data sistem manufaktur yang tidak lengkap.

- Ketika dibutuhkan untuk mengomunikasikan ide desain untuk membantu peserta sistem lebih memahami sistem.

Namun, simulasi pabrik dengan paradigma dan teknologi yang ada sulit diproses bahkan dengan komputer canggih. Karena pabrik sebagai sistem keseluruhan terdiri dari banyak subsistem dan pemodelan semua subsistem pada tingkat detail yang diinginkan dan pembuatan model pabrik secara keseluruhan membuat proses simulasi menjadi cukup rumit. Bahkan satu kali simulasi model dapat memakan waktu yang cukup lama.

Menurut laporan yang dikeluarkan oleh ARC Advisory Group Collaborative Production Management (CPM), 2007, “Dalam waktu dekat, pemodelan dan simulasi akan menjadi cara baru dalam berbisnis”. Sesuai dengan perkembangan ini, beberapa perangkat lunak komersial telah dikembangkan sejauh ini untuk mensimulasikan pabrik pintar yang canggih.

Tujuan bab ini adalah untuk menjelaskan konsep “Pabrik Virtual”; membahas kemungkinan manfaat yang dapat diperoleh melalui aplikasi Pabrik Virtual di lingkungan perangkat lunak; untuk menjelaskan contoh fasilitas perangkat lunak terkini yang dikembangkan sejauh ini oleh berbagai perusahaan komersial, dan untuk membahas keterbatasan perangkat lunak ini.

## 14.2 PABRIK VIRTUAL KOMERSIAL

Pada bagian ini, makalah jurnal dan publikasi konferensi yang berhubungan dengan VF dan proyek penelitian yang bertujuan mengembangkan infrastruktur VF dianalisis dan dibahas. Salah satu studi perintis adalah milik Fujii et al. (2000) di mana konsep Pabrik Virtual Terdistribusi (DVF) diusulkan yang terdiri dari model Simulasi terintegrasi dan tepat dari modul produksi termasuk aktivitas penanganan material. Beberapa model simulasi “terdistribusi” dihubungkan satu sama lain melalui mekanisme sinkronisasi (Fujii et al. 2000).

Salah satu proyek penelitian adalah Proyek FP6 Uni Eropa yang disebut Pabrik Digital untuk Sistem Produksi Berorientasi Manusia (DiFac) yang dilakukan untuk mengembangkan lingkungan manufaktur kolaboratif (CME) dari perusahaan Manufaktur generasi berikutnya, dan secara khusus menargetkan UKM di Eropa.

**Tabel 14.1** Perangkat lunak pabrik virtual komersial yang banyak digunakan

Perangkat lunak	Simulasi kejadian diskrit	Dinamika sistem	Simulasi Berbasis Agen	Simulasi berkelanjutan	Visualisasi 2D	Visualisasi 3D	Simulasi & analisis konsumsi energi	Neural network	Algoritma genetika
AnyLogic®	X	X	X		X	X			
Arena®	X				X	X			
FlexSim®	X					X		X	
Simulasi Tanaman®	X					X	X	X	X
Simcad Pro®	X			X	X	X			
Simio®	X		X		X	X			
SIMUL8®	X				X				
Komponen Visual®	X					X			

Pabrik Digital adalah model statis dari proses manufaktur, teknologi, metode, dan alat yang digunakan saat ini, sedangkan keadaan masa depan direpresentasikan dalam Pabrik Virtual. Dengan menggunakan data yang diperoleh dari Pabrik Digital, kemungkinan desain sistem masa depan disimulasikan dalam model realitas virtual 3 dimensi. Menurut hasil yang diperoleh dari model simulasi VF, proses, metode, atau alat baru diadaptasi dalam Pabrik Digital. Alat yang digunakan oleh VF adalah alat untuk pemodelan proses, perangkat lunak simulasi, realitas virtual, dan sistem realitas Tertambah.

Penulis mengklaim bahwa pendekatan Pabrik Digital dan Virtual yang terintegrasi dapat memberikan manfaat berikut: Orang-orang di lokasi yang berbeda dapat bekerja sama dengan lebih baik dalam proyek yang sama. Melalui desain produk baru virtual, waktu produksi dan Pemborosan dapat dikurangi. Kolaborasi antara orang-orang yang mengerjakan proyek yang sama di tempat yang berbeda difasilitasi pada berbagai tahap proyek. Proses pengambilan keputusan dapat menjadi interaktif yang memfasilitasi inovasi.

Basis pengetahuan yang berkaitan dengan desain produk dapat dibagikan dan diakses oleh berbagai pihak. Karena sifat proses pengembangan yang berpusat pada manusia, efisiensi dan keselamatan pekerja ditingkatkan melalui pelatihan dan pembelajaran pada lini dan mesin virtual. Selain itu, pelatihan untuk kasus darurat dapat diberikan kepada pekerja di lingkungan virtual. Isu penelitian yang dibahas dalam proyek DiFac dijelaskan secara komprehensif, dalam sebuah buku internasional.

Salah satu aspek yang menarik adalah pemodelan Manusia Digital di mana postur dan gerakan manusia disimulasikan secara virtual dalam bentuk 3-D, baik melalui pemodelan berbasis tugas maupun pemodelan berbasis data (pemodelan dinamis terbalik) dengan menggunakan perangkat lunak khusus.

Oleh karena itu, upaya bersama, ketidaknyamanan, dan konsumsi energi dimaksudkan untuk diminimalkan sambil mengoptimalkan desain stasiun kerja. Constantinescu menjelaskan perangkat lunak Factory Constructor<sup>®</sup> yang dikembangkan selama proyek DiFac. Factory Constructor terdiri dari alat bantu pengambilan keputusan berbasis Web yang disebut iGDSS, GIOVE, templat Pabrik Virtual, Alat Simulasi eM-Plant berbasis Web, dan platform Web iPortal untuk manajemen konten.

Selain itu, dalam proyek DiFac ini, Simulator Pelatihan berbasis Augmented Reality dikembangkan untuk mendukung pekerja dalam aktivitas Pemeliharaan dan kasus darurat. Selain itu, proyek Uni Eropa FP7 yang disebut “Kerangka Kerja Pabrik Virtual (VFF) Holistik, Dapat Diperluas, Dapat Diskalakan, dan Standar” yang bertujuan untuk meningkatkan dan memperkuat Industri Manufaktur Eropa dengan mendefinisikan VFF generasi berikutnya, dengan meningkatkan desain, manajemen, dan konfigurasi ulang pabrik yang ada.

Dalam proyek ini, fondasi konseptual VFF diusulkan. Pada dasarnya, sinkronisasi data antara pabrik nyata dan pabrik Virtual ditujukan. Perangkat lunak VFF terdiri dari Model Referensi, Virtual Factory Manager, Modul Fungsional, dan Knowledge Repository.

Menurut hasil Simulasi VF, pabrik nyata dirancang dan dioperasikan, sedangkan data yang diperoleh dari pabrik nyata termasuk indikator kinerja utama (KPI) diumpungkan kembali ke perangkat lunak VF dan model simulasi diperbarui sebagaimana mestinya. Ini disebut

sinkronisasi data. Sebagai perluasan dari proyek VFF ini, templat pabrik diusulkan untuk mengurangi waktu pengembangan model simulasi.

Model Referensi Perusahaan yang merupakan konsep dan elemen yang umum untuk semua siklus hidup pabrik. Ini disebut model Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology (GERAM). Templat Pabrik terdiri dari Domain Statis dan Dinamis. Dalam domain statis, proses/peralatan manufaktur, sumber daya manusia, sistem informasi, isu lingkungan yang memengaruhi proses desain dipertimbangkan. Dalam domain dinamis, algoritma Penaksir Nilai Proses seperti Jaringan Syaraf Tiruan, dsb. digunakan untuk memperkirakan kemungkinan perilaku pabrik dalam kondisi operasi baru.

Prototipe VF terdiri dari tingkat proses, mesin, dan sel Manufaktur. Pada tingkat proses, proses pemesinan bubut dimodelkan dalam lingkungan virtual tempat kinetika fisik proses bubut direpresentasikan. Parameter proses seperti laju umpan dan kedalaman pemotongan, dsb. dimasukkan ke model virtual untuk memperkirakan gaya pemotongan yang dihasilkan, konsumsi energi, dan durasi proses. Tingkat perangkat lunak VF ini dikodekan dalam Java untuk diintegrasikan dengan Tingkat Mesin. Tingkat mesin merepresentasikan mesin dan dimodelkan dengan menggunakan perangkat lunak berbasis agen yang disebut Any Logic®.

Pada tingkat perangkat lunak VF ini, status mesin dimodelkan sebagai diam, penyiapan komponen, penyiapan batch, pemesinan, pengeluaran komponen, dan pengeluaran batch. Mesin yang dimodelkan sebagai agen memutuskan status mana yang akan dilalui menurut logika transisi Status. Tingkat Sel Manufaktur perangkat lunak VF dikembangkan dengan menggunakan fitur simulasi kejadian diskrit dari Perangkat Lunak Any Logic.

Perangkat lunak simulasi VF yang mencakup pemodelan simulasi pada proses manufaktur, mesin, sel/lini, dan tingkat pabrik, sekitar sepuluh tahun yang lalu. Penulis menyebut konsep ini Pabrik Digital. Diusulkan agar perangkat lunak tersebut mencakup basis data sumber daya tempat mesin, alat pemotong, pengukur, robot, senapan las, dan templat manufaktur semuanya membentuk sebuah pustaka. Diusulkan agar objek 3-D yang telah ditetapkan sebelumnya yang mewakili mesin, konveyor, derek, kontainer material, dan pekerja dapat digunakan untuk membangun tata letak pabrik Virtual 3-D dengan cepat.

Oleh karena itu, pabrik, lini/sel produksi, dan proses dapat dianalisis melalui simulasi kejadian diskret; aliran pabrik dapat dioptimalkan dengan mempertimbangkan rute komponen, jarak antara sumber daya produksi, spesifikasi peralatan penanganan material saat ini. Sel robotik dapat disimulasikan dalam lingkungan 3-D untuk melakukan perencanaan lintasan robot, memprogram langkah-langkah pengoperasian robot, mendeteksi tabrakan atau ketidaknyamanan yang terjadi di lingkungan kerja. Selain itu, tempat kerja manual dapat dimodelkan secara virtual untuk melakukan analisis gerak-waktu yang ergonomis, untuk menghasilkan instruksi kerja bagi operator yang sesuai dengan prinsip-prinsip ergonomi dan masalah keselamatan kerja.

Infrastruktur pemantauan proses cerdas untuk melacak Indikator Kinerja Utama (KPI) dan visualisasi data yang dikumpulkan melalui antarmuka pengguna yang disebut dasbor, dalam lingkungan virtual. Perangkat lunak ini dikembangkan selama Proyek FP7 EU yang disebut ADVENTURE (ADaptive Virtual ENterprise ManufacTURing Environment). Penulis

menyatakan bahwa desain konseptual, dan pengembangan dilakukan dan desain divalidasi melalui proyek ini. Aplikasi menarik dari pabrik virtual menyangkut pemodelan simulasi perilaku konsumsi energi fasilitas Manufaktur.

Peta aliran nilai status terkini yang berkaitan dengan konsumsi energi terkini dari seluruh peralatan dan proses fasilitas dapat dibuat. Berdasarkan hal ini, model simulasi status terkini fasilitas dikembangkan. Melalui analisis menyeluruh atas kinerja energi dari tahapan produksi, dan aktivitas transportasi untuk bahan baku, WIP, dan produk, beberapa skenario keadaan masa depan yang disempurnakan dikembangkan dan modelnya dibangun dalam lingkungan perangkat lunak Simulasi.

Kemudian, berdasarkan skenario yang disimulasikan, solusi untuk meningkatkan konsumsi energi dari seluruh fasilitas produksi dapat dinilai. Semua pemodelan simulasi diusulkan untuk dilakukan dalam perangkat lunak simulasi kejadian diskrit Arena<sup>®</sup>. Pada subbagian berikutnya, disebutkan bahwa perangkat lunak komersial Plant Simulation<sup>®</sup> milik Siemens mampu melakukan simulasi konsumsi energi dan analisis Ekonomi pabrik.

Konsep Digital Twin juga telah disebutkan dalam literatur yang terkait dengan simulasi virtual entitas fisik. Di sini, data produk fisik yang dikumpulkan dimasukkan ke dalam model produk virtual untuk mengelola siklus hidup produk dengan cara yang lebih baik, termasuk desain produk, produksi, dan layanan. Kembaran digital bertujuan untuk memanfaatkan kemajuan dalam pemodelan dan simulasi digital entitas fisik dalam mode tiga dimensi dan komputasi kinerja tinggi untuk mengamati dan menguji kinerja desain struktural yang lengkap.

Kembaran Digital komponen ekor pesawat dikembangkan, di mana model untuk dinamika fluida komputasional (CFD), dinamika struktural (SDM), termodinamika, analisis tegangan (SAM), dan retak lelah (FCM) dihubungkan satu sama lain dalam model perangkat lunak virtual yang disebut Kembaran Digital, untuk mengamati perilaku desain dalam berbagai kondisi operasi. Namun, dalam aplikasi konvensional, model yang disebutkan di atas diisolasi satu sama lain, dan dimodelkan dalam lingkungan terfragmentasi yang mencegah analisis interaksi di antara aspek-aspek desain ini.

### **14.3 PERANGKAT LUNAK PABRIK VIRTUAL**

Pabrik nyata yang sesuai dengan sebagian besar fitur dan operasinya harus direpresentasikan dalam Pabrik Virtual. Berbagai perangkat lunak digunakan untuk membuat pabrik virtual. Perangkat lunak ini memungkinkan para insinyur untuk menjalankan eksperimen dan skenario what-if tanpa mengganggu sistem produksi yang ada. Selain itu, perangkat lunak ini juga digunakan selama studi desain awal, sebelum pembangunan pabrik.

Perangkat lunak yang banyak digunakan dijelaskan di bagian ini. Fitur-fitur utamanya disajikan dalam Tabel 14.1. Perangkat lunak diklasifikasikan menurut teknik simulasi yang digunakan, yaitu simulasi kejadian diskrit, simulasi berbasis agen, dinamika sistem, dan Simulasi berkelanjutan; jenis visualisasi (baik 2 dimensi maupun 3 dimensi), alat analisis konsumsi energi, algoritma jaringan saraf, dan algoritma pengoptimalan. Ketika Tabel 14.1 diperiksa, jelas bahwa hampir semua perangkat lunak memiliki fitur Visualisasi 3-D, dan sebagian besar juga memiliki aspek 2-D.

Semuanya bekerja berdasarkan Simulasi Kejadian Diskrit. Namun, AnyLogic® dan Simio® juga dapat menggunakan teknik simulasi berbasis agen di mana agen seperti kendaraan penanganan material, pekerja, mesin yang dimodelkan sebagai agen dapat memutuskan cara bekerja dalam kondisi yang telah ditentukan sebelumnya. Ini merupakan aspek yang menarik dan bernilai saat memodelkan Pabrik Virtual.

Perangkat lunak Plant Simulation® memiliki fitur tambahan seperti alat Analisis Konsumsi Energi yang dapat digunakan untuk melacak efektivitas energi seluruh pabrik dan memperbaikinya. Selain itu, perangkat lunak ini memiliki Alat Jaringan Syaraf Tiruan yang digunakan untuk menganalisis data sensor dan memperkirakan kegagalan peralatan terlebih dahulu, sebelum kegagalan terjadi. Ini juga merupakan fitur kontemporer dan bernilai. Selain itu, Algoritma Genetika digunakan oleh Plant Simulation® di mana aliran material yang hampir optimal tercapai, karena Algoritma Genetika dapat mencapai (dalam kasus terbaik) solusi optimal atau mendekati optimal.

AnyLogic adalah lingkungan model tunggal yang menggabungkan dinamika sistem, simulasi kejadian diskret, dan simulasi berbasis agen. Moto mereka adalah dirilis sebagai lingkungan pemodelan simulasi multimetode. Mereka menyediakan pemodelan bisnis, ekonomi, dan sistem sosial yang fleksibel pada tingkat detail yang diinginkan dalam satu bahasa pemodelan dan satu lingkungan pengembangan model. Mereka menawarkan berbagai alat visual untuk pemodelan seperti diagram status, diagram alur proses, diagram tindakan, dan diagram stok & aliran. Keuntungan lain dari perangkat lunak ini adalah dapat menyediakan visualisasi dan animasi yang sangat menarik.

