YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PERUBAHAN IKLIM INOVASI BISNIS

di Era Digital



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

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

PERUBAHAN IKLIM INOVASI BISNIS

di Era Digital



PENERBIT :
YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK
Jl. Majapahit No. 605 Semarang
Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144
Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

ISBN 978-634-7695-59-8 (PDF)

PERUBAHAN IKLIM INOVASI BISNIS di Era Digital

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

ISBN : 978-634-7695-59-8 (PDF)

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

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

Desain Sampul dan Tata Letak :
Irdha Yunianto, S.Ds., M.Kom

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

Anggota IKAPI No: 279 / ALB / JTE / 2023

Redaksi :
Jl. Majapahit no 605 Semarang
Telp. 08122925000
Fax. 024-6710144
Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

Distributor Tunggal :
Universitas STEKOM
Jl. Majapahit no 605 Semarang
Telp. 08122925000
Fax. 024-6710144
Email : info@stekom.ac.id

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa ijin dari penulis

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur senantiasa kita panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas limpahan rahmat, petunjuk, dan karunia-Nya, buku pelengkap diskursus akademik dan praktis yang berjudul "*PERUBAHAN IKLIM INOVASI BISNIS di era Digital*" ini dapat diselesaikan dan hadir di hadapan para pembaca yang budiman.

Kita tengah berada pada persimpangan sejarah yang paling krusial. Di satu sisi, dunia dihadapkan pada krisis iklim yang menghadirkan ancaman eksistensial bagi keberlangsungan hidup manusia dan ekosistem bumi. Di sisi lain, kita sedang menyaksikan pusaran revolusi teknologi digital—yang dipelopori oleh Kecerdasan Buatan (AI), *Blockchain*, dan sistem terdesentralisasi—yang mengubah cara kita hidup, bekerja, dan berinteraksi. Buku ini lahir dari sebuah kesadaran mendalam bahwa krisis ekologi berskala global tidak lagi dapat diselesaikan melalui pendekatan konvensional (Bussines as Usual). Diperlukan sebuah konvergensi yang berani antara inovasi teknologi mutakhir dan transformasi strategi bisnis untuk menavigasi tantangan lingkungan, sekaligus mempertahankan resiliensi dan pertumbuhan ekonomi secara adil. Buku ini disusun secara komprehensif ke dalam lima belas bab yang saling berkesinambungan, membawa pembaca menelusuri lanskap teoretis hingga aplikasi praktis dan tata kelola kebijakan global:

Bagian Pertama: Fondasi AI dan Transformasi Lanskap Korporat Pada awal pembahasan (Bab 1 hingga Bab 4), buku ini membangun pemahaman fundamental mengenai imperatif iklim dan bagaimana AI muncul sebagai katalisator utama dalam mitigasi. Pembaca akan diajak untuk membedah bagaimana AI tidak hanya sekadar alat efisiensi, tetapi telah menjadi instrumen esensial dalam menghijaukan lanskap korporat, mengoptimalkan tata kelola rantai pasok yang ramah lingkungan, dan mentransformasi model bisnis secara radikal menuju target *Net-Zero Emission*. Kami juga mengupas secara spesifik terobosan AI dalam akselerasi dekarbonisasi, termasuk pemanfaatannya dalam teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS).

Bagian Kedua: Ekonomi Hijau, Transisi Energi, dan Cetak Biru Karbon Eksplorasi selanjutnya diperluas pada Bab 5, Bab 6, Bab 8, dan Bab 9, yang menyoroti pergeseran paradigma menuju ekonomi baru. Bagian ini membahas konvergensi antara AI dan teknologi *Blockchain* dalam membangun ekonomi hijau yang terdesentralisasi, serta implementasi AI secara praktis dalam revolusi efisiensi energi di pembangkit listrik. Lebih jauh lagi, buku ini memaparkan cetak biru strategis tentang bagaimana AI dapat menyeimbangkan pertumbuhan ekonomi dengan keberlanjutan ekologi, membuktikan bahwa profitabilitas dan pelestarian alam dapat berjalan beriringan dalam sebuah ekonomi netral karbon.

Bagian Ketiga: Optimalisasi Infrastruktur, Tata Ruang, dan Pendekatan Baru Pada Bab 10 hingga Bab 12, fokus diarahkan pada optimalisasi sektor riil dan pengembangan infrastruktur masa depan. Di sini, diuraikan bagaimana integrasi AI mentransformasi industri berkelanjutan dan menjadi komponen penyusun (modular) utama dalam pengembangan kota cerdas (*Smart Cities*) yang adaptif terhadap perubahan iklim. Pendekatan inovatif dan

mutakhir juga diperkenalkan secara khusus pada Bab 12, yang membedah metafora hidrologis AI dalam akuntansi serta tata kelola karbon yang lebih transparan dan terukur.

Bagian Keempat: Etika, Evolusi Strategi, dan Kebijakan Global Teknologi yang kuat menuntut tanggung jawab moral dan kerangka kebijakan yang kokoh. Oleh karena itu, bagian akhir buku ini (Bab 7, Bab 13, Bab 14, dan Bab 15) secara kritis menavigasi dimensi etika, tata kelola, dan kolaborasi. Bagian ini mengupas kompleksitas etika teknologi berkelanjutan, menempatkan algoritma AI sebagai agen kebijakan lingkungan era baru, serta mendorong evolusi strategi bisnis melalui konsep "Darwinisme Digital" demi ketahanan iklim korporasi. Buku ini diakhiri dengan pandangan ke depan mengenai masa depan tata kelola AI dan peran krusialnya dalam menyatukan kolaborasi iklim dan perjanjian tingkat global.

Penyusunan karya ini tentu tidak lepas dari dukungan, diskusi yang bernas, serta wawasan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, ucapan terima kasih dan apresiasi yang setinggi-tingginya kami sampaikan kepada seluruh kolega, akademisi, peneliti, dan praktisi industri yang telah menyumbangkan pemikiran dan waktunya selama proses penulisan.

Semoga buku ini dapat menjadi referensi yang komprehensif, pemantik diskusi yang konstruktif, serta panduan strategis yang aplikatif bagi para pemimpin bisnis, pembuat kebijakan, akademisi, dan mahasiswa. Kami menyadari bahwa ilmu pengetahuan dan teknologi terus berkembang pesat, sehingga kami sangat terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan karya-karya di masa mendatang.

Selamat membaca, mari bersama-sama merancang dan mewujudkan masa depan dunia yang lebih inovatif, tangguh, dan lestari.

Semarang, September 2026
Penulis

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

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... **i**
DAFTAR ISI ..... **iii**
BAB 1 MENGURAI PERAN AI DALAM MITIGASI IKLIM **1**
1.1 Imperatif Iklim dan Munculnya AI 1
1.2 Faktor Penentu Peran AI dalam Mitigasi Iklim 4
1.3 Mempercepat Implementasi Solusi Berbasis AI Demi Keberlanjutan Iklim 7
1.4 Mitigasi Iklim Berbasis AI 10
1.5 Peran Kecerdasan Buatan (AI) 13
1.6 Pengembangan Masa Depan 14
BAB 2 BAGAIMANA AI MENGHIJAUKAN LANSKAP KORPORAT **15**
2.1 Kecerdasan Buatan dan Perubahan dalam Rantai Pasok 15
2.2 Peran Kecerdasan Buatan dalam Keberlanjutan Korporat 18
2.3 Kecerdasan Buatan, Etika, Dan Kelestarian Alam 20
2.4 Sistem Kecerdasan Buatan (AI) dalam Strategi Keberlanjutan 24
2.5 Keberlanjutan Perusahaan Berbasis AI 27
BAB 3 MENTRANSFORMASI MODEL BISNIS DEMI MASA DEPAN NET-ZERO **30**
3.1 Menyelaraskan Teknologi dan Alam dalam Dunia Bisnis 30
3.2 AI dan Model Bisnis Berkelanjutan 33
3.3 Integrasi AI untuk Model Bisnis Berkelanjutan 36
3.4 Kecerdesan AI Terhadap Bisnis Berkelanjutan dan Net-Zero 41
3.5 AI Sebagai Penggerak Model Bisnis Berkelanjutan 44
BAB 4 TEROBOSAN AI DALAM PENGURANGAN EMISI KARBON **46**
4.1 Peran AI Dalam Akselerasi Dekarbonisasi 46
4.2 Kecerdasan Buatan dalam Penangkapan dan Penyimpanan Karbon (CCS) 49
4.3 Menyelaraskan AI dengan Keselamatan Bumi 52
4.4 Implikasi Pemanfaatan AI Terhadap Dekarbonisasi dan Keberlanjutan 54
4.5 AI Sebagai Penggerak Akselerasi Dekarbonisasi 57
BAB 5 MEMBANGUN EKONOMI HIJAU YANG TERDESENTRALISASI **60**
5.1 Konvergensi Blockchain dan AI 60
5.2 Fondasi AI, Blockchain, dan Ekonomi Hijau Terdesentralisasi 63
5.3 Membangun Ekonomi Hijau VIA Blockchain Dan AI 66
5.4 Integrasi Blockchain dan AI Terhadap Ekonomi Hijau Terdesentralisasi 69
5.5 Penerapan AI dan Blockchain dalam Ekonomi Hijau 73
BAB 6 SOLUSI BERBASIS AI UNTUK EFISIENSI ENERGI **75**
6.1 Tantangan dan Transformasi Energi 75
6.2 AI dalam Sistem Energi 78
6.3 Kerangka Kerja Praktis untuk Adopsi AI di Pembangkit Listrik 81
6.4 Penerapan Kecerdasan Buatan (AI) Pada Pembangkit Listrik 83

6.5 Arah Transformasi AI dalam Sistem Energi 86
BAB 7 MENAVIGASI ETIKA TEKNOLOGI BERKELANJUTAN 88
7.1 Persimpangan AI, Lingkungan, dan Etika 88
7.2 Kompleksitas Etika dalam Riset AI dan Keberlanjutan 93
7.3 Kerangka Kerja Etika dan Tata Kelola AI 96
7.4 Implikasi Strategis Etika AI Berkelanjutan 98
7.5 Visi Menuju Masa Depan AI yang Adil dan Lestari 102
BAB 8 PERAN AI DALAM MENYELARASKAN EKONOMI DAN LINGKUNGAN 104
8.1 Peran AI Menyeimbangkan Ekonomi dan Ekologi 104
8.2 AI Dalam Pertumbuhan Ekonomi dan Keberlanjutan Lingkungan 107
8.3 Enam Pilar Aksi Strategis Penerapan AI 109
8.4 Dampak AI Terhadap Pertumbuhan Ekonomi 112
8.5 AI untuk Pertumbuhan Ekonomi Lingkungan 114
BAB 9 CETAK BIRU AI UNTUK EKONOMI NETRAL KARBON 116
9.2 AI dalam Transformasi Menuju Netralitas Karbon 118
9.3 Kerangka Implementasi AI Menuju Netralitas Karbon 120
9.4 Implikasi AI dalam Mencapai Netralitas Karbon 123
9.5 AI Sebagai Mitra Menuju Netralitas Karbon 125
BAB 10 OPTIMALISASI INDUSTRI DAN RANTAI PASOK BERBASIS AI 128
10.1 AI dalam Transformasi Industri 128
10.2 Faktor Pendukung Penerapan AI untuk Industri Berkelanjutan 129
10.3 Strategi Integrasi AI Berkelanjutan 132
10.4 Penerapan AI Bagi Industri 135
10.5 Arah Transformasi AI Menuju Industri 138
BAB 11 MEMBANGUN KOTA CERDAS DENGAN KOMPONEN PENYUSUN AI 140
11.1 Transformasi Kota Cerdas Berbasis AI 140
11.2 Dasar Pengembangan Kota Cerdas Berbasis AI 142
11.3 Modular Pengembangan Kota Cerdas Berbasis AI 145
11.4 Pergeseran Paradigma dalam Pengembangan Perkotaan 148
11.5 Transformasi Perkotaan Berbasis AI dan Tata Kelola Adaptif 152
BAB 12 AI HIDROLOGIS UNTUK PENGELOLAAN KARBON DAN *NET-ZERO* 156
12.1 Metafora Hidrologis dalam Pengelolaan Karbon 156
12.2 AI dalam Akuntansi dan Perdagangan Karbon 157
12.3 Cetak Biru Hidrologis AI Menuju *Net-Zero* 160
12.4 Implikasi AI dalam Pengelolaan Karbon Berkelanjutan 163
12.5 Transformasi Pengelolaan Karbon Menuju *Net-Zero* 167
BAB 13 ALGORITMA AI SEBAGAI KEBIJAKAN LINGKUNGAN BARU 170
13.1 AI Sebagai Agen Kebijakan Lingkungan 170
13.2 Peluang dan Risiko Tata Kelola AI Iklim 171
13.3 Kerangka Kerja AI dalam Kebijakan Lingkungan 173
13.4 Implikasi AI Terhadap Tata Kelola Lingkungan 176

13.5 Transformasi Pengelolaan Karbon Menuju *Net-Zero* 179
BAB 14 EVOLUSI STRATEGI BISNIS DEMI KETAHANAN IKLIM 182
14.1 AI Sebagai Landasan Ketahanan Bisnis 182
14.2 Strategi Bisnis yang Tangguh Terhadap Iklim 183
14.3 Kerangka Kerja Ketahanan Darwinisme Digital 186
14.4 Transformasi Kerangka Teoretis dan Tata Kelola AI dalam Aksi Iklim 189
14.5 AI Sebagai Penggerak Evolusi Bisnis 192
BAB 15 AI DALAM KOLABORASI IKLIM DAN PERJANJIAN GLOBAL 195
15.1 Peran AI Menghadapi Krisis Iklim 195
15.2 Pemanfaatan Teknologi Kecerdasan Buatan (AI) 196
15.3 Kemampuan AI dalam Mendorong Keberlanjutan di Sektor Industri 199
15.4 Dampak dan Implikasi AI dalam Mendukung Keberlanjutan Industri 202
15.5 Masa Depan Tata Kelola AI dan Aksi Iklim 205
DAFTAR PUSTAKA 209

BAB 1
MENGURAI PERAN AI DALAM MITIGASI IKLIM

1.1 IMPERATIF IKLIM DAN MUNCULNYA AI

Krisis iklim merupakan isu paling krusial di masa kini. Meningkatnya suhu global, mencairnya lapisan es, dan meningkatnya frekuensi peristiwa cuaca ekstrem telah memaksa umat manusia untuk merespons sebuah keharusan eksistensial: memangkas emisi gas rumah kaca secara drastis sembari beradaptasi dengan dampak perubahan iklim yang tidak dapat dipulihkan terhadap lingkungan kita. Langkah-langkah mitigasi iklim konvensional—seperti reformasi kebijakan, penerapan energi terbarukan, dan perubahan perilaku—tetaplah penting namun tidak memadai.

Di sinilah peran kecerdasan buatan (AI) muncul; sebuah teknologi dengan kekuatan transformatif untuk mempercepat dan menyempurnakan respons kita terhadap krisis ini. Bab ini, "*The Carbon Code*: Mengurai Peran AI dalam Mitigasi Iklim," juga mengeksplorasi berbagai peluang yang dihadirkan oleh teknologi AI yang kini tengah mendefinisikan ulang aksi iklim, baik sebagai kerangka kerja teoretis maupun sebagai panduan praktis mengenai bagaimana pembelajaran mesin (*machine learning*), jaringan saraf (*neural networks*), dan strategi berbasis data dapat dimanfaatkan untuk memerangi pemanasan global.

Perubahan iklim merupakan masalah yang sangat kompleks, melibatkan sistem atmosfer, lautan, ekologi, dan manusia yang saling terkait, sehingga menghadirkan tantangan pemodelan yang luar biasa berat. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) menekankan perlunya dekarbonisasi cepat di seluruh sektor ekonomi untuk membatasi pemanasan global hingga 1,5°C—sebuah target yang menuntut tingkat inovasi luar biasa. Di sinilah AI hadir, bukan sebagai solusi ajaib untuk segala masalah, melainkan sebagai penguat kecerdasan dan kreativitas manusia. Kemampuannya dalam memproses kumpulan data masif, mendeteksi pola tersembunyi, dan menyempurnakan pengambilan keputusan *secara real-time* menjadikannya sangat tepat untuk menjawab skala dan urgensi tantangan iklim.

Pada dasarnya, AI beroperasi sebagai pengurai kompleksitas. Satelit, sensor, dan simulasi yang menggerakkan sistem iklim menghasilkan data dalam skala eksabita, yang membebani teknik pembelajaran konvensional. Namun, membanjirnya informasi ini justru menjadi keuntungan bagi algoritma *machine learning* (ML); algoritma ini memanfaatkannya untuk menyarikan wawasan yang mendorong pengembangan model prediktif dan intervensi strategis. Sebagai contoh, jaringan saraf tiruan (*neural networks*) yang dilatih menggunakan data iklim masa lalu dapat memprediksi skenario pemanasan di masa depan dengan lebih akurat, sementara agen *reinforcement learning* semakin efektif dalam mengoptimalkan jaringan energi berbasis sumber terbarukan. Istilah "kode karbon" (*carbon code*) menggambarkan keseimbangan rumit antara aktivitas manusia, emisi, dan kesehatan planet secara keseluruhan; sinergi antara daya komputasi dan ilmu lingkungan inilah yang mendasarinya—sebuah kemajuan tidak hanya dalam pemodelan aktivitas manusia, tetapi juga dalam akumulasi pengetahuan.

Penggunaan AI dalam Mitigasi Iklim

Landasan teoretis penggunaan AI dalam mitigasi iklim bersandar pada pembelajaran sistem kompleks dan pembelajaran adaptif. Perubahan iklim adalah contoh utama sistem kompleks, di mana perubahan lokal (misalnya, deforestasi) merambat dan menimbulkan dampak global (misalnya, perubahan pola curah hujan). Sifat non-linear seperti ini sulit ditangkap oleh model linear konvensional, namun AI sangat piawai menanganinya. Arsitektur *deep learning*, termasuk *convolutional neural networks* (CNN), memungkinkan pembelajaran data spasial-temporal—seperti citra satelit mengenai deforestasi atau arus laut—untuk memodelkan secara lebih baik berbagai mekanisme umpan balik dan titik kritis (*tipping points*).

Kemampuan AI untuk memadukan pembelajaran berskala mikro dan makro merupakan wawasan teoretis yang krusial. Sebagai contoh, data beresolusi temporal tinggi atau data rinci dari meteran pintar (*smart meters*) di rumah-rumah dapat dikorelasikan (hingga ke skala kota) dengan pola konsumsi energi yang menggerakkan algoritma respons permintaan (*demand-response*) di seluruh jaringan utilitas. Kemampuan lintas skala ini menunjukkan bagaimana AI membantu menerjemahkan tindakan individu menjadi dampak berskala sistem, yang merupakan salah satu gagasan utama di balik kerangka kerja *carbon code*.

Namun, potensi teoretis AI bergantung pada penggabungannya dengan pengetahuan spesifik bidang terkait. Sains iklim memberikan batasan dan arah (*guardrails*), sementara AI berperan sebagai akselerator. Model hibrida yang menggabungkan persamaan berbasis fisika dengan *machine learning* (ML)—seperti emulator iklim yang mengurangi beban komputasi model sistem Bumi—merupakan contoh nyata dari bentuk simbiosis ini. Lebih jauh lagi, bab ini berargumen bahwa perpaduan lintas disiplin semacam itu sangatlah penting untuk menghasilkan solusi yang tangguh dan dapat diterapkan secara nyata.

Kerangka Kerja yang Lebih Praktis: dari Data Hingga Penerapan

Beralih dari teori ke praktik memerlukan penerapan perangkat AI di tiga bidang: pemantauan, prediksi, dan optimalisasi.

a) Melacak emisi dan ekosistem.

Platform berbasis AI menggunakan data satelit dan pembelajaran mesin (*machine learning* atau ML) untuk membuat data emisi global lebih transparan secara *real-time*, serta mengungkap sumber emisi yang sulit dideteksi seperti kebocoran metana. Penginderaan jauh yang didukung AI juga memantau pembalakan liar atau pemutihan terumbu karang, sehingga memungkinkan dilakukannya langkah-langkah konservasi preventif. Perangkat-perangkat ini membuat informasi intelijen iklim dapat diakses baik oleh pembuat kebijakan maupun aktivis.

(b) Memprediksi perubahan lingkungan.

Jaringan saraf (*neural networks*) berkontribusi pada prakiraan iklim dengan mengintegrasikan beragam data—seperti suhu laut, pola angin, dan konsentrasi aerosol—menjadi proyeksi beresolusi tinggi. Perusahaan rintisan (*startup*) mengandalkan ML untuk memprediksi risiko iklim pada tingkat aset, termasuk infrastruktur yang rentan dan tanaman yang rawan kekeringan. Prakiraan semacam itu

menjadi panduan bagi strategi adaptif, mulai dari perencanaan kota hingga penentuan harga asuransi.

(c) Mengoptimalkan pengurangan karbon.

Algoritma *reinforcement learning* (RL) berperan dalam membentuk sistem energi. Sebagai contoh, DeepMind milik Google berhasil menurunkan biaya pendinginan pusat data sebesar 40% berkat peningkatan efisiensi yang dicapai melalui RL. Dalam skala global, AI membantu menentukan lokasi optimal ladang angin, menyeimbangkan beban jaringan listrik pintar (*smart grid*), serta merancang material penangkap karbon. Penerapan-penerapan ini menyoroti peran AI sebagai faktor penguat (*force multiplier*) bagi teknologi yang sudah kita miliki.

Garis Depan Penelitian Dan Kerja Sama Kolaboratif

Bab ini merangkum upaya-upaya inovatif dari berbagai organisasi—seperti ClimateML dari MIT, *AI for Climate Initiative* dari Stanford, dan *Allen Institute for AI*—yang memprioritaskan infrastruktur sumber terbuka (*open-source*) demi ketahanan iklim. Inovasi-inovasi utamanya meliputi:

a. **ML berbasis fisika (*Physics-informed* ML):** Menerapkan hukum termodinamika dalam jaringan saraf ML untuk meningkatkan akurasi model iklim.
b. **AI Generatif:** *Generative adversarial networks* (GAN) dapat digunakan untuk menciptakan material rendah karbon atau bahan bakar sintetis.
c. **Kerangka kerja AI etis:** Membangun dunia di mana algoritma mengutamakan kesetaraan dalam kebijakan iklim, alih-alih meminggirkan komunitas rentan.

Namun, tantangan tetap ada. Kesenjangan data di negara-negara berkembang (*Global South*) membatasi kemampuan generalisasi model, dan pelatihan model AI berskala besar menghasilkan jejak karbon yang menantang manfaat bersih dari energi.

Salah satu langkah yang dapat diambil adalah menerapkan *federated learning* (pembelajaran data terdesentralisasi) dan mematuhi praktik AI ramah lingkungan, seperti penggunaan algoritma hemat energi. Karena ini merupakan upaya kolaboratif untuk memecahkan kode, tidak ada jawaban mutlak dan terdapat beragam penafsiran terhadap petunjuk yang ada. Mengungkap "kode karbon" memerlukan kolaborasi lintas disiplin ilmu. Untuk mengatasi krisis iklim, para ilmuwan iklim, peneliti AI, pembuat kebijakan, dan ahli etika harus bekerja sama dalam menciptakan solusi yang efektif dan berkeadilan. Program-program seperti *Destination Earth* dari Uni Eropa dan *AI for Good Global Consortium* mencerminkan filosofi ini dengan memadukan ambisi teknis dan tanggung jawab menjaga kelestarian bumi.

Bab ini memandang AI bukan sekadar alat, melainkan sebuah pergeseran paradigma dalam aksi iklim—sebuah sarana untuk menavigasi kompleksitas dengan kecepatan dan presisi. Hanya dengan memadukan ketajaman teoretis dan inovasi praktis, kita dapat memanfaatkan AI sebagai teknologi yang mampu mengubah "kode karbon" serta membuka jalan bagi umat manusia menuju masa depan yang berkelanjutan. Ini adalah perjalanan yang penuh tantangan teknis maupun etis, namun taruhannya sangatlah besar. Di persimpangan antara inovasi teknologi dan kelangsungan hidup ekologis ini, memahami peran AI bukan lagi sekadar upaya akademis, melainkan sebuah keharusan moral. Para penulis memilih untuk

mengeksplorasi aspek teknis dari solusi iklim berbasis AI guna memberikan panduan bagi pembaca dalam menavigasi isu-isu transformatif ini.