Oleh karena itu, model dapat disajikan kepada pemangku kepentingan dengan cara yang jelas dan dapat digunakan sebagai alat pendidikan di perusahaan juga. Pustaka khusus industri memiliki keunggulan dibandingkan perangkat lunak lain. Yaitu, pustaka pemodelan proses, pustaka fluida, pustaka rel, pustaka pejalan kaki, pustaka lalu lintas jalan raya, dan pustaka penanganan material. Khususnya Pustaka Lalu Lintas Pejalan Kaki, Rel, dan Jalan Raya memungkinkan simulasi tingkat fisik terperinci dari pergerakan dan interaksi objek, yang membuatnya selangkah lebih maju dari para pesaingnya dalam hal ini.

Selain itu, program ini memungkinkan pengimporan gambar CAD, gambar, dan file pembentukan ke dalam model simulasi. Dari sudut pandang simulasi berbasis agen, program ini memungkinkan pengisian model data besar organisasi berskala besar dengan agen dengan karakteristik yang dipersonalisasi seperti perilaku konsumen, keterampilan individu, jadwal, data kinerja, atau profil terkait kesehatan. Integrasi peta GIS juga dapat digunakan untuk memodelkan sistem seperti rantai pasokan, jaringan logistik. Seperti banyak program simulasi lainnya, program ini mampu melakukan interoperabilitas data dan menyediakan dukungan dalam pembuatan model.

Meskipun platformnya dapat diperluas dan disesuaikan, program ini memerlukan tingkat kemampuan pemrograman tertentu dari pengguna. Meskipun demikian, kemampuan adaptasi perangkat lunak AnyLogic ini memberikan peluang untuk merancang eksperimen khusus untuk persyaratan khusus, atau menggunakan algoritme dan mesin pengoptimalan yang disesuaikan. Arena adalah salah satu program simulasi yang paling umum digunakan

untuk simulasi kejadian diskrit (DES). Program ini menggunakan metodologi pemodelan diagram alir termasuk pustaka besar blok penyusun yang telah ditentukan sebelumnya untuk memodelkan proses.

Elemen dan struktur seret dan lepas memungkinkan pembuatan model simulasi dengan cara yang cepat, intuitif, dan mudah dipelajari. Arena tidak memerlukan bantuan pemrograman, tetapi terkadang hal ini dapat membatasi pengguna. Di sisi lain, kode SIMAN dapat diakses dalam edisi profesional untuk diintervensi. Selain itu, templat khusus dan modul yang dapat digunakan kembali dapat dibuat. Arena memiliki pustaka khusus untuk pengemasan berkecepatan tinggi guna memodelkan jenis sistem produksi ini dengan cara yang lebih efisien. Fitur lain dari simulasi Arena adalah menangani tidak hanya pemodelan dan simulasi manufaktur diskrit tetapi juga aliran/kontinu. Arena telah digunakan selama 30 tahun dan disukai oleh banyak perusahaan berskala besar.

Berbagai bidang aplikasi tersedia mulai dari Manufaktur dan, perawatan kesehatan hingga layanan militer. Kemampuan pemodelan 3D khususnya membantu menciptakan kembaran digital fasilitas tersebut. Arena memiliki alat Virtual Designer untuk animasi yang dibuat dari mesin permainan. Kerangka kerja pabrik virtual (VFF) ke pemasok pabrik komponen otomotif. Melalui proyek ini, alat termasuk Arena yang diperlukan untuk membuat VFF telah digunakan secara efektif dan mempercepat proses pengambilan keputusan.

FlexSim juga merupakan program simulasi kejadian diskret yang canggih. Program ini menawarkan peningkatan kemampuan 3D dengan peningkatan kemudahan penggunaan. Flexsim memungkinkan pemodelan langsung dalam lingkungan 3D sementara banyak program simulasi lainnya memerlukan pasca-pemrosesan. Fitur menonjol lainnya dari FlexSim dibandingkan dengan program simulasi lainnya adalah kemampuannya untuk mengoptimalkan.

Dengan menggunakan alat Eksperimen Flexsim, skenario dengan mengubah level parameter dapat dibuat dan dijalankan dan hasilnya dilaporkan. Selain itu, alat pengoptimalan OptQuest Flexsim menggunakan pencarian tabu, pencarian sebaran, pemrograman integer, dan algoritma jaringan saraf untuk secara efisien memilih skenario terbaik sesuai dengan nilai parameter yang ditentukan oleh perancang.

Simulasi Pabrik digunakan untuk membuat model digital pabrik sehingga dapat menciptakan kembaran digital fasilitas tersebut. Ini adalah alat simulasi kejadian diskret yang memungkinkan pengoptimalan sistem dan proses produksi. Namun, alat ini tidak hanya dapat diterapkan pada proses diskret tetapi juga proses berkelanjutan. Salah satu fitur terpenting dari Simulasi Pabrik adalah deteksi kemacetan otomatis, penghitungan dan pengoptimalan penggunaan energi melalui alat analisis energi, penggunaan algoritma genetika dan jaringan saraf untuk pengoptimalan sistem. Model-model tersebut dapat disinkronisasikan dengan rantai pasokan, sumber daya produksi, dan proses bisnis dengan arsitektur sistem terbuka.

Hal ini memungkinkan dilakukannya analisis yang benar berdasarkan peserta yang berbeda dalam proses manufaktur. Visualisasi pabrik tersedia dalam bentuk 2D atau 3D. Dengan menggunakan pustaka atau model data desain berbantuan komputer (CAD), model dapat divisualisasikan dalam lingkungan 3D. Pustaka pemetaan aliran nilai juga tersedia

sebagai ekstensi. Pemetaan aliran nilai berbasis kertas yang statis digambarkan secara dinamis melalui ekstensi ini. Kontribusi utama dari fitur ini adalah untuk menunjukkan aktivitas yang memberikan nilai tambah dan yang tidak memberikan nilai tambah.

Situs web Siemens Automation menunjukkan pemodelan 3D fasilitas produksi perusahaan pemasok otomotif India, Eicher Engineering Solutions (EES). Mereka menggunakan perangkat lunak Simulasi Pabrik untuk membuat kembaran digital pabrik. Tata letak, peralatan, dan aliran produk pabrik dimodelkan secara realistis dalam 3D. Temuan model yang disiapkan menunjukkan bahwa peningkatan signifikan dapat dilakukan dalam desain pabrik, pemanfaatan ruang, pergerakan material, dan investasi yang direncanakan.

Memang, peningkatan yang diterapkan telah menghasilkan penghematan yang signifikan dan peningkatan produktivitas. Selain itu, aplikasi serupa dilakukan untuk perusahaan saudara di India. Dalam satu proyek, mereka dapat meningkatkan kapasitas hingga hampir lima kali lipat tanpa lahan tambahan dan dalam proyek lain, mereka meningkatkan pemanfaatan ruang secara keseluruhan hingga 33% di samping sejumlah peningkatan. Aplikasi yang dilakukan dengan program simulasi ini menunjukkan bahwa hasil yang sangat efisien dan efektif dapat dicapai.

SimCad Pro adalah perangkat lunak simulasi diskrit dan kontinu dinamis yang memungkinkan modifikasi model selama Simulasi berjalan, menganalisis dampak perubahan kendala. Perangkat lunak ini juga dapat diintegrasikan dengan data langsung dan historis. SimCad Pro memiliki beberapa alat, yaitu simulator proses SimCad, SimTrack, SimData, IAnimate3D. SimTrack berinteraksi dengan sistem data langsung seperti sistem identifikasi frekuensi radio (RFID), kode batang, sistem manajemen gudang (WMS), perencanaan sumber daya perusahaan (ERP), perencanaan kebutuhan material (MRP). Oleh karena itu, model dapat belajar dari lingkungan saat ini. Hal ini membuat status operasional fasilitas secara real-time terlihat. Barang-barang di fasilitas dapat dilacak secara real-time dalam 2D atau 3D. Analisis dinamis sistem secara otomatis menjadwalkan ulang aliran produksi. Di sisi lain, SimData menyediakan pengumpulan data studi waktu dan gerakan.

Hal ini memungkinkan pengguna untuk secara efektif menerapkan studi waktu pada operasi yang ada. IAnimate3D adalah perangkat lunak animasi 3-D yang dapat digunakan untuk membangun gambar yang diinginkan dari peralatan, alat, dan komponen lain serta gerakan orang yang realistis. Kompatibilitas dengan program gambar lain memungkinkan untuk mengimpor gambar 3D. Simulator Proses SimCad mensimulasikan lingkungan manufaktur secara dinamis dan juga secara otomatis menghasilkan peta aliran nilai model. Selain membuat diagram spaghetti, jalur renang, peta panas, efisiensi, dan perhitungan OEE memperkuat tangan pengguna untuk memperoleh pelaporan dan analisis yang kuat.

Simio memberikan solusi simulasi untuk manufaktur komponen diskrit. Selain simulasi kejadian diskrit, ia menyediakan pendekatan simulasi berbasis agen yang relatif modern dan lingkungan pemodelan berbasis objek 3D. Simio dioptimalkan untuk mengembangkan model 3D yang dapat membangun model 3D dalam satu langkah dari tampilan 2D atas-bawah, dan kemudian langsung beralih ke tampilan 3D sistem. Simio juga menawarkan simulasi dan pengoptimalan penjadwalan.

Perangkat Lunak Penjadwalan Produksi Simio memberikan jadwal terperinci dengan mempertimbangkan pendekatan Perencanaan dan Penjadwalan Lanjutan (APS). Anda dapat memodelkan sistem dalam lingkungan yang sempurna tanpa kegagalan mesin, waktu proses yang konstan, material yang tiba tepat waktu dan menghasilkan jadwal terperinci. Setelah jadwal ini dihasilkan, Simio mereplikasi model simulasi ini dengan mempertimbangkan variasi.

Oleh karena itu, perencanaan dan penjadwalan berbasis risiko dilakukan untuk memperoleh kemungkinan tercapainya target yang ditetapkan, serta hasil jadwal yang diharapkan, pesimistis, dan optimistis. Perangkat Lunak Penjadwalan Produksi Simio dapat terintegrasi dengan sumber data hubungan eksternal seperti ERP atau sistem transaksi bisnis lainnya. Dalam aplikasi kehidupan nyata, sangat penting untuk memasukkan data secara otomatis ke dalam simulator untuk tindakan cepat. Selain itu, perubahan jadwal produksi sering kali diperlukan dalam kondisi produksi nyata. Oleh karena itu, inisialisasi sistem dengan data waktu nyata, memenuhi kebutuhan instan untuk perubahan jadwal.

BAE Systems menggunakan aplikasi penjadwalan Simio untuk membuat jadwal, melakukan analisis risiko dan biaya, menyelidiki potensi perbaikan, dan melihat parameter tersebut dalam animasi 3D. Schneider Electric mengintegrasikan Simio dengan sistem eksekusi manufaktur real-time mereka. Dengan integrasi ini, operator memiliki kemampuan untuk melihat jadwal yang direncanakan beserta alternatif yang layak saat rencana tersebut tidak lagi berlaku karena perubahan yang tidak terduga.

Simul8: Program simulasi kejadian diskrit berbasis objek lainnya yang memungkinkan Simul8 untuk merancang, meluncurkan, dan meningkatkan lingkungan produksi fasilitas secara efektif. Simul8 mudah digunakan dengan antarmuka drag and drop dan lebih intuitif dibandingkan dengan program simulasi lainnya. Jadi, Simul8 tidak terlalu bergantung pada pengodean seperti C++, VBA, dan Java.

Berdasarkan bahasa simulasi Simul8 sendiri, hal ini membuatnya lebih unggul daripada beberapa paket lama yang masih menggunakan prosesor SIMAN dan bahasa simulasi. Melihat area aplikasinya, terlihat bahwa banyak perusahaan berskala dunia menggunakan Simul8. Selain itu, salah satu keuntungan terbesar dari perangkat lunak ini adalah dapat berjalan lebih cepat.

Visual Components memberikan kemudahan penggunaan bagi pengguna dan memvisualisasikan model 3D tata letak pabrik dengan mudah. Ia juga menawarkan banyak webinar, kursus, dan pelajaran yang dapat membantu pengguna. Salah satu poin terpenting yang disumbangkan oleh program ini adalah dapat menyediakan pemrograman robot. Ia memungkinkan pengajaran titik gerak, konfigurasi alat dan basis (sistem koordinat), konfigurasi dan penyambungan input/output. Ia memiliki kemampuan desain yang cukup fleksibel dan adaptif khusus untuk komponen dalam lingkungan manufaktur. Model simulasi yang dikembangkan menyediakan beberapa KPI untuk menilai kinerja sistem.

Selain itu, banyak dari program ini dapat digunakan untuk membuat keputusan untuk sektor perawatan kesehatan, manufaktur, otomotif, rantai pasokan, peradilan, dan bisnis. Namun, teknologi kembaran digital mencakup semua industri serta fasilitas perawatan kesehatan. Studi pemodelan dan simulasi diterapkan untuk tujuan ini. Dengan demikian,

variabel keputusan yang disediakan pelanggan; KPI dan properti sistem dapat dianalisis untuk mengelola sistem perawatan kesehatan secara efektif. Untuk merancang dan mengimplementasikan sistem simulasi tingkat lanjut, perhatian besar harus diberikan pada data proses waktu riil serta data historis. Jika sistem simulasi terintegrasi dengan pengetahuan berbasis data sehingga perilaku sistem nyata dapat diekstrapolasi dengan cepat, beberapa alternatif opsional dan solusi dapat ditetapkan.

Melihat perkembangan perangkat lunak simulasi dalam beberapa tahun terakhir, terlihat bahwa mereka telah beralih ke teknologi cloud yang mengubah cara orang menjalankan model. Situasi ini menyediakan analitik simulasi daring tidak hanya untuk karyawan dan manajer perusahaan tetapi juga untuk klien. Lebih jauh, komputasi cloud berkinerja tinggi untuk eksperimen kompleks dapat diterapkan dengan cara ini.

#### 14.4 KETERBATASAN PERANGKAT LUNAK KOMERSIAL

Meskipun perangkat lunak VF dapat memberikan beberapa manfaat, implementasinya memerlukan upaya dan sumber daya khusus. Hal ini dibahas secara singkat di bawah ini.

- Model simulasi Pabrik Virtual harus disesuaikan untuk setiap kondisi spesifik fasilitas manufaktur, serealistis mungkin. Jadi, penyesuaian ini merupakan pekerjaan yang padat karya dan memerlukan keahlian perangkat lunak khusus.
- Perangkat lunak Pabrik Virtual mungkin mahal untuk dikembangkan, terutama jika fasilitas produksinya rumit. Dalam kasus ini, biaya yang dikeluarkan harus dibenarkan sebagai imbalan atas nilai yang dapat diperoleh melalui pemodelan dan analisis simulasi virtual.
- Pengumpulan data waktu nyata sangat diperlukan untuk melacak status seluruh sistem manufaktur, mesin, robot, dan peralatan lainnya, secara berkelanjutan, dan untuk melakukan simulasi serealistis mungkin. Oleh karena itu, segera setelah beberapa parameter berubah dalam sistem manufaktur, hal ini dapat dengan cepat tercermin pada model simulasi.
- Alat dan algoritme analisis data juga harus diintegrasikan dengan perangkat lunak simulasi. Akan tetapi, hanya sedikit perangkat lunak komersial yang mampu menganalisis data waktu nyata. Lebih banyak algoritme seperti Jaringan Syaraf Tiruan, dsb. yang perlu diintegrasikan dengan perangkat lunak tersebut.

#### Kesimpulan

Dalam bab ini, dibahas berbagai proyek penelitian Pabrik Virtual dan makalah akademis terkini. Selain itu, fitur utama perangkat lunak Pabrik Virtual komersial disajikan dan dibahas. Dapat disimpulkan bahwa sebagian besar perangkat lunak menggunakan simulasi kejadian diskrit untuk pemodelan. Hanya beberapa di antaranya (AnyLogic dan Simio) yang menggunakan simulasi Berbasis Agen. Selain itu, hanya perangkat lunak Plant Simulation® yang memiliki alat analisis konsumsi energi yang merupakan utilitas bagus yang diberikan kepada para perancang untuk meningkatkan efektivitas energi pabrik.