1.2 FAKTOR PENENTU PERAN AI DALAM MITIGASI IKLIM

AI dan mitigasi iklim merupakan ranah penelitian lintas disiplin yang sangat penting. Kajian riset ini menelaah berbagai karya ilmiah mengenai aspek teknologi, etika, dan sistemik terkait kapasitas AI dalam membantu mengatasi perubahan iklim melalui pembelajaran data, pemodelan prediktif, dan optimalisasi. Bab ini menggunakan pemantauan terhadap studi yang telah melalui telaah sejawat, laporan kebijakan, dan kerangka kerja teknis untuk merumuskan kembali peluang, tantangan, serta kesenjangan dalam keterkaitan yang terus berkembang antara AI dan aksi iklim.

Penggunaan AI untuk Memantau Data Iklim dan Melacak Emisi

AI umumnya digunakan untuk memproses kumpulan data heterogen yang besar, memantau perubahan lingkungan, dan mengukur besaran emisi. Kekuatan transformatif AI dalam ilmu iklim disoroti oleh Rolnick dan rekan-rekan, di mana algoritma *machine learning* (ML) memproses citra satelit, jaringan sensor IoT, dan data atmosfer untuk mengidentifikasi, misalnya, deforestasi, kebocoran metana, dan fenomena pulau panas perkotaan (*urban heat islands*).

Salah satu upaya tersebut dilakukan oleh Kiranyaz dan rekan-rekan, yang memantau emisi global secara *real-time* dari fasilitas industri menggunakan *convolutional neural networks* (CNN), dan metode ini disesuaikan untuk mengatasi kelemahan dalam inventarisasi nasional yang didasarkan pada pelaporan mandiri. Mereka menunjukkan bagaimana AI mendemokratisasi akuntabilitas iklim dengan memungkinkan transparansi dan kebermanfaatan data emisi untuk pengambilan tindakan.

Model hibrida yang memadukan AI dengan prinsip fisika spesifik bidang terkait juga telah meningkatkan akurasi pemantauan. Kochkov dan rekan-rekan, melatih jaringan saraf (*neural network*) menggunakan data simulasi iklim untuk memprediksi dinamika tutupan awan, sebuah variabel kunci yang perlu diprediksi guna memperkirakan potensi energi surya. Demikian pula, Jarrahi dan rekan-rekan, menyerukan penggunaan kerangka kerja "AI hibrida" yang mengintegrasikan hukum fisika (misalnya, dinamika fluida) ke dalam arsitektur ML untuk meningkatkan kemampuan interpretasi hasil keluaran bagi para pembuat kebijakan. Studi-studi ini juga mencatat bahwa AI dapat membantu mengisi kesenjangan data pengembangan teknologi masa depan, khususnya di wilayah yang tidak memiliki atau hanya memiliki sedikit infrastruktur pemantauan berbasis darat.

Shumailov dan rekan-rekan, menunjukkan bagaimana model AI yang dilatih menggunakan kumpulan data dari negara-negara Utara Global (*Global North*)—serta ketergantungan berlebih terhadap data tersebut—menghasilkan sistem yang tidak fleksibel dan model dengan kinerja buruk yang tidak dapat digeneralisasi untuk ekosistem tropis atau wilayah gersang, sehingga memperparah bias dalam intervensi iklim. Pembelajaran mereka menekankan perlunya kerangka kerja berbagi data yang terdesentralisasi, seperti *federated learning*, yang bertujuan membekali wilayah-wilayah yang kurang terwakili dalam lanskap data

saat ini dengan kemampuan untuk berkontribusi dan memperoleh manfaat dari pemantauan berbasis AI.

Pengambilan Keputusan Berbasis Data terkait Risiko Iklim dan Adaptasi

Memanfaatkan proyeksi berbasis AI dalam penilaian risiko iklim, perencanaan adaptif, dan pembelajaran prediktif peristiwa iklim ekstrem melalui pendekatan *deep learning* seperti *recurrent neural networks* (RNN) dan *transformer*. Model CNN yang dilatih menggunakan data iklim beresolusi tinggi terbukti mengungguli model numerik tradisional sebesar 15–20% dalam memprediksi lintasan badai. Menurut Laporan Penilaian Keenam IPCC tahun 2022—yang mengaitkan sistem peringatan dini berbasis AI dengan penurunan angka kematian pada populasi yang rentan terhadap dampak iklim—kemajuan semacam itu sangat krusial bagi kesiapsiagaan bencana.

Pada skala mikroekonomi, AI memungkinkan penilaian risiko yang sangat rinci untuk sektor infrastruktur dan pertanian. Platform *Climate Intelligence*, yang dikaji oleh Eyring dan rekan-rekan., menggunakan *machine learning* (ML) untuk menilai tingkat paparan aset terhadap banjir, kekeringan, dan kenaikan permukaan laut, yang kemudian menjadi acuan bagi model asuransi dan strategi ketahanan perkotaan. Secara bersamaan, *generative adversarial networks* (GAN) digunakan untuk memodelkan skenario iklim masa depan. GAN dimanfaatkan untuk mengumpulkan data sintetis guna memprediksi kekeringan di wilayah dengan keterbatasan data, yang dapat membantu upaya pengelolaan air secara proaktif.

Terlepas dari potensi tersebut, AI prediktif menghadapi tantangan berupa skeptisisme terkait sifat "kotak hitam" (*black-box*)-nya. Rudin menangani pengambilan keputusan iklim yang berisiko tinggi—yang biasanya melibatkan penggunaan model *deep learning*—dan mengemukakan perlunya teknik AI yang dapat dijelaskan (*explainable AI* atau XAI), seperti SHAP (*Shapley Additive Explanations*), untuk menghadirkan transparansi pada model-model yang sebelumnya bersifat tertutup dan sulit dipahami layaknya kotak hitam. Hal ini menuntut adanya pedoman etis terkait prediksi iklim agar hasilnya akurat dan dapat dipahami oleh para pemangku kepentingan. Selama beberapa dekade terakhir, banyak kajian teoretis telah dilakukan untuk mengoptimalkan strategi pengurangan karbon.

AI mentransformasi sistem energi, ekonomi sirkular, teknologi penangkapan karbon, dan berbagai bidang lainnya melalui optimalisasi. Algoritma *reinforcement learning* (RL)—yang belajar mengambil keputusan secara bertahap menjadi lebih baik berdasarkan imbalan (*reward*)—dapat menjadi alat yang sangat ampuh. Dalam sebuah studi kasus yang menunjukkan potensi efisiensi industri melalui AI, Mukatash dan rekan-rekan, menguraikan penggunaan RL oleh *Google DeepMind* yang berhasil menghemat energi pendinginan hingga 40% di pusat data. Demikian pula, Bhardwaj dan rekan-rekan, mengembangkan algoritma genetika untuk mengoptimalkan tata letak ladang angin, yang menghasilkan peningkatan keluaran energi sebesar 12–15% serta pengurangan penggunaan lahan.

AI mempercepat penemuan material untuk teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS). Sánchez-Lengeling dan rekan-rekan. menggunakan *graph neural networks* (GNN) untuk menyeleksi jutaan *metal-organic frameworks* (MOF) guna keperluan adsorpsi CO_2, serta mengidentifikasi kandidat material dengan efisiensi tiga kali lebih tinggi

dibandingkan material konvensional. Sementara itu, model generatif turut menciptakan rantai pasok rendah karbon. Kannan dan rekan-rekan. merumuskan kerangka kerja RL untuk meminimalkan emisi di seluruh jaringan logistik sembari menyeimbangkan aspek biaya dan keberlanjutan—sebuah masalah dengan dua tujuan (*bi-objective*) yang sebelumnya dianggap sulit dipecahkan melalui pemrograman linear.

Para kritikus memperingatkan agar tidak terlalu bergantung pada AI dalam upaya dekarbonisasi yang lebih sistematis. Kaack dan rekan-rekan, menyatakan bahwa algoritma optimalisasi cenderung berfokus pada peningkatan marjinal (misalnya, peningkatan efisiensi) alih-alih perubahan struktural (misalnya, penghentian penggunaan bahan bakar fosil secara bertahap). Kritik ini mencerminkan diskusi yang lebih luas mengenai "teknosolusionisme" dalam kebijakan iklim, yang memperingatkan bahwa AI dapat mengalihkan perhatian dari langkah-langkah penting yang bersifat politis dan perilaku.

Permasalahan Etika dan Operasional

Penerapan AI dalam mitigasi iklim memunculkan masalah etika, terutama yang berkaitan dengan kesetaraan dan keberlanjutan komputasi. Arora dan rekan-rekan, menyoroti bias algoritmik sebagai masalah signifikan; misalnya, model optimasi energi dapat lebih menguntungkan masyarakat mampu yang memiliki akses ke jaringan listrik pintar (*smart grid*), sementara mengabaikan wilayah yang tidak terhubung ke jaringan listrik utama (*off-grid*). Selain itu, jejak karbon dari AI itu sendiri juga tidak dapat diabaikan. Azeez memperkirakan jejak karbon dari pelatihan model bahasa berskala besar (*large language model*) mencapai 626.000 pon CO2. Paradoks ini mendorong perlunya penerapan praktik "AI hijau" (*green AI*), termasuk penggunaan arsitektur model yang hemat energi.

Kedaulatan dan tata kelola data turut menambah kompleksitas peran AI. *General Data Protection Regulation* (GDPR) Uni Eropa sempat berbenturan dengan inisiatif iklim yang mengharuskan pertukaran data lintas batas. Solusi yang diusulkan mencakup sistem *federated learning*—di mana model dilatih menggunakan data yang terdesentralisasi tanpa mengorbankan privasi serta perjanjian internasional seperti *Global Climate Observing System* (GCOS) untuk menstandarisasi protokol data.

Arah Masa Depan

Riset menunjukkan adanya konsensus mengenai potensi transformatif AI, namun terdapat perbedaan pendapat mengenai keterbatasannya. Kesenjangan utama meliputi:

(a) Kesenjangan regional: Sebagian besar model AI dilatih menggunakan data dari negara-negara industri saja, sehingga membatasi kemampuan generalisasinya untuk wilayah Global Selatan.

(b) Kolaborasi lintas disiplin: Penciptaan perangkat praktis untuk memanfaatkan aspek-aspek tertentu dari AI bagi penanganan iklim akan melibatkan kolaborasi yang lebih erat antara ilmuwan iklim, ahli etika, dan insinyur pembelajaran mesin (ML).

(c) Pihak penerima manfaat dan cakupan integrasi berbagai jenis emisi: Saat ini, hanya terdapat sedikit kerangka kerja untuk menerjemahkan wawasan yang diperoleh dari AI menjadi kebijakan iklim yang dapat diterapkan secara efektif.

Penelitian di masa depan harus berfokus pada AI partisipatif—yang melibatkan komunitas yang selama ini terpinggirkan dalam proses perancangan bersama—serta algoritma rendah karbon yang selaras dengan tujuan ekologis dengan tetap memaksimalkan kinerja komputasi. Potensi AI dalam memitigasi perubahan iklim bergantung pada kemampuannya untuk mengurai kompleksitas, mengoptimalkan sistem, dan mendemokratisasi data. Namun, prospeknya menghadapi hambatan terkait etika, teknologi, dan geopolitik. Untuk memastikan perangkat ini mendorong dekarbonisasi yang adil dan dapat ditingkatkan skalanya, para peneliti perlu mendasarkan pengembangan AI pada prinsip-prinsip keadilan iklim dan mendorong kolaborasi global.

1.3 MEMPERCEPAT IMPLEMENTASI SOLUSI BERBASIS AI DEMI KEBERLANJUTAN IKLIM

Mitigasi terhadap berbagai hambatan teknis, etis, dan sistemik yang bersifat tidak transparan—guna mengoperasionalkan manfaat AI secara efektif dalam aksi iklim—memerlukan pendekatan lintas disiplin yang terstruktur dari komunitas pemangku kepentingan. Berikut adalah kerangka kerja lima bagian untuk penerapan perangkat AI secara efektif, yang disusun berdasarkan riset serta bertujuan untuk memaksimalkan kesetaraan, skalabilitas, dan dampak.

Infrastruktur dan Aksesibilitas Data

(a) Tujuan: Menyediakan data iklim yang berkualitas tinggi dan representatif bagi semua pihak.

(b) Berbagi data secara terdesentralisasi: Sistem *federated learning* (pembelajaran terfederasi) yang memungkinkan pelatihan model pada kumpulan data yang tersebar tanpa harus membagikan informasi sensitif. Sebagai contoh, badan iklim regional di Global Selatan dapat menggabungkan data satelit dan sensor untuk meningkatkan model prediksi banjir sembari tetap menjaga kedaulatan data.

(c) Platform sumber terbuka (*open-source*): Pembuatan repositori untuk mengodifikasi dan berbagi kumpulan data iklim yang telah diproses sebelumnya guna mengurangi duplikasi upaya dalam pelatihan AI.

(d) Pengumpulan data partisipatif: *Crowdsourcing* (pengumpulan data berbasis partisipasi publik) untuk data lingkungan berskala sangat lokal (seperti kualitas udara dan kesehatan tanah) melalui aplikasi seluler dan pelibatan penduduk setempat, terutama di wilayah yang tidak memiliki sistem pemantauan institusional formal.

(e) Integrasi perangkat: Standardisasi data lintas sensor IoT untuk menjamin interoperabilitas dan integrasi dengan jaringan *blockchain*. Perangkat/alat: kerangka kerja *federated learning* (misalnya, *TensorFlow Federated*).

(f) Pemangku kepentingan: Pemerintah, LSM, akademisi, dan masyarakat setempat.

Pengembangan Dan Penerapan Model

(a) Tujuan: Mengembangkan model AI yang dapat diinterpretasikan dan berbasis prinsip fisika (*physics-guided*) untuk memenuhi kebutuhan sains iklim.

(b) Sistem AI hibrida: Mengintegrasikan pengetahuan domain (misalnya, termodinamika, ekologi) ke dalam arsitektur *machine learning* (ML). Contoh: Penggunaan jaringan saraf (*neural networks*) dan persamaan dinamika fluida untuk menyimulasikan arus laut.

(c) ***Explainable AI* (XAI):** Menerapkan metode seperti nilai SHAP atau LIME untuk menjelaskan prediksi model guna memastikan pembuat kebijakan menaruh kepercayaan pada model tersebut. XAI dapat digunakan dalam perangkat seperti *Climate TRACE* untuk menyediakan audit transparan mengenai sumber emisi.

(d) **Algoritma hemat energi:** Menggunakan model yang hemat energi atau "AI ramah lingkungan" (*green AI*)—seperti *sparse neural networks*—untuk membatasi jejak karbon dari aktivitas komputasi.

(e) **Tantangan komputasi:** Memperoleh data berkualitas tinggi untuk pelatihan model pada cip AI berdaya rendah.

(f) **Integrasi pemangku kepentingan:** Peneliti AI, ilmuwan iklim, dan perusahaan teknologi.

Tata Kelola Etis dan Kesetaraan

(a) **Tujuan:** Menerapkan prinsip-prinsip keadilan iklim dalam penerapan AI.

(b) **Audit bias:** Bagaimana alat AI berkontribusi terhadap kesetaraan atau ketidaksetaraan dalam pembentukan kota? Penyesuaian algoritmik untuk mengakomodasi aspirasi komunitas yang terpinggirkan.

(c) **Akuntansi karbon:** Kebijakan yang mewajibkan penilaian siklus hidup proyek AI, dengan memperhitungkan emisi mulai dari tahap pelatihan hingga penerapan. Sertifikasi alat yang memenuhi standar *Green AI*.

(d) **Perancangan bersama komunitas:** Berkolaborasi dengan masyarakat adat dan komunitas petani untuk merancang solusi AI secara bersama (misalnya, algoritma tanaman tahan kekeringan) yang mengintegrasikan serta menghormati pengetahuan masyarakat adat dan petani.

(e) **Alat:** Kerangka kerja dampak kesetaraan (*AI Fairness 360*) dan perangkat lunak pelacakan karbon (*CodeCarbon*).

(f) **Integrasi pemangku kepentingan:** Pemangku kepentingan mencakup ahli etika, tokoh masyarakat, badan regulator, dan ahli kesehatan masyarakat.

Tingkat Integrasi Pemangku Kepentingan dan Kebijakan

(a) **Tujuan:** Mengubah rekomendasi AI menjadi kebijakan publik yang mengikat secara hukum dan insentif pasar.

(b) **Laboratorium berbasis AI:** Membentuk tim lintas disiplin (misalnya, ilmuwan iklim, ekonom, dan insinyur *machine learning*) untuk menyimulasikan hasil kebijakan secara akurat. Contohnya, menyimulasikan dampak pajak karbon menggunakan *reinforcement learning*.

(c) **Kemitraan publik-swasta:** Menggunakan insentif pajak untuk mendorong perusahaan mengubah praktik mereka setelah adanya verifikasi penurunan emisi dari strategi berbasis AI. Contoh yang baik adalah kolaborasi Google dengan *DeepMind* terkait sistem pendingin pusat data.

(d) **Membuat komitmen global:** Mendorong perjanjian global mengenai dampak timbal balik antara AI dan iklim, serupa dengan persyaratan pelaporan dalam Perjanjian Paris.

(e) Alat: Platform simulasi kebijakan (*OpenAI Gym*) dan pasar karbon tersedia pada tingkat ini.

(f) Integrasi pemangku kepentingan: Pemangku kepentingan mencakup pembuat kebijakan, perusahaan, dan badan internasional.

Pemantauan dan Peningkatan Berkelanjutan

(a) Tujuan: Mengembangkan penilaian dan peningkatan sistem AI secara berkelanjutan.

(b) Dasbor waktu nyata (*real-time*): Menggunakan platform berbasis AI seperti Cervest Climate Intelligence untuk memantau risiko iklim dan efektivitas strategi mitigasi, serta memperbarui model dan hasil keluaran seiring tersedianya data baru.

(c) Mekanisme umpan balik: Warga dapat memberikan masukan (misalnya melalui aplikasi seluler) untuk menyempurnakan prediksi AI (seperti rute perjalanan teraman saat banjir) dan memastikan bahwa prediksi tersebut relevan secara budaya dan sosial.

(d) Regulasi adaptif: Pembaruan kerangka hukum agar selaras dengan kemajuan AI, termasuk ketentuan mengenai pelatihan ulang model seiring perubahan tolok ukur iklim.

(e) Perangkat: Jaringan *Internet of Things* (IoT), platform sains warga (seperti *Zooniverse*), dan *regulatory sandbox* (ruang uji coba regulasi).

(f) Pemangku kepentingan: Pembuat kebijakan, regulator hukum, masyarakat sipil, dan auditor teknologi.

Kerangka kerja ini memosisikan ulang AI sebagai alat yang fleksibel dan etis untuk mitigasi iklim, dengan menekankan kolaborasi lintas sektor dan lintas skala. Kunci keberhasilannya terletak pada penciptaan keseimbangan antara inovasi dan akuntabilitas terkait AI: tujuannya adalah memastikan AI tidak hanya mampu memecahkan persoalan emisi karbon, tetapi juga mewujudkan masyarakat yang berkeadilan dan tangguh. Ketika data terbuka, pendekatan hibrida, dan tata kelola partisipatif diprioritaskan, potensi teoretis akan bertransformasi menjadi kemajuan nyata. Gambar 1.1 menyajikan kerangka kerja AI untuk aksi iklim.



Gambar 1.1 Kerangka kerja AI dalam aksi iklim (Sumber: Konsepsi penulis)

1.4 MITIGASI IKLIM BERBASIS AI

Penerapan AI dalam pendekatan mitigasi iklim yang diusulkan dalam kerangka kerja ini memiliki konsekuensi yang berpotensi transformatif dari segi teoretis, pragmatis, sosial, dan keberlanjutan. Pembelajaran ini mengeksplorasi dimensi-dimensi tersebut dengan memanfaatkan penelitian lintas disiplin melalui sudut pandang peluang, tantangan, dan potensi transformatif.

Implikasi Teoretis: Memadukan Kompleksitas dan Inovasi

Fokus kerangka kerja ini pada model AI hibrida—di mana *machine learning* (ML) digunakan bersamaan dengan ilmu iklim—memperluas paradigma teoretis seputar teori sistem dan keberlanjutan komputasional. Sebagai sistem yang sangat kompleks, perubahan iklim tidak dapat didekati dengan metode pemodelan reduksionis karena adanya umpan balik non-linear dan interaksi lintas skala. Kerangka kerja ini memanfaatkan *physics-informed neural networks* (jaringan saraf yang berbasis prinsip fisika) untuk membuktikan bahwa AI dapat menyempurnakan model sistem Bumi (*Earth System Models* atau ESM). Arsitektur hibrida ini menyelaraskan pengembangan teknologi masa depan empiris dengan konstruksi teoretis, seperti teorema termodinamika, serta memberikan perspektif baru dalam menguraikan dinamika iklim.

Hal ini menantang pendekatan yang selama ini memisahkan ilmu iklim dan AI secara teoretis. Rolnick dan rekan-rekan, berpendapat bahwa kemampuan AI dalam memproses "data besar" (*big data*) dari satelit, sensor, dan perangkat lainnya mengharuskan kita meninjau ulang pemodelan iklim tradisional, yang cenderung lebih mengutamakan persamaan fisik dibandingkan wawasan berbasis data. Dengan demikian, model hibrida dalam kerangka kerja ini mencerminkan pergeseran paradigma; model ini mendorong kolaborasi lintas disiplin dan menegaskan metode "sains kompleksitas" dalam mengkaji sistem iklim. Namun, hal ini juga menimbulkan pertanyaan mengenai kemampuan interpretasi model. Meskipun alat *explainable AI* (XAI) bawaan (seperti nilai SHAP) diklaim sebagai solusi alternatif, para kritikus memberikan peringatan keras bahwa model hibrida mungkin tidak memberikan pemahaman kausalitas yang lebih akurat dan berisiko membuat pengguna menyimpulkan hubungan sebab-akibat secara berlebihan hanya berdasarkan korelasi.

Selain itu, mekanisme berbagi data yang terdesentralisasi dalam kerangka kerja ini (misalnya, *federated learning*) selaras dengan teori keadilan epistemik yang mendorong produksi pengetahuan yang lebih inklusif—dengan mendesentralisasi kepemilikan data sebagai upaya melawan warisan kolonial dalam ilmu iklim (di mana perspektif Global Utara sering kali lebih diutamakan dalam konteks Global Selatan). Hal ini menempatkan AI bukan sekadar sebagai alat, melainkan sebagai faktor pendorong (*force multiplier*) bagi demokratisasi aksi iklim.

Implikasi Praktis: Bagaimana Hambatan Sistemik Menghambat Skalabilitas

Dari perspektif praktis, kerangka kerja ini menyediakan jalur yang dapat ditindaklanjuti untuk meningkatkan pemantauan, prediksi, dan optimalisasi iklim. Alat-alat seperti *Climate TRACE* menyoroti kemampuan AI dalam mendemokratisasi pembelajaran emisi, yang memungkinkan pengawasan langsung (*real-time*) terhadap perusahaan dan pemerintah. Demikian pula, *DeepMind* milik Google telah terbukti efektif dalam optimalisasi energi

berbasis deep reinforcement learning (RL) dan telah meningkatkan efisiensi secara nyata. Namun, untuk mencapai skala yang lebih luas, hambatan infrastruktur dan teknis harus diatasi.

Ketimpangan data dan biaya komputasi merupakan beberapa tantangan utama. *Federated learning* dapat menghilangkan silo data, namun di daerah terpencil dengan akses listrik atau internet yang terbatas, pengoperasian jaringan perangkat IoT yang tangguh akan sulit dilakukan. Praktik *Green AI* (AI ramah lingkungan), seperti penggunaan algoritma hemat energi, sangat penting untuk mengimbangi jejak karbon yang dihasilkan saat melatih model berskala besar. Akan tetapi, efektivitas kerangka kerja ini bergantung pada dukungan pemangku kepentingan: pembuat kebijakan harus menciptakan insentif finansial melalui pasar karbon agar organisasi mau mengadopsi teknologi ini, sementara perusahaan menghadapi biaya awal untuk merancang ulang infrastruktur demi mengakomodasi sistem AI.

Salah satu risiko operasional adalah ketergantungan yang berlebihan pada AI dalam pengambilan keputusan. Terkait penggunaan RL untuk menentukan tata letak ladang angin, penilaian manusia tetap diperlukan untuk menimbang aspek etis, seperti konflik penggunaan lahan dengan masyarakat adat. Konsep "laboratorium kebijakan" dalam kerangka kerja ini dapat membantu menjembatani kesenjangan tersebut dengan melibatkan tim lintas disiplin dalam struktur tata kelola, guna memastikan bahwa AI memperkuat—bukan menggantikan—penilaian manusia.

Implikasi Sosial: Kesetaraan, Kekuasaan, Dan Partisipasi

Secara sosial, semangat partisipatif kerangka kerja ini—yang diperkuat melalui proses perancangan bersama (*co-design*) dengan masyarakat dan audit bias—mendukung keadilan iklim sekaligus menantang dinamika kekuasaan yang mengakar. Ketika melibatkan orang-orang dari komunitas terpinggirkan yang memiliki pengalaman langsung dengan solusi yang berpusat pada masyarakat—seperti prediksi kekeringan bagi petani kecil—pendekatan ini mampu mengimbangi wacana teknokratis yang cenderung mengutamakan sumber-sumber dari negara-negara Utara Global (*Global North*). Pemantauan kualitas udara berbasis urun daya (*crowdsourcing*), misalnya, memungkinkan warga untuk menjadi penghasil data sekaligus mendorong aksi perubahan iklim dari tingkat akar rumput.

Namun, risiko bias algoritma tetap ada. Hal ini sangat krusial dalam pengambilan keputusan berbasis AI di bidang-bidang seperti perencanaan kota, di mana data yang digunakan dapat mencerminkan ketimpangan yang sudah ada dalam data pelatihan. Dengan demikian, perlindungan dari banjir akan diberikan kepada bandara, bukan desa. Penilaian kesetaraan dalam kerangka kerja tersebut merupakan sebuah kemajuan, namun agar prosesnya benar-benar inklusif, diperlukan standar yang dapat ditegakkan. Selain itu, terdapat pula risiko privasi; sistem data terdesentralisasi masih dapat membuat komunitas rentan terpapar pengawasan oleh rezim otoriter.

Hal ini juga menambah otomatisasi berbasis AI ke dalam daftar potensi disrupsi pasar tenaga kerja. Menghilangkan seluruh emisi yang tercantum dalam grafik ini dari rantai pasok Anda dapat berdampak pada pekerja di sektor logistik atau energi. Salah satu celah utama dalam kerangka kerja ini adalah tidak adanya pembahasan mengenai strategi transisi yang adil—seperti program pelatihan ulang bagi pekerja yang terdampak oleh langkah-langkah

mitigasi perubahan iklim. Penerimaan sosial harus didasarkan pada komunikasi yang jelas mengenai peran AI sebagai pelengkap—bukan pengganti—tenaga kerja manusia, serta sebagai alat untuk mendorong perubahan kebijakan.

Mencapai Keseimbangan Antara Inovasi Dan Batas-Batas Planet

Implikasi keberlanjutan dari kerangka kerja ini bergantung pada kemampuannya untuk menyelaraskan peningkatan efisiensi yang dihasilkan AI dengan batasan ekologis. Digitalisasi memiliki potensi besar untuk mengurangi emisi GRK melalui jaringan energi terbarukan yang dioptimalkan oleh AI dan rantai pasok sirkular. Beberapa teknologi mungkin tidak dikembangkan secara khusus untuk CCS (penangkapan dan penyimpanan karbon)—seperti *graph neural networks* (GNN) yang mempercepat penemuan material penangkap karbon—namun teknologi tersebut berpotensi mengubah teknologi CCS secara fundamental. Akan tetapi, keberlanjutan bergantung pada dua hal:

Dampak lingkungan bersih (*net environmental impact*): Meskipun AI mengurangi tingkat emisi di sektor-sektor padat emisi seperti energi, siklus hidupnya—mulai dari pusat data hingga perangkat keras—harus mematuhi batasan anggaran karbon yang ketat. Kerangka kerja yang diusulkan ini menyoroti perlunya sertifikasi *Green AI* untuk memastikan hasil akhir yang berdampak positif bagi lingkungan.

Responsivitas: Model AI harus mampu beradaptasi dengan perubahan kondisi dasar iklim. Algoritma prediktif yang didasarkan pada data historis mungkin tidak efektif dalam skenario pemanasan global yang belum pernah terjadi sebelumnya, sehingga model-model tersebut harus terus dilatih ulang. Jika tidak dikaitkan dengan reformasi sistemik—dan yang terpenting, dengan kekuatan yang menopang reformasi tersebut—kerangka kerja ini membuat kita rentan terjebak dalam bentuk *techno-solutionism* (keyakinan bahwa teknologi semata dapat menyelesaikan masalah). Sebagaimana diperingatkan oleh Kaack dan rekan-rekan, peningkatan efisiensi ekstraksi energi fosil yang dimungkinkan oleh AI justru dapat meningkatkan emisi secara paradoks karena membuat energi fosil menjadi lebih murah. Oleh karena itu, AI harus diatur melalui kebijakan yang berfokus pada dekarbonisasi absolut, bukan sekadar efisiensi relatif.

Implikasi sosial, keberlanjutan, teoretis, dan praktis dari kerangka kerja ini saling bergantung satu sama lain. Secara teoretis, kerangka kerja ini memajukan pemodelan hibrida dan keadilan epistemik; secara praktis, ia menjembatani berbagai pertukaran kepentingan (*trade-off*) terkait infrastruktur dan etika; secara sosial, ia mendorong pemberdayaan sekaligus memitigasi risiko ketimpangan; dan dari sisi keberlanjutan, ia menyeimbangkan inovasi dengan batasan-batasan planet.

Pemerintah federal dan negara bagian juga harus merangkul masa depan ini dengan menerapkan tata kelola holistik yang memadukan sains terbuka, desain partisipatif, dan metrik keberlanjutan yang tangguh demi mewujudkan kesetaraan sosial yang luas serta manfaat lingkungan dalam ranah ketahanan iklim. Seiring bergulirnya era "kode karbon" ini, tujuan umat manusia bukanlah sekadar memanfaatkan kekuatan AI, melainkan mengarahkan perkembangannya menuju keadilan dan integritas ekologis.

1.5 PERAN KECERDASAN BUATAN (AI)

Perdebatan mengenai peran kecerdasan buatan (AI) sebagai katalisator mitigasi iklim memiliki narasi ganda: peluang yang belum pernah ada sebelumnya dan tantangan yang menuntut kesadaran serius. Di tengah ancaman krisis iklim global, AI tidak dipandang sebagai solusi ajaib yang berlaku untuk segala situasi, melainkan sebagai teknologi yang berpotensi mengubah keadaan secara fundamental—asalkan, seperti yang diungkapkan para penulis, kita mampu membaca tanda-tanda zaman dengan tepat terkait cara kita menerapkannya: yakni upaya menyeimbangkan inovasi dan etika, efisiensi dan keadilan, antusiasme teknologi dan skala dampak global.

Bab penutup ini merangkum berbagai pemahaman mendalam yang muncul dari eksplorasi tematis mengenai teori, praktik, dan dampak AI bagi keberlanjutan serta masa depan yang lebih baik—masa depan yang memadukan inovasi teknologi terbaik dengan upaya memelihara nilai-nilai dan hubungan antarmanusia. Salah satu keunggulan utama AI terletak pada kemampuannya untuk menyederhanakan kompleksitas. Sistem iklim dikenal sangat kompleks, dengan interaksi yang saling terkait erat antara faktor atmosfer, ekologi, dan aktivitas manusia. Algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*), jaringan saraf tiruan (*neural networks*), dan analitik prediktif akan mengubah cara kita melaporkan emisi, mengelola risiko, dan mengoptimalkan strategi dekarbonisasi.

Mulai dari pemantauan emisi global secara *real-time* menggunakan *Climate TRACE* hingga optimalisasi jaringan energi yang didukung oleh *reinforcement learning*, kita telah menyaksikan bagaimana AI dapat dimanfaatkan untuk mempercepat aksi iklim. Terobosan-terobosan ini menegaskan satu hal yang tak terbantahkan: AI mampu memproses kumpulan data yang sangat besar, mengidentifikasi tren yang mungkin terlewatkan oleh analis manusia, serta menghasilkan solusi dengan kecepatan yang tidak dapat ditandingi oleh pendekatan apa pun yang mengandalkan kemampuan manusia semata.

Namun, potensi besar ini dibarengi dengan berbagai keterbatasan yang signifikan. Sifat model AI yang menyerupai "kotak hitam" (*black-box*), ketimpangan data yang lebih menguntungkan negara-negara Utara Global (*Global North*), serta jejak karbon yang timbul dari pelatihan algoritma berskala besar menghadirkan dilema etis dan operasional. Sebagai contoh, meskipun *federated learning* dapat memungkinkan demokratisasi data, penerapannya secara praktis bergantung pada upaya menjembatani kesenjangan infrastruktur di kalangan kelompok yang selama ini kurang terwakili.

Contoh lainnya, pendekatan AI hibrida yang mengintegrasikan input berbasis fisika ke dalam pembelajaran mesin memang mengurangi hilangnya informasi dalam akurasi prediksi, namun dapat mengaburkan mekanisme sebab-akibat yang mendasari solusi berorientasi kebijakan sebagai metode pembelajaran utama. Tantangan-tantangan ini menyoroti perlunya kerja sama lintas disiplin—kebutuhan mendesak untuk melibatkan ilmuwan iklim, pengembang AI, ahli etika, dan pembuat kebijakan sebagai perancang bersama (*co-designer*) bagi perangkat yang tangguh secara teknologi dan adil secara sosial.

Akan tetapi, teknologi saja tidak akan membawa perubahan sistemik. Peran AI juga harus dipahami dalam konteks dinamika sosial-politik yang lebih luas. Oleh karena itu, para

pembuat kebijakan perlu memanfaatkan wawasan yang dihasilkan AI untuk merumuskannya menjadi mandat praktis yang bersifat direktif, seperti sistem penetapan harga karbon yang didasarkan pada model *reinforcement learning*. Di tingkat internasional, dunia perlu menetapkan protokol data antarnegara yang selaras dengan semangat kolaboratif Perjanjian Paris, serta menentukan cara mengarahkan pengembangan AI agar mendukung tujuan pembangunan manusia yang berlandaskan kepentingan nasional. Pada saat yang sama, kemitraan publik-swasta dapat menjadi instrumen pendorong yang efektif untuk memotivasi para pelaku bisnis global agar mengadopsi perilaku hemat energi dalam penggunaan algoritma AI—seperti yang terlihat pada upaya *Google/DeepMind* dalam menangani emisi pusat data.

Pelajaran terpenting di sini adalah peringatan terhadap paham *techno-solutionism* (keyakinan bahwa teknologi semata dapat menyelesaikan masalah). Peningkatan efisiensi dalam ekstraksi bahan bakar fosil atau pengurangan emisi berskala kecil yang didukung AI berisiko mengalihkan perhatian dari kebutuhan mendesak untuk menghentikan penggunaan hidrokarbon sepenuhnya. Keberlanjutan sejati menuntut perubahan struktural—meliputi reformasi kebijakan, perubahan perilaku, dan penyesuaian ekonomi—yang dapat diarahkan oleh AI melalui pembelajaran data. Sebagai contoh, meskipun AI mampu mengoptimalkan rantai pasok untuk menekan emisi, penerapannya harus dilakukan dalam sistem yang memprioritaskan ekonomi sirkular dan pemanfaatan energi terbarukan.

1.6 PENGEMBANGAN MASA DEPAN

(a) Inovasi inklusif: Perluas proses pelatihan AI skala besar ke wilayah geografis yang kurang terwakili, seperti model prediksi banjir di tempat-tempat yang relevan dengan daerah tropis dan kering.

(b) Tata kelola etis: Tetapkan standar transparansi, akuntabilitas, dan kesetaraan global untuk aplikasi AI-iklim. Perjanjian internasional dapat menciptakan hukum berdasarkan standar ini, sementara wadah uji regulasi lokal dapat memperkuat penegakan hukum.

(c) Integrasi holistik: Rumuskan dan tanamkan AI ke dalam solusi iklim lintas disiplin yang mendorong penilaian manusia, indigenisasi, dan tindakan berbasis kebijakan daripada sekadar menambah kemampuan.

Untuk menguraikan "kode karbon," AI harus menavigasi jalan yang sulit—tindakan penyeimbangan yang kompleks antara kemampuan komputasi dan kendala praktis masyarakat dan ekologi. Krisis iklim adalah tantangan kolektif, dan kontribusi AI yang paling signifikan dapat berupa harmonisasi berbagai pemangku kepentingan di sekitar solusi berbasis data.

Hanya dengan memadukan inovasi dengan empati, ketelitian dengan partisipasi, dan ambisi dengan akuntabilitas, umat manusia dapat mengubah AI dari alat menjadi mitra untuk membangun masa depan yang tangguh, adil, dan berkelanjutan. Jalannya kompleks, tetapi taruhannya terlalu besar untuk diabaikan. Jadi, pada persimpangan potensi teknologi dan kelangsungan hidup planet ini, jawabannya sangat sederhana: Kita harus menerapkan AI secara cerdas, mendesak, dan inklusif untuk kehidupan di Bumi.

BAB 2
BAGAIMANA AI MENGHIJAUKAN LANSKAP KORPORAT

2.1 KECERDASAN BUATAN DAN PERUBAHAN DALAM RANTAI PASOK

Di jantung sebuah kota mandiri yang hidup dengan kaca, beton, dan denyut nadi perdagangan, sebuah metamorfosis tak terduga sedang terjadi. Ruang rapat yang dulunya berkutat seputar lembar kerja (*spreadsheet*) dan margin keuntungan kini riuh dengan pembicaraan mengenai "jaringan saraf tiruan" (*neural networks*), "jejak karbon," dan "ekonomi sirkular." Dunia korporat, yang turut memikul tanggung jawab atas kerusakan lingkungan, sedang mengalami kebangkitan kembali; penggeraknya bukanlah pengelola konvensional, melainkan kecerdasan buatan. Demikianlah awal mula era Hutan Silikon: perpaduan harmonis antara layar digital dan kehidupan tanaman, di mana kode menjadi bibit bagi ekosistem kita dan informasi menyuburkan padang rumput baru yang rimbun dengan vegetasi. Urgensi perubahan iklim membayangi berbagai industri. Di tengah kenaikan suhu global dan ekosistem yang kian rapuh, dunia usaha menghadapi tekanan yang meningkat dari konsumen, investor, dan regulator untuk beralih menuju keberlanjutan.

Namun, mandat ini bukan sekadar tindakan altruistik; ini adalah masalah ekonomi. Kelangkaan sumber daya, pasar energi yang fluktuatif, dan perubahan preferensi konsumen telah menjadikan konsep "hijau" sebagai sebuah kebutuhan strategis. Di sinilah hadir AI, sang penyelamat tak terduga dalam kisah ini. Sempat dianggap sekadar angan-angan fiksi ilmiah, kecerdasan buatan kini telah bertransformasi menjadi instrumen praktis yang mampu pembahasan kumpulan data masif, memprediksi tren, serta mengoptimalkan sistem dengan kecepatan dan akurasi yang melampaui kemampuan manusia. Perusahaan kini memanfaatkan alat ini untuk menekan biaya, meningkatkan keuntungan, dan menata ulang hubungan mereka dengan planet ini.

Mari kita ambil contoh perjalanan sehelai kaus. Mulai dari ladang kapas hingga pabrik pewarnaan, kapal kargo hingga rak ritel, prosesnya melibatkan labirin keputusan logistik—yang masing-masing memiliki dampak lingkungan. Selama berpuluh-puluh tahun, rantai pasok beroperasi berdasarkan estimasi atau perkiraan semata; tak mengherankan jika hal ini berujung pada kelebihan produksi, pemborosan bahan bakar, dan emisi berlebih. Namun, di era Hutan Silikon, AI mengubah perkiraan tersebut menjadi perhitungan yang presisi dan terukur. Perhatikan Walmart, raksasa ritel yang rantai pasoknya menghubungkan 11.500 gerai dengan 100.000 pemasok. Baru-baru ini, perusahaan tersebut meluncurkan platform berbasis AI untuk mengoptimalkan jaringan inventaris dan transportasinya. Penyesuaian rute pengiriman—dengan memasukkan data pola cuaca, peristiwa geopolitik, dan perilaku konsumen secara *real-time*—berhasil memangkas jarak tempuh sebesar 15 persen dan mengurangi konsumsi bahan bakar diesel sebanyak 25 juta galon per tahun. Hasilnya? Situasi yang saling menguntungkan: biaya lebih rendah dan emisi karbon yang berkurang.

Demikian pula Maersk, perusahaan pelayaran terbesar di dunia, baru-baru ini memanfaatkan *machine learning* untuk memprediksi kepadatan pelabuhan dan mengubah

rute kapal guna mencegah mesin tetap menyala (*idling*) yang memboroskan bahan bakar minyak berat. Proses yang dulunya membutuhkan waktu berhari-hari hingga berminggu-minggu bagi tim analis untuk menyelesaikannya, kini dapat dilakukan dalam hitungan milidetik. Hal ini membuktikan bahwa efisiensi dan keberlanjutan bukanlah musuh bebuyutan seperti yang sering digambarkan; keduanya justru merupakan mitra.

Namun, pelopor sesungguhnya adalah perusahaan rintisan seperti Climatiq, perusahaan yang berbasis di Berlin yang menggunakan AI untuk berperan sebagai "akuntan karbon" bagi dunia bisnis. Melalui integrasi dengan sistem pengadaan, setiap kali pesanan pembelian dibuat, perangkat lunak Climatiq secara otomatis menghitung emisi yang dihasilkan oleh pesanan tersebut—misalnya, berapa gram CO_2 yang terkait dengan satu kotak klip kertas. IKEA, sebagai contoh, telah memanfaatkan visibilitas yang sangat rinci ini untuk mengubah pola interaksinya, sehingga memungkinkan pengurangan emisi secara terarah tanpa mengorbankan pertumbuhan.

Naungan Manajemen Energi: Sistem Multifungsi

Di bawah pepohonan "*Silicon Forest*" (Hutan Silikon), sebuah revolusi lain sedang bergulir: kelahiran kembali energi. Manajemen energi tradisional lebih menyerupai sakelar peredup cahaya—kasar dan reaktif. Kini, sistem AI berperan sebagai orkestrator utama yang mengatur konsumsi, penyimpanan, dan pembangkitan energi secara harmonis dan sempurna.

Pusat data Google—mesin di balik miliaran pencarian harian—dulunya merupakan konsumen energi yang sangat rakus. Namun, pada tahun 2016, perusahaan tersebut bermitra dengan *DeepMind* untuk mengembangkan AI yang secara otomatis mengendalikan sistem pendingin berdasarkan pembacaan suhu waktu nyata, beban server, dan prakiraan cuaca. Sebuah algoritma terobosan, yang dilatih menggunakan data historis, berhasil memangkas penggunaan energi pendingin sebesar 40%—langkah yang kemudian diadopsi pula oleh Microsoft dan Amazon. Yang tak kalah mengejutkan adalah kisah Stem Inc., sebuah perusahaan rintisan (*startup*) asal California yang memanfaatkan baterai berbasis AI untuk membantu pabrik dan supermarket mengalihkan aktivitas operasional ke periode di luar jam sibuk (*off-peak*). Sistem mereka pembahasan harga listrik dan permintaan jaringan, sehingga mampu mengurangi tagihan energi hingga 30 persen sekaligus meringankan beban jaringan listrik yang bergantung pada bahan bakar fosil.

Akan tetapi, contoh yang mungkin paling puitis datang dari Belanda, tempat perusahaan rintisan teknologi Sympower bekerja sama dengan ladang angin. Mereka menggunakan AI untuk mengantisipasi pola angin dan menyelaraskan produksi energi dengan permintaan industri. Saat embusan angin menguat, sistem memerintahkan pabrik untuk meningkatkan aktivitas yang intensif energi; sebaliknya, saat angin melemah, aktivitas tersebut dikurangi. Dinamika timbal-balik antara industri dan alam ini mencerminkan filosofi Silicon Forest: jangan melawan lingkungan, melainkan rangkullah lingkungan tersebut.

Namun, inovasi sejati hadir dari perusahaan rintisan seperti Climatiq, sebuah perusahaan asal Berlin yang AI-nya berfungsi sebagai "akuntan karbon" bagi dunia bisnis. Perangkat lunak Climatiq terhubung dengan sistem pengadaan untuk menghitung emisi secara otomatis pada setiap pesanan pembelian, bahkan hingga ke hitungan gram CO_2 dalam sekotak

klip kertas. Visibilitas yang sangat rinci semacam ini dapat membawa perubahan transformatif bagi perusahaan besar seperti IKEA, memungkinkan upaya pengurangan emisi yang spesifik tanpa menghambat pertumbuhan.

Inovasi/Desain Berkelanjutan dan Ekonomi Sirkular

Inti dari "Hutan" ini adalah penciptaan. Selama sebagian besar abad ke-20, proses desain produk bersifat linear: ekstraksi, produksi, dan pembuangan. AI kini mengubah garis linear tersebut menjadi sebuah lingkaran. Sebagai contoh, Adidas memanfaatkan AI untuk mengurai dan merekayasa ulang material guna menghilangkan penggunaan plastik baru (virgin plastic). Mereka bermitra dengan perusahaan rintisan *Carbon* untuk merancang sol tengah sepatu menggunakan busa berbahan dasar alga. AI menghasilkan jutaan kombinasi molekuler untuk menemukan satu struktur yang tahan lama, fleksibel, dan dapat terurai secara hayati—sebuah tugas yang dulunya memakan waktu bertahun-tahun namun kini dapat diselesaikan dalam hitungan bulan.

Demikian pula, Unilever menggunakan AI generatif untuk merancang kemasan yang meminimalkan penggunaan material sekaligus memaksimalkan kekuatan. Berkas-berkas desain ini memungkinkan algoritma mengeksplorasi ribuan permutasi geometris, yang menghasilkan desain-desain yang mungkin tidak pernah terbayangkan oleh manusia. Perusahaan rintisan seperti Circulor melangkah lebih jauh dengan menggunakan blockchain dan kecerdasan buatan untuk melacak bahan baku mulai dari tahap penambangan hingga menjadi produk akhir.

Bagi produsen kendaraan listrik seperti *Volvo*, hal ini berarti penggunaan kobalt bebas konflik dan aluminium daur ulang, sehingga menciptakan rantai pasok yang tertutup dan berkelanjutan (*circular supply chain*). AI mendeteksi ketidaksesuaian secara *real-time*, mengubah konsep keberlanjutan dari sekadar slogan pemasaran menjadi praktik yang dapat diaudit. Namun, tidak ada transformasi yang berjalan tanpa hambatan. Di balik setiap kisah sukses, selalu ada potensi masalah. Privasi data sering kali berbenturan dengan kebutuhan AI akan data dalam jumlah besar.

Bias algoritma juga menjadi kekhawatiran lain yang membayangi. Ketika sebuah perusahaan utilitas Eropa menerapkan AI untuk membantu penyaluran subsidi energi terbarukan, sistem tersebut secara tidak sengaja mendiskriminasi kawasan berpenghasilan rendah yang tidak memiliki meteran pintar (*smart meter*)—sehingga menciptakan ketimpangan. Selain itu, sifat AI yang menyerupai "kotak hitam" (black-box)—di mana cara kerjanya tidak transparan—menimbulkan skeptisisme. Bagaimana sebuah organisasi dapat mengklaim dirinya berkelanjutan jika para insinyurnya sendiri tidak memahami bagaimana keputusan-keputusan tersebut diambil? Perusahaan seperti IBM berupaya menjawab tantangan ini melalui solusi seperti AI *Explainability 360*, namun transparansi tetap menjadi kendala. Biaya juga menjadi hambatan lain; perusahaan raksasa Fortune 500 menghabiskan jutaan dolar untuk layanan AI, sementara usaha kecil memiliki akses terbatas terhadap pilihan yang terjangkau.