Selain itu, hanya dua produk perangkat lunak, yaitu Plant Simulation® dan FlexSim®

yang memiliki alat Jaringan Syaraf Tiruan untuk pengoptimalan sistem dan/atau prediksi kegagalan peralatan. Ini juga merupakan aspek pembeda dari keduanya. Hampir semua perangkat lunak memiliki fitur Visualisasi 3-D yang kuat. Khususnya, perangkat lunak SimCad Pro dapat dengan mudah diintegrasikan dengan perangkat lunak ERP; secara otomatis menghasilkan Peta Aliran Nilai dan Diagram Spagetti yang merupakan alat visual ramping untuk mengomunikasikan kinerja pabrik.

Ketika literatur akademis ditinjau, jelas bahwa banyak makalah yang mengusulkan infrastruktur Pabrik Virtual konseptual. Namun, studi kasus yang mencontohkan penggunaan perangkat lunak Pabrik Virtual jarang ditemukan. Jadi, dalam studi mendatang, diperlukan lebih banyak bukti empiris untuk memvalidasi kegunaan perangkat lunak VF, dan manfaat yang diperoleh. Selain itu, alat analisis energi harus dikembangkan dan diimplementasikan secara lebih luas dalam perangkat lunak VF, karena efektivitas energi merupakan isu penting bagi keberlanjutan pabrik.

## **BAB 15**

### **JEJAK DIGITAL MELALUI RANTAI NILAI PRODUKSI**

Nilai teknologi Ketertelusuran Digital sangat penting bagi sistem produksi, karena tingginya tingkat proses manufaktur dan operasi logistik yang rumit. Dalam bab ini, teknologi ketertelusuran digital dibahas untuk menganalisis proses manufaktur, seperti: melacak pekerjaan yang sedang berlangsung, melacak inventaris, menghitung stok, menerima, memilih, dan mengirim produk setengah jadi. Untuk melakukan ini, kerangka kerja arsitektur teknologi dalam industri produksi dirancang.

Peta jalan untuk desain, konfigurasi, dan penerapan ketertelusuran digital disajikan untuk merancang pendekatan terintegrasi seperti yang ditunjukkan dalam literatur dan dalam proyek sebelumnya. Dapat ditunjukkan dengan jelas bahwa, dengan menggunakan teknologi keterlacakan digital dalam rantai nilai produksi, persediaan dan biaya produksi yang berlebihan, biaya tenaga kerja yang berlebihan yang disebabkan oleh aktivitas produksi yang tidak efisien, ketidakakuratan catatan, pengiriman pesanan yang salah, dan biaya penalti yang dikeluarkan oleh pelanggan dapat dikurangi secara signifikan, yang memberikan keuntungan yang tak ternilai dalam persaingan sistem produksi di dunia nyata.

#### **15.1 PENDAHULUAN**

Teknologi informasi telah berubah secara signifikan sehingga perusahaan yang menolak untuk menggunakannya dalam lingkungan persaingan global dapat dengan mudah kehilangan kekuatannya. Ada banyak teknologi baru yang mengejutkan pengguna dengan memberikan dukungan penting serta memungkinkan proses yang berbeda dan lebih baik. Sistem Keterlacakan Digital adalah teknologi signifikan yang memberikan manfaat luar biasa seperti peningkatan keterlacakan, akurasi, keamanan, efisiensi, pengendalian waktu nyata, dan pengurangan biaya tenaga kerja.

Aplikasi Ketertelusuran Digital telah menarik peningkatan R&D dan praktis dalam kasus dunia nyata. Dalam istilah yang paling sederhana, sistem berbasis Ketertelusuran Digital telah diterapkan di banyak area yang berbeda tetapi telah digunakan secara khusus dalam logistik, sistem manajemen rantai pasokan dan produksi untuk identifikasi, penelusuran dan pelacakan. Kemudahan ini menyediakan pemantauan sistem dengan data yang lebih tepat dan waktu nyata di berbagai bidang. Sistem yang mengadopsi Ketertelusuran Digital menyediakan peningkatan kapasitas dan produktivitas tenaga kerja dengan mengurangi kesalahan operasional.

Dengan memanfaatkan implementasi Ketertelusuran Digital dalam sistem produksi, aplikasi berbasis Ketertelusuran Digital dapat diadopsi secara praktis dan efisien untuk pelacakan waktu nyata atas malfungsi dan masalah yang terjadi dalam proses produksi. Selain itu, ketidaktepatan dalam catatan dan pengiriman pesanan yang mengakibatkan kompleksitas dalam aktivitas perencanaan dan biaya penalti yang dikeluarkan oleh pelanggan dapat dicegah secara signifikan, dan keadaan ini memastikan keuntungan besar bagi persaingan global.

Secara khusus, kesulitan yang terkait dengan penelusuran, pelacakan dan pemantauan barang WIP dan kesalahan yang terjadi dalam proses ini adalah beberapa masalah utama dari sistem produksi.

Metode konvensional umum yang digunakan untuk melacak dan menelusuri produk WIP dalam industri adalah sistem kode batang atau, lebih primitif, penghitungan manual. Selama proses produksi, kesalahan yang disebabkan oleh sistem kode batang atau penghitungan manual menyebabkan catatan yang tidak dapat diandalkan dan tidak konsisten yang jumlahnya sangat berbeda dari tingkat inventaris WIP yang sebenarnya. Secara umum, kesulitan memantau proses yang rumit dan ketidakkonsistenan catatan menyebabkan biaya tenaga kerja yang tinggi dan produktivitas yang rendah.

Selain itu, ketidakmampuan untuk mencegah pencurian, kehilangan produk yang tidak dapat dijelaskan, dan pengiriman produk yang salah merupakan penyebab tidak langsung dari kemampuan pelacakan dan penelusuran yang tidak memadai. Akibatnya, ketidakpuasan dengan efisiensi sistem dan kualitas proses merupakan ciri industri ini. Teknologi Ketertelusuran Digital telah digunakan untuk memecahkan masalah serupa di banyak industri yang berbeda.

Dengan pembentukan sistem pelacakan Ketertelusuran Digital, deteksi dini dan pengendalian malfungsi dan masalah dimungkinkan, yang memberikan keuntungan signifikan bagi sistem produksi dalam kondisi pasar yang kompetitif saat ini.

## 15.2 TEKNOLOGI KETERTELUSURAN DIGITAL

Teknologi identifikasi otomatis (auto-ID) memiliki kemampuan untuk melacak dan menelusuri objek, produk, aset, dan individu di seluruh rantai nilai dengan menangkap dan mentransfer data dengan intervensi manusia yang terbatas atau tanpa campur tangan manusia. Teknologi ini dapat menyediakan informasi penting (misalnya, lokasi, getaran, suhu, kelembaban, waktu kedatangan, kecepatan, dan status kendaraan) secara otomatis dan tepat waktu yang memungkinkan pengambilan keputusan dini dan menghilangkan aktivitas manual yang rawan kesalahan.

Meskipun ada beberapa teknologi auto-ID yang terlibat dalam pelacakan otomatis, teknologi yang paling umum digunakan di berbagai titik dalam rantai nilai produksi adalah kode batang, Identifikasi Frekuensi Radio (RFID), Sistem Penentuan Lokasi Waktu Nyata (RTLS), dan Sistem Pemosisian Global (GPS). Teknologi tersebut memiliki fitur yang berbeda dan dapat diimplementasikan dengan beberapa cara untuk berbagai tujuan.

1. **Barcode:** Barcode adalah kode digital cetak yang terdiri dari garis-garis paralel hitam (batang) atau modul-modul kecil (kotak) yang disusun pada latar belakang putih. Barcode dapat dibaca oleh pembaca barcode yang menggunakan sinar laser serta perangkat seluler dengan perangkat lunak pembaca barcode yang terpasang. Sementara barcode tradisional dengan garis-garis paralel memiliki kapasitas data yang rendah, barcode 2D dengan modul (misalnya, kode respons cepat (QR)) dapat menyimpan hingga 7089 karakter. Teknologi barcode murah dan merupakan teknologi ID otomatis yang paling umum digunakan di dunia. Namun, persyaratan pembacaan

garis pandang, keamanan data yang buruk, kerusakan karena kotoran dan pembengkokan di lingkungan yang sulit, dan kemampuan baca-saja merupakan kelemahan utama teknologi ini.

2. **Radio Frequency: Identification (RFID):** Sistem RFID, yang menggunakan gelombang radio untuk transfer data, biasanya terdiri dari elemen-elemen berikut:
  - Label dengan chip yang dapat menyimpan nomor identifikasi unik dan informasi barang yang ditempelinya.
  - Pembaca dengan antena untuk berkomunikasi secara bersamaan dengan beberapa tag dalam jangkauan antena. Komunikasi dapat dilakukan secara searah atau dua arah.
  - Perangkat lunak aplikasi dengan basis data yang memproses dan mengintegrasikan informasi yang dikumpulkan.

Tidak seperti kode batang, yang harus diarahkan ke pemindai untuk dibaca, tag RFID dapat dibaca tanpa persyaratan garis pandang selama berada dalam jangkauan pembaca. Oleh karena itu, objek yang diberi tag dapat dengan mudah dilacak dalam rantai pasokan tanpa keterlibatan manusia. Selain itu, tag RFID dapat menampung lebih banyak data yang dapat ditransmisikan dengan cepat, ditulis ulang berkali-kali, dan dienkripsi.

Keuntungan lain dari tag RFID adalah dapat digunakan kembali dan lebih tahan terhadap suhu dan faktor lingkungan lainnya. Seiring dengan manfaat tersebut, biaya investasi yang tinggi merupakan kelemahan utama RFID dalam banyak aplikasi. Kekhawatiran lain mengenai jenis material (misalnya, logam dan cairan), inferensi, keandalan pembacaan massal, dan kurangnya standarisasi juga membatasi aplikasi. Ada berbagai jenis tag RFID yang tersedia dengan konfigurasi, implikasi biaya, dan kinerja yang berbeda-beda. Namun, sistem RFID secara umum dapat dikategorikan sebagai tipe pasif, semi-pasif, atau aktif.

Tag pasif, bentuk tag RFID yang paling sederhana, tidak memiliki sumber daya internal. Jenis tag ini mengubah energi frekuensi radio yang berasal dari antena pembaca menjadi energi listrik untuk mengirimkan kembali sinyal ke pembaca. Sistem RFID pasif dapat beroperasi dalam pita radio frekuensi rendah (LF), frekuensi tinggi (HF), atau frekuensi sangat tinggi (UHF). Biasanya, tag ini memiliki jangkauan baca yang pendek (beberapa sentimeter untuk LF dan hingga 12 m untuk UHF) dan dapat menampung sedikit lebih banyak informasi daripada kode batang. Namun, tag ini lebih murah, lebih ringan, lebih kecil, dan lebih mudah dicetak daripada jenis RFID lainnya.

Solusi RFID pasif dapat berguna untuk banyak aplikasi seperti identifikasi dan pelacakan individu, hewan, dan produk dalam rantai pasokan; manajemen inventaris dalam industri ritel; identifikasi peralatan dan aset; dan autentikasi farmasi. Bergantung pada aplikasinya, tag RFID pasif dapat dirancang dalam berbagai bentuk. Tag ini dapat dipasang pada substrat, diapit di antara lapisan perekat dan label kertas, disematkan dalam kartu plastik, dikemas secara khusus untuk menahan beberapa faktor lingkungan. Karena tidak memiliki sumber energi sendiri, sensor tidak dapat dipasang

pada tag RFID pasif.

Tag RFID semi-pasif adalah tag pasif yang dibantu baterai yang berisi sumber daya terintegrasi untuk memasok energi ke chip tetapi bergantung pada energi pembaca untuk mengirim sinyal. Tag semi-pasif dapat memiliki jangkauan baca yang lebih panjang dan beberapa di antaranya dapat mendukung sensor, tetapi lebih mahal dan lebih besar daripada tag pasif. Tag RFID aktif berisi pemancarnya sendiri dan sumber daya yang dapat berupa baterai, atau panel surya untuk menarik energi dari cahaya. Jenis tag ini dapat menyiarkan sinyal secara independen ke pembaca. Sistem RFID aktif biasanya beroperasi dalam pita radio UHF dan memiliki jangkauan yang jauh lebih besar (hingga 100 m).

Tag ini dapat mengirimkan lokasi dan informasi penting lainnya. Biaya tag aktif dapat bervariasi dari beberapa dolar hingga ratusan dolar, tergantung pada jangkauan baca, masa pakai baterai, daya tahan, dan kemampuan lain yang diperlukan. Pembaca juga lebih mahal daripada yang digunakan untuk sistem pasif. Tag aktif umumnya digunakan pada aset yang mahal dan besar (misalnya, truk, kontainer, gerbong kereta, hewan, peralatan medis). Sumber daya di dalam kendaraan juga dapat mendukung pengoperasian sensor yang sangat meningkatkan kegunaan sistem RFID, khususnya untuk logistik rantai dingin produk yang sensitif terhadap suhu seperti buah, ikan, obat-obatan, dan vaksin.

Transponder dan beacon adalah dua jenis utama tag aktif. Transponder menyala saat menerima sinyal dari pembaca. Misalnya, transponder digunakan untuk identifikasi kendaraan di gerbang yang dijaga ketat. Saat mobil dengan transponder mendekati gerbang, transponder di mobil akan aktif dengan sinyal pembaca di gerbang dan kemudian mengirimkan ID uniknya ke pembaca. Transponder menghemat daya baterai karena hanya mengirimkan sinyal saat berada dalam jangkauan pembaca. Di sisi lain, beacon terus-menerus menyiarkan sinyal pada interval yang telah ditetapkan seperti setiap beberapa detik atau sekali sehari.

3. **Sistem Pelacakan Lokasi Real-time (RTLS):** Sistem Pelacakan Lokasi Real-time (RTLS) menyediakan lokasi objek atau orang secara real-time dengan melacaknya secara terus-menerus di dalam gedung atau area tertutup lainnya. Informasi mengenai objek atau orang yang dilacak dapat mencakup lokasi, kecepatan, suhu, dan informasi tertentu lainnya. Contoh RTLS meliputi pelacakan pasien di rumah sakit, pelacakan mobil melalui jalur perakitan, atau menemukan truk angkat di gudang. RTLS saat ini didasarkan pada teknologi nirkabel seperti RFID, inframerah, ultra-suara, dan jaringan sensor nirkabel.

Di antara berbagai jenis RFID, beacon (sistem aktif) sering digunakan dalam RTLS. Lokasi objek yang ditandai dapat diidentifikasi dengan membaca sinyal tag oleh setidaknya tiga antena. Sistem pasif dapat menyediakan solusi RTLS berbiaya rendah. Namun, data dalam tag pasif hanya dapat dibaca di lokasi tertentu dalam area yang dipantau.

Teknologi inframerah menggunakan cahaya yang tidak terlihat untuk mendeteksi

apakah suatu objek atau orang berada di lokasinya atau tidak. Sinar inframerah tidak dapat menembus dinding dan memerlukan transmisi garis pandang. Untuk meningkatkan akurasi, beberapa penerima inframerah dapat dipasang di gedung yang dipantau. Cahaya inframerah mudah ditransmisikan dan diterima, dan teknologi ini menawarkan akurasi tinggi dengan hampir tidak ada pembacaan yang salah. Ultrasonografi, yang memiliki frekuensi tinggi di luar tingkat pendengaran, dapat digunakan dalam RTLS. Label yang dipasang pada permukaan objek atau orang mengirimkan sinyal ultrasonik unik untuk mengomunikasikan lokasi mereka ke mikrofon yang ditempatkan di sekitar ruangan yang dipantau.