Terlepas dari berbagai tantangan tersebut, "*Silicon Forest*" (Hutan Silikon) terus berkembang. Sektor pertanian, mode, dan konstruksi—industri yang sebelumnya tampak jauh

dari dunia teknologi—kini mulai merambah ranah keberlanjutan berbasis AI. Berkat teknologi *computer vision*, traktor otonom John Deere kini mampu menanam benih dengan presisi tinggi, sehingga mengurangi penggunaan air dan pupuk. *Startup* di bidang mode, Colorifix, memanfaatkan AI untuk memproduksi pewarna dari mikroba, yang berhasil memangkas limbah bahan kimia beracun hingga 90 persen.

Bahkan industri semen—yang menyumbang 8% dari emisi global—kini mengalami transformasi inovatif berkat perusahaan seperti *startup* asal Kanada, *CarbonCure*; teknologi AI mereka memasukkan CO_2 daur ulang ke dalam beton, yang tidak hanya meningkatkan kekuatan material tersebut tetapi juga mengikat karbon dioksida di dalamnya. Microsoft melalui *Planetary Computer* memadukan data lingkungan dengan perangkat AI untuk mendukung berbagai sektor, mulai dari kehutanan hingga perikanan. Pemerintah pun turut berperan aktif; "*Green Digital Coalition*" milik Uni Eropa mendanai berbagai proyek AI yang mendukung pencapaian target iklim.

Silicon Forest menandai fajar baru seiring memudarnya paradigma korporat lama. Ini bukanlah sebuah utopia, melainkan pergeseran bertahap yang mengakui bahwa keuntungan finansial dan kelestarian planet tidak harus saling bertentangan. Terlepas dari segala kerumitannya, AI ibarat cermin: ia memantulkan nilai-nilai yang dianut oleh para penggunanya. Perusahaan yang meraih kesuksesan dalam lanskap baru ini menanam algoritma layaknya benih, menciptakan sistem di mana efisiensi berjalan selaras dengan ekologi. Perjalanan ini baru saja dimulai. Proses ini akan membawa pemulihan, inovasi, dan penghijauan kembali, seiring dengan semakin matangnya teknologi AI kita.

Silicon Forest yang terus berkembang ini mengajak kita membayangkan masa depan di mana teknologi tidak mendominasi alam, melainkan berkolaborasi dengannya. Lebih dari itu, kemitraan tersebut menyimpan harapan bagi industri, Bumi, dan generasi mendatang yang akan melangkah di bawah naungan pepohonan berkanopi digital ini.

2.2 PERAN KECERDASAN BUATAN DALAM KEBERLANJUTAN KORPORAT

Kaitan antara penggunaan kecerdasan buatan (AI) dan pengembangan keberlanjutan korporat merupakan topik penting saat ini, mengingat urgensi perubahan iklim, penipisan sumber daya alam, dan kebutuhan akan keberlanjutan ekonomi. Bab ini mengulas riset yang ada untuk menyoroti bagaimana teknologi AI digunakan dalam upaya "menghijaukan kembali" industri, dengan menekankan pada penerapan yang relevan bagi optimalisasi rantai pasok, manajemen energi, desain produk berkelanjutan, serta tantangan sosial-etis dalam peningkatan skala penerapannya.

Kecerdasan Buatan dalam Optimalisasi Rantai Pasok

Kemampuan AI untuk pembahasan kumpulan data berskala besar dan memprediksi kemungkinan hasil telah mengubah rantai pasok, serta mengurangi limbah dan emisi. Berbagai studi menunjukkan bahwa algoritma *machine learning* (ML) mengoptimalkan logistik dengan memprediksi permintaan, mengatur ulang rute pengiriman, dan mengurangi pemborosan.

Sebagai contoh, Modgil dan rekan-rekan, menunjukkan bahwa rantai pasok ritel yang didukung AI mampu mengurangi jejak karbon sebesar 18–25% tanpa mengorbankan margin

keuntungan. Sama halnya dengan penerapan platform AI oleh *Walmart* untuk mengoptimalkan jaringan logistik globalnya—yang berhasil mengurangi penggunaan bahan bakar diesel sebanyak 25 juta galon setiap tahunnya—Toorajipour dan rekan-rekan, menyoroti keuntungan ganda yang diperoleh dari pengurangan biaya sekaligus emisi. Mulai dari sistem akuntansi karbon berbasis AI yang memfasilitasi pelacakan emisi secara *real-time* terkait keputusan pengadaan, perusahaan rintisan seperti *Climatiq* telah menetapkan standar baru dalam bidang ini.

AI dalam Manajemen Energi

Bidang fokus lain dalam keberlanjutan berbasis AI adalah efisiensi. Dalam sebuah contoh penerapan hasil penelitian akademis ke dunia nyata, *DeepMind* menunjukkan bahwa penggunaan *reinforcement learning* untuk mengelola sistem pendingin pusat data berhasil menurunkan konsumsi energi Google sebesar 40%; ini merupakan pencapaian pertama dalam aplikasi industri.

Selanjutnya, Van Quaquebeke dan Gerpott menunjukkan bagaimana AI dapat menyeimbangkan jaringan listrik dengan memprediksi fluktuasi pasokan energi terbarukan dan permintaan energi. Sebagai contoh, platform AI milik *Sympower* di Belanda menyelaraskan pembangkitan energi angin dengan penggunaan energi di sektor industri, sehingga mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil saat kecepatan angin rendah. Hal ini tidak serta-merta mengimbangi sifat intensif energi dalam proses pelatihan AI, kecuali jika proses tersebut ditenagai oleh energi terbarukan.

Kecerdasan Buatan dalam Desain Produk Ramah Lingkungan

Desain produk sirkular sedang dikembangkan kembali melalui AI generatif dan ilmu material. Penelitian akademis oleh Akhtar dan rekan-rekan, serta sol tengah berbahan busa bioteknologi dari Adidas—yang dikembangkan bersama perusahaan rintisan *Carbon*—menunjukkan bahwa AI mampu menyimulasikan berbagai jenis material yang dapat terurai secara hayati. Sebagai contoh, desain kemasan berbasis AI dari Unilever membutuhkan plastik 30% lebih sedikit namun tetap memberikan tingkat perlindungan yang setara bagi konsumen hal ini membuktikan bagaimana algoritma dapat mengubah kreativitas menjadi komoditas dengan jauh lebih baik dibandingkan manusia. Selain itu, proses *blockchain* berbasis AI yang melacak bahan baku mulai dari tahap ekstraksi hingga produksi—seperti yang dilakukan oleh Circulor—menjamin praktik pengadaan yang etis sekaligus meredakan kekhawatiran terkait mineral konflik dan praktik ketenagakerjaan.

Namun, terlepas dari segala potensinya, peran AI dalam keberlanjutan menghadirkan dilema etis. Salah satu kekhawatiran utama adalah bias algoritmik; Luusua melaporkan bahwa penggunaan AI untuk alokasi subsidi energi secara sistematis lebih menguntungkan kawasan tempat tinggal penduduk kaya, sehingga memperparah ketimpangan sosial. Privasi data masih menjadi topik perdebatan hangat, di mana kontroversi lain muncul terkait klasifikasi deforestasi melalui citra satelit berbasis AI yang juga menyinggung isu hak penggunaan lahan masyarakat adat. Selain itu, sifat "kotak hitam" (*black box*) pada AI membuat aspek akuntabilitas menjadi semakin rumit. Perangkat *AI Explainability 360* dari IBM bertujuan

mengatasi masalah ini dengan menghadirkan proses pengambilan keputusan yang lebih transparan, namun tingkat adopsinya masih lambat.

Planetary Computer menghimpun informasi lingkungan global untuk aplikasi AI, sehingga memfasilitasi penerapan pertanian presisi dan semen rendah karbon di sektor-sektor seperti pertanian dan konstruksi. Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) berupaya mengatasi tantangan ekologis melalui pendanaan dan inisiatif kebijakan guna mendorong inovasi AI yang selaras dengan target iklim, contohnya adalah *Green Digital Coalition* milik Uni Eropa. Akan tetapi, pelaku usaha berskala kecil sering kali tidak dapat mengakses perangkat AI karena tingginya biaya, yang pada akhirnya menciptakan "kesenjangan keberlanjutan" (*sustainability divide*). Bukti yang ada menunjukkan bahwa AI mampu mengubah hubungan antara profitabilitas dan kesehatan planet. Meskipun contoh keberhasilan dari perusahaan *Fortune 500* dan perusahaan rintisan (*startup*) telah menunjukkan hasil nyata, tantangan terkait etika, kesetaraan, dan transparansi tetap ada. Studi di masa depan perlu mengkaji skalabilitas solusi AI dengan mempertimbangkan UKM serta dampak lingkungan jangka panjang—baik dari sisi infrastruktur AI maupun kerangka kerja—guna memastikan akses sumber daya bagi negara-negara berkembang tidak terhambat. Seiring dengan berkembangnya "*Silicon Forest*", kolaborasi lintas sektor—yang mengintegrasikan teknologi dengan perumusan kebijakan dan etika—akan menentukan apakah AI akan menjadi komponen integral dari pembangunan berkelanjutan atau justru memicu dampak yang tidak diinginkan.

2.3 KECERDASAN BUATAN, ETIKA, DAN KELESTARIAN ALAM

Hal ini mencakup kerangka kerja khusus yang dapat diikuti oleh perusahaan untuk mengadaptasi AI yang cerdas dan berkelanjutan guna mengatasi tantangan teknis, etis, dan operasional. Kerangka kerja ini memadukan wawasan dari berbagai studi kasus serta riset, dan membantu perusahaan menyelaraskan keuntungan dengan kelestarian lingkungan.

1. **Penyelarasan Strategis dan Penetapan Tujuan**
   - **(a) Target:** Mengekstrak, membersihkan, menggabungkan, dan mentransformasikan data bisnis untuk mendukung penerapan AI dalam keberlanjutan.
   - **(b) Tindakan:** Melakukan penilaian materialitas yang menyoroti area berdampak tinggi (misalnya, penggunaan energi, limbah, rantai pasok) di mana AI dapat menghasilkan perubahan nyata.
   - **(c) Menetapkan tujuan SMART:**
     - Contoh: Mengurangi emisi cakupan 3 (scope 3) sebesar 30% pada tahun 2030 melalui logistik yang dioptimalkan dengan AI.
     - Menyelaraskan dengan standar global (misalnya, SDGs PBB, inisiatif *Science-Based Targets*) untuk memastikan akuntabilitas.
   - **(d) Studi kasus:** Rantai pasok berbasis AI ini (sebagai upaya awal pengurangan biaya) membantu Walmart mengintegrasikan data emisi cakupan 1 dan 2 dalam upaya mencapai SDG 12 (Konsumsi yang Bertanggung Jawab) dan SDG 13 (Penanganan

Perubahan Iklim), dengan pelacakan emisi yang terintegrasi dalam pengambilan keputusan pengadaan.

2. **Infrastruktur dan Integrasi Data: Transaksi Domain.**
   (a) **Tujuan:** Membangun ekosistem data yang tangguh untuk memasok kebutuhan sistem AI.
   (b) **Tindakan:**
   - Sensor IoT dan pemantauan waktu nyata (*real-time*) untuk memperoleh data yang rinci/granular (misalnya, konsumsi energi dan limbah material).
   - Akses data lintas departemen melalui sistem *cloud* (seperti *Microsoft Azure*, *Google Cloud*).
   - Penjaminan kualitas data: Membersihkan, melabeli, dan menstandarisasi kumpulan data (*dataset*) untuk meningkatkan kualitas data serta mencegah hasil yang buruk akibat kualitas data masukan yang buruk (*garbage in, garbage out*).

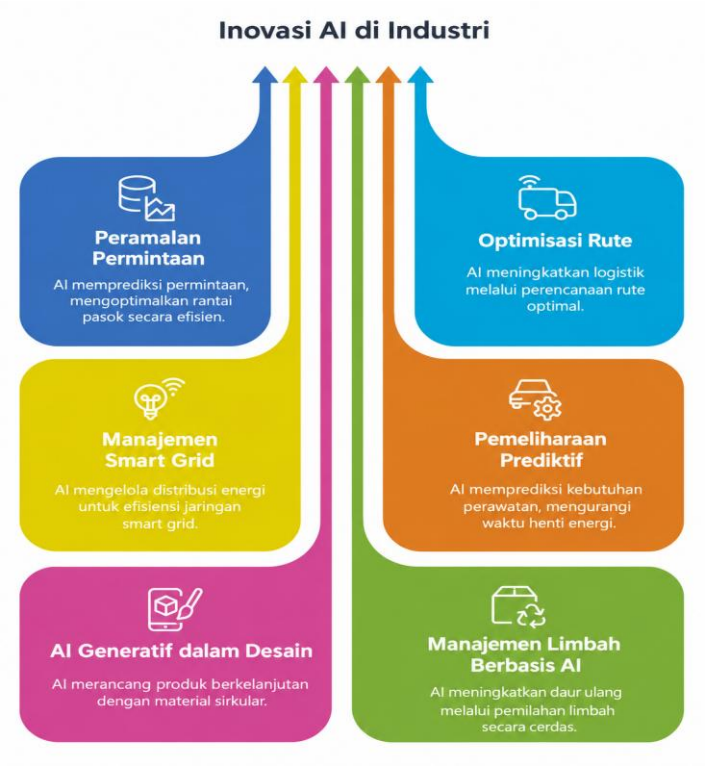
   (c) **Perangkat/Alat:**
   - API untuk penghitungan karbon waktu nyata dari Climatiq.
   - IBM Environmental Intelligence Suite untuk menjalankan analitik prediktif.
   - Pemilihan dan Penerapan Aplikasi AI.

   (d) **Visi:** Kami akan menerapkan perangkat AI sebagai respons terhadap tantangan keberlanjutan yang menjadi prioritas.
   (e) **Aplikasi berdasarkan sektor:** Gambar 2.1 menampilkan inovasi AI di berbagai industri.
   (f) **Langkah-langkah penerapan:**
   - Melakukan uji coba skala kecil (misalnya, satu pabrik atau lini produk).
   - Mengembangkan keberhasilan uji coba menggunakan solusi AI modular.
   - Model harus dilatih ulang dengan data baru untuk menyesuaikan diri dengan perubahan kondisi dunia.

3. **Dampak AI dalam Keseharian**
   (a) **Tujuan:** Memastikan solusi AI yang transparan, adil, dan akuntabel.
   (b) **Tindakan:**
   - Membentuk dewan etika AI untuk mengevaluasi algoritma terkait bias, pelanggaran privasi, dan dampak lingkungan (*trade-off*).
   - Menerapkan perangkat *Explainable AI* (XAI)—seperti *AI Explainability 360* dari IBM—untuk memperjelas prosedur pengambilan keputusannya.
   - Pelibatan pemangku kepentingan: Melakukan kolaborasi (*co-creation*) dengan LSM, masyarakat setempat, dan regulator untuk memastikan penggunaan AI selaras dengan tujuan keadilan.

   (c) **Daftar periksa mitigasi risiko:**
   - Mengaudit konsumsi energi dalam proses pelatihan AI (misalnya, menggunakan pusat data bertenaga energi terbarukan).

- Dukungan kebijakan: Mendorong pemerintah untuk memberikan subsidi bagi adopsi AI di kalangan UKM (misalnya, keringanan pajak, hibah).
- Berbagi praktik terbaik: Membangun repositori sumber terbuka (*open-source*) untuk model AI (misalnya, pusat keberlanjutan di GitHub).
- Mendapatkan konfirmasi independen atas klaim keberlanjutan (misalnya, sertifikasi B Corp atau ISO14001) guna menghindari tuduhan *greenwashing*.
- Mengutamakan privasi data (misalnya, melakukan anonimisasi data dari mitra rantai pasok).



Gambar 2.1 Inovasi AI di berbagai industri
(*Sumber: Konsepsi penulis*)

4. Kolaborasi dan Pembangunan Ekosistem

(a) Tujuan: Mempercepat inovasi melalui kemitraan. Tindakan:

(b) Berkolaborasi dengan perusahaan rintisan (*startup*): Memanfaatkan perusahaan teknologi yang tangkas untuk solusi spesifik (misalnya, Circulor untuk penggunaan AI dalam pengadaan yang etis).

(c) Cara bergabung dengan koalisi industri: Berkolaborasi melalui inisiatif seperti *Planetary Computer* dari Microsoft atau *EU Green Digital Coalition* untuk berbagi sumber daya.

(d) Melibatkan institusi akademis: Mendanai penelitian universitas terkait keberlanjutan berbasis AI (misalnya, perancangan material yang dapat terurai secara hayati/biodegradabel).

(e) Studi kasus: Contoh lainnya adalah Unilever, yang bekerja sama dengan *startup* AI bernama Alchemy untuk menciptakan desain kemasan yang mengurangi penggunaan plastik sebesar 30%. Perusahaan tersebut membuka akses informasi kekayaan intelektual (IP) terkait desain ini kepada para pesaing guna mendorong perubahan di seluruh industri.

5. Melacak, Melaporkan, dan Melakukan Iterasi

(a) Tujuan: Memantau kinerja dan menyesuaikan strategi secara iteratif.

(b) Tindakan: Mengembangkan KPI.

- Lingkungan: Pengurangan emisi karbon per unit serta peningkatan efisiensi energi.
- Ekonomi: ROI (pengembalian investasi) untuk proyek AI dan penghematan biaya melalui pengurangan limbah.
- Melakukan pelaporan keberlanjutan secara *real-time* menggunakan dasbor berbasis AI.

(c) Bersikap transparan dengan menerbitkan laporan dampak tahunan.

(d) Metrik: Rantai pasok – "% pemasok yang diintegrasikan ke dalam sistem pelacakan emisi berbasis AI".

(e) Energi: "MW optimalisasi energi terbarukan berbasis AI".

6. Peningkatan Skala bagi UKM dengan Dampak Global.

(a) Sasaran: Membuat perangkat keberlanjutan berbasis AI dapat diakses oleh perusahaan berskala kecil.

(b) Tindakan:

- Manfaatkan SaaS: Banyak perangkat AI tersedia sebagai *software-as-a-service* (SaaS) dengan harga terjangkau (*Salesforce Einstein*, solusi AI dari SAP).
- Dukungan kebijakan: Mendorong pemerintah untuk menyubsidi adopsi AI bagi UKM (misalnya, keringanan pajak, hibah).
- Berbagi praktik terbaik: Membangun repositori sumber terbuka untuk model AI (misalnya, pusat keberlanjutan GitHub).

(c) Studi kasus: Stem Inc. menyediakan layanan manajemen energi berbasis AI dengan sistem langganan yang memungkinkan produsen berskala lebih kecil untuk mengurangi biaya energi tanpa perlu investasi awal.

Kerangka kerja ini memandang AI bukan sebagai solusi ajaib, melainkan sebagai faktor pengali bagi upaya keberlanjutan. Melalui penyelarasan strategis, tata kelola yang etis, dan kolaborasi lintas sektor, perusahaan dapat mengembangkan "Hutan Silikon" (*Silicon Forests*) mereka sendiri—yaitu ekosistem yang memajukan teknologi sekaligus aspek ekologis dalam lingkungan yang saling bergantung. Ke depannya, kita harus menyeimbangkan inovasi dengan tanggung jawab, serta memastikan bahwa upaya AI dalam menghijaukan lanskap korporat memberikan manfaat yang sama besarnya bagi jajaran pimpinan perusahaan maupun bagi planet bumi. Langkah selanjutnya:

(a) Melakukan penilaian internal mengenai kesenjangan kesiapan (*Readiness Gap Assessment*).

(b) Berfokus pada 1–2 inisiatif percontohan yang muncul dari penilaian materialitas.

(c) Adopsi AI berbasis fakta: Memastikan adanya dukungan dari para pemimpin dan pemangku kepentingan terhadap penerapan AI yang berkelanjutan.

Kerangka kerja ini berfungsi sebagai panduan bagi organisasi yang berupaya mengelola kompleksitas keberlanjutan yang didukung oleh AI, yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan industri spesifik serta fungsionalitas teknologi yang terus berkembang.

2.4 SISTEM KECERDASAN BUATAN (AI) DALAM STRATEGI KEBERLANJUTAN

Penggunaan sistem kecerdasan buatan (AI) dalam strategi keberlanjutan perusahaan menandai pergeseran paradigma mengenai cara perusahaan menyeimbangkan antara keuntungan dan kesehatan planet. Sejalan dengan kebutuhan akan transformasi perilaku organisasi, penerapan teknologi ini juga dilakukan dalam kerangka kerja teoretis, praktis, dan berkelanjutan guna mentransformasi pasar serta sistem ekologi internasional. Dengan meninjau implikasi ini dari sudut pandang teori yang ada, skenario dunia nyata, dan tujuan keberlanjutan jangka panjang, kita melihat AI sebagai pedang bermata dua yang berperan sebagai agen transformasi untuk menghijaukan kembali struktur perusahaan.

Implikasi Teoretis

(a) Pemantauan ulang teori pemangku kepentingan (*stakeholder theory*).

Teori pemangku kepentingan menuntut bisnis untuk memenuhi kebutuhan seluruh pemangku kepentingan—bukan hanya pemegang saham, melainkan juga karyawan, masyarakat, dan lingkungan. Peran AI dalam keberlanjutan memperluas konsep ini dengan memfasilitasi akuntabilitas berbasis data terhadap pemangku kepentingan non-manusia (misalnya, ekosistem). Contohnya adalah perangkat berbasis AI—seperti perangkat lunak akuntansi karbon dari Climatiq—yang menerapkan teori pemangku kepentingan dengan menerjemahkan dampak lingkungan menjadi metrik waktu nyata (*real-time*), sehingga mendorong perusahaan untuk menginternalisasi biaya lingkungan yang sebelumnya tidak diperhitungkan dalam model keuangan. Transformasi ini bertentangan dengan gagasan Milton Friedman mengenai supremasi pemegang saham, serta mengusulkan kerangka kerja "pemangku kepentingan planet" yang dirancang oleh AI, di mana algoritma akan memperjuangkan kepentingan manusia sekaligus kepentingan alam.

(b) Pandangan berbasis sumber daya (*Resource-Based View* atau RBV).

Para ahli teori RBV berpendapat bahwa perusahaan yang memiliki sumber daya unik dan bernilai tinggi memiliki keunggulan kompetitif. AI memanfaatkan berbagai aset tak berwujud (seperti data dan algoritma) untuk menciptakan keunggulan berkelanjutan. Sebagai contoh, pusat data Google yang dioptimalkan dengan AI mampu menekan biaya energi dan meningkatkan citra merek, sehingga menyulitkan perusahaan lain untuk mengejar ketertinggalan. Namun, hal ini juga menimbulkan pertanyaan mengenai demokratisasi perangkat AI. Jika sistem AI canggih hanya terjangkau oleh perusahaan Fortune 500, RBV dapat memperparah ketimpangan, yang berujung pada "kesenjangan keberlanjutan" antara perusahaan besar dan kecil.

(c) Ekonomi sirkular dan gaya hidup berbasis sistem.

Melalui optimalisasi siklus sumber daya, AI mempercepat transisi dari ekonomi linear ("ambil-buat-buang") menuju ekonomi sirkular. Model AI generatif—seperti yang digunakan Adidas untuk merancang sepatu yang dapat terurai secara hayati—merupakan penerapan praktis teori sistem dalam bentuk elektronik; model ini memandang produk sebagai bagian dari sistem entitas industri dan ekologis yang saling terkait. Namun, ketergantungan AI pada mineral tanah jarang untuk perangkat keras (misalnya, GPU) berisiko melanggengkan praktik ekstraktif, sehingga memunculkan sebuah paradoks: AI dapat menutup siklus material di satu ranah sembari membuka siklus baru di ranah lain.

Implikasi Praktis

(a) Mendefinisikan ulang efisiensi.

AI mengubah konsep efisiensi agar tidak sekadar mengukur penghematan biaya, melainkan juga mempertimbangkan kemaslahatan bersama. Sistem logistik berbasis AI milik Walmart berhasil memangkas penggunaan bahan bakar diesel sebanyak 25 juta galon per tahun; hal ini menunjukkan keterkaitan yang membuktikan bahwa efisiensi operasional dan pengurangan emisi bukanlah tujuan yang saling bertentangan. Akan tetapi, hal ini menuntut perubahan budaya: karyawan perlu beralih dari pola kerja yang terisolasi (bekerja dalam silo) menuju kolaborasi lintas disiplin, di mana ilmuwan data bekerja secara langsung dengan petugas keberlanjutan. Terdapat berbagai hambatan, seperti resistensi terhadap perubahan, kesenjangan keterampilan, dan ketidakselarasan insentif (misalnya, motif keuntungan jangka pendek versus keberlanjutan jangka panjang).