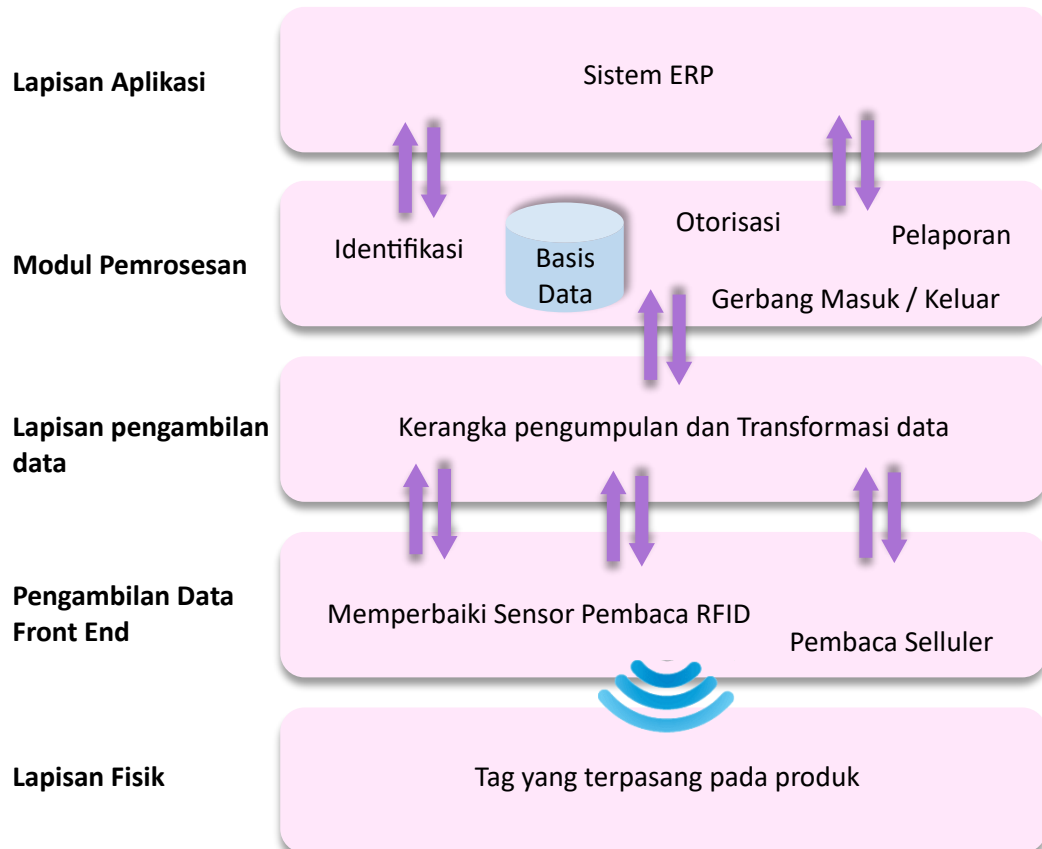
Mirip dengan gelombang inframerah, sinyal ultrasonik memberikan hasil yang akurat dengan penempatan beberapa penerima (mikrofon) yang cermat, dan sinyal tersebut dibatasi oleh dinding. Jaringan sensor nirkabel (WSN) terdiri dari simpul komputasi otonom kecil dan berdaya rendah yang didistribusikan secara spasial untuk memantau dan merekam kondisi di berbagai lokasi. Setiap simpul komputasi dilengkapi dengan transduser, komputer mikro, transceiver frekuensi radio, sumber daya; dan sensor yang mendeteksi cahaya, suhu, kelembapan, suara, tekanan, getaran, tingkat polutan, atau kondisi fisik lainnya.

Data yang terkumpul ditransmisikan di antara node sensor dengan cara melompat, dan akhirnya mencapai gateway untuk koneksi ke internet. WSN dapat dirancang dalam berbagai topologi jaringan termasuk bintang, di mana setiap node terhubung langsung ke gateway; pohon kluster, di mana setiap node terhubung ke node di pohon yang lebih tinggi dan kemudian ke gateway; mesh, di mana node dapat terhubung ke beberapa node dan pesan melewati jalur yang paling andal yang tersedia; dan ring, di mana setiap node terhubung ke dua tetangga.

4. **Sistem penentuan posisi global (GPS):** GPS memungkinkan barang dilacak dari jarak jauh di mana saja di Bumi secara real-time menggunakan sistem navigasi satelit. GPS sesuai untuk melacak kendaraan dan kontainer pengiriman dalam logistik. Penerima GPS dapat menentukan lokasinya dalam lintang dan bujur dengan berkomunikasi ke setidaknya tiga satelit dan menghitung jarak ke masing-masing. Informasi lokasi kemudian ditransfer ke server melalui jaringan halaman/suara nirkabel. Penerima GPS dapat beroperasi di seluruh dunia selama beberapa tahun.

### 15.3 ARSITEKTUR SISTEM JEJAK DIGITAL

Pada bagian ini, kerangka arsitektur sistem Ketertelusuran Digital akan dijelaskan. Kerangka ini memiliki lima lapisan penampang: lapisan fisik, ujung depan penangkapan data, lapisan penangkapan data, modul pemrosesan, dan lapisan aplikasi. Lapisan-lapisan tersebut ditunjukkan pada Gambar 15.1, dan penjelasan terperinci ditunjukkan di bawah ini.



**Gambar 15.1** Kerangka kerja arsitektur sistem Ketertelusuran Digital

1. *Lapisan Fisik*: Lapisan pertama mencakup tag yang berisi informasi tentang produk.
2. *Front End Pengambilan Data*: Lapisan kedua mencakup pembaca, sensor yang digunakan untuk pengumpulan data. Saat pekerjaan dalam proses diterima atau dikirim dari gudang atau unit produksi terkait, informasi waktu nyata ditangkap oleh lapisan front end pengambilan data. Pembaca memiliki perangkat lunak sistem yang menyediakan interaksi antara pembaca dan tag.
3. *Lapisan Pengambilan Data*: Lapisan ketiga adalah jenis perangkat lunak yang bertindak sebagai jembatan antara unit front end pengambilan data dan modul pemrosesan. Fungsi dasar dari lapisan ini adalah,
  - Mengonversi informasi sistem Ketertelusuran Digital menjadi informasi bisnis
  - Mendistribusikan informasi sistem Ketertelusuran Digital ke proses bisnis
  - Memfilter informasi
  - Memicu proses bisnis dari proses sistem Ketertelusuran Digital dan sebaliknya
  - Mengelola perangkat sistem Ketertelusuran Digital
  - Mengonsolidasikan informasi sistem Ketertelusuran Digital

Fungsi-fungsi ini menyediakan informasi yang bersih, akurat, dan berguna dari sejumlah besar data yang ditangkap oleh pembaca.
4. *Modul Pemrosesan*: Lapisan keempat adalah modul pemrosesan, yang meminta sistem Ketertelusuran Digital dan kejadian unit lainnya dari lapisan penangkapan data dan menghasilkan kejadian dan laporan. Ini termasuk data, seperti data historis, waktu, dan

lokasi. Beberapa kejadian dan laporan dari lapisan ini adalah aktivitas pengambilan dan penerimaan, otorisasi, catatan pekerjaan dalam proses, dan penghitungan inventaris. Kejadian dan laporan disimpan dalam sistem basis data relasional dan dibagikan dengan lapisan aplikasi.

5. *Lapisan Aplikasi*: Lapisan terakhir adalah lapisan aplikasi tempat proses bisnis inti terpenuhi. Perangkat lunak aplikasi pada lapisan ini mencakup Perencanaan Sumber Daya Perusahaan (ERP) dan aplikasi WEB serta mendukung proses bisnis. Semua antarmuka aplikasi yang diperlukan terletak di level ini. Antarmuka ini memungkinkan pengguna untuk memanfaatkan aplikasi, seperti dengan memasukkan data terkait ke dalam komputer untuk mengumpulkan detail inventaris dari sistem. ERP merupakan aplikasi utama dari level ini, dan beberapa antarmuka pengguna penting yang ada memungkinkan pengguna untuk menjalankan fungsi-fungsi seperti yang tercantum di bawah ini:

- Mengaitkan informasi produk
- Memperbarui catatan sesuai dengan produk yang diterima dan yang keluar dari gudang dan unit produksi terkait
- Menanyakan level stok produk dari sistem
- Menghitung inventaris fisik
- Menanyakan produk yang dibawa ke/dari sistem dan unit produksi terkait

#### 15.4 APLIKASI SISTEM

Industri 4.0 membuat lingkungan produksi lebih cerdas, fleksibel, dan dinamis dengan melengkapi manufaktur dengan sensor, aktor, dan sistem otonom. Oleh karena itu, mesin dan peralatan akan mencapai tingkat optimalisasi dan otomatisasi diri yang tinggi. Tingkat optimalisasi dan otomatisasi diri akan meningkat dan kapasitas produksi mencapai standar yang lebih kompleks dan berkualitas.

Dengan demikian, tujuan utama industri 4.0 adalah menciptakan pabrik cerdas dan manufaktur cerdas. Paradigma agen diakui sebagai salah satu alat yang efektif untuk manufaktur cerdas.

Industri 4.0 menciptakan integrasi nilai tambah pada proses manufaktur dalam dua cara seperti horizontal dan vertikal. Bagian horizontal menciptakan modul dari aliran material hingga logistik siklus hidup produk, di sisi lain prosedur vertikal mengintegrasikan produk, peralatan, dan kebutuhan manusia dengan berbagai tingkat agregasi.

Model untuk mesin injeksi guna memperkirakan garis dasar yang disesuaikan dengan risiko dan ketidakpastian yang lebih rendah dalam mengukur dan memverifikasi percakapan energi. Sistem manufaktur virtual dan mempertimbangkan tiga tingkat: objek rekayasa virtual, proses rekayasa virtual, dan pabrik rekayasa virtual. Mekanisme terintegrasi dari ketiga tingkat tersebut akan membantu membangun struktur Industri 4.0 dan untuk mencapai tingkat mesin cerdas, otomasi industri, dan analitik semantik tingkat lanjut yang lebih tinggi.

Software-Defined Cloud Manufacturing yang didasarkan pada pemanfaatan abstraksi antara perangkat keras manufaktur dan aplikasi, layanan, serta platform berbasis cloud.

Prototipe pabrik tangkas yang mentransfer teknik rekayasa perangkat lunak tangkas ke domain manufaktur; mereka juga mengusulkan kerangka kerja yang menggambarkan dampak dan kelayakan perubahan pelanggan selama waktu perakitan.

Sistem realitas tertambah yang mendukung pekerja manusia dalam lingkungan produksi yang berubah dengan cepat, menganalisis hubungan antara produksi ramping dan manufaktur cerdas, dan mengusulkan sistem produksi cerdas ramping (LIPS) untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi produksi serta mengurangi biaya, dalam Industri 4.0. Sistem Ketertelusuran Digital dan aplikasi terkait telah menarik peningkatan R&D dan praktis dalam kasus dunia nyata. Secara sederhana, sistem berbasis Ketertelusuran Digital telah diterapkan di banyak area berbeda, tetapi khususnya digunakan dalam sistem produksi untuk identifikasi, penelusuran, dan pelacakan.

Kemudahan ini menyediakan pemantauan sistem dengan data yang lebih akurat dan waktu nyata di berbagai bidang. Sistem yang mengadopsi Ketertelusuran Digital menyediakan peningkatan kapasitas dan produktivitas tenaga kerja dengan kesalahan operasional yang berkurang.

RFID diimplementasikan untuk deteksi hewan, penerbangan, manajemen gedung, konstruksi, kontrol umpan balik perusahaan, kain dan pakaian, kesehatan, jaminan keamanan pangan, layanan perpustakaan, museum, dan ritel.

Sistem penginderaan lokasi berbasis RFID untuk manajemen keselamatan dalam industri baja ketika kondisi lingkungan sekitar memengaruhi sinyal RFID. Manajerial dalam aplikasi RFID, seperti ID pribadi dan kontrol akses, pelacakan rantai pasokan dan inventaris, tol jalan tol, kontrol pencurian, kontrol produksi, dan manajemen aset. Sebagai fase aplikasi penting dari implementasi RFID, berbagai aplikasi untuk infrastruktur sistem informasi berbasis RFID. Contoh sistem pelacakan RFID untuk meningkatkan efisiensi pelacakan ban baik dalam manajemen gudang maupun proses produksi. Penanganan material dan persepsi pelacakan dalam rantai pasokan konstruksi dengan menerapkan survei dan wawancara tatap muka. Praktik penerapan RFID dalam manufaktur sebagian besar terdiri dari subproses dalam elemen rantai pasokan

Dengan menggunakan RFID, data manufaktur, perakitan, dan layanan ditangkap melalui tag RFID dan disimpan di server lokal. Ini juga dapat diintegrasikan dengan aplikasi bisnis tingkat tinggi. Chen dkk. (2013) mengusulkan integrasi produksi ramping dan teknologi identifikasi frekuensi radio (RFID) untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas manajemen gudang. Dinyatakan bahwa integrasi RFID ke lean, total waktu operasi dapat dihemat hingga 87%.

Selain itu, manfaat penggunaan RFID dalam manajemen gudang terwujud dan dipromosikan. Ramadan dkk. (2016) menciptakan sistem pelacakan biaya manufaktur real-time (RT-MCT) inovatif yang memadukan konsep lean manufacturing dan RFID. Permodel produksi-inventaris dan dua skenario dianalisis mengenai teknologi mana yang harus digunakan untuk mengoptimalkan keputusan pengisian ulang, salah satunya adalah teknologi kode batang dan yang lainnya adalah teknologi identifikasi frekuensi radio (RFID).

Pembaca RFID sebagai sensor pendeteksi, tujuan penelitian ini adalah

mengembangkan sistem pelacakan objek berbantuan RFID terutama pada jalur perakitan manufaktur fleksibel. Analisis produktivitas tenaga kerja pengecer yang mengadopsi RFID.

Hasilnya, terdapat hubungan antara teknologi RFID dan produktivitas tenaga kerja pengecer yang mengadopsi. Analisis regresi digunakan dan diamati bahwa pengecer RFID memiliki elastisitas tenaga kerja terhadap pendapatan kotor yang lebih tinggi daripada pengecer non-RFID.

### 15.5 MANAJEMEN PROYEK DALAM KETERTELUKURAN DIGITAL

Untuk merancang manajemen proyek dalam ketertelusuran digital; tahap desain, implementasi, dan penyebaran sistem ketertelusuran digital untuk area aplikasi apa pun harus diselidiki. Oleh karena itu, di bagian ini, peta jalan terpadu yang mencakup tahap persiapan dan perencanaan proyek ketertelusuran, operasi implementasi dan penyebaran, serta pemeliharaan sistem dan proses perekrutan diusulkan menurut tinjauan literatur yang ada. Di sisi lain, metodologi yang diberikan dalam tidak memuat seluruh aspek keuangan dan organisasi. Dengan demikian, dalam studi ini, peta jalan manajemen proyek terpadu dirancang yang juga mencakup elemen keuangan dan organisasi.

Di bagian keuangan, faktor biaya dan manfaat, metode evaluasi alternatif secara ekonomi, sensitivitas dan analisis risiko. Bagian organisasi berisi penentuan tujuan dan sasaran proyek, pembentukan tim proyek, dan penentuan batas proyek. Tabel 15.1 menunjukkan tahapan setiap fase manajemen proyek. Metodologi ini memungkinkan deteksi dini dan pencegahan masalah yang dapat terjadi di seluruh tahap implementasi proyek atau selama tahap penggunaan sistem berbasis ketertelusuran digital yang telah selesai.

#### 1. Persiapan dan Perencanaan

Pada tahap pertama peta jalan, secara umum, perusahaan harus mengumpulkan informasi tambahan tentang proyek ketertelusuran digital, membangun tim proyek ketertelusuran digitalnya, dan menentukan sumber daya proyek, seperti anggaran proyek dan tenaga kerja yang dibutuhkan. Akibatnya, studi pra-kelayakan harus dilakukan, dan kontribusi tambahan untuk proyek harus diselidiki.

Pada tahap berikutnya, tahap kedua, analisis dan desain keadaan apa adanya serta penerapan adalah tiga konsep utama yang secara langsung memengaruhi keseluruhan aliran proyek implementasi ketertelusuran digital. Pengumpulan data dari operasi dan analisis lingkungan proses sangat penting untuk analisis situasi terkini. Selain itu, penentuan kriteria pemilihan teknologi, alternatif tag dan penempatan tag dan pembaca serta identifikasi perangkat keras tambahan pembaca adalah poin penting lainnya yang memainkan peran kunci untuk kinerja sistem berbasis ketertelusuran digital. Selain itu, skenario pra-uji dan spesifikasi titik kontrol pembacaan adalah langkah lain dari evaluasi kinerja pembacaan.

**Tabel 15.1** Peta jalan yang diusulkan: Tahapan desain, integrasi dan penerapan sistem Ketertelusuran Digital.

Desain Integrasi dan Penerapan Sistem Ketertelusuran Digital	
Tahapan	Konsep
Persiapan & Perencanaan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memperoleh pengetahuan tentang teknologi</li> <li>• Identifikasi masalah</li> <li>• Penetapan persyaratan</li> <li>• Penetapan tujuan dan sasaran proyek</li> <li>• Pembentukan tim proyek</li> <li>• Penetapan batasan proyek (lingkup-anggaran)</li> <li>• Memberikan dukungan yang diperlukan untuk proyek</li> <li>• Studi pra-kelayakan               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Teknis</li> <li>– Ekonomi</li> <li>– Organisasi</li> </ul> </li> <li>• Penyusunan rencana proyek dan penugasan sumber daya untuk proyek</li> </ul>
Pengembangan & Penerapan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analisis Keadaan Apa Adanya               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Pengumpulan Data (bagan organisasi, diagram proses, penentuan kriteria kinerja, pengumpulan data yang terkait dengan mesin dan tenaga kerja, penelitian peralatan dan material)</li> <li>– Analisis proses dan lingkungan</li> </ul> </li> <li>• Desain               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Usulan solusi dan pengembangan proses baru</li> <li>– Penentuan frekuensi kerja,</li> <li>– Penentuan alternatif tag,</li> <li>– Penentuan persyaratan perangkat keras,</li> <li>– Penentuan skenario pra-uji, menyiapkan mesin dan melakukan pra-uji (daya tahan tag, kinerja pembacaan, dll.)</li> <li>– Menentukan penempatan tag dan antena,</li> <li>– Menetapkan perangkat keras yang sesuai (pembaca, antena dan tag, dll.) dan perangkat lunak</li> <li>– Mengidentifikasi modifikasi yang harus dilakukan pada proses,</li> <li>– Menentukan titik kontrol pembacaan,</li> <li>– Studi kelayakan terperinci</li> </ul> </li> <li>• Kelayakan ekonomi               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Faktor Biaya</li> <li>– Faktor Manfaat</li> <li>– Metode Evaluasi Ekonomi</li> <li>– Analisis Sensitivitas</li> <li>– Analisis Risiko</li> </ul> </li> </ul>

---

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kelayakan teknis (pra-uji yang terkait dengan perangkat keras dan tag)</li> <li>• Verifikasi <ul style="list-style-type: none"> <li>– Pengembangan perangkat lunak,</li> <li>– Studi percontohan (pengujian solusi)</li> </ul> </li> <li>• Penentuan proses skema percontohan</li> <li>• Pengadaan perangkat keras</li> <li>• Integrasi sistem</li> <li>• Uji coba</li> <li>• Pengujian</li> <li>• Studi perekrutan system <ul style="list-style-type: none"> <li>– Implementasi dan penyebaran solusi</li> </ul> </li> </ul>
Pemeliharaan dan Perekrutan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melakukan pengamatan terhadap pengalaman pengguna akhir dan pelanggan</li> <li>• Melakukan pengamatan terhadap proses dan penentuan masalah yang terkait dengan proses baru dan penyelesaian masalah</li> <li>• Melakukan perbandingan antara hasil yang direncanakan dan hasil aktual serta penentuan bidang yang memerlukan pengembangan</li> </ul>

---

## 2. Pengembangan dan Penerapan

Pada tahap penerapan, perangkat lunak sistem berbasis ketertelusuran digital yang mengendalikan aliran informasi tag sistem ke komputer dan menyediakan interaksi pengguna akhir-sistem serta aplikasi percontohan digunakan. Dengan cara ini, proses penerapan ketertelusuran digital akan berhasil diadopsi oleh seluruh sistem. Pertama-tama, studi percontohan atau proses harus didefinisikan dengan cermat untuk prosedur berikut dan untuk mendapatkan perangkat keras penting serta melakukan uji coba eksperimental proyek ketertelusuran digital. Setelah semua uji coba diterapkan, perekrutan sistem harus dilakukan untuk mengambil tindakan perbaikan dan menyebarkan sistem yang diusulkan untuk diterapkan. Setelah itu, kelayakan ekonomi dan teknis investasi diperlukan untuk menentukan keputusan akhir. Selain itu, analisis risiko dilakukan untuk investasi. Untuk analisis risiko, manfaat dipilih dan dapat digunakan dalam simulasi sebagai variabel. Model simulasi dapat digunakan untuk memperkirakan hasil investasi guna memahami kemungkinan seputar eksposur dan risiko investasi. Selain itu, menjalankan model simulasi menciptakan distribusi probabilitas atau penilaian risiko untuk investasi tertentu. Ia juga memilih nilai variabel secara acak dan mensimulasikan model serta memberikan rentang nilai yang diketahui tetapi nilai yang tidak pasti untuk setiap peristiwa tertentu.

## 3. Pemeliharaan dan Perekrutan

Terakhir, refleksi sistem berbasis ketertelusuran digital harus diamati dan dievaluasi secara cermat dengan menganalisis interpretasi pengguna akhir. Akibatnya, masalah yang terjadi dalam sistem harus diperbaiki dengan kontribusi dan kolaborasi dari kedua

pengguna akhir dan individu yang bertanggung jawab atas implementasi sistem.

### **Kesimpulan**

Dalam bab ini, peta jalan untuk desain ketertelusuran digital, teknologi identifikasi otomatis (auto-ID) dan aplikasinya dalam sistem manufaktur disajikan untuk mengisi kesenjangan yang ditunjukkan oleh tinjauan pustaka dan proyek-proyek sebelumnya.

Tujuan Industri 4.0 adalah untuk mencapai tingkat efisiensi dan produktivitas operasional yang lebih tinggi, serta tingkat otomatisasi yang lebih tinggi. Dalam penerapan proyek berbasis ketertelusuran digital yang diterapkan dalam industri manufaktur, biaya inventaris dan produksi yang berlebihan, biaya tenaga kerja yang berlebihan (disebabkan oleh operasi gudang dan produksi yang tidak efisien dan aktivitas yang tidak bernilai tambah, seperti sistem kontrol yang tidak memadai yang menyebabkan hilangnya produk dan ketertelusuran dan visibilitas barang yang tidak memadai), proses manual yang tidak efisien dalam proses kerja, ketidakakuratan catatan dan kesulitan dalam merencanakan aktivitas (karena data yang tidak akurat dan kurangnya catatan data waktu nyata) akan berkurang. Informasi terperinci mengenai teknologi yang paling umum digunakan di berbagai titik dalam rantai nilai produksi, yaitu kode batang, Identifikasi Frekuensi Radio (RFID), Sistem Penentuan Lokasi Real-time (RTLS), dan Sistem Pemosisian Global (GPS), dianalisis. Kerangka kerja arsitektur dibahas dan lapisan fisik dipertimbangkan.

Dalam bab ini, ditunjukkan dengan jelas bahwa teknologi ketertelusuran digital dapat diterapkan dalam industri produksi, dan validasi peta jalan implementasi yang diusulkan disediakan oleh desain yang berhasil. Terakhir, peta jalan ini dapat menjadi model referensi untuk memahami peningkatan efisiensi dalam sistem manufaktur menggunakan filosofi manajemen yang lebih baik dan teknologi modern.

## **BAB 16**

### **KEAMANAN SIBER DI ERA INDUSTRI 4.0**

Industri pembangunan global tengah mengalami transformasi untuk memenuhi tuntutan industri yang semakin kompleks dan sangat kompetitif saat ini. Dengan pesatnya kemajuan teknologi, muncul fenomena baru di era saat ini, Industri 4.0. Integrasi teknologi informasi dan teknologi operasional menghadirkan tantangan baru, khususnya keamanan siber.

Dalam bab ini, salah satu topik paling populer akhir-akhir ini, yaitu masalah keamanan siber, telah diteliti. Munculnya Internet of Things (IoT), juga telah mengubah secara dramatis munculnya ancaman siber. Ancaman keamanan dan kerentanan IoT, tantangan industri, alasan utama serangan siber, persyaratan keamanan siber, dan beberapa langkah/metode keamanan siber dibahas dengan perspektif global yang melibatkan sektor publik dan swasta dalam konteks IoT.

#### **16.1 PENDAHULUAN**

Revolusi industri merupakan tonggak terpenting yang telah mengubah arah sejarah manusia. Menurut banyak peneliti, revolusi industri memengaruhi gaya hidup masyarakat bahkan lebih dari revolusi sains.

Setelah ditemukannya tenaga uap, revolusi-revolusi telah berevolusi dengan perubahan cepat yang sejajar dengan kebutuhan setiap era. Revolusi-revolusi berikutnya muncul sebagai produksi massal yang digerakkan oleh energi listrik pada awal abad kedua puluh, dan penggunaan otomatisasi elektronik yang sangat efisien dalam lingkungan industri pada tahun 1970-an, dan akhirnya muncul baru-baru ini sebagai Industri 4.0, yang hadir dengan sistem produksi yang digerakkan oleh data, lebih khusus lagi sistem siber-fisik atau Internet of Things (IoT).

Di era saat ini, dunia berada di awal revolusi industri keempat yang berbasis pada IoT. IoT bergantung pada berbagai teknologi pendukung seperti jaringan sensor nirkabel (WSN), sistem mesin-ke-mesin (M2M), data besar, layanan cloud, dan aplikasi pintar serta sistem identifikasi frekuensi radio (RFID).

Perubahan baru dalam industri, yang juga dikenal sebagai Industri 4.0, sangat menarik perhatian perusahaan manufaktur. Hal ini penting bagi perusahaan manufaktur di seluruh dunia dengan efisiensi operasional, produktivitas, dan fitur kustomisasi. Industri 4.0 menyediakan penanganan volume data yang besar, pengembangan sistem interaktif manusia-mesin, dan peningkatan komunikasi antara lingkungan digital dan fisik.

Industri 4.0 mencakup tiga tahap penting: Pertama, mendapatkan catatan digital melalui sensor yang terpasang pada aset industri, yang mengumpulkan data dengan meniru perasaan dan pikiran manusia secara dekat. Teknologi ini dikenal sebagai fusi sensor. Kedua, langkah analisis dan visualisasi mencakup penerapan kemampuan analitis pada data yang ditangkap dengan sensor.

Dari pemrosesan sinyal hingga pengoptimalan, visualisasi, komputasi kognitif dan kinerja tinggi, banyak operasi berbeda dilakukan dengan operasi latar belakang. Sistem penyajian didukung oleh cloud industri untuk membantu mengelola volume data yang sangat besar. Ketiga, tahap penerjemahan wawasan menjadi tindakan melibatkan konversi data agregat menjadi keluaran yang bermakna, seperti manufaktur aditif, robot otonom, serta desain dan simulasi digital. Dalam cloud industri, data mentah diproses dengan aplikasi analisis data dan kemudian diubah menjadi pengetahuan yang dapat digunakan secara praktis.

Dengan Industri 4.0, era interkoneksi juga dimulai. Interkoneksi menyediakan tautan antara mitra, pelanggan, karyawan, dan sistem untuk mempercepat kinerja bisnis dan menciptakan peluang baru dengan berkolaborasi pada platform bersama. Interkoneksi merupakan persyaratan untuk akses instan ke data yang saling bergantung dan real-time antara industri atau antara geografi yang berbeda. Awan industri menyediakan platform umum untuk menyimpan data dan untuk mengolaborasikan pengguna dari berbagai geografi.

Peningkatan kepadatan data dengan Industri 4.0 dan penggabungan teknologi informasi dan teknologi operasional membawa serta tantangan baru, khususnya keamanan siber. Keamanan siber merupakan isu inti yang diikuti oleh semua pemerintah pada tingkat kepentingan tertinggi. Ini adalah perlindungan informasi bisnis dan pengetahuan berharga tentang subjek atau sistem dalam bentuk digital terhadap penyalahgunaan, akses tidak sah, dan pencurian.

Dengan meluasnya koneksi jaringan, serangan siber menjadi lebih umum karena meningkatnya kecenderungan penyalahgunaan data untuk berbagai tujuan seperti alasan finansial dan strategis. Ledakan teknologi baru dan meningkatnya ketergantungan masyarakat pada teknologi yang saling terhubung secara global, otomatisasi, dan komodifikasi alat-alat serangan siber, serangan peretas yang canggih, dan rendahnya langkah-langkah keamanan di pasar siber, tidak diragukan lagi merupakan hal-hal penting.

Dengan jumlah penyerang potensial dan semakin besarnya jaringan, alat-alat yang dapat digunakan oleh penyerang potensial menjadi lebih canggih, efisien, dan efektif. Oleh karena itu, IoT perlu dilindungi dari ancaman dan kerentanan untuk mencapai potensi IoT yang tertinggi. Penggunaan perangkat dan layanan yang terhubung secara luas di IoT telah menghasilkan bentuk-bentuk baru pertahanan siber untuk memastikan keamanan yang kuat.

Serangan dan ancaman siber telah meningkat pesat dalam beberapa dekade terakhir. Setiap pemangku kepentingan yang menggunakan sistem IoT secara langsung atau tidak langsung terpengaruh oleh masalah ini. Terutama perusahaan besar yang rentan terhadap serangan jahat yang mengakibatkan beban keuangan yang serius selain kerugian yang tak terukur seperti kerusakan data, kerusakan sistem, pelanggaran privasi, gengsi, pelanggan, keandalan, dan kerugian pasar.

Di banyak organisasi, keamanan siber terutama dianggap sebagai masalah teknologi. Para eksekutif/otoritas perusahaan publik dan swasta menyadari bahayanya, dan tidak ingin membiarkan penyerang mengakses informasi bisnis penting dan informasi khusus karyawan dan pelanggan. Umumnya, organisasi tidak secara resmi melaporkan serangan siber yang mereka alami. Sejujurnya, bisnis cenderung tidak mengungkapkan kerentanan keamanan yang

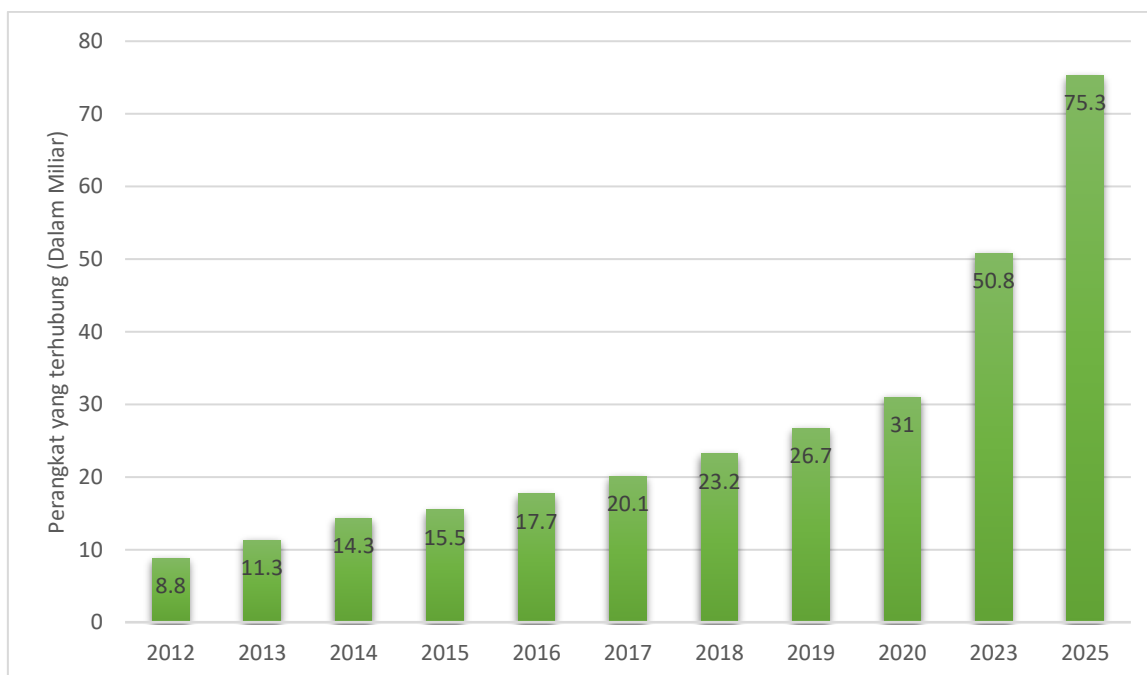
membuat mereka harus membayar tebusan bagi penjahat siber.