(b) Tantangan etika dan tata kelola.

Penerapan AI di dunia nyata penuh dengan dilema etis:

a. Bias dan kesetaraan: Algoritma yang dilatih menggunakan data historis dapat memperparah ketimpangan. Sebagai contoh, sistem AI yang mengelola subsidi energi bersih mungkin lebih memprioritaskan wilayah perkotaan yang melek teknologi dibandingkan komunitas pedesaan, sehingga memperlebar "kesenjangan iklim".
b. Transparansi: Sifat "kotak hitam" (*black-box*) AI menyulitkan akuntabilitas. Bagaimana pemangku kepentingan bisa yakin akan validitas klaim lingkungan dari kemasan bebas plastik hasil rancangan AI Unilever tanpa mengetahui cara kerja algoritmanya?
c. Privasi: Sensor IoT yang memantau emisi rantai pasok dapat melanggar privasi pekerja, sehingga perusahaan harus menyeimbangkan pertukaran antara transparansi dan kerahasiaan.

(c) Realitas skalabilitas dan biaya.

Secara teoretis, solusi AI dapat ditingkatkan skalanya (*scalable*), namun penerapannya di lapangan tidak merata. Microsoft Planetary Computer menyediakan perangkat AI untuk reboisasi global, tetapi usaha kecil dan menengah mungkin tidak memiliki dana atau keahlian untuk menggunakannya. Perusahaan kecil seperti Stem Inc. mengatasi hal ini dengan menyediakan model berbasis langganan, namun mereka bergantung pada platform pihak ketiga, yang menimbulkan risiko ketergantungan. Selain itu, kebutuhan energi AI yang sangat

besar—di mana pelatihan satu model saja dapat menghasilkan 626.000 pon CO_2—dapat meniadakan manfaat keberlanjutan jika tidak menggunakan energi terbarukan.

Dampak Jangka Panjang Terhadap Ekologi dan Masyarakat

(a) Regenerasi lingkungan vs. optimisme teknologi.

AI juga menjanjikan untuk meregenerasi ekosistem yang rusak. Kita menggunakan perangkat pertanian presisi, seperti traktor berbasis AI dari John Deere yang meminimalkan limpasan pupuk dan memulihkan kesehatan tanah, serta proyek reboisasi berbasis AI (contohnya: Dendra Systems) yang mampu menanam pohon 150 kali lebih cepat dibandingkan manusia. Namun, optimisme teknologi berisiko mengaburkan perlunya perubahan sistemik. AI dapat membantu mengurangi emisi, tetapi tidak akan menghilangkan kebutuhan akan kebijakan dekarbonisasi atau perubahan perilaku untuk meninggalkan pola konsumsi berlebihan. Ketergantungan berlebihan pada AI—di mana perusahaan merasa cukup melakukan *greenwashing* melalui perubahan algoritmik alih-alih melakukan perubahan mendasar—kemungkinan besar akan memicu sikap berpuas diri yang berkelanjutan.

(b) Membangun ketangguhan dan keselarasan iklim.

Kecerdasan buatan memperkuat ketangguhan perusahaan dalam menghadapi gangguan iklim. Salah satu contohnya adalah algoritma penanganan kemacetan pelabuhan milik Maersk, yang mengurangi guncangan pada rantai pasok global akibat cuaca ekstrem. Namun, kumpulan data historis yang digunakan untuk melatih model AI mungkin tidak dapat memprediksi fenomena yang belum pernah terjadi sebelumnya (misalnya, badai "angsa hitam" atau peristiwa ekstrem yang sangat langka), yang menunjukkan perlunya sistem pembelajaran adaptif. Selain itu, ketahanan yang didorong oleh AI dapat memperparah ketimpangan global: perusahaan yang lebih kaya mungkin mampu beradaptasi lebih cepat dibandingkan pesaing mereka, sehingga meminggirkan wilayah dengan sumber daya terbatas.

(c) Kesetaraan parasosial dan transisi yang berkeadilan.

Manfaat keberlanjutan dari AI juga harus berkeadilan secara sosial—AI menciptakan lapangan kerja ramah lingkungan (seperti analis data dan insinyur keberlanjutan), namun juga menggantikan pekerja di sektor-sektor padat karbon. Sebagai contoh, sebuah studi IMF tahun 2023 memperingatkan bahwa AI dapat meningkatkan pengangguran di komunitas yang bergantung pada bahan bakar fosil jika tidak disertai program pelatihan ulang. Di sisi lain, proyek-proyek seperti *Green Digital Coalition* milik Uni Eropa mendanai pelatihan AI di wilayah-wilayah tertinggal, yang mencerminkan model "transisi yang berkeadilan" di mana pengembangan teknologi dan keberlanjutan berjalan beriringan dalam semangat solidaritas.

Pendekatan Holistik: Gaya, Landasan, Dan Keberlanjutan

Saling keterkaitan dari berbagai implikasi ini menuntut model tata kelola holistik yang menyeimbangkan potensi AI dengan keharusan ekologis dan sosial. Dengan menerapkan prinsip-prinsip tata kelola sumber daya bersama (*commons governance*) dari Elinor Ostrom dan konsep "Ekonomi Donat" (*Doughnut Economics*) dari Kate Raworth, model-model tersebut akan:

(a) Memasukkan batasan ekologis ke dalam desain AI: Algoritma harus memperlakukan batasan planet (misalnya, anggaran karbon dan penggunaan air tawar) sebagai batasan mutlak yang tidak boleh dilanggar.

(b) Mendorong inovasi inklusif: Platform AI sumber terbuka (*open-source*), akses bersubsidi ke AI yang sudah ada bagi UKM, dan proyek AI yang dipimpin komunitas (misalnya, pemantauan lahan masyarakat adat) dapat mendemokratisasi akses terhadap perangkat pendukung keberlanjutan.

(c) Mandat akuntabilitas hibrida: Audit algoritmik dapat dilengkapi dengan pelaporan tradisional yang komprehensif (misalnya, berdasarkan standar GRI) untuk menjamin akuntabilitas dan membuktikan kinerja etisnya.

2.5 KEBERLANJUTAN PERUSAHAAN BERBASIS AI

Konsekuensi dari keberlanjutan perusahaan yang didorong oleh AI tidaklah selalu menguntungkan ataupun secara otomatis merugikan. Dampaknya berada di antara inovasi dan risiko, efisiensi dan kesetaraan, serta optimalisasi dan perubahan sistemik. Dualitas ini sebenarnya melekat pada metafora "*Silicon Forest*" (Hutan Silikon): sebuah ekosistem yang berkembang pesat di mana teknologi dan alam hidup berdampingan, namun juga rentan terhadap monokultur (ketergantungan berlebih pada AI) atau spesies invasif (algoritma yang tidak etis). Bagi perusahaan, langkah ke depan menuntut kerendahan hati—pemahaman bahwa AI hanyalah alat, bukan solusi ajaib untuk segala masalah. Kerangka kerja teoretis harus beradaptasi untuk mencerminkan kompleksitas sosio-teknis AI, dan strategi implementasi perlu mencakup tata kelola teknologi yang dinamis, dengan menimbang keuntungan terhadap tanggung jawab pelestarian bumi. Dalam perspektif ini, keberlanjutan bukanlah sekadar istilah populer, melainkan upaya mencapai keseimbangan dinamis, di mana kemampuan AI untuk memulihkan lingkungan dimanfaatkan guna membangun ekosistem perusahaan yang tangguh, adil, dan regeneratif. Keberhasilan "*Silicon Forest*" bergantung pada kemampuan umat manusia untuk menjinakkan AI—bukan sebagai penguasa, melainkan sebagai sekutu dan penjaga digital yang menuntun kita menuju dunia di mana ruang rapat perusahaan dan biosfer dapat hidup berdampingan serta berkembang bersama.

Cakupan Masa Depan: Langkah Ke Depan Dalam Keberlanjutan Perusahaan Berbasis Ai

Peran AI dalam keberlanjutan perusahaan: Sebuah pergeseran paradigma dalam menyeimbangkan profitabilitas dengan tanggung jawab menjaga kelestarian bumi. Sebagaimana telah dibahas, potensi AI untuk mendorong keberlanjutan—melalui optimalisasi rantai pasok, peningkatan efisiensi energi, dan inovasi desain produk berkelanjutan—bersifat sangat transformatif. Namun, perjalanan ini penuh kompleksitas. Isu-isu mengenai tata kelola etis, aksesibilitas yang adil, dan pertukaran kepentingan (*trade-off*) terkait lingkungan menuntut respons yang lebih canggih, yang menyelaraskan kecerdikan teknologi dengan transformasi sistemik. Tiga keharusan penting muncul dari teori, praktik, dan aspirasi keberlanjutan: kolaborasi, akuntabilitas, dan adaptabilitas.

AI Sebagai Pendorong Penciptaan Nilai Ganda

Janji paling menarik dari AI adalah kemampuannya menghasilkan nilai ganda yang mengesankan—yaitu perbaikan di bidang lingkungan sekaligus ekonomi. Studi kasus pada

pemimpin industri seperti Walmart dan raksasa teknologi seperti Google menunjukkan bahwa solusi berbasis AI—yang memperbaiki logistik atau penggunaan energi secara cerdas—dapat memangkas emisi di satu sisi, sekaligus mendorong efisiensi operasional di sisi lain.

Pada tingkat yang lebih rinci, perusahaan rintisan seperti Climatiq dan Circulor memperlihatkan bagaimana analitik data memungkinkan perusahaan memantau dan mengurangi jejak karbon mereka secara *real-time*, sehingga tujuan tersebut menjadi hasil yang dapat diukur secara kuantitatif. Contoh-contoh ini mengilustrasikan bahwa AI dapat berperan lebih dari sekadar sarana untuk memperbaiki model bisnis yang sudah mapan; AI memungkinkan kita memikirkan model bisnis dengan cara yang segar dan transformatif. Ketika penerapan AI diselaraskan dengan kerangka kerja seperti ekonomi sirkular dan teori pemangku kepentingan, perusahaan dapat bertransformasi dari praktik ekstraktif menjadi sistem regeneratif, di mana limbah berubah menjadi sumber daya dan sumber daya terus disirkulasikan tanpa henti.

Menghadapi Sisi Gelap: Dilema Etis dan Praktis

Namun, jalan menuju "*Silicon Forest*" (*Hutan Silikon*) memiliki tantangan etis dan logistik. Sebagai contoh, penggunaan energi yang melekat pada algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*) bisa menjadi sebuah kontradiksi tidak langsung. Meskipun algoritma dapat memanfaatkan data secara sangat efisien, sistem ini tetap bergantung pada pusat data yang ditenagai oleh sumber energi tak terbarukan, sehingga hanya menghasilkan sedikit atau bahkan tidak ada keuntungan bersih sama sekali.

Penerapan algoritma berisiko memperparah kesenjangan yang sudah ada; organisasi dengan kekuatan ekonomi pun menghadapi sorotan terkait hal ini—kekhawatiran mengenai privasi data yang muncul belakangan ini sering kali melibatkan kasus di mana sistem pengambilan keputusan otomatis dapat memperkuat ketimpangan sosial yang ada (seperti lebih menguntungkan kelompok kepentingan yang lebih kaya). Karena AI sering dipandang sebagai "kotak hitam" (*black box*)—di mana proses internalnya tidak terlihat—hal ini menyulitkan akuntabilitas dan memunculkan pertanyaan mengenai transparansi dalam proses pengambilan keputusan. Untuk mengatasi risiko-risiko ini, entitas bisnis perlu menerapkan praktik tata kelola etis yang kuat, termasuk penggunaan perangkat AI yang dapat dijelaskan (*explainable AI* atau XAI) dan audit oleh pihak ketiga, guna memastikan bahwa upaya keberlanjutan tidak mengorbankan keadilan sosial ataupun integritas ekologis.

KTT Tata Kelola yang Inklusif dan Adaptif

Skalabilitas merupakan tantangan lainnya. Selain itu, sementara perusahaan-perusahaan Fortune 500 memanfaatkan potensi AI, UKM sering kali kekurangan sumber daya untuk menerapkan teknologi ini, sehingga memperlebar "kesenjangan keberlanjutan" yang ada. Solusi transformatif untuk menjembatani kesenjangan tersebut harus diciptakan bersama dalam ekosistem kolaboratif yang melibatkan tiga sektor: pemerintah, korporasi, dan masyarakat sipil. Intervensi kebijakan—seperti subsidi bagi perusahaan rintisan (*startup*) AI ramah lingkungan atau penyediaan platform sumber terbuka (*open-source*) bagi UKM—dapat memeratakan akses. Inisiatif seperti *Green Digital Coalition* milik Uni Eropa menunjukkan

bagaimana kolaborasi lintas sektor dapat mempercepat inovasi layanan digital publik untuk mendukung strategi iklim sekaligus mendorong pertumbuhan yang inklusif.

Menuju Masa Depan yang Regeneratif

Secara umum, peran AI dalam keberlanjutan sebaiknya dipandang sebagai salah satu aspek dari transformasi sistemik yang lebih luas. AI bukanlah solusi pamungkas (*panacea*), melainkan bagian dari teka-teki besar yang mencakup reformasi kebijakan, perubahan budaya, dan aktivisme akar rumput. Perusahaan perlu bersikap rendah hati dan memahami bahwa keberhasilan AI bergantung pada kemampuannya untuk menempatkan diri selaras dengan nilai-nilai kemanusiaan serta batasan ekologis planet ini. Hal ini berarti memprioritaskan energi terbarukan untuk menjalankan sistem AI, mendanai pelatihan ulang tenaga kerja demi ekonomi hijau, serta mengintegrasikan batasan planet ke dalam desain algoritma.

Visi Simbiosis

Metafora "Hutan Silikon" mewujudkan masa depan yang harmonis di mana teknologi dan lingkungan hidup berdampingan. Bayangkan sektor-sektor di mana pertanian presisi yang didukung AI memulihkan tanah di tebing, rantai pasokan berbasis *blockchain* memungkinkan kesetaraan perdagangan, dan AI generatif mengkurasi produk yang selaras dengan ekosistem Bumi. Visi ini mungkin—tetapi kita harus berinovasi dengan wawasan etis dan tanggung jawab kolektif. Pada titik ini, pilihannya tidak ambigu: Bisnis perlu memanfaatkan AI bukan sebagai penguasa tetapi sebagai pengelola, membudidayakan dunia di mana kemakmuran ekonomi dan keberlanjutan lingkungan tidak terpisahkan. Pekerjaan ini akan membutuhkan keberanian bersama, kerja tim, dan komitmen teguh untuk keseimbangan. Dalam keseimbangan ini, harapan untuk masa depan yang regeneratif muncul—dunia di mana Hutan Silikon berkembang, dan manusia berjalan dengan lembut, namun sadar, di atas tanah yang kita sebut rumah.

BAB 3
MENTRANSFORMASI MODEL BISNIS DEMI MASA DEPAN NET-ZERO

3.1 MENYELARASKAN TEKNOLOGI DAN ALAM DALAM DUNIA BISNIS

Krisis iklim belakangan ini telah menjadi tantangan yang mendesak dan. Seiring meningkatnya suhu dan runtuhnya ekosistem, tuntutan sistem kita akan transformasi drastis menjadi semakin jelas. Dunia bisnis—yang secara historis kerap dipandang sebagai pihak antagonis sekaligus protagonis dalam kisah ini—kini berada di persimpangan jalan.

Model ekstraksi, produksi, dan konsumsi tradisional, yang bergantung pada paradigma linier "ambil-buat-buang" (*take-make-waste*), tidak lagi layak dipertahankan di dunia yang sedang bergerak cepat menuju emisi nol bersih (*net-zero*) pada pertengahan abad. Namun, di balik urgensi ini tersimpan sebuah peluang: peluang untuk mendefinisikan ulang penciptaan nilai—bukan sebagai permainan *zero-sum* (di mana keuntungan harus mengorbankan kelestarian planet, atau sebaliknya) melainkan sebagai hubungan simbiotik yang didorong oleh inovasi teknologi. Penggerak utama revolusi ini adalah kecerdasan buatan atau *artificial intelligence* (AI), sebuah kekuatan transformatif yang kini menyandang julukan baru: sang alkemis algoritmik.

Bab ini mengkaji keterkaitan dengan kekuatan transformatif tersebut yang semakin menyentuh inti dari bisnis—yakni DNA dari strategi-strategi itu sendiri; hal ini melibatkan evolusi dan perombakan tradisi usang menjadi praktik berkelanjutan demi memastikan ketahanan model bisnis di masa depan melalui AI. Perusahaan-perusahaan yang merintis jalan baru dalam memisahkan pertumbuhan ekonomi dari kerusakan lingkungan memanfaatkan *machine learning*, analitik prediktif, dan otomatisasi. Mulai dari ekonomi sirkular yang meniru siklus regeneratif alam hingga kerangka kerja *product-as-a-service* (produk sebagai layanan) yang mengutamakan akses dibandingkan kepemilikan, AI menjadi kekuatan pendorong yang mengubah konsep keberlanjutan menjadi kenyataan praktis.

Akan tetapi, perjalanan ini tidaklah mudah ataupun pasti keberhasilannya. Proses ini menuntut kemampuan untuk mengatasi kompleksitas teknis, dilema etika, serta inersia sistemik, sembari terus berupaya mempertahankan keunggulan. Dengan menelaah wawasan dari para pemimpin bisnis, ekonom, dan ahli teknologi, kami mengeksplorasi peluang serta risiko dari transisi ini dan menyajikan panduan strategis yang seimbang bagi perusahaan yang ingin berkembang di masa depan yang bebas emisi (*net-zero*).

Urgensi Iklim: Dan Momen Penentuan Bagi Dunia Bisnis

Konsumen, investor, dan pemerintah kini semakin menyelaraskan insentif dengan keberlanjutan, memberikan sanksi bagi pihak yang lamban beradaptasi dan imbalan bagi para inovator. Di Eropa, *Corporate Sustainability Reporting Directive* (CSRD) serta aktivisme pemegang saham di berbagai belahan dunia lainnya turut mempertegas transisi ini. Namun, kepatuhan semata tidaklah cukup. Upaya-upaya tersebut akan sia-sia jika kita tidak melakukan perombakan radikal terhadap model bisnis—yang menyelaraskan profitabilitas dengan batasan daya dukung planet—sesuatu yang hanya dapat dicapai melalui inovasi sistemik.

AI memiliki potensi transformatif yang jauh melampaui sekadar peningkatan efisiensi atau akuntansi karbon secara bertahap. Kemampuannya dalam mengolah data dalam jumlah masif, mengenali pola, dan mengoptimalkan pengambilan keputusan secara **real-time** memungkinkan perusahaan untuk merancang ulang rantai nilai, produk, dan hubungan dengan pelanggan dari dasarnya. Pada intinya, AI ibarat "batu filsuf" di era modern; ia mengubah "pasir" berupa sistem lama menjadi "emas" berupa ekonomi sirkular serta masyarakat yang berkelanjutan dan rendah karbon.

Ekonomi Sirkular: Menutup Siklus Melalui Kecerdasan Mesin

Ekonomi sirkular—sebuah model yang mengutamakan penggunaan kembali (*reuse*), perbaikan (*repair*), dan daur ulang (*recycling*) alih-alih ekstraksi sumber daya baru—telah lama dianggap sebagai standar ideal keberlanjutan. Namun, penerapannya selama ini terkendala oleh hambatan logistik dan ekonomi. Bagaimana dunia bisnis dapat melacak material di tengah rantai pasok yang rumit? Bagaimana mereka memprediksi masa pakai produk atau mengoptimalkan logistik balik (*reverse logistics*)? AI memberikan jawaban dengan tingkat akurasi yang belum pernah ada sebelumnya.

Algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*) pembahasan data historis untuk memprediksi ketahanan produk, sehingga memungkinkan perusahaan seperti Patagonia menciptakan produk yang dirancang untuk dua siklus hidup. Sebagai contoh, sistem pemeliharaan prediktif—seperti yang digunakan Siemens pada peralatan industri—mampu meminimalkan waktu henti operasional (*downtime*) dan memperpanjang masa pakai peralatan. Di sisi lain, robot penyortir yang memanfaatkan *computer vision* untuk meningkatkan akurasi daur ulang telah diterapkan oleh perusahaan seperti AMP Robotics guna mengidentifikasi dan mengklasifikasikan material secara sangat rinci.

Penerapan teknologi ini bukan sekadar upaya meningkatkan efisiensi, melainkan sebuah perombakan total dalam memaknai nilai. Dengan memandang limbah sebagai persoalan desain, AI memungkinkan organisasi mengubah sampah menjadi sumber pendapatan. Melalui langkah ini, AI mengelola metrik langganan, pola penggunaan, dan pembelajaran siklus hidup untuk mendorong profitabilitas serta membatasi limbah yang diatur oleh ketentuan.

Fokus Baru pada Akses Versus Kepemilikan

Peralihan dari kepemilikan ke akses mungkin merupakan inovasi model bisnis paling radikal di abad ke-21. *Rolls-Royce*, yang menyewakan mesin jet dengan skema "*Power-by-the-Hour*" (daya per jam), adalah contoh tren ini; begitu pula Mud Jeans yang menyewakan celana jin kepada konsumen. Dengan tetap memegang kepemilikan produk, perusahaan memiliki insentif untuk mengembangkan produk yang tahan lama dan dapat ditingkatkan kualitasnya (*upgradable*), alih-alih menerapkan strategi keusangan terencana.

AI menjadi kekuatan pendorong di balik transisi ini. Model berlangganan sangat bergantung pada penetapan harga dinamis, prakiraan permintaan, dan interaksi pelanggan yang dipersonalisasi—semuanya merupakan bidang yang menjadi keunggulan AI. Meskipun berada di ranah yang berbeda, algoritma rekomendasi Netflix menunjukkan kemampuan analitik prediktif dalam mempertahankan pengguna dan memastikan pemanfaatan sumber

daya secara optimal. Saat diterapkan pada produk fisik, AI memungkinkan perusahaan memaksimalkan kumpulan aset bersama, memprediksi kebutuhan pemeliharaan, dan meminimalkan kelebihan produksi. Hasilnya? Jejak karbon yang berkurang dan loyalitas pelanggan yang meningkat.

Efisiensi Menuju Sistem Inovatif dengan AI

Sirkularitas dan servitisasi memang penting, namun AI mampu melakukan lebih dari itu. Kecerdasan digital juga berperan dalam sistem energi: *DeepMind* milik Google berhasil memangkas biaya pendinginan pusat data sebesar 40% melalui pengendalian suhu yang dioptimalkan oleh AI. *Eco-grid* (jaringan listrik ramah lingkungan), yang diperkuat oleh pembelajaran mesin (machine learning), memasok energi terbarukan dan menyesuaikan dengan permintaan secara *real-time*, sehingga mengatasi masalah ketidakstabilan pasokan (*intermittency*) dari tenaga surya dan angin. Di sektor pertanian, perusahaan seperti *Blue River Technology* menggunakan robot yang dikendalikan AI untuk menyemprotkan pestisida hanya pada area yang membutuhkannya, sehingga mengurangi penggunaan bahan kimia hingga 90 persen. Poin-poin berikut menjelaskan sistem inovatif yang melibatkan AI.

(a) Contoh-contoh ini menunjukkan kebenaran yang lebih luas: AI bukan sekadar alat untuk melakukan perbaikan kecil, melainkan platform untuk transformasi menyeluruh. Bisnis dapat mengembangkan sistem tertutup yang beroperasi dalam batasan ekologis dengan mengintegrasikan teknologi seperti AI, sensor IoT, *blockchain*, dan prinsip desain biomimetik.

(b) Betapapun menjanjikannya teknologi ini, keberlanjutan yang didukung oleh AI tetap menghadapi berbagai tantangan. Para pemimpin bisnis yang kami wawancarai untuk bab ini menyoroti beberapa hambatan:

(c) Kompleksitas data: AI bekerja paling optimal jika diterapkan pada data berkualitas yang dapat saling beroperasi (*interoperable*) di berbagai sistem pencatatan; informasi sering kali terisolasi di berbagai departemen, sektor, atau mitra rantai pasok.