Sebagian besar perusahaan besar telah memperkuat kemampuan keamanan siber mereka secara signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Jutaan dolar telah dihabiskan untuk mengembangkan strategi baru dengan investasi teknologi dalam keamanan teknologi informasi (TI) untuk mengurangi risiko serangan siber. Sistem berbasis internet akan menjadi lebih menarik untuk serangan siber jika IoT mencapai pertumbuhan besar pada tahun 2020. Beberapa perusahaan dan organisasi telah memperkirakan jumlah hal yang akan menghubungkan internet dalam beberapa tahun mendatang.

Jumlah perangkat yang terhubung ke jaringan diperkirakan mencapai 20,8 miliar, dengan Cisco diperkirakan memiliki sekitar 50 miliar koneksi IoT pada tahun 2020, dan akhirnya, proyeksi Huawei menunjukkan bahwa pada tahun 2025, jumlah koneksi akan mencapai 100 miliar. Meskipun ada perbedaan dalam perkiraan, hasil yang paling penting adalah mengharapkan pertumbuhan yang penting. Kesimpulan yang paling jelas adalah bahwa akan ada sejumlah besar perangkat yang mendukung Internet yang memerlukan sistem perlindungan yang komprehensif segera. Gambar 16.1 menunjukkan jumlah perangkat yang terhubung di seluruh dunia dari tahun 2012 hingga 2025.

Meningkatnya serangan siber dalam beberapa tahun terakhir, dengan korban mulai dari individu hingga pemerintah di seluruh dunia, terus menimbulkan kekhawatiran. Tahun 2014 dinyatakan sebagai Tahun Pelanggaran dan tahun 2015 diubah namanya oleh beberapa komentator industri sebagai Tahun Pelanggaran 2.0. Seperti yang terlihat dari perspektif umum, jelas bahwa serangan siber telah menyebabkan banyak kerusakan di seluruh dunia. Untuk mencegah serangan siber, organisasi harus mendidik konsumen tentang prosedur keselamatan yang tepat yang harus diikuti saat menggunakan sistem IoT.

Dalam buku ini bertujuan untuk membahas beberapa masalah, seperti peningkatan intensitas data dan ancaman siber yang semakin serius karena penggunaan teknologi informasi, dalam konsep yang baru-baru ini muncul, Industri 4.0. Penggunaan IoT yang meluas menyebabkan peningkatan jumlah perusahaan yang saling terhubung, yang secara otomatis mengakibatkan sejumlah besar serangan siber.



**Gambar 16.1** Jumlah perangkat yang terhubung (Internet of Things) di seluruh dunia dari tahun 2012 hingga 2025

## 16.2 ANCAMAN KEAMANAN DAN KERENTANAN IOT

Tidak ada konsensus universal tunggal tentang arsitektur IoT. Berbagai arsitektur telah diusulkan oleh berbagai peneliti. Secara umum, IoT dapat dibagi menjadi empat level utama. Gambar 16.2 menunjukkan arsitektur level IoT dan beberapa komponen dasar di setiap level.

- *Lapisan Persepsi (Penginderaan)*: Lapisan persepsi juga disebut sebagai ‘Lapisan Penginderaan’. Lapisan ini terdiri dari objek fisik dan perangkat penginderaan seperti berbagai bentuk teknologi sensorik, sensor RFID. Teknologi ini memungkinkan perangkat untuk merasakan objek lain.
- *Lapisan Jaringan*: Lapisan jaringan adalah infrastruktur untuk mendukung koneksi nirkabel atau kabel antara perangkat sensor dan sistem pemrosesan informasi.
- *Lapisan Layanan*: Lapisan ini untuk memastikan dan mengelola layanan yang dibutuhkan oleh pengguna atau aplikasi. Lapisan ini bertanggung jawab atas manajemen layanan dan memiliki tautan ke basis data.
- *Lapisan Aplikasi (Antarmuka)*: Lapisan aplikasi atau antarmuka yang terdiri dari metode interaksi dengan pengguna atau aplikasi. Bertanggung jawab untuk memberikan layanan aplikasi kepada pengguna.

	Lapisan Persepsi	Lapisan Jaringan	Lapisan Layanan	Lapisan Aplikasi
Komponen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barcode</li> <li>• Tak RFID</li> <li>• RFID Writer-Reader</li> <li>• Sensor Cerdas, GPS</li> <li>• Perangkat BLE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jaringan sensor Nirkabel (WSN)</li> <li>• WLAN</li> <li>• Jejaring Sosial</li> <li>• Cloud Network</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manajemen Layanan</li> <li>• Basis Data</li> <li>• Layanan API</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplikasi dan Manajemen Cerdas</li> <li>• Interface</li> </ul>
Ancaman dan Kerentanan keamanan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Akses tidak Sah</li> <li>• Kerahasiaan</li> <li>• Ketersediaan</li> <li>• Noisy Data</li> <li>• Serangan Kode berbahaya</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Denial of Service (DoS)</li> <li>• Serangan Routing</li> <li>• Ancaman Transmisi</li> <li>• Cabang Data</li> <li>• Kemacetan Jaringan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manipulasi</li> <li>• Pemalsuan</li> <li>• Akses tidak sah</li> <li>• Informasi berbahaya</li> <li>• Serangan DoS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ancaman Konfigurasi</li> <li>• Serangan kode berbahaya (Malware)</li> <li>• Serangan Phishing</li> </ul>

**Gambar 16.2** Ancaman dan kerentanan keamanan menurut level

Penyebaran perangkat yang terhubung di IoT di area yang luas telah menciptakan permintaan yang besar untuk keamanan yang tangguh di samping permintaan yang terus meningkat akan jutaan perangkat dan layanan yang terhubung di seluruh dunia. Jumlah dan kompleksitas ancaman dan serangan meningkat dari hari ke hari dan alat yang tersedia untuk penyerang potensial juga menjadi lebih canggih dan efektif. Oleh karena itu, agar IoT dapat mencapai potensi penuhnya, IoT perlu dilindungi secara ketat terhadap ancaman dan kerentanan.

Ancaman keamanan pada setiap lapisan berbeda karena fiturnya. Ancaman keamanan dan kerentanan menurut lapisan disajikan di bawah ini.

Pada lapisan persepsi, sensor cerdas dan tag RFID secara otomatis mengidentifikasi lingkungan dan bertukar data antar perangkat. Masalah keamanan merupakan masalah penting dalam lapisan persepsi. Pada lapisan persepsi, sebagian besar ancaman berasal dari entitas eksternal, sebagian besar dari sensor dan perangkat pengumpulan data lainnya. Sebagian besar perangkat ini umumnya berukuran kecil, murah, dan tidak dilindungi keamanan fisik. Ancaman dan kerentanan umum dalam lapisan persepsi dapat diringkas sebagai berikut:

- *Akses tidak sah*: Pada simpul pertama, akses tidak sah merupakan ancaman penting karena penangkapan fisik atau serangan logika.
- *Kerahasiaan*: Penyerang dapat menempatkan sensor atau perangkat jahat untuk memperoleh informasi dari sistem.
- *Ketersediaan*: Komponen sistem berhenti bekerja karena ditangkap secara fisik atau diserang secara logis.
- *Data berisik (ancaman transmisi)*: Data mungkin berisi informasi yang tidak lengkap atau informasi yang salah karena transmisi melalui jaringan yang mencakup jarak yang jauh.
- *Serangan kode jahat*: Penyerang dapat menyebabkan kegagalan perangkat lunak

melalui kode jahat seperti virus, Trojan, dan pesan sampah.

Lapisan jaringan menghubungkan semua hal dalam IoT dan memungkinkan mereka untuk menyadari lingkungannya. Lapisan jaringan cukup sensitif terhadap serangan karena sejumlah besar data yang dibawanya. IoT menghubungkan berbagai jenis jaringan, yang dapat menyebabkan kesulitan keamanan jaringan. Oleh karena itu perlindungan keamanan pada level ini sangat penting bagi IoT. Pada lapisan jaringan, ancaman dan kerentanan keamanan umum adalah sebagai berikut.

- *Serangan Denial of Services (DoS)*: Penyerang terus-menerus membombardir jaringan yang ditargetkan dengan pesan kegagalan, permintaan palsu, dan/atau perintah lainnya. Serangan DoS adalah ancaman paling umum bagi jaringan.
- *Serangan routing*: Ini adalah serangan pada jalur routing seperti mengubah informasi routing, membuat loop routing atau mengirim pesan kesalahan.
- *Ancaman transmisi*: Ini adalah ancaman dalam transmisi seperti pemblokiran, manipulasi data, interupsi.
- *Pelanggaran data*: Pelanggaran data adalah pelepasan informasi aman atau rahasia yang disengaja atau tidak disengaja ke lingkungan yang tidak tepercaya.
- *Kemacetan jaringan*: Sejumlah besar data sensor beserta sejumlah besar autentikasi perangkat dapat menyebabkan kemacetan jaringan.

Dalam IoT, lapisan layanan bergantung pada teknologi middleware, yang memungkinkan komunikasi dan pengelolaan data dalam aplikasi dan layanan. Lapisan layanan mendukung dan memuat layanan menggunakan antarmuka pemrograman aplikasi (API). Dalam lapisan ini, keamanan data sangat penting dan lebih rumit dibandingkan dengan lapisan lainnya.

Beberapa ancaman dan kerentanan keamanan umum dalam lapisan layanan adalah:

- *Manipulasi*: Informasi dalam layanan dimanipulasi oleh penyerang.
- *Spoofing*: Informasi dikembalikan oleh penyerang untuk menipu penerima.
- *Akses tidak sah*: Penyalahgunaan layanan yang diakses oleh pengguna tidak sah.
- *Informasi berbahaya*: Privasi dan keamanan data terancam dengan pelacakan berbahaya.
- *Serangan DoS*: Sumber daya layanan yang berguna tidak tersedia karena terpapar lalu lintas yang melebihi kapasitasnya.

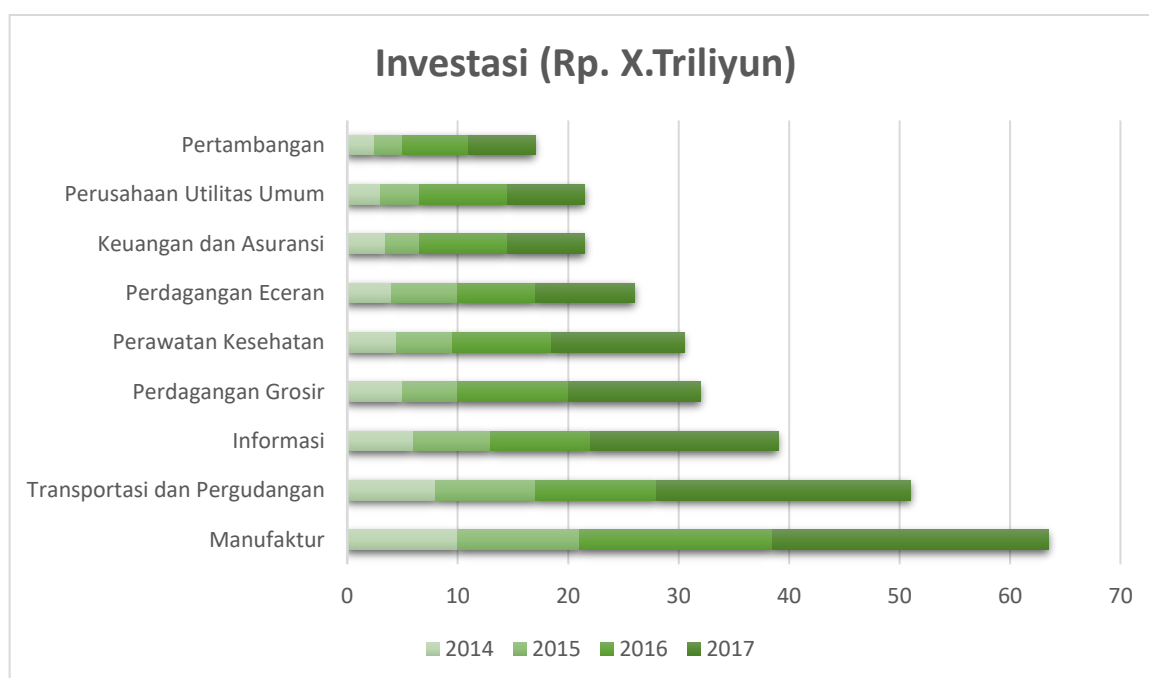
Lapisan paling atas adalah lapisan aplikasi yang terlihat oleh pengguna akhir. Lapisan aplikasi mencakup berbagai antarmuka dan aplikasi, dari yang sederhana hingga yang canggih. Persyaratan keamanan dalam lapisan aplikasi sangat bergantung pada aplikasi. Ancaman keamanan dan kerentanan dalam lapisan aplikasi dirangkum di bawah ini:

- *Ancaman konfigurasi*: Konfigurasi yang gagal pada antarmuka dan/atau kesalahan konfigurasi yang tidak tepat pada node jarak jauh merupakan ancaman terpenting untuk lapisan ini.
- *Serangan kode berbahaya (Malware)*: Serangan ini sengaja dilakukan secara langsung ke sistem perangkat lunak untuk secara sengaja menyebabkan kerusakan atau merusak fungsi sistem yang dimaksudkan.
- *Serangan Phishing*: Di lapisan antarmuka, penyerang dapat mencoba memperoleh

informasi sensitif seperti nama pengguna, kata sandi, dan detail kartu kredit. Persyaratan keamanan di semua lapisan adalah kerahasiaan, integritas, ketersediaan, autentikasi, non-repudiasi, dan privasi.

### 16.3 TANTANGAN INDUSTRI

Seiring dengan perkembangan terkini dalam platform IoT, hampir mustahil bagi industri untuk membayangkan banyaknya implementasi IoT, mengingat inovasi dalam teknologi, layanan, dan kebutuhan berkelanjutan dalam industri. Area aplikasi saat ini meliputi manufaktur cerdas, rumah cerdas, dan kota cerdas, transportasi dan pergudangan, perawatan kesehatan, ritel dan logistik, pemantauan lingkungan, keuangan cerdas, dan asuransi. Investasi dalam solusi IoT menurut Industri ditunjukkan dalam Gambar 16.3. Dengan demikian, sektor manufaktur memiliki volume investasi lebih dari 60 miliar dolar. Transportasi dan pergudangan serta sistem informasi adalah sektor yang paling banyak diinvestasikan setelah sektor manufaktur (Gambar 16.3).



**Gambar 16.3** Investasi dalam solusi IoT berdasarkan industri

Ada tantangan keamanan yang terkait dengan semua area aplikasi ini. Beberapa di antaranya sangat jelas, misalnya, penyalahgunaan informasi pribadi, penyalahgunaan keuangan. Di sisi lain, yang lain lebih spesifik tergantung pada struktur industri. Dengan semakin banyaknya perangkat yang terhubung dengan perusahaan yang dimasukkan ke dalam sektor perbankan, industri keuangan dihadapkan pada semakin banyaknya tantangan keamanan siber yang terus berkembang. Masalah yang paling menjadi perhatian dalam industri jasa keuangan meliputi perlindungan privasi dan keamanan data, pengelolaan risiko pihak ketiga, dan pembatasan peraturan kepatuhan.

Meskipun serangan siber telah menyebar luas di industri manufaktur, laporan terkini

menunjukkan bahwa perusahaan energi lebih rentan terhadap ancaman ini, yang telah menjadi lebih canggih selama bertahun-tahun. Setidaknya 75% perusahaan di sektor minyak, gas, dan listrik mengalami satu atau lebih serangan yang berhasil pada tahun 2016. Secara total, lebih dari 15% serangan siber merupakan serangan langsung terhadap sektor energi. Tantangan yang menjadi perhatian utama dalam industri energi meliputi perlindungan privasi dan keamanan data, kurangnya keterampilan dan kesadaran, integritas komponen yang digunakan dalam sistem energi dan meningkatnya saling ketergantungan di antara para pelaku pasar.

Penggunaan IoT dalam aplikasi perawatan kesehatan tumbuh dengan cepat. Banyak aplikasi seperti monitor detak jantung, monitor tekanan darah, dan kapsul endoskopi saat ini digunakan. Keamanan informasi dan privasi menjadi semakin penting dalam sektor perawatan kesehatan. Penyimpanan catatan pasien digital, peningkatan regulasi seperti Health Insurance Portability and Accountability Act (HIPAA), konsolidasi penyedia, dan meningkatnya persyaratan informasi antara pasien, penyedia, dan pembayar menunjukkan perlunya keamanan informasi yang lebih baik.