(d) Risiko etis: Risiko reputasi dan operasional akibat bias algoritma, konsumsi energi dalam pelatihan AI, serta hilangnya lapangan kerja.

(e) Biaya investasi: Peralihan ke model berbasis AI memerlukan investasi awal, yang dapat menjadi hambatan bagi UKM yang tidak memiliki ukuran dan skala sebesar perusahaan-perusahaan raksasa.

(f) Ketidakpastian regulasi: Regulasi belum mengimbangi laju inovasi, sehingga menimbulkan ketidakjelasan mengenai kepemilikan data, penghitungan karbon, dan tanggung jawab hukum.

Para ekonom memperingatkan agar tidak terjebak dalam optimisme teknologi semata, dengan argumen bahwa AI saja tidak dapat menyelesaikan masalah struktural seperti konsumsi berlebihan atau ketimpangan. "Teknologi seharusnya mendukung desain regeneratif, bukan sekadar metrik pertumbuhan". Senada dengan hal tersebut, para eksekutif menekankan pentingnya kolaborasi lintas sektor serta mendorong kemitraan antara pemerintah, LSM, dan perusahaan pesaing untuk menstandarisasi metrik keberlanjutan dan berbagi perangkat AI.

Menuju Era Baru Netzero

Bab ini menempatkan AI sebagai penggerak transformasi yang luas—salah satu dari sekian banyak faktor—di saat kita harus segera memikirkan kembali cara kita menjalankan bisnis secara global. Melalui studi kasus, wawancara dengan para ahli, dan pemeriksaaan kritis, kami mengkaji bagaimana para pelopor menyeimbangkan inovasi dan pragmatisme, keuntungan dan tujuan mulia, serta disrupsi dan kesetaraan. Perjalanan menuju *net-zero* bukanlah perjalanan yang linier, mulus, ataupun seragam. Perjalanan ini menuntut kreativitas, keberanian, dan semangat petualangan. Namun, sebagaimana para alkemis sepanjang sejarah berupaya mengubah timbal menjadi emas, demikian pula para alkemis masa kini—yang berbasis algoritma—menggunakan AI untuk membentuk tatanan ekonomi baru: sebuah tatanan di mana perusahaan tumbuh dengan cara menjaga planet yang menjadi tumpuan kelangsungan hidup mereka. Taruhannya belum pernah sebesar ini, namun peluangnya pun belum pernah seindah ini. Bab ini menawarkan solusi dalam empat dimensi:

a) **Kajian mendalam mengenai desain berkelanjutan berbasis AI**: Memanfaatkan AI untuk optimalisasi sumber daya, logistik balik (*reverse logistics*), dan pengurangan limbah.
b) **Produk sebagai layanan (*product-as-a-service*)**: Model bisnis yang mentransformasi berbagai industri, mulai dari fesyen hingga konstruksi.
c) **Inovasi sistemik**: Intervensi berbasis sektor di bidang energi, pertanian, dan perencanaan kota dengan memanfaatkan AI.
d) **Menavigasi transisi**: Perspektif para ahli mengenai cara mengatasi hambatan teknis, etika, dan regulasi.

Melalui perpaduan yang mulus antara teori dan ilustrasi praktis, kami berharap dapat memberikan wawasan yang dibutuhkan para pemimpin untuk memanfaatkan AI—bukan sekadar sebagai istilah tren (*buzzword*), melainkan sebagai kompas yang mengarahkan organisasi menuju transformasi *net-zero*. Kita sedang memasuki era "alkimia algoritmik"—dan bersamanya, muncul peluang untuk merumuskan ulang hakikat kemajuan itu sendiri.

3.2 AI DAN MODEL BISNIS BERKELANJUTAN

Peran kecerdasan buatan (AI) dalam bisnis berkelanjutan jangka panjang—melalui pengembangan model bisnis baru yang inovatif—akan mendorong pergeseran paradigma yang mendefinisikan ulang cara perusahaan menyeimbangkan keuntungan dengan tanggung jawab menjaga kelestarian bumi. Tinjauan pustaka ini merangkum riset ilmiah yang mengkaji faktor pendorong maupun penghambat—baik dari sisi teknologi, ekonomi, regulasi, maupun sosial-budaya—terkait transisi ini. Bagian ini mengulas riset lintas disiplin untuk mengidentifikasi faktor-faktor tersebut serta sejauh mana penggunaan AI di sepanjang rantai nilai dapat memberikan dampak positif terhadap model bisnis berkelanjutan melalui model bisnis sirkular, servitisasi, dan inovasi sistemik.

Faktor Teknologi: Potensi Daya Optimasi AI Yang Luar Biasa

AI bersifat transformatif justru karena kemampuannya dalam memproses kumpulan data (*dataset*) yang besar dan mengoptimalkan sistem yang kompleks. Berbagai studi

menekankan pentingnya *machine learning* (ML) sebagai katalisator krusial bagi aktivitas ekonomi sirkular, termasuk pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*) dan pemulihan material. Sebagai contoh, Geissdoerfer dan rekan rekan. menyatakan bahwa teknologi digital—termasuk AI—sangat penting untuk "menutup siklus" (*closing the loop*) dalam rantai pasok karena teknologi ini mampu melacak aliran sumber daya dan memprediksi timbulan limbah. Contoh lainnya, teknologi berbasis AI seperti *computer vision* dan *sensor* IoT mengoptimalkan proses daur ulang dengan mengenali serta mengategorikan material, sekaligus mencapai tingkat akurasi 95% dalam mendeteksi kontaminasi pada aliran limbah. Demikian pula, Olawade dan rekan rekan. menyoroti potensi smart *remanufacturing* (manufaktur ulang cerdas), di mana AI memungkinkan algoritma memeriksa data siklus hidup produk untuk memberikan panduan dalam perancangan produk yang mudah dibongkar dan digunakan kembali.

Namun, keberhasilan AI sangat bergantung pada kualitas data dan interoperabilitas. Ekosistem data yang terfragmentasi—yang umum ditemukan pada industri konvensional—menjadi hambatan bagi adopsi AI, karena model semacam itu membutuhkan input yang terstandarisasi dan real-time untuk menghasilkan output yang dapat ditindaklanjuti. Tantangan ini menjadi jauh lebih signifikan dalam rantai pasok global: kekhawatiran dan tantangan inheren terkait transparansi kerangka kerja tata kelola membuat model tata kelola data semacam itu menjadi rentan. AI dapat membantu mengurangi emisi operasional, namun hal ini juga membawa dampak lingkungan. Model *machine learning* (ML) berskala besar seperti GPT-3 membutuhkan energi yang sangat besar untuk proses pelatihannya, yang sebagian besar bersumber dari jaringan listrik berbasis energi tak terbarukan. Para peneliti telah memperingatkan mengenai praktik "*climate-washing*," yaitu ketika perusahaan mengabaikan jejak karbon AI dalam klaim keberlanjutan mereka. Selain itu, Hanna dan rekan rekan. menyoroti risiko etis, seperti bias algoritmik dalam alokasi sumber daya yang berpotensi menimbulkan dampak merugikan secara tidak proporsional terhadap komunitas marginal yang terlibat dalam inisiatif keberlanjutan.

Faktor Ekonomi: Model Berkelanjutan dan Profitabilitasnya

AI mendorong profitabilitas dengan menerapkan harga karbon pada aspek keberlanjutan. Dengan menyoroti konsep "nilai bersama" (*shared value*), Hanna dan rekan rekan. menekankan bagaimana keuntungan dapat diperoleh melalui pemecahan masalah sosial. Studi kasus mengenai model *product-as-a-service* (PaaS)—seperti penyewaan sistem pencahayaan melalui layanan "*Pay-per-Lux*" dari Philips—menunjukkan bagaimana AI meningkatkan profitabilitas dengan berfokus pada analitik langganan dalam model ekonomi retensi. Accenture memperkirakan bahwa model bisnis sirkular dapat menghasilkan nilai ekonomi global sebesar Rp79,22 kuadriliun per tahun pada tahun 2030, di mana AI (kecerdasan buatan) berperan mengoptimalkan pemanfaatan aset dan mengurangi kapasitas yang tidak terpakai (*idle capacity*).

Adopsi AI di kalangan UKM masih rendah akibat tingginya biaya awal, terlepas dari manfaat jangka panjang yang ditawarkan. Schwaeke dan rekan rekan. menyebut fenomena ini sebagai "dilema inovator" (*innovator's dilemma*), yang mengindikasikan bahwa perusahaan

petahana cenderung mengejar keuntungan jangka pendek dan mengabaikan investasi keberlanjutan yang bersifat disruptif namun bermanfaat untuk jangka panjang. Selain itu, ketimpangan pasar lebih menguntungkan perusahaan besar yang memiliki akses terhadap infrastruktur AI. Sebagai contoh, jaringan logistik Amazon yang berbasis AI menghasilkan emisi 15% lebih rendah per pengiriman dibandingkan pesaing berskala kecil dan menengah, sehingga memperlebar kesenjangan terkait keberlanjutan (*green divide*).

Faktor Regulasi dan Kebijakan: Kerangka Kebijakan Sebagai Penggerak

Regulasi pemerintah bekerja melalui dua cara: mendorong inovasi berkelanjutan dan memberikan sanksi atas ketidakpatuhan. Rencana Aksi Ekonomi Sirkular Uni Eropa menyerukan pelacakan material yang difasilitasi oleh AI dan mewajibkan perusahaan untuk menerapkan paspor produk digital. Demikian pula, instrumen penetapan harga karbon—seperti *Emissions Trading System* (ETS) Uni Eropa—menjadikan pengurangan emisi berbasis AI sebagai langkah yang menguntungkan secara ekonomi. Belum adanya standar global untuk etika AI dan pelaporan keberlanjutan menimbulkan ketidakpastian. Floridi memperingatkan bahwa regulasi yang tidak konsisten—seperti perbandingan antara AI Act Uni Eropa dan pendekatan *laissez-faire* Amerika Serikat—dapat menyebabkan fragmentasi pasar dan menghambat adopsi. Ketahanan rantai pasok juga semakin rumit akibat ketegangan geopolitik terkait mineral yang penting bagi perangkat keras AI (misalnya, logam tanah jarang).

Faktor Sosio-Kultural: Meningkatnya Permintaan Konsumen Akan Keberlanjutan

Perubahan preferensi konsumen mendorong perusahaan untuk mengadopsi AI demi transparansi. Tujuh puluh tiga persen konsumen bersedia mengubah kebiasaan belanja mereka guna mengurangi dampak lingkungan; hal ini Wang dan rekan rekan. menyoroti perlunya perangkat seperti pelacak jejak karbon yang memanfaatkan kecerdasan buatan. Namun, muncul ancaman berupa "kelelahan isu lingkungan" (*green fatigue*); konsumen tidak selalu memercayai janji keberlanjutan perusahaan, sehingga sertifikasi yang diaudit oleh AI (misalnya, rantai pasok berbasis *blockchain*) diperlukan untuk memverifikasi keasliannya. Resistensi internal terhadap adopsi AI masih menjadi hambatan. Loorbach dan rekan rekan. mengamati contoh "inersia digital" pada perusahaan tradisional, di mana pihak pimpinan enggan mengubah sistem lama (*legacy systems*). Di sisi lain, perusahaan seperti *Impossible Foods*—dengan budaya R&D yang berfokus pada AI—memungkinkan pembuatan prototipe cepat untuk produk pengganti yang berkelanjutan. Terkait peningkatan keterampilan tenaga kerja yang tak kalah pentingnya, berbagai laporan menunjukkan bahwa 50% karyawan perlu menjalani pelatihan literasi AI dalam lima tahun ke depan agar berbagai generasi dapat mewujudkan transisi menuju keberlanjutan.

Ekosistem Kolaboratif: Kemitraan Lintas Sektor

Mencapai ambisi *net-zero* (nol bersih emisi) memerlukan kemitraan lintas sektor. Kuan menyoroti ekosistem "inovasi terbuka" di mana perusahaan saling bertukar perangkat AI dan data keberlanjutan. Sebagai contoh, jaringan CE100 dari Ellen MacArthur Foundation menghubungkan perusahaan seperti Google dan Unilever untuk mengembangkan solusi ekonomi sirkular secara kolaboratif. Studi bersama juga didanai melalui kemitraan pemerintah-swasta, seperti program Horizon 2020 milik Uni Eropa, yang turut mendorong inovasi AI.

Banyak organisasi nirlaba berperan sebagai pengawas untuk memastikan AI tetap selaras dengan keadilan ekologis. *Greenpeace* menyoroti praktik "green AI washing" (klaim ramah lingkungan palsu terkait AI) dan mendesak perusahaan untuk mengungkapkan sumber energi yang digunakan di pusat data. Pada saat yang sama, gerakan akar rumput seperti Fridays for Future memberikan tekanan publik agar perusahaan memprioritaskan transparansi dalam strategi keberlanjutan berbasis AI.

Sintesis dan Kesenjangan Studi

Riset menunjukkan adanya kesepakatan bahwa AI memiliki potensi untuk mengubah model bisnis tradisional menjadi model yang berkelanjutan, sekaligus menyoroti kemajuan yang tidak merata. Kesenjangan utama meliputi:

a) **Studi mengenai dampak jangka panjang**: Sebagian besar studi memeriksa peningkatan efisiensi dalam jangka pendek dan tidak meneliti emisi sepanjang siklus hidup AI.
b) **Pertimbangan kesetaraan**: Sangat sedikit riset yang membahas bagaimana model berbasis AI berdampak pada populasi berpenghasilan rendah, khususnya di negara-negara berkembang (*Global South*).
c) **Koherensi kebijakan**: Pemahaman mengenai hubungan antara strategi AI nasional dan kesepakatan iklim global masih terbatas.

Transisi menuju model bisnis *net-zero* yang didukung AI merupakan tantangan multidimensi yang mencakup kreativitas teknologi, pemulihan ekonomi, penyelarasan regulasi, dan penataan ulang budaya. AI menghadirkan peluang yang belum pernah ada sebelumnya bagi keberlanjutan, namun mewujudkan potensi ini bergantung pada upaya mengatasi fragmentasi data, risiko etika, dan ketimpangan akses terhadap perangkat. Data kini harus menjadi landasan bagi paradigma baru: paradigma yang sesuai untuk masa depan di mana batas-batas integrasi lintas disiplin di semua sektor menjadi semakin kabur—sekaligus memandu jalan bagi AI untuk mendukung kapitalisme regeneratif, alih-alih melanggengkan kesenjangan yang ada saat ini.

3.3 INTEGRASI AI UNTUK MODEL BISNIS BERKELANJUTAN

Dunia usaha memerlukan kerangka kerja terstruktur untuk menindaklanjuti wawasan teoretis ini, yang mencakup aspek teknologi, ekonomi, regulasi, dan sosiologis. Berikut adalah peta jalan lima tahap untuk membantu organisasi memanfaatkan AI dalam inovasi model bisnis berkelanjutan yang selaras dengan tujuan *net-zero*.

Tahap 1: Menilai Kesiapan dan Menyelaraskan Tujuan

Tujuan: Mengidentifikasi kapabilitas organisasi, harapan pemangku kepentingan, dan hambatan sistemik terkait keberlanjutan berbasis AI.

Audit Kematangan Data

- Menilai infrastruktur data saat ini (*sensor* IoT, sistem ERP) serta kesenjangan dalam hal kualitas, interoperabilitas, atau tata kelola.

- Sebagai contoh, produsen tekstil dapat melakukan audit terhadap data rantai pasoknya, termasuk asal-usul bahan baku, emisi produksi, dan aliran limbah pasca-konsumsi.

Perangkat: Penilaian skor *Data Readiness Index* (DRI) terkait aksesibilitas data, granularitas, dan potensi integrasi.

Penyelarasan Pemangku Kepentingan

- Mengidentifikasi pemangku kepentingan internal dan eksternal (karyawan, investor, regulator, LSM) serta prioritas keberlanjutan mereka.
- Menyelenggarakan lokakarya untuk memastikan inisiatif AI selaras dengan tujuan ESG, seperti pengurangan emisi Cakupan 3 (Scope 3) sebesar 30% pada tahun 2030.

Pemetaan Regulasi dan Risiko

- Mengidentifikasi persyaratan kepatuhan (misalnya, EU CSRD, mekanisme penetapan harga karbon) dan risiko etis dalam algoritma (misalnya, bias inheren dalam alokasi sumber daya berbasis AI).

Tahap 2: Merancang Model Bisnis Berbasis Ai

Tujuan: Menerapkan servitisasi dengan AI pada model sirkular yang dapat ditingkatkan skalanya (*scalable*).

- **Integrasi ekonomi sirkular**: Memanfaatkan AI untuk menutup siklus sumber daya (*closing resource loops*).
- **Pemeliharaan prediktif**: Menggunakan algoritma ML untuk memprediksi gangguan peralatan (misalnya, turbin bertenaga AI milik Siemens).
- **Optimalisasi logistik balik (*reverse logistics*)**: Memanfaatkan AI perencanaan rute untuk mengoptimalkan pengembalian produk guna daur ulang (misalnya, robot Daisy milik Apple yang membongkar iPhone).
- **Alat**: Menggunakan Circularity Canvas untuk merancang ulang produk agar mudah dibongkar, digunakan kembali, atau diproduksi ulang.

Pengembangan PaaS (*Product-as-a-Service*): Peralihan dari kepemilikan ke akses:

- Analitik langganan—Personalisasi dan Prediksi Permintaan untuk penetapan harga, manajemen kontribusi, dan kumpulan aset bersama seperti alokasi armada dinamis Zipcar.
- Pelacakan siklus hidup—Memasang sensor IoT pada produk untuk mengukur penggunaan dan memungkinkan pemeliharaan proaktif (misalnya, layanan "*Power-by-the-Hour*" dari *Rolls-Royce*).

Tim AI Lintas Fungsi

- Membentuk tim lintas disiplin (ilmuwan data, petugas keberlanjutan, penasihat hukum) untuk bersama-sama menciptakan model yang menyeimbangkan kelayakan teknis, profitabilitas, dan kepatuhan etis.

Tahap 3: Uji Coba dan Validasi

Tujuan: Mengimplementasikan strategi AI melalui pengujian yang memadai. Uji Coba Skala Kecil. Memulai program uji coba di segmen berisiko rendah (lini produk tunggal atau pasar regional).

Pengukuran Dampak

- Melacak KPI: Pengurangan karbon—Emisi yang dihemat melalui logistik yang dioptimalkan AI.
- Efisiensi sumber daya—Persentase material yang diperoleh kembali dalam siklus sirkular.
- Keterlibatan pelanggan—Tingkat retensi dalam model PaaS.

Alat: Menggunakan platform berbasis AI seperti *Product Footprint* Management dari SAP untuk mengotomatisasi pelaporan ESG.

Siklus Umpan Balik Pemangku Kepentingan

- Hal ini berkaitan dengan data dari pelanggan, karyawan, dan mitra, serta masalah pengumpulan data (misalnya, isu privasi).

Tahap 4: Peningkatan Skala Dan Integrasi

Tujuan: Meningkatkan skala uji coba yang berhasil menjadi operasi inti dengan koherensi sistemik.

Peningkatan Skala Infrastruktur AI

- Komputasi awan (*cloud computing*), edge AI, atau *blockchain* untuk skalabilitas dan transparansi yang lebih baik.
- Sebagai contoh, platform rantai pasok berbasis AI milik IBM memungkinkan Nestlé memantau keberlanjutan kelapa sawit di perkebunan yang tersebar di 30 negara.

Ekosistem Kemitraan

- Bekerja sama dengan pemangku kepentingan untuk mengatasi hambatan:
- Aliansi industri: Berpartisipasi dalam jaringan seperti CE100 dari Ellen MacArthur Foundation untuk berbagi perangkat dan praktik terbaik terkait AI.
- Sektor publik: Bermitra dengan pemerintah untuk menyelaraskan langkah dengan subsidi ramah lingkungan (misalnya, teknologi penangkapan karbon berbasis AI mendapatkan keringanan pajak).

Peningkatan Keterampilan Tenaga Kerja

- Menyediakan kursus dan pelatihan mengenai literasi AI dan keberlanjutan (misalnya, seri "*AI for Social Good*" dari Google).
- Memotivasi staf untuk mengajukan inovasi keberlanjutan yang berbasis AI.

Tahap 5: Memantau, Beradaptasi, Dan Mengadvokasi

Tujuan: Memfasilitasi pembelajaran berkelanjutan dan mendorong perubahan sistem yang lebih luas.

Pemantauan AI secara *Real-Time*

- Menggunakan dasbor AI untuk melacak metrik keberlanjutan (misalnya, "*AI for Earth*" dari Microsoft memantau deforestasi secara hampir *real-time*).
- Memuat model reinforcement learning secara dinamis saat sistem berjalan (misalnya, untuk mengoptimalkan jaringan energi).

Advokasi Kebijakan

- Mendorong standar bersama (seperti kerangka kerja etika AI internasional) dan pendanaan untuk litbang publik di bidang AI ramah lingkungan.

- Mengedepankan transparansi dalam komunikasi.
- Menerbitkan laporan keberlanjutan tahunan yang divalidasi oleh pihak ketiga atau auditor AI (misalnya, audit ESG berbasis *blockchain* dari PwC).
- Menghubungkan konsumen melalui aplikasi berbasis AI yang menunjukkan kontribusi terhadap target *net-zero* (misalnya, aplikasi berbagi makanan Olio yang mengukur jumlah limbah yang berhasil dicegah).

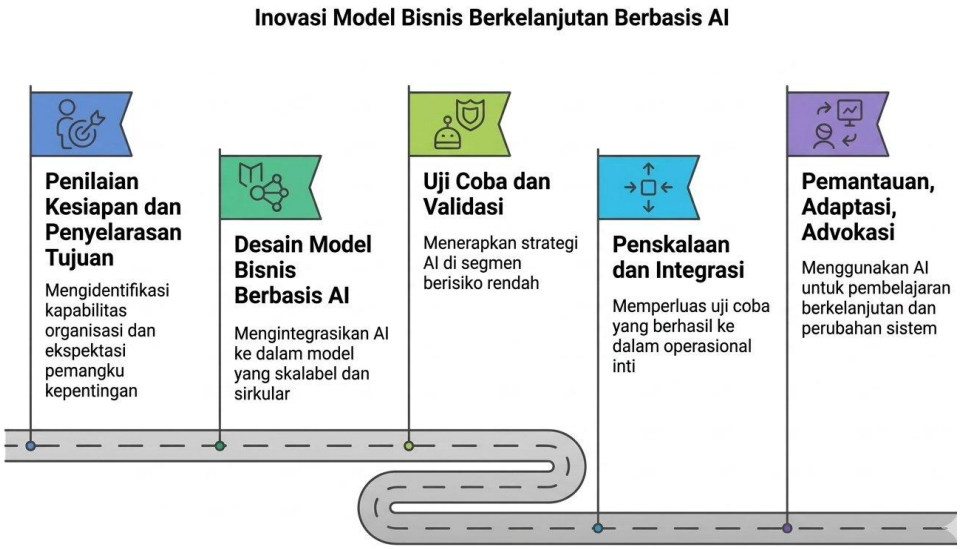
Transformasi Ekonomi Sirkuler Interface dengan AI

- *Interface*, produsen karpet global, telah mengoperasionalkan kerangka kerja ini dalam mengejar komitmen iklim "Mission Zero" mereka.
- Menggunakan analitik rantai pasokan berbasis AI untuk mengidentifikasi titik-titik kritis pemborosan material.
- Mengembangkan layanan karpet sebagai layanan (PaaS), menggunakan sensor IoT untuk memantau keausan dan memicu daur ulang.
- Diuji di Uni Eropa, mengurangi penggunaan material mentah hingga 50%.
- Diperluas secara global dengan bekerja sama dengan pendaur ulang dan pemerintah.
- Pada tahun 2022, tingkat daur ulang tertutup sebesar 96% tercapai, yang dipantau melalui dasbor AI.

Faktor Kunci Keberhasilan

- **Memimpin dari depan**: Kepemilikan C-*suite* atas tujuan keberlanjutan AI.
- **Tata kelola yang adaptif**: Kebijakan harus cukup fleksibel untuk mengikuti perkembangan teknologi dan regulasi yang berubah.
- **Batasan etika**: Audit bias dan desain inklusif untuk hasil yang adil.