Dalam industri transportasi, perkembangan teknologi yang pesat dan perluasan konektivitas sistem, jaringan, dan perangkat di seluruh transportasi dan logistik membawa lebih banyak peluang dalam hal biaya, kecepatan, dan efisiensi. Karena semakin banyak perangkat dan proses kontrol yang terhubung di lingkungan internet, lebih banyak kerentanan akan muncul. Mengembangkan langkah-langkah terhadap ancaman ini berada di puncak isu-isu penting bagi sektor transportasi. Di antara masalah utama dalam industri transportasi adalah keamanan data dan privasi serta ancaman cyber yang baru dan canggih. Beberapa tantangan industri yang dihadapi para ahli keamanan siber diuraikan pada Tabel 16.1 menurut industri.

**Tabel 16.1** Tantangan menurut industry

Keuangan	Melindungi privasi dan keamanan data
	Mengelola risiko pihak ketiga: Kontrak alih daya, seperti perjanjian layanan cloud, memberlakukan peraturan pembagian data yang rumit dan menimbulkan sejumlah tantangan keamanan siber baru
	Ancaman siber yang muncul dan canggih
	Kepatuhan terhadap peraturan
Energi	Melindungi privasi dan keamanan data
	Kurangnya keterampilan dan kesadaran
	Pembagian informasi: Banyak organisasi tidak membagi informasi tentang ancaman atau bekerja sama secara eksternal
	Integritas komponen yang digunakan dalam sistem energi
	Peningkatan saling ketergantungan di antara pelaku pasar
	Penyelarasan aktivitas keamanan siber: Semua aktivitas harus diselaraskan dan diintegrasikan sepenuhnya dengan keamanan siber nasional
Pelayanan kesehatan	Melindungi privasi dan keamanan data: Organisasi layanan kesehatan diharuskan mematuhi Undang-Undang Portabilitas dan Akuntabilitas Asuransi

	Kesehatan (HIPAA), yang mengharuskan vendor layanan kesehatan untuk memastikan bahwa privasi data pengguna tidak terganggu dalam situasi apa pun (Zhang dan Liu 2010)
	Masalah peralatan medis: Organisasi layanan kesehatan memiliki peralatan medis khusus yang dapat menimbulkan tantangan keamanan tertentu (Korolov 2015)
	Mengelola risiko pihak ketiga: Organisasi layanan kesehatan ragu untuk beralih ke perlindungan data berbasis cloud untuk memastikan bahwa informasi sensitif terlindungi tanpa meninggalkan jaringan perusahaan (Zhang dan Liu 2010)
Angkutan	Melindungi privasi dan keamanan data terutama di industri kargo (Xu et al. 2014)
	Ancaman siber yang baru muncul dan canggih (serangan DoS, serangan Spoofing) (Warren dan Hutchinson 2000)

#### 16.4 EVOLUSI SERANGAN SIBER

Lanskap siber terus berubah dan berkembang karena kecepatan perubahan teknologi, kompleksitas penyerang, nilai target potensial, dan dampak serangan. Dengan meluasnya penggunaan jaringan komputer, peretas telah memanfaatkan layanan berbasis jaringan untuk mendapatkan keuntungan pribadi dan reputasi.

Dalam lingkungan ancaman di mana produk keamanan perlu terus disempurnakan atau diperbarui untuk mengidentifikasi eksploitasi terkini, tantangannya adalah menemukan solusi yang menyediakan pertahanan yang tahan lama untuk memastikan perlindungan jaringan yang langgeng.

Setiap organisasi memiliki pengetahuan digital dan banyak bisnis mengelola transaksi bisnis dan perdagangan dengan sistem daring. Sebagian besar perusahaan terbuka terhadap ancaman siber yang menyerang dari batas eksternal dan internal, sehingga infrastruktur penting Anda perlu dilindungi.

Keamanan siber awalnya dianggap sebagai masalah bagi tim TI, tetapi saat ini menjadi agenda bagi seluruh eksekutif senior. Kejahatan dunia maya dipicu oleh teknologi canggih, penggunaan mobilitas, media sosial, dan tren yang relatif baru dalam konektivitas yang berkembang pesat—semuanya berada di tangan jaringan kriminal terorganisasi.

Dalam keadaan ini, pendekatan yang cerdas, dinamis, dan evolusioner terhadap keamanan dunia maya sangat penting untuk tetap unggul dalam kejahatan dunia maya dan persaingan. Upaya keamanan dunia maya memerlukan perlindungan terhadap berbagai tantangan yang lebih luas. Hal ini semakin sulit dengan teknologi baru, tren dalam penggunaan seluler, media sosial, musuh yang terorganisasi dan memiliki dana yang besar, serta serangan 24 jam. Risiko dunia maya dapat berdampak langsung pada segala hal mulai dari harga bursa saham hingga reputasi merek, dengan strukturnya yang lebih rumit.

Gambar 16.4 menunjukkan bagaimana serangan dunia maya telah berkembang selama bertahun-tahun dan apa yang akan dilihat industri di tahun-tahun mendatang. Pada awal tahun 1980-an, serangan dunia maya umum dimulai dengan metode pemecahan kata sandi

dan tebakan kata sandi. Saat ini, serangan dunia maya terarah terjadi dengan packet spoofing, pemindaian lanjutan, keylogger, dan penolakan layanan. Di masa mendatang, serangan siber strategis diperkirakan akan merusak titik-titik strategis dengan bot, morphing, dan kode-kode berbahaya. Seiring berjalannya waktu, sifat serangan siber menjadi rumit dan sangat canggih.



**Gambar 16.4** Evolusi serangan siber

### 16.5 KASUS SERANGAN SIBER DAN SOLUSINYA

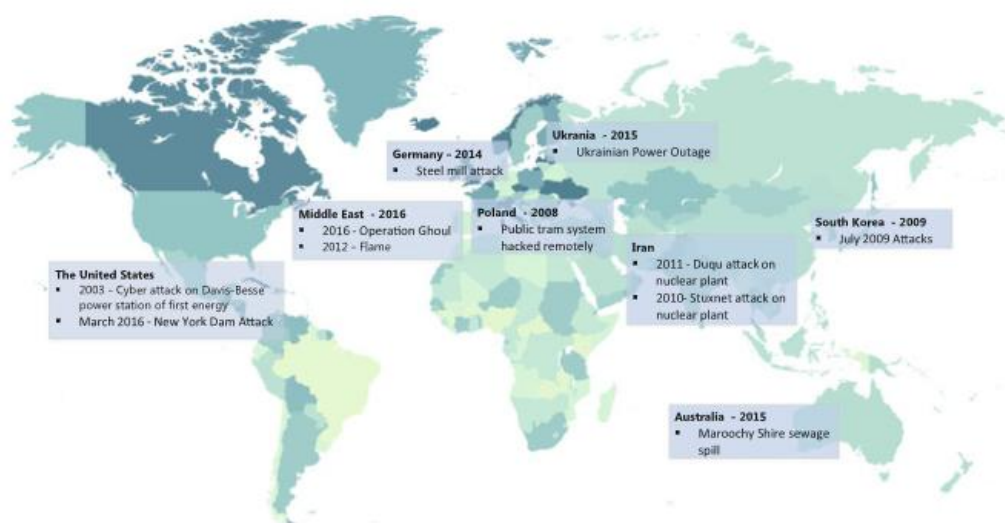
Ruang siber merupakan komunitas yang berkembang di mana setiap orang dapat saling berhubungan tanpa terikat waktu dan jarak. Karena alasan ini, beberapa orang menggunakan ruang siber untuk rencana mencurigakan mereka sendiri terhadap individu, perusahaan, bank, bahkan lembaga militer dan pemerintah. Di bagian ini, kami akan menyajikan beberapa serangan siber penting, yang merupakan terorisme siber berskala besar yang memengaruhi massa dalam jumlah besar (Gambar 16.5).

- **Flame:** Flame, juga dikenal sebagai Skywiper dan Flamer, adalah malware komputer modular yang ditemukan pada tahun 2012 sebagai virus yang menyerang komputer sistem operasi Microsoft Windows di Timur Tengah. Ketika digunakan oleh mata-mata untuk spionase, malware ini menginfeksi sistem lain melalui jaringan area lokal (LAN) atau stik USB dengan lebih dari ribuan mesin yang terhubung ke komputer lain, lembaga pendidikan, dan lembaga pemerintah. Percakapan Skype, aktivitas keyboard, tangkapan layar, dan lalu lintas jaringan direkam. Pada tanggal 28 Mei 2012, virus tersebut ditemukan oleh Tim Tanggap Darurat Komputer Nasional Iran (CERT), CrySys

- Lab, dan Pusat MAHER dari Kaspersky Lab.
- ***Serangan Siber Juli 2009:*** Sekelompok serangan siber menyerang situs web keuangan dan kantor berita pemerintah besar, baik Amerika Serikat maupun Korea Selatan, dengan merilis botnet. Ini termasuk komputer yang diretas yang menyebabkan server kelebihan beban karena banjir lalu lintas yang disebut serangan DDoS. Lebih dari 300.000 komputer dibajak dari berbagai sumber.
  - ***Proyek Spamhaus:*** Spamhaus, yang dianggap sebagai serangan siber terbesar dalam sejarah, adalah layanan penyaringan yang digunakan untuk mengekstrak email spam. Ribuan warga Inggris mengirim Spamhaus setiap hari untuk menentukan apakah mereka akan menerima email masuk. Spamhaus menambahkan Cyberbunker ke situs-situs yang masuk daftar hitam pada tanggal 18 Maret 2013; Cyberbunker dan perusahaan hosting lainnya telah ditugaskan untuk merekrut router rumah dan broadband guna menyewa peretas untuk menyalahgunakan botnet guna mematikan sistem Spamhaus.
  - ***Tumpahan limbah Maroochy Shire di Australia*** (Maret 2000, Australia): Penyerang mengubah data elektronik menggunakan radio nirkabel yang dicuri, pengendali SCADA, dan perangkat lunak kontrol, dan semua operasi gagal. Hal ini menyebabkan pelepasan hingga satu juta liter limbah ke sungai dan perairan pesisir Maroochydore di Queensland, Australia.
  - ***Serangan siber pada pembangkit listrik Davis-Besse milik First Energy (Januari 2003, Amerika Serikat):*** Cacing Slammer memasuki jaringan komputer pribadi di pembangkit listrik tenaga nuklir Davis-Besse di Ohio dan menonaktifkan sistem pemantauan keamanan selama sekitar lima jam.
  - ***Sistem trem umum diretas dari jarak jauh (Januari 2008, Polandia):*** Sistem persinyalan pada jaringan trem Lodz dimanipulasi oleh sistem kendali jarak jauh yang dirancang oleh seorang anak laki-laki berusia 14 tahun yang menggunakan kendali jarak jauh TV. Hal itu menyebabkan empat trem tergelincir dan lebih dari selusin penumpang terluka.
  - ***Serangan Stuxnet pada pabrik nuklir Iran (Desember 2010, Iran):*** Pabrik nuklir Natanz di Iran terinfeksi oleh Stuxnet pada bulan Juni 2010, cacing siber ini diduga merupakan upaya bersama Israel dan AS tetapi tidak ada yang bertanggung jawab atas serangan tersebut. Cacing tersebut menghancurkan 1000 sentrifus nuklir di Teheran dan sangat memengaruhi kemajuan negara tersebut karena serangan tersebut bukan hanya sekadar serangan pembangkit listrik dan juga menginfeksi 60.000 komputer.
  - ***Serangan Duqu di pabrik nuklir Iran (November 2011, Iran):*** Trojan Duqu menyerang sistem komputer Iran. Para ahli mengatakan dalam sebuah pernyataan kepada Reuters bahwa Duqu yang berbasis pada Stuxnet dirancang untuk mengumpulkan data yang akan memfasilitasi peluncuran serangan siber di masa mendatang. Stuxnet dimaksudkan untuk menonaktifkan sistem kontrol industri dan mungkin telah menghancurkan beberapa sentrifus yang digunakan Iran untuk memperkaya uranium.
  - ***Serangan pabrik baja (Desember 2014, Jerman):*** Para peretas menyerang pabrik baja

di Jerman. Dengan memanipulasi atau mengganggu sistem kontrol, hal itu menyebabkan kerusakan besar di pabrik pengecoran. Penyerang yang canggih memasuki jaringan kantor pabrik baja menggunakan spear-phishing dan rekayasa sosial. Jaringan produksi dicapai dari jaringan ini. Dengan tindakan para penyerang, komponen kontrol dan semua mesin produksi terputus.

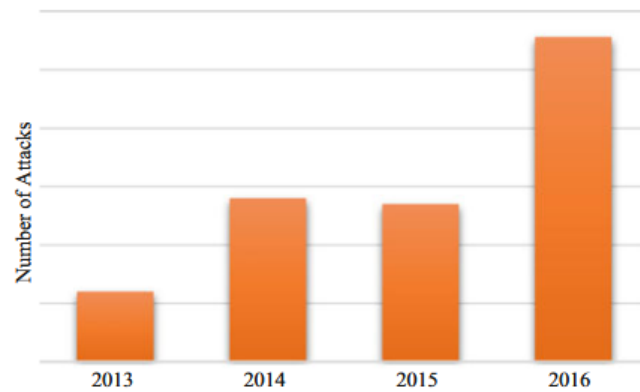
Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 16.6, serangan siber pada jaringan TI Industri dan Komersial telah menunjukkan peningkatan yang signifikan baik dalam frekuensi maupun intensitas selama empat tahun terakhir.



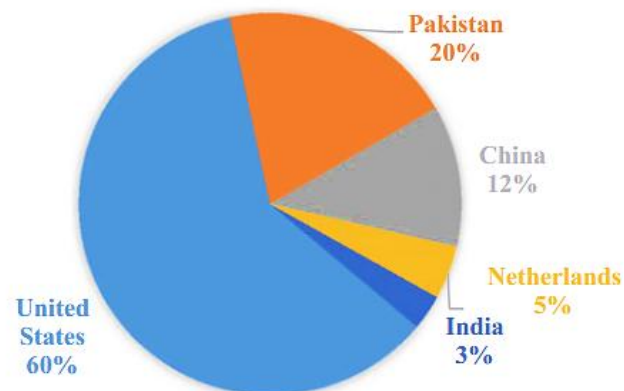
**Gambar 16.5** Serangan siber industri besar berdasarkan wilayah

Serangan yang menargetkan sistem kontrol industri (ICS) meningkat 110% pada bulan November 2016 dibandingkan tahun lalu, menurut data layanan keamanan manajemen IBM. Secara khusus, peningkatan lalu lintas ICS terkait dengan serangan brute force SCADA yang menggunakan otomatisasi untuk menebak kata sandi default atau lemah. Kemudian penyerang dapat memanipulasi perangkat SCADA yang terpasang dari jarak jauh. Amerika Serikat merupakan target terbesar serangan berbasis ICS pada tahun 2016 karena serangan ini sekarang memiliki kehadiran ICS yang lebih besar daripada negara lain mana pun. 5 wilayah sumber dan tujuan teratas diilustrasikan dalam Gambar 16.7 dan 16.8.

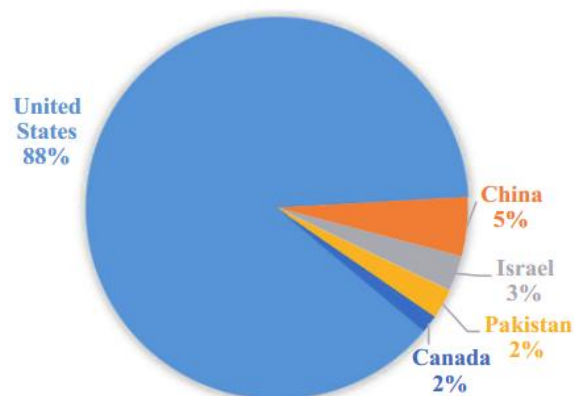
Berikut ini, beberapa kasus serangan siber penting terkini yang terjadi di berbagai belahan dunia diberikan.



**Gambar 16.6** Serangan sistem IoT industri berdasarkan tahun



**Gambar 16.7** 5 negara sumber teratas



**Gambar 16.8** 5 negara tujuan teratas

- **Operasi Ghoul:** Malware SFG, yang ditemukan di jaringan perusahaan energi Eropa pada bulan Juni 2016, telah menciptakan pintu belakang untuk sistem kontrol industri yang menjadi target. Menurut peneliti keamanan di SentinelOne Labs, tujuannya adalah untuk mengekstrak data dari jaringan energi atau mematikan jaringan energi. Malware SFG berbasis Windows dibuat untuk mengatasi perangkat lunak antivirus dan firewall tradisional.

- **Serangan Bendungan New York:** Pada bulan Maret 2016, kontrol berbasis komputer terhadap bendungan di New York diretas oleh penyerang menggunakan modem seluler.
- **Pemadaman Listrik Ukraina:** Pada bulan Desember 2015, sebuah perusahaan listrik yang berlokasi di Ukraina bagian barat mengalami pemadaman listrik yang berdampak pada area yang luas termasuk ibu kota regional Ivano-Frankivsk. Tiga perusahaan energi terpisah, yang dikenal sebagai "Oblenergos", diserang dan memblokir daya 225.000 pelanggan. Serangan tersebut dilakukan oleh peretas yang menggunakan malware BlackEnergy yang mengeksploitasi makro dalam dokumen Microsoft Excel. Bug tersebut ditanam ke dalam jaringan perusahaan menggunakan email spam. Serangan terhadap sistem industri akan terus berlanjut karena otomatisasi dan peningkatan koneksi internet.

Ini berarti bahwa jumlah serangan siber yang merusak seperti itu akan terus meningkat dan oleh karena itu semua organisasi yang dirugikan akan membayar harga yang mahal untuk serangan tersebut.

## 16.6 PRINSIP STRATEGIS KEAMANAN SIBER

Prinsip keamanan utama dari keamanan IoT yang efisien dibahas dari enam aspek. Prinsip-prinsip ini harus dipastikan agar keamanan dapat terjamin di seluruh sistem IoT.

- **Kerahasiaan:** Kerahasiaan adalah kemampuan untuk menyembunyikan informasi dari orang-orang yang tidak berwenang untuk mengaksesnya dan dengan demikian memerlukan perlindungan dari akses yang tidak sah. Kerahasiaan adalah fitur keamanan penting dalam IoT. Dalam sebagian besar situasi dan skenario, data sensitif seperti data pasien, data perdagangan pribadi, dan/atau data militer serta kredensial keamanan dan kunci rahasia, harus disembunyikan dari akses yang tidak sah.
- **Integritas:** Integritas informasi mengacu pada perlindungan informasi dari modifikasi yang tidak sah, tidak terduga, atau tidak disengaja. Integritas adalah properti keamanan wajib dalam sebagian besar kasus untuk menyediakan layanan yang andal bagi pengguna IoT. Sistem yang berbeda dalam IoT memiliki kebutuhan integritas yang beragam.
- **Ketersediaan:** Ketersediaan adalah akses ke informasi kapan pun dibutuhkan oleh pengguna perangkat (atau perangkat itu sendiri). Oleh karena itu, sumber daya IoT harus tersedia tepat waktu untuk memenuhi kebutuhan atau menghindari kerugian yang signifikan.
- **Keaslian:** Properti keaslian hanya memungkinkan entitas yang berwenang untuk melakukan operasi tertentu dalam jaringan. Kebutuhan autentikasi yang berbeda memerlukan solusi yang berbeda. Beberapa solusi harus memiliki kontrol yang kuat, misalnya, autentikasi sistem keuangan. Di sisi lain, sebagian besar harus bersifat internasional, misalnya, ePassport, sementara yang lain harus bersifat lokal.
- **Nonrepudiation:** Layanan IoT harus menyediakan jejak audit tepercaya. Properti nonrepudiation menyajikan bukti tertentu dalam kasus di mana pengguna atau

perangkat tidak dapat menyangkal suatu tindakan, misalnya, tindakan pembayaran.

- *Privasi*: Privasi adalah hak entitas untuk menentukan sejauh mana ia akan berinteraksi dengan lingkungannya dan sejauh mana entitas tersebut bersedia untuk berbagi informasi pribadi dengan orang lain.

## 16.7 LANGKAH-LANGKAH KEAMANAN SIBER

Langkah-langkah keamanan siber harus diambil di masa mendatang untuk mengurangi risiko siber. Kami akan menjelaskan beberapa tindakan pencegahan/langkah-langkah keamanan siber dasar sebisa mungkin untuk mencegah semua kemungkinan serangan.

- Jangan biarkan koneksi langsung ke mesin di jaringan kontrol, jaringan bisnis, atau Internet. Organisasi mungkin tidak menyadari keberadaan koneksi ini, penyerang siber dapat menemukan celah untuk mengakses dan mengeksploitasi sistem kontrol industri untuk menimbulkan kerusakan fisik. Karena alasan ini, saluran antara perangkat dalam sistem kontrol dan perangkat jaringan lainnya harus dihilangkan dari pusat untuk mengurangi celah jaringan.
- Firewall adalah program perangkat lunak atau perangkat keras yang menyaring lalu lintas masuk dan keluar antara berbagai bagian jaringan atau antara jaringan dan Internet. Jangan biarkan ancaman dengan mudah mencapai sistem Anda dengan mengurangi jumlah rute di jaringan Anda dan menerapkan protokol keamanan pada rute tersebut. Menetapkan batas dan segmen jaringan memberi otoritas organisasi untuk menerapkan kontrol detektif dan protektif pada infrastruktur. Pemantauan, pembatasan, dan pengelolaan arus komunikasi menyediakan kemampuan praktis untuk lalu lintas jaringan dasar (terutama untuk lalu lintas yang melampaui batas jaringan) dan menentukan arus komunikasi yang tidak normal atau mencurigakan.
- Akses jarak jauh ke jaringan menggunakan beberapa metode konservatif seperti Virtual Private Network (VPN) memberikan keuntungan besar bagi pengguna akhir. Akses jarak jauh ini dapat diperkuat dengan mengurangi jumlah alamat Protokol Internet (IP) yang dapat mengaksesnya dengan menggunakan perangkat jaringan dan/atau firewall ke alamat IP yang teridentifikasi.
- Kontrol akses berbasis peran mengizinkan atau menolak akses ke sumber daya jaringan berdasarkan fungsi bisnis. Ini membatasi kemampuan untuk mengakses file atau bagian sistem yang tidak boleh diakses oleh pengguna individu (atau penyerang).
- Menerapkan kata sandi yang kuat adalah cara termudah untuk memperkuat keamanan Anda. Peretas dapat menggunakan perangkat lunak yang mudah diakses untuk mencoba jutaan kombinasi karakter guna memperoleh akses yang tidak sah—ini disebut serangan brute force. Menurut Microsoft, Anda harus benar-benar menghindari penggunaan data pribadi (seperti tanggal lahir), kata-kata yang sudah dikenal sebelumnya, dan urutan karakter atau angka yang berdekatan pada papan ketik. Buat kebijakan kata sandi untuk membantu karyawan memantau praktik terbaik demi keamanan. Berbagai solusi teknologi dapat didukung untuk menegakkan kebijakan kata sandi Anda, seperti pengaturan ulang kata sandi terjadwal.

- Banyak perangkat yang mendukung Internet menyertakan kredensial default yang dikodekan secara keras. Informasi identitas tersebut sering kali tersedia secara bebas di Internet dan diketahui banyak orang. Sebagian besar malware yang menargetkan perangkat IoT hanya dilakukan oleh penyerang yang menggunakan kredensial default. Menurut Microsoft, Anda harus benar-benar menghindari penggunaan data pribadi (seperti tanggal lahir), kata-kata yang sudah dikenal sebelumnya, dan urutan karakter atau angka yang berdekatan pada papan ketik.
- Penting untuk memastikan kesadaran akan kerentanan dan penerapan patch dan pembaruan yang diperlukan. Untuk melindungi organisasi dari serangan oportunistik, sistem harus diterapkan untuk memantau dan menegakkan pengaturan dan pembaruan sistem. Organisasi harus mempertimbangkan untuk memperbarui pengaturan sistem dan perangkat lunak secara otomatis untuk menghindari hilangnya pembaruan penting.
- Karyawan Anda bertanggung jawab untuk membantu memastikan keamanan bisnis Anda. Sangat penting untuk memberikan informasi kepada karyawan Anda tentang kebiasaan online yang aman dan pertahanan proaktif serta memberi mereka kesadaran dan pelatihan keamanan siber secara berkala.
- Karena sifatnya yang portabel, risiko komputer laptop lebih besar. Penting bagi Anda untuk mengambil langkah ekstra untuk melindungi data sensitif. Penting bagi Anda untuk mengambil langkah ekstra untuk melindungi data sensitif. Mengenkripsi laptop Anda adalah cara termudah untuk mengambil tindakan pencegahan. Perangkat lunak enkripsi mengubah cara informasi muncul di hard drive, sehingga tidak dapat dibaca tanpa kata sandi yang benar.
- Saat ini ponsel pintar menjadi pusat segalanya, jadi harus dianggap bahwa ponsel pintar sama berharganya dengan komputer perusahaan jika hilang atau dicuri. Perangkat lunak enkripsi, perlindungan kata sandi, dan penerapan penghapusan jarak jauh adalah metode pengamanan yang sangat efektif untuk ponsel pintar dari semua kemungkinan serangan.
- Pemimpin organisasi umumnya tidak mengetahui ancaman dan kebutuhan keamanan siber. Melibatkan manajer dalam lingkup keamanan siber membantu perusahaan dengan masalah keamanan siber dalam berinteraksi dengan pemangku kepentingan eksternal.
- Meskipun demikian, administrator tidak boleh hanya mengandalkan perangkat lunak anti-virus untuk mendeteksi infeksi. Firewall, sensor deteksi dan pencegahan intrusi, dan log dari server harus dipantau dalam hal indikasi infeksi. Rencana respons insiden merupakan komponen penting namun belum cukup digunakan dalam kesiapsiagaan dan fleksibilitas tanggap darurat. Tindakan keamanan siber yang efektif akan membatasi kerusakan, meningkatkan kepercayaan mitra dan pelanggan, serta mengurangi biaya dan waktu pemulihan.

## **Kesimpulan**

Perkembangan teknologi industri digital baru menyebabkan munculnya Industri 4.0,

gelombang keempat revolusi industri. Industri 4.0 menangani volume data yang sangat besar, mengembangkan sistem interaktif manusia-mesin, dan meningkatkan komunikasi antara lingkungan digital dan fisik, yaitu dalam konteks IoT.

Dengan Industri 4.0, kombinasi teknologi informasi dan teknologi operasional telah membawa tantangan baru. Keamanan siber merupakan isu utama yang telah diupayakan oleh semua pemerintah di dunia untuk melawan serangan keamanan siber. Pada tahun 2020, lebih dari 50 miliar perangkat IoT telah menunjukkan betapa pentingnya keamanan siber.

Dalam bab ini, konsep keamanan siber diteliti dari perspektif komprehensif, berdasarkan konteks IoT, yang melibatkan banyak pemangku kepentingan dari berbagai sektor di dunia global. Persyaratan keamanan siber, ancaman keamanan, dan kerentanan IoT, evolusi serangan siber, dan langkah-langkah keamanan siber dibahas dan didukung dengan beberapa grafik, gambar, tabel, dan studi dalam literatur.

Seiring dengan terus berkembangnya platform dan sistem operasi baru untuk perangkat yang terhubung, anggaran keamanan diperkirakan akan tumbuh secara eksponensial untuk semua organisasi. Masa depan keamanan siber sangat bergantung pada pertimbangan lanskap ancaman dan tren yang muncul dalam teknologi yang terkait dengan big data, komputasi kognitif, dan IoT.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, Farid. 2019. "Fenomena Digital Era Revolusi Industri 4.0." *Dimensi DKV Seni Rupa dan Desain*, Vol. 4, No. 1, hlm. 47-58.
- Astrid Savitri. 2019. *Revolusi Industri 4.0: Mengubah Tantangan Menjadi Peluang di Era Disrupsi 4.0*. Yogyakarta: Genesis Learning.
- Baur, C., & Wee, D. (2015). "Manufacturing's Next Act." *McKinsey & Company*.
- Ceha, Rakhmat. 2019. *Revolusi Industri 4.0: Konsep dan Implementasi*. Bandung: P2U LPPM Unisba.
- Giffi, C., Gangula, B., Illinda, P., et al. (2017). *The Next Era of Manufacturing: New Strategies for the Fourth Industrial Revolution*. Deloitte Insights.
- Hamdan. 2018. "Industri 4.0: Pengaruh Revolusi Industri pada Kewirausahaan demi Kemandirian Ekonomi." *Jurnal Musamba*, Vol. 3, No. 2, Oktober 2018.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). "Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review." *Procedia CIRP*, 52, 164–169.
- Indrawati. (2018). *Manajemen Transformasi Digital dan Industri 4.0*. Bandung: Refika Aditama.
- Irianto, D. (2017). "Industry 4.0: The Challenges of Tomorrow." *Jurnal Teknik Industri*, 19(1), 1–4.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*. Final Report of the Industrie 4.0 Working Group.
- Kementerian Perindustrian Republik Indonesia. (2018). *Making Indonesia 4.0*. Jakarta: Kemenperin RI.
- Kurniawan, D. (2019). *Manajemen Proyek Digital di Era Revolusi Industri 4.0*. Surabaya: Airlangga University Press.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). "Industry 4.0." *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.A. (2015). "A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-based Manufacturing Systems." *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
- N. Purba. 2021. "Revolusi Industri 4.0: Peran Teknologi Dalam Eksistensi Penguasaan Bisnis dan Implementasinya." *Jurnal Perilaku dan Strategi Bisnis*, Vol. 9, No. 2, hlm. 91–98.
- Prasetyo, B., & Sutopo, W. (2020). "Implementasi Industri 4.0 di Indonesia: Peluang dan Tantangan." *Jurnal Teknik Industri*, 21(2), 123–132.

- Prasetyo, B., & Trisyanti, U. 2018. "Revolusi Industri 4.0 dan Tantangan Perubahan Sosial." Dalam Prosiding SEMATEKSOS 3 "Strategi Pembangunan Nasional".
- Putra, R. A., & Santosa, P. I. (2019). "Analisis Kesiapan SDM dalam Menghadapi Industri 4.0." *Jurnal Manajemen Teknologi*, 18(2), 101–110.
- Rifai, A., & Suryanto, T. (2019). *Revolusi Industri 4.0: Peluang dan Tantangan di Indonesia*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Sani, R. (2018). "Peran Pendidikan Tinggi dalam Menghadapi Era Revolusi Industri 4.0." *Jurnal Pendidikan dan Kebudayaan*, 23(3), 225–236.
- Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva: World Economic Forum.
- Siregar, E. (2018). "Internet of Things (IoT) dan Transformasi Digital di Era Industri 4.0." *Jurnal Teknologi Informasi*, 14(2), 45–53.
- Sunargo. 2019. "Mengatasi Perilaku Kerja Kontra Produktif Melalui Peran Integrative Politik Organisasional dan Kecerdasan Emosional pada Era Revolusi Industri 4.0." *Jurnal Paradigma Ekonomika*, Vol. 14, No. 2, Juni-Desember 2019.
- Suryani, E. (2019). "Peran Big Data dan Analitik dalam Industri 4.0." *Jurnal Sistem Informasi*, 15(1), 33–41.
- Syamsul Huda, M. (2019). *Revolusi Industri 4.0: Peluang, Tantangan, dan Solusi bagi Dunia Pendidikan*. Yogyakarta: Deepublish.
- Tjandrawinata, R. R. 2016. "Industri 4.0: Revolusi Industri Abad Ini dan Pengaruhnya pada Bidang Kesehatan dan Bioteknologi." *Jurnal Medicinus*, 29(1).
- Tri Nugroho, Munajat. 2019. *Industri Kreatif Berbasis Budaya: Peluang dan Tantangan di Era Industry 4.0*. Jakarta.
- Xu, X., Xu, C., & Li, L. (2018). "Industry 4.0: State of the Art and Future Trends." *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941–2962.
- Yuliana, E. (2020). "Digitalisasi dan Keamanan Siber di Era Industri 4.0." *Jurnal Keamanan Nasional*, 6(1), 88–99.

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

# MANAJEMEN TRANSFORMASI DIGITAL Industri 4.0



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 978-634-7227-05-8 (PDF)



9

786347

227058