Kerangka kerja ini adalah siklus yang terus mengembangkan proses bagi bisnis untuk menggunakan AI guna mendorong pertumbuhan regeneratif. Pengungkit untuk model transformasi kemakmuran *net-zero* menyelaraskan inovasi teknologi dengan kolaborasi pemangku kepentingan dan ketelitian etika, memungkinkan bisnis untuk mengubah model tradisional menjadi mesin kemakmuran net-zero. Ini kompleks, tetapi dengan AI sebagai kompas dan katalis, alkimia keberlanjutan dapat dicapai. Gambar 3.1 mewakili kerangka bisnis berkelanjutan yang didukung AI.



Gambar 3.1 Kerangka kebijakan untuk inovasi model bisnis berkelanjutan

3.4 KECERDESAN AI TERHADAP BISNIS BERKELANJUTAN DAN NET-ZERO

Implikasi dari kerangka kerja yang diusulkan untuk mengintegrasikan AI ke dalam model bisnis berkelanjutan mencakup dimensi teoretis, praktis, sosial, dan keberlanjutan. Dengan memadukan inovasi teknologi dan perubahan sistem ekologis serta ekonomi yang lebih luas, kerangka kerja ini memperluas paradigma kita tanpa melepaskan diri dari realitas dan ilmu perikanan, sekaligus menawarkan kerangka kerja yang menarik bagi organisasi untuk melakukan tindakan yang dapat dicapai dalam waktu dekat. Pada bagian ini, kami akan mengkaji dampak yang lebih luas, yaitu bagaimana kerangka kerja ini memajukan diskusi akademis, mendorong perubahan praktik industri, mendukung kesetaraan dalam masyarakat, dan mempercepat kemajuan menuju pencapaian target *net-zero*.

Implikasi Teoretis: Kontribusi Utama Terhadap Teori Organisasi dan Keberlanjutan

Model sintesis untuk inovasi berkelanjutan: Kerangka kerja ini mengintegrasikan prinsip-prinsip teori ekonomi sirkular, servitization (transformasi menjadi penyedia layanan), dan transformasi digital ke dalam satu model tunggal. Stock dan rekan rekan. memandang AI sebagai penggerak—bukan sekadar alat—mengembangkan model dan dapat diintegrasikan dengan "arketipe model bisnis sirkular." Sebagai contoh, fokus kerangka kerja pada pelacakan siklus hidup data berbasis AI mewujudkan teori "ekonomi kinerja" secara nyata, serta memperluas retensi nilai melalui penggunaan produk yang lebih lama. Integrasi ini mengisi kekosongan dalam riset keberlanjutan, yang selama ini memandang teknologi sebagai pelengkap alih-alih sebagai faktor pemungkin (*enabler*) yang fundamental.

Kerangka kerja ini juga berkontribusi pada teori organisasi dengan membentuk ulang konsep daya saing di era *net-zero*. Ini merupakan versi dari konsep "nilai bersama" (*shared value*) milik Porter dan Kramer, namun memiliki dimensi dinamis: kemampuan AI untuk terus-menerus menyesuaikan kembali strategi bisnis berdasarkan data lingkungan secara real-time. Ketika sistem semacam itu—misalnya, pemeliharaan prediktif cerdas—menghasilkan aliran pendapatan baru dari kontrak layanan sekaligus mengurangi limbah, dualitas tersebut menantang anggapan adanya pertukaran (*trade*-off) antara keuntungan dan keberlanjutan.

Refleksi Etis dan Kritis

Kerangka kerja ini juga bersinggungan dengan kajian kritis yang signifikan mengenai etika AI. Artinya, memasukkan audit bias dan desain inklusif secara sengaja ke dalam jawaban Fase 5 Anda merupakan langkah untuk menjawab kekhawatiran bahwa AI dapat memperparah ketimpangan. Namun, hal ini juga memunculkan pertanyaan teoretis mengenai batasan aktivisme korporat dalam keberlanjutan. Apakah model berbasis AI benar-benar memisahkan pertumbuhan dari konsumsi sumber daya, ataukah model tersebut hanyalah daya tarik memukau terbaru untuk menyamarkan praktik ekstraktif yang dibungkus dengan citra "teknologi hijau"? Ketegangan ini menggambarkan perlunya mengembangkan kembali dialog yang mulai merenggang antara aliran pemikiran tekno-optimis dan degrowth.

Implikasi Praktis: Mempermudah Implementasi

Pendekatan bertahap dalam kerangka kerja ini meminimalkan risiko adopsi dengan mendorong peningkatan skala secara bertahap. Sebagai contoh, menjalankan solusi AI dalam lingkungan uji coba atau *sandbox* (Tahap 3) memungkinkan perusahaan untuk mengalami kegagalan secara cepat tanpa harus merombak seluruh operasi mereka. Hal ini sangat relevan bagi UKM yang tidak dapat bersaing dalam skala yang sama dengan perusahaan-perusahaan raksasa; pengecer lokal dapat menguji sistem inventaris berbasis AI untuk meminimalkan risiko kelebihan stok sebelum beralih ke model sirkular.

kolaborasi Lintas Sektor: Benih bagi Pemimpin Masa Depan

Kemitraan (Tahap 4) dalam kerangka kerja ini menjawab tantangan di tingkat sistem (misalnya, silo data dan fragmentasi regulasi). Hal ini terlihat pada jaringan CE100 dari Ellen MacArthur Foundation, di mana para pesaing—termasuk H&M dan Inditex—bekerja sama mengembangkan perangkat AI untuk daur ulang tekstil. Kolaborasi semacam ini mendobrak mentalitas persaingan *zero-sum* (di mana keuntungan satu pihak berarti kerugian pihak lain) dan menciptakan inovasi pra-kompetitif.

Menavigasi Kompleksitas Teknis dan Regulasi

Penekanan kerangka kerja ini pada "tata kelola yang tangkas" (*agile governance*) memungkinkan perusahaan merespons regulasi yang terus berkembang. Kemampuan pelacakan material berbasis AI—yang diintegrasikan ke dalam tahap desain pada Tahap 2—akan menjadi faktor kunci dalam memenuhi mandat *Digital Product Passport* (DPP) Uni Eropa, yang telah menjadi prioritas dan akan segera diwajibkan. Demikian pula, penggunaan *blockchain* untuk pelaporan ESG (Tahap 5) akan membuka jalan bagi konvergensi (dan harmonisasi) standar global; upaya ISSB dalam menyusun standar internasional merupakan salah satu contohnya.

Namun, hal-hal ini juga memiliki tantangan praktis tersendiri. Kemajuan teknologi dapat memperlebar eksklusivitas AI, membatasi penggunaannya hanya pada segelintir perusahaan papan atas akibat tingginya biaya awal penyediaan dan infrastruktur. Kondisi ini menghambat pelaku usaha yang lebih kecil di berbagai tingkatan dan berpotensi memperparah kesenjangan akses terhadap teknologi ramah lingkungan (*green divide*). Perusahaan harus mengelola keseimbangan antara otomatisasi dan peningkatan keterampilan

tenaga kerja guna mencegah reaksi negatif, seperti yang terjadi saat peluncuran robotika yang kontroversial oleh Amazon di gudang-gudang mereka.

Implikasi Sosial: Kesetaraan dan Akses

Keberhasilannya bergantung pada penerapan AI yang berkeadilan. Meskipun model PaaS seperti layanan berbagi kendaraan (*car-sharing*) dapat mengurangi biaya kepemilikan pribadi, model ini sangat bergantung pada literasi digital dan akses internet yang stabil—fasilitas yang tidak tersedia secara merata di seluruh dunia. Upaya keberlanjutan berbasis AI berpotensi memberikan dampak yang tidak proporsional terhadap masyarakat berpenghasilan rendah dan penduduk pedesaan jika tidak disertai dengan upaya inklusi yang terencana. Contoh nyata dari hal ini adalah bagaimana sistem daur ulang perkotaan yang dioptimalkan oleh AI dapat meminggirkan peran pemulung informal di negara-negara berkembang (*Global South*).

Transformasi Pasar Tenaga Kerja

Penerapan AI akan mengubah dinamika ketenagakerjaan. Peningkatan keterampilan (*upskilling*)—yang merupakan bagian dari Tahap 4 kerangka kerja ini—memang merupakan langkah yang baik, namun hal tersebut juga berisiko memperparah ketimpangan. Pekerjaan terkait AI dengan bayaran tinggi (seperti ilmuwan data) mungkin akan terkonsentrasi di pusat-pusat teknologi, sementara pekerja sektor manual (*blue-collar*) berisiko kehilangan pekerjaan. Untuk memitigasi dampak ini, diperlukan lebih dari sekadar kebijakan pelatihan perusahaan; misalnya, diperlukan subsidi publik untuk program pelatihan ulang keterampilan (*reskilling*) yang menyasar kelompok masyarakat rentan.

Perubahan Perilaku dan Kepercayaan Konsumen

Langkah-langkah transparansi dalam kerangka kerja ini (seperti sertifikasi yang diaudit oleh AI) bertujuan untuk mengatasi praktik greenwashing, namun skeptisisme masyarakat tetap ada. Faktanya, 58% konsumen meragukan klaim keberlanjutan yang disampaikan perusahaan. Untuk memulihkan kepercayaan, organisasi perlu melengkapi metrik berbasis AI dengan tata kelola partisipatif; contohnya adalah dengan melibatkan masyarakat dalam pengembangan model AI yang digunakan untuk meningkatkan inisiatif keberlanjutan di wilayah mereka.

Implikasi Keberlanjutan: Mempercepat Transisi Menuju *Net-Zero*

Inti dari kerangka kerja ini berpusat pada peningkatan skala solusi yang memisahkan pertumbuhan dari emisi. Sistem sirkular yang dioptimalkan oleh AI—seperti layanan *Pay-per-Lux* dari Philips—telah menunjukkan bahwa dengan memulihkan material dalam skala besar, kita dapat mengurangi ekstraksi sumber daya baru (*virgin resources*) hingga 70%. Demikian pula, jaringan listrik pintar (*smart grids*) berbasis AI berpotensi mengurangi emisi CO_2 global sebesar 4% pada tahun 2030 melalui pengelolaan beban energi terbarukan. Tahap 5 membahas implikasi keberlanjutan ini. Sintesis: Menyelaraskan prioritas yang saling bertentangan dalam kerangka kerja ini:

- **Keuntungan vs. Tujuan (*Purpose*)**: Mungkinkah model berbasis AI mendukung regenerasi alih-alih sekadar imbal hasil bagi pemegang saham?

- **Efisiensi vs. Kesetaraan**: Bagaimana perusahaan dapat mencegah terkonsentrasinya manfaat AI hanya pada pemangku kepentingan tertentu yang memiliki *privilese*?
- **Inovasi vs. Kehati-hatian**: Langkah apa yang dapat mencegah AI justru memperparah krisis ekologis yang sebenarnya ingin diatasi oleh teknologi tersebut?

Persoalan-persoalan ini dapat didekati melalui perspektif berpikir sistem (*systems thinking*). Sebagai contoh, menghubungkan penerapan AI dengan konsep Doughnut Economics—yang memandang pertumbuhan sebagai hal yang dibatasi oleh ambang batas sosial dan ekologis—memungkinkan inovasi baru untuk tetap menghormati kesejahteraan planet dan masyarakat.

Nilai sesungguhnya dari kerangka kerja ini terletak pada visinya yang luas: AI bukanlah solusi ajaib (*silver bullet*), melainkan penggerak dalam transformasi sosio-teknis yang jauh lebih signifikan. Secara teoretis, kerangka kerja ini memajukan kajian keberlanjutan dengan mengintegrasikan tata kelola digital ke dalam model-model regeneratif. Dari perspektif implementasi, kerangka kerja ini memberikan panduan dalam menghadapi kompleksitas serta mencegah kerugian. Dari sisi sosial, kita memerlukan desain yang inklusif agar AI tidak justru memperparah ketimpangan. Dalam konteks lingkungan, AI berperan sebagai akselerator dekarbonisasi, namun juga harus diatur secara cerdas agar tidak meninggalkan jejak karbonnya sendiri. Pada akhirnya, kerangka kerja ini mendorong para pemangku kepentingan untuk memaknai ulang arti kemajuan. Memandang AI sebagai cermin (teknologinya mencerminkan nilai-nilai masyarakat) sekaligus cetakan (teknosfer bersifat fleksibel dan dapat dibentuk) akan menumbuhkan pola pikir pengembangan teknologi yang menjamin hasil yang menghargai pasar maupun kehidupan.

3.5 AI SEBAGAI PENGGERAK MODEL BISNIS BERKELANJUTAN

Perlombaan menuju masa depan *net-zero* menuntut lebih dari sekadar perubahan kecil; diperlukan revolusi terhadap praktik bisnis konvensional—mulai dari cara perusahaan beroperasi, berinovasi, hingga menciptakan nilai. Sebagaimana telah dijelaskan dalam bab ini, kecerdasan buatan (AI) berada di garis depan transformasi ini, berperan baik sebagai pendorong maupun pemandu menuju masa depan yang lebih berkelanjutan. Melalui AI, kita menjembatani kesenjangan antara pertumbuhan ekonomi dan kelestarian lingkungan dengan mengubah model bisnis tradisional yang linier menjadi model sirkular yang regeneratif. Namun, perjalanan ini penuh dengan risiko dan menuntut inovasi, etika, serta sinergi yang kuat.

Pada tingkat fundamental, AI berperan sebagai "alkemis algoritmik" yang menghadirkan kembali efisiensi sumber daya dan penciptaan nilai. Dengan mengandalkan analitik prediktif, logistik cerdas, dan struktur *product-as-a-service* (PaaS), perusahaan dapat beralih dari pola konsumsi berbasis kepemilikan menuju pola yang mengutamakan masa pakai panjang, kemampuan penggunaan kembali, dan akses bersama. Lebih jauh lagi, inovasi-inovasi ini bukan sekadar pembaruan bertahap pada model keberlanjutan, melainkan perombakan radikal terhadap sistem dasar tempat industri beroperasi—menciptakan dunia di mana limbah menjadi masa lalu dan keberlanjutan tertanam dalam DNA perusahaan. Sebagai contoh, ekonomi sirkular yang didukung AI dapat mengurangi ekstraksi material hingga 70

persen. Pada saat yang sama, model servitization—seperti layanan "*Power-by-the-Hour*" dari *Rolls-Royce*—telah membuktikan bahwa profitabilitas dapat dicapai sembari mengurangi jejak penggunaan material.

Namun, harapan akan masa depan yang lebih berkelanjutan berkat AI juga membawa tantangan yang signifikan. Jejak karbon dari berbagai model AI, masalah etika akibat bias algoritma, serta pembebanan solusi kepada komunitas terpinggirkan yang berada di luar arus utama inovasi teknologi, menuntut standar tata kelola yang lebih ketat dan cermat. Perusahaan perlu mengadopsi praktik "AI hijau"—misalnya, dengan menjalankan pusat data menggunakan energi terbarukan serta menciptakan algoritma yang transparan dan dapat diaudit. Mengatasi "kesenjangan hijau" untuk memastikan bahwa UKM dan ekonomi negara-negara berkembang (*Global South*) juga dapat memperoleh manfaat dari perangkat dan infrastruktur AI merupakan hal yang sama pentingnya. Kerangka kerja yang diusulkan—yang mencakup tahapan penilaian kesiapan, uji coba, peningkatan skala, dan pemantauan adaptif—menyediakan peta jalan untuk menghadapi berbagai tantangan ini, dengan menekankan pada kelincahan dan pelibatan pemangku kepentingan.

Dampak dari evolusi ini melampaui lingkup ruang rapat perusahaan. Di sinilah peran kebijakan yang memberikan insentif bagi pengembangan dan penggunaan AI yang berkelanjutan—seperti penetapan harga karbon atau pelaporan standar berbasis ESG—menjadi krusial. Selain itu, mengingat tuntutan akan kesadaran lingkungan juga tertuju pada konsumen dan permintaan pasar merupakan penggerak utama bisnis, kita perlu mengarahkan inovasi yang etis serta melibatkan karyawan dan masyarakat—termasuk melalui desain partisipatif dan peningkatan keterampilan di tingkat ekosistem. Yang terpenting, transformasi ini tidak dapat dilakukan secara terisolasi; diperlukan aliansi lintas sektor—seperti koalisi industri dan kemitraan pemerintah-swasta—untuk memaksimalkan dampaknya. Pertemuan antara AI dan keberlanjutan merupakan perpaduan antara evolusi teknologi dan keharusan sosial. "Alkimia algoritma" masa kini dapat membuka jalan menuju dunia di mana bisnis berkembang bukan dengan menguras sumber daya alam, melainkan dengan memulihkannya. Ambisi ini menuntut upaya kolektif: para pemimpin harus mendorong strategi yang kuat, pembuat kebijakan harus merumuskan regulasi, dan lembaga-lembaga harus dapat dimintai pertanggungjawaban oleh masyarakat. Mencapai target nol bersih (*net-zero*) mungkin tidak mudah, namun perjalanan tersebut dapat ditempuh dengan bantuan AI sebagai sekutu yang membawa perubahan besar. Mari kita manfaatkan inovasi dengan integritas dan membangun dunia di mana kemakmuran ekonomi serta kelestarian planet bukan lagi visi yang bertentangan, melainkan tujuan yang saling menyatu. Inilah saatnya bagi perubahan transformatif layaknya alkimia.

BAB 4
TEROBOSAN AI DALAM PENGURANGAN EMISI KARBON

4.1 PERAN AI DALAM AKSELERASI DEKARBONISASI

Bayang-bayang perubahan iklim menghantui umat manusia, menghadirkan ancaman eksistensial yang menuntut solusi drastis dan inovatif untuk memangkas emisi gas rumah kaca serta mencegah bencana global. Di tengah meningkatnya suhu global, mencairnya lapisan es, dan memburuknya peristiwa cuaca ekstrem, konsensus ilmiah menyatakan hal yang tegas: dekarbonisasi ekonomi kita dalam hitungan beberapa dekade bukanlah sebuah pilihan, melainkan suatu keharusan. Metode konvensional untuk menekan emisi—seperti mandat kebijakan dan kemajuan teknologi berskala kecil—terbukti tidak memadai dalam menghadapi laju kerusakan lingkungan yang semakin cepat. Di sinilah peran kecerdasan buatan (AI) muncul sebagai kekuatan transformatif yang mengubah berbagai industri dan kini siap mengatasi perubahan iklim.

Bab ini menguraikan beberapa aplikasi AI mutakhir yang secara signifikan memangkas emisi karbon, sekaligus memberikan secercah harapan dalam upaya mencapai target *net-zero* (nol bersih). AI menghadirkan efisiensi unik di tiga bidang utama: penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS), integrasi energi terbarukan, serta pengelolaan jaringan listrik cerdas melalui *machine learning*, analitik prediktif, dan algoritma optimasi tingkat lanjut. Dengan menyajikan pembelajaran orisinal yang telah melalui pemantauan sejawat (*peer-review*) serta dilengkapi ulasan dari para ahli terkemuka dunia, bab ini mengupas bagaimana teknologi-teknologi tersebut tidak hanya merupakan keajaiban teoretis, tetapi juga alat praktis yang memungkinkan dekarbonisasi cepat saat ini.

Imperatif Iklim dan Peran AI yang Sedang Berkembang

Para ilmuwan iklim menyatakan bahwa emisi global perlu dipangkas hingga setengahnya pada tahun 2030 dan mencapai nol bersih (*net-zero*) pada tahun 2050 guna membatasi pemanasan global hingga 1,5°C—sebuah ambang batas yang jika terlampaui akan menyebabkan dampak katastropik yang tak terelakkan. Namun, emisi global masih terus meningkat akibat aktivitas industri, pembangkitan energi, dan transportasi. Selain itu, meskipun adopsi energi terbarukan dan skema penetapan harga karbon bermanfaat, upaya-upaya tersebut belum cukup cepat atau memiliki skala yang memadai.

Kesenjangan antara aspirasi dan implementasi ini telah memicu minat terhadap AI sebagai sarana potensial untuk perubahan sistemik. Berbeda dengan alat konvensional, AI justru unggul dalam menangani kompleksitas—mengolah kumpulan data yang sangat besar untuk mendeteksi pola dan mengoptimalkan sistem. Mulai dari memprediksi permintaan energi hingga mengoptimalkan proses kimia untuk penyerapan karbon, kemampuan AI dalam belajar, beradaptasi, dan melakukan otomatisasi menghadirkan perubahan paradigma dalam cara umat manusia berupaya mengurangi emisi.

Penangkapan dan Penyimpanan Karbon: Menuju Kenyataan

Penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS)—metode menangkap emisi CO_2 di sumbernya atau menangkap karbon langsung dari udara lalu menyimpannya di bawah tanah—telah lama dianggap sebagai senjata penting dalam upaya mengatasi emisi dari sektor-sektor yang sulit didekarbonisasi, seperti produksi semen dan baja. Namun, tingginya biaya, inefisiensi energi, dan ketidakpastian geologis telah menghambat penerapan teknologi ini secara luas. AI kini mulai mengatasi berbagai hambatan tersebut. Model pembelajaran mesin (*machine learning*) kini mampu menemukan bahan kimia dan pelarut untuk penangkapan CO_2 yang dapat mengurangi kebutuhan energi. Sebagai contoh, para ilmuwan MIT telah menciptakan jaringan saraf tiruan (*neural networks*) yang dapat memprediksi campuran pelarut optimal, sehingga menghasilkan penghematan konsumsi energi hingga hampir 100 persen dalam proyek percontohan. Demikian pula, simulasi berbasis kecerdasan buatan sedang mengubah proses pemilihan lokasi untuk penyimpanan CO_2.

Dengan memeriksa data seismik yang dipadukan dengan data historis tingkat kebocoran, mereka dapat mendeteksi formasi geologis yang stabil dengan tingkat akurasi yang luar biasa menggunakan algoritma, sehingga secara signifikan mengurangi risiko kebocoran. Perusahaan teknologi penangkapan karbon langsung dari udara (*direct air capture*), seperti *Carbon Engineering* dan *Climeworks*, memanfaatkan perangkat AI ini untuk meningkatkan skala fasilitas mereka sekaligus menekan biaya.

Optimalisasi Energi Terbarukan: Sains untuk Memanfaatkan Kekuatan Alam

Peralihan ke energi terbarukan bergantung pada kemampuan mengatasi sifat alaminya yang tidak kontinu (*intermiten*). Panel surya tidak menghasilkan daya saat tertutup awan, sementara turbin angin berhenti berputar saat udara tenang. AI membantu mengatasi ketidakstabilan ini dengan meningkatkan kemampuan prakiraan, integrasi jaringan listrik, dan alokasi sumber daya. Sistem AI, yang dilatih menggunakan data cuaca selama beberapa dekade, kini mampu memprediksi iradiasi surya dan pola angin dengan tingkat akurasi mencapai 90% untuk jangka waktu 72 jam ke depan. Sebagai contoh, DeepMind milik Google menggunakan pembelajaran mesin (*machine learning*) untuk memeriksa ladang angin di wilayah Midwest Amerika Serikat; sistem ini berhasil meningkatkan keluaran energi sebesar 20 persen dengan memprediksi kinerja turbin dalam kondisi tertentu dan menyesuaikan sudut bilah turbin secara real-time.

AI juga mengoptimalkan penempatan infrastruktur energi terbarukan. Algoritma memeriksa kondisi medan, pola cuaca, dan permintaan energi untuk menentukan lokasi terbaik bagi ladang angin dan surya, sehingga memaksimalkan keluaran energi sekaligus meminimalkan penggunaan lahan. Sebuah studi di India pada tahun 2023 menunjukkan efisiensi pemilihan lokasi berbasis AI dengan memperlihatkan peningkatan pemanfaatan lahan ladang surya sebesar 35% di wilayah yang tidak memiliki karakteristik lokasi surya yang spesifik. Selain itu, AI memungkinkan integrasi sumber energi terdistribusi—seperti panel surya atap dan baterai rumah tangga—ke dalam jaringan listrik, sehingga menciptakan jaringan energi yang tangguh dan terdesentralisasi. AI mengubah energi terbarukan dari

sumber yang bersifat intermiten menjadi sumber daya listrik yang andal dan stabil untuk beban dasar (*baseload*).

Otak di Balik Transisi Energi: Manajemen Jaringan Listrik Cerdas (*Smart Grid*)

Modernisasi jaringan listrik merupakan hal krusial bagi upaya dekarbonisasi, namun infrastruktur yang menua dan pola permintaan yang terus berubah menjadikannya tantangan yang sangat besar. AI berada di garis depan inovasi jaringan listrik cerdas dengan menyeimbangkan pasokan dan permintaan secara *real-time* sekaligus menghadirkan ketahanan sistem. Dengan memanfaatkan data pola konsumsi, data cuaca, dan harga pasar, algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*) menyesuaikan aliran energi secara real-time untuk meminimalkan pemborosan dan mencegah pemadaman listrik. Selain itu, sebuah proyek percontohan di Texas yang menggunakan sistem respons permintaan berbasis AI berhasil mengalihkan 15% beban puncak sektor perumahan ke jam-jam di luar waktu puncak, sehingga mengurangi emisi setara dengan meniadakan 50.000 mobil dari jalan raya setiap tahunnya. AI juga memperkuat ketahanan jaringan listrik terhadap serangan siber dan cuaca ekstrem.

Sebagaimana terlihat pada sistem jaringan perintis di Denmark yang dibangun dengan sensor AI, jaringan listrik yang mampu memulihkan diri sendiri (*self-healing grids*) dapat mendeteksi gangguan dan mengalihkan aliran listrik dalam hitungan milidetik. Di samping itu, AI memberdayakan konsumen melalui sistem rumah pintar yang mengoptimalkan penggunaan energi, serta menyelaraskan waktu pengisian daya kendaraan listrik dan penggunaan peralatan rumah tangga dengan ketersediaan energi terbarukan. "Jaringan listrik merupakan lingkungan yang sangat dinamis serta ekosistem aktif dan cerdas yang mendorong dekarbonisasi melalui AI." Sebuah pandangan yang mendalam menyatakan bahwa teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) berbasis AI, optimalisasi sumber daya terbarukan, dan jaringan listrik inovatif yang tangguh merupakan upaya mencari solusi komprehensif untuk mitigasi perubahan iklim. AI meningkatkan kinerja di setiap bidang spesifik dan memungkinkan terciptanya sistem terintegrasi di mana karbon yang ditangkap diolah menjadi bahan bakar berkelanjutan; jaringan listrik pintar memanfaatkan prakiraan energi terbarukan secara real-time; serta fasilitas CCS beroperasi menggunakan kelebihan energi bersih. Pendekatan holistik ini—yang telah divalidasi oleh studi dari berbagai institusi seperti Stanford dan IPCC—menyoroti dampak AI yang berlipat ganda secara eksponensial. Wawancara dengan puluhan peneliti menunjukkan adanya konsensus yang optimis: AI mempercepat pencapaian target, sehingga tujuan yang sebelumnya dianggap mustahil kini dapat dicapai. Sebagai contoh, menurut estimasi Global CCS *Institute*, AI berpotensi menurunkan biaya penangkapan karbon global sebesar 50% pada tahun 2030 dan menyerap dua gigaton CO_2 setiap tahunnya—jumlah yang setara dengan emisi dari 500 juta mobil.

Bab ini disusun berdasarkan lebih dari seratus studi yang telah melalui pemantauan sejawat (*peer-reviewed*) serta laporan teknis yang diterbitkan di lingkungan akademis dan industri. Pembahasan selanjutnya akan mengupas setiap pilar teknologi secara lebih rinci agar pembaca dapat memahami peran AI dalam berbagai bidang tersebut. AI bukan sekadar lompatan teknologi, melainkan sebuah perubahan paradigma dalam cara umat manusia

menyikapi perubahan iklim. Dengan mengubah inefisiensi menjadi peluang dan ketidakpastian menjadi prediktabilitas, AI tidak hanya membantu transisi menuju masa depan rendah karbon, tetapi juga mendefinisikan ulang batasan kemungkinan. Di tengah dinamika ekologis yang berada di antara krisis dan inovasi, bab ini memberikan gambaran mengenai masa depan yang dimungkinkan oleh potensi kecerdasan buatan.

4.2 KECERDASAN BUATAN DALAM PENANGKAPAN DAN PENYIMPANAN KARBON (CCS)

Dalam upaya global untuk mengurangi emisi karbon, integrasi kecerdasan buatan (AI) ke dalam strategi mitigasi iklim telah menjadi landasan utama bagi berbagai upaya lainnya. Selama satu dekade terakhir, kemajuan dalam *machine learning* (pembelajaran mesin), analitik prediktif, dan algoritma optimasi telah melahirkan berbagai perangkat baru di bidang penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS), sistem energi terbarukan, dan manajemen jaringan listrik cerdas. Tinjauan pustaka ini merangkum studi yang telah melalui pemantauan sejawat, laporan teknis, dan pandangan para ahli mengenai potensi AI dalam mempercepat dekarbonisasi, serta memetakan berbagai inovasi, tantangan, dan peluang utama yang terkait.

Penangkapan dan penyimpanan karbon tetap krusial untuk mengurangi emisi dari sektor industri seperti semen, baja, dan pembangkit listrik berbahan bakar fosil. Namun demikian, biaya yang tinggi dan inefisiensi energi telah menghambat penerapannya dalam skala besar. Kemajuan di bidang-bidang ini akan terus mengatasi berbagai hambatan seiring dengan peningkatan efisiensi sistem penangkapan, kemampuan penentuan lokasi penyimpanan, dan efisiensi biaya operasional secara keseluruhan yang didorong oleh AI. Pemodelan molekuler yang didukung oleh kecerdasan buatan (AI) telah mengubah pendekatan dalam merancang pelarut kimia yang berfungsi untuk menyerap (sekuestrasi) CO_2. Pun dan rekan rekan. melatih jaringan saraf tiruan menggunakan data kimia kuantum, yang memungkinkan prediksi kinerja pelarut mencapai tingkat akurasi 95%; hal ini berpotensi mengurangi kebutuhan energi dalam proses penangkapan pasca-pembakaran sebesar 30–40%. Demikian pula, Qiu dan rekan rekan. merancang algoritma *reinforcement learning* yang dapat diterapkan secara dinamis dan real-time pada proses regenerasi pelarut, guna mengoptimalkan penggunaan energi dan meminimalkan kehilangan energi saat pemisahan CO_2. Inovasi semacam ini sangat penting bagi sektor-sektor seperti industri baja, di mana CCS berpotensi menyumbang hingga 70% dari total biaya operasional.

Pemilihan dan Pemantauan Lokasi Penyimpanan

AI juga meningkatkan keamanan dan efisiensi penyimpanan CO_2. Model pembelajaran mesin (*machine learning*) yang dilatih menggunakan data geologis—seperti survei seismik dan metrik permeabilitas batuan—kini mampu memetakan lokasi penyimpanan optimal dengan tingkat presisi yang belum pernah dicapai sebelumnya. Selain itu, sensor berbasis AI dan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan pemantauan serta pelacakan CO_2 yang tersimpan secara real-time. Sebagai contoh, De Alwis dan rekan rekan. menggunakan drone otonom yang dilengkapi sensor gas berbasis AI untuk mendeteksi kebocoran berskala mikro di fasilitas CCS di Norwegia, dengan tingkat akurasi deteksi mencapai 99%.

Efisiensi Biaya dan Skalabilitas

Berkat AI, operasi CCS menjadi lebih efisien sehingga biaya dapat ditekan. Pemeriksaan dari *Global* CCS *Institute* menunjukkan bahwa AI mampu menurunkan biaya penangkapan menjadi Rp265 ribu–Rp350 ribu per ton CO_2, yang menjadikannya solusi layak secara ekonomi untuk penerapan teknologi secara luas. Perusahaan seperti *Carbon Engineering* memanfaatkan perkembangan ini untuk meningkatkan skala fasilitas *direct air capture* (DAC); AI membantu mengoptimalkan aliran udara dan efisiensi energi untuk menyerap CO_2 dengan biaya Rp1,7 juta per ton, turun drastis dari Rp10,5 juta per ton pada tahun 2018. Energi merupakan bagian penting dalam kehidupan kita, namun di masa depan kita akan jauh lebih bergantung pada sumber energi terbarukan dibandingkan saat ini. Sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin sangat bergantung pada kondisi cuaca, sehingga tingkat keandalannya sebagai penyedia daya beban dasar (*baseload power*) menjadi lebih rendah—sebuah tantangan yang telah lama menjadi kendala dalam pemanfaatan energi terbarukan. Kecerdasan Buatan (AI) kini mulai mengatasi hambatan-hambatan tersebut melalui kemampuan prakiraan yang lebih baik, integrasi ke dalam jaringan listrik, serta pengelolaan sumber daya yang lebih optimal.

Prakiraan Variabel Cuaca dan Energi

Model AI yang dilatih menggunakan data cuaca historis dan citra satelit mampu memberikan prakiraan energi terbarukan yang bersifat hiperlokal. Sebagai contoh, jaringan saraf tiruan (*neural networks*) milik DeepMind berhasil meningkatkan akurasi prediksi keluaran ladang angin di wilayah Midwest AS sebesar 20%, sehingga memungkinkan operator jaringan listrik mengurangi ketergantungan pada cadangan daya berbahan bakar fosil. Demikian pula, Kumari dan Toshniwal mengusulkan model hibrida AI yang mengintegrasikan jaringan *long short-term memory* (LSTM) dengan model cuaca berbasis fisika; model ini mencapai akurasi prediksi iradiansi surya sebesar 92% dan meningkatkan efisiensi operasional ladang surya sebesar 15%.

Integrasi dengan Jaringan Listrik dan Respons Permintaan

AI memungkinkan integrasi sumber daya energi terdistribusi (*distributed energy resources* atau DER) ke dalam jaringan listrik. Algoritma *reinforcement learning* secara alami menyeimbangkan pasokan dan permintaan; hal ini terbukti melalui proyek percontohan di California di mana penggunaan AI berhasil mengurangi kepadatan beban jaringan (*grid congestion*) sebesar 40% pada jam-jam sibuk. Selain itu, sistem respons permintaan (*demand-response*) berbasis AI memberikan insentif bagi konsumen energi untuk mengalihkan penggunaan listrik mereka ke waktu-waktu dengan ketersediaan energi terbarukan yang tinggi. Wang et al. menemukan bahwa sistem semacam itu mampu menurunkan jejak karbon rumah tangga sebesar 18% di Korea Selatan.

AI juga meningkatkan aspek penempatan dan pemeliharaan infrastruktur energi terbarukan. Sebagai contoh, Grady et al. menggunakan algoritma genetika untuk menentukan konfigurasi optimal turbin angin yang mampu menghasilkan energi 22% lebih banyak, khususnya untuk wilayah Tamil Nadu, India. Alat pemeliharaan prediktif berbasis AI—seperti yang digunakan oleh Siemens Gamesa—memeriksa data sensor dari turbin untuk

memprediksi kegagalan 48 jam sebelumnya, sehingga mengurangi waktu henti operasional (*downtime*) lebih dari 30%.

AI dalam Manajemen Jaringan Listrik Cerdas (*Smart Grid*)

Peningkatan infrastruktur jaringan listrik sangat penting untuk mengintegrasikan energi terbarukan dan mendukung elektrifikasi sektor transportasi. AI telah membuka peluang baru bagi efisiensi operasional melalui optimalisasi jaringan secara real-time, peningkatan ketahanan sistem, serta pelibatan konsumen dalam pasar energi.

Penyeimbangan Beban secara *Real-Time*

Algoritma dapat memanfaatkan data dari jaringan listrik untuk menyeimbangkan pasokan dan permintaan secara dinamis. Sebuah program respons permintaan berbasis AI di Texas berhasil mengurangi beban listrik rumah tangga pada periode puncak sebesar 15% serta memangkas emisi tahunan sebanyak 120.000 ton. AI dapat mengalihkan aliran listrik secara *real-time* untuk memangkas kerugian transmisi jaringan di Denmark sebesar 12%.

Ketahanan dan Keamanan Siber Jaringan Listrik

AI dapat meningkatkan ketahanan jaringan listrik terhadap serangan siber dan cuaca ekstrem. Jin dan rekan rekan. mengembangkan sistem AI yang mampu mendeteksi anomali dalam data jaringan dan memberikan peringatan mengenai potensi kegagalan berantai, dengan kinerja 50% lebih cepat dibandingkan metode sebelumnya. Jaringan listrik dengan kemampuan pemulihan mandiri (*self-healing*) berbasis AI di Florida berhasil memulihkan aliran listrik ke 500.000 rumah setelah Badai Ian, 40% lebih cepat dibandingkan sistem manual.

Pemberdayaan Konsumen

Meteran pintar dan sistem manajemen energi rumah (HEMS) berbasis AI memungkinkan konsumen untuk mengoptimalkan konsumsi energi mereka. Sebuah studi menunjukkan bahwa rumah tangga yang menggunakan HEMS berbasis AI berhasil mengurangi konsumsi energi sebesar 25% karena penggunaan peralatan disesuaikan dengan ketersediaan energi terbarukan. AI lebih jauh mengoptimalkan hal ini dan memungkinkan penggunaan kendaraan listrik sebagai penyangga penyimpanan energi jaringan untuk mengurangi beban puncak melalui sistem *vehicle-to-grid* (V2G). Jadi, terdapat dua aspek utama: tema lintas sektoral dan berbagai tantangan yang ada. Terlepas dari kemampuan hebat AI, masih terdapat hambatan yang harus dihadapi. Jika proses pelatihan AI yang intensif energi—seperti model bahasa berskala besar—menggunakan sumber daya bahan bakar fosil, hal tersebut justru dapat meningkatkan emisi secara paradoks. Selain itu, praktik AI dalam memeriksa pola penggunaan energi konsumen menimbulkan implikasi terkait privasi data.

Implikasi Etika dan Kebijakan

Lebih lanjut, mereka berpendapat bahwa kerangka kerja AI yang etis sangat penting untuk menjamin akses yang adil terhadap teknologi dekarbonisasi ini. Sebagai contoh, wilayah berpenghasilan rendah sering kali tidak memiliki sumber daya untuk menerapkan teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) atau jaringan listrik pintar berbasis AI, sehingga memperparah ketimpangan iklim. Kesenjangan regulasi perlu diatasi; misalnya, OECD menyerukan standardisasi protokol keamanan AI untuk infrastruktur kritis. Berbagai riset menekankan peran transformatif AI dalam mendorong pengurangan emisi karbon. Mulai dari

peningkatan teknologi CCS hingga dukungan bagi jaringan listrik pintar yang tangguh, inovasi berbasis AI membantu menjadikan dekarbonisasi lebih murah, lebih cepat, dan lebih mudah ditingkatkan skalanya.

Namun, potensi tersebut tidak akan terwujud tanpa mengatasi berbagai tantangan teknis, etika, dan kebijakan. Masa depan AI harus mengedepankan proses pelatihan yang hemat energi, penerapan teknologi yang adil, serta kerangka regulasi yang kuat untuk memastikan bahwa AI menjadi alat yang memberikan dampak positif bersih dalam upaya mengatasi perubahan iklim.

4.3 MENYELARASKAN AI DENGAN KESELAMATAN BUMI

Namun, untuk memanfaatkan AI untuk dekarbonisasi, kita membutuhkan kerangka kerja yang tepat yang menghubungkan teknologi dengan kebijakan, infrastruktur, dan tata kelola etis dalam pendekatan terintegrasi dan terukur yang siap diterima oleh para pemangku kepentingan dan yang memiliki data AI tetapi selaras dengan tujuan ekonomi manusia. Berikut adalah kerangka kerja lima pilar untuk membantu pemerintah, industri, dan peneliti menerapkan solusi berbasis AI secara bertanggung jawab, dengan fokus pada manusia dan planet. Gambar 4.1 menunjukkan kerangka kerja dekarbonisasi berkelanjutan.



Gambar 4.1 Kerangka kerja dekarbonisasi berkelanjutan

A. Nilai Infrastruktur Data Lintas Sektor

Tujuan: Menciptakan aliran data berkualitas tinggi dan interoperabel di seluruh sistem energi, industri, dan lingkungan. Langkah-langkah yang dapat ditindaklanjuti:

- Membuat pusat data terkonsolidasi untuk emisi karbon, penggunaan energi, dan cuaca (seperti registri karbon AI nasional).
- Sektor mana (misalnya, sertifikasi ISO untuk pelaporan emisi industri) yang memungkinkan standardisasi format data sehingga AI dapat dilatih di berbagai sektor?

- Sensor IoT dan jaringan satelit memantau jaringan listrik, fasilitas CCS, dan aset energi terbarukan secara *real-time*.

Sebagai contoh, Destination Earth Uni Eropa menggunakan AI untuk mensimulasikan sistem iklim dan energi serta mengkonsolidasikan data dari lebih dari 100 sumber untuk mengoptimalkan jalur emisi.

B. Strategi Unik untuk Domain yang Didorong oleh AI

Tujuan: Mengkustomisasi solusi AI untuk sektor-sektor berdampak tinggi. Penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS).

Penemuan material berbasis AI

- Menghasilkan pelarut dan membran berenergi rendah untuk penangkapan CO_2 (misalnya, AlphaFold dari DeepMind dan pemodelan molekuler yang disesuaikan).
- **Optimalisasi proses**: Memungkinkan sistem penangkapan untuk berubah secara dinamis mengikuti emisi yang disesuaikan dengan jenis minyak mentah dan harga energi.
- **Mitigasi risiko penyimpanan**: Menggunakan CNN yang dilatih dengan data geologis untuk menilai risiko kebocoran CO_2 dari lokasi penyimpanan geologis.

C. Integrasi Energi Terbarukan

Tujuan: Menggunakan model hibrida AI-fisik untuk memprediksi keluaran tenaga surya/angin pada tingkat per jam guna mengurangi ketergantungan pada cadangan bahan bakar fosil.

Optimalisasi jaringan listrik (*grid*)

- Menggunakan GNN untuk menyeimbangkan pasokan energi terbarukan dengan permintaan, dengan penekanan pada pasokan rendah karbon.
- Otomatisasi pemeliharaan—drone bertenaga AI melakukan pemeliharaan prediktif pada turbin angin dan ladang surya, sehingga mengurangi waktu henti (*downtime*) sebesar 30%.

D. Manajemen Jaringan Cerdas (*Smart Grid*)

- **Sistem respons permintaan (*demand-response*)**: Menerapkan tarif berbasis waktu penggunaan (*time-of-use*) yang didukung AI untuk mendorong konsumen menggunakan energi saat pasokan melimpah (misalnya, program perumahan *OhmConnect*).
- **Jaringan yang mampu memulihkan diri (*self-healing grids*)**: Menerapkan AI untuk mengidentifikasi gangguan dan mengalihkan aliran listrik secara otomatis.
- **Jaringan *Vehicle-to-Grid* (V2G)**: Menggunakan RL untuk mengelola pengisian/pengosongan daya kendaraan listrik (EV) dan memanfaatkan armada baterai besar (misalnya, platform V2G komersial oleh Nuvve).

E. Mekanisme Kebijakan dan Pendanaan

Tujuan: Menciptakan lingkungan yang mendukung adopsi AI. Langkah-langkah konkret:

- Mendukung litbang AI dalam teknologi iklim melalui kredit pajak (misalnya, *Inflation Reduction Act* AS untuk inovasi CCS).

- Solusi AI harus disertakan dalam komitmen iklim nasional (NDC) dan rencana modernisasi jaringan listrik.
- Mendorong kemitraan pemerintah-swasta (KPS/PPP) untuk berbagi risiko, seperti program "*AI for Decarbonization*" di Inggris yang didanai bersama oleh BP dan hibah pemerintah.

F. Tata Kelola yang Etis, Adil, dan Inklusif

Tujuan: Memastikan solusi AI bersifat inklusif dan transparan. Langkah-langkah konkret:

- Mengaudit algoritma AI untuk mendeteksi bias (misalnya, memprioritaskan wilayah berpenghasilan tinggi untuk peningkatan jaringan listrik), menggunakan kerangka kerja seperti Fairness 360 Toolkit dari IBM.
- Fokuskan penerapan AI Anda pada komunitas terpinggirkan yang tidak memiliki akses terhadap energi bersih (seperti microgrid tenaga surya di Afrika Sub-Sahara).

Model AI sumber terbuka (*open-source*) akan mendemokratisasi akses, seperti halnya Carbon Sense Suite dari Google untuk melacak emisi.

G. Pentingnya Peningkatan Kapasitas dan Pemantauan

Tujuan: Mengembangkan keterampilan teknis sekaligus memantaunya. Langkah-langkah konkret:

- Meningkatkan keterampilan tenaga kerja di bidang AI dan sains iklim melalui kemitraan (misalnya, akademi *AI for Earth* dari Microsoft).
- Menetapkan KPI untuk mengukur dampak AI: jumlah ton CO_2 yang dikurangi per algoritma atau biaya per MWh energi terbarukan yang dioptimalkan.
- Membentuk dewan peninjau independen untuk mengevaluasi efektivitas lingkungan dari sistem AI (misalnya, usulan Dewan Dampak Iklim AI oleh UE).

Peta Jalan Implementasi

a) Tahap percontohan (tahun 1–2): Menguji model AI secara sistematis dalam lingkungan terkendali (misalnya, satu fasilitas CCS atau jaringan listrik kota).
b) Tahap menengah: Skala nasional (tahun 3–5) dan perluasan regional, yang memungkinkan reformasi serta kemitraan pemerintah-swasta (PPP).
c) Integrasi global (tahun 6–10): Menghubungkan sistem nasional melalui pasar karbon berbasis AI dan jaringan listrik pintar lintas benua.

Kerangka kerja ini menghubungkan potensi teoretis AI dengan dampak nyata serta menyediakan peta jalan dekarbonisasi yang cepat dan adil. Dengan menyelaraskan data, teknologi, kebijakan, dan etika, para pemangku kepentingan dapat memosisikan AI bukan sekadar sebagai istilah populer (*buzzword*), melainkan sebagai sarana untuk mewujudkan tujuan *net-zero* (nol bersih emisi).

4.4 IMPLIKASI PEMANFAATAN AI TERHADAP DEKARBONISASI DAN KEBERLANJUTAN

Terkait cara menerapkan AI untuk mengurangi jejak karbon dunia, struktur yang diusulkan ini menjadi faktor penentu keberhasilan dalam memerangi perubahan lingkungan. Struktur ini memadukan kemajuan teknologi dengan kebijakan, etika, dan keadilan untuk menghasilkan peta jalan komprehensif bagi dekarbonisasi yang cepat. Di sini, kami

mengeksplorasi implikasinya dalam empat dimensi: teoretis, praktis, sosial, dan keberlanjutan, dengan menekankan potensi transformatif serta hambatan yang harus diatasi.

Implikasi Teoretis

Pendekatan lintas disiplin dalam kerangka kerja ini menolak pola pikir yang terkotak-kotak serta mengintegrasikan AI, ilmu iklim, ekonomi, dan etika ke dalam satu model tunggal. Kerangka kerja tersebut memformalkan informatika iklim sebagai bidang krusial di mana AI mengolah kumpulan data masif untuk memodelkan sistem Bumi yang kompleks. Registri karbon berbasis AI juga dapat dipahami melalui lensa teori sistem, yang memandang emisi bukan sebagai keluaran terpisah, melainkan sebagai variabel-variabel yang saling terhubung. AI generatif untuk perancangan pelarut memperluas cakupan ilmu material dengan memungkinkan simulasi interaksi molekuler dalam skala yang belum pernah terjadi sebelumnya, sehingga mempercepat penemuan jauh melampaui metode coba-coba (*trial-and-error*) konvensional.

Meninjau Kembali Linimasa Dekarbonisasi

Kerangka kerja ini menentang model dekarbonisasi inkremental dengan menempatkan AI sebagai katalisator, bukan sekadar alat. Pemeriksaan prediktif untuk energi terbarukan dan jaringan listrik yang mampu memulihkan diri sendiri (*self-healing grids*) selaras dengan teori ketahanan (*resilience theory*), yang berfokus pada fleksibilitas dan peralihan dinamis menuju kondisi variabel baru—hal yang krusial di tengah ketidakstabilan iklim. Pendekatan ini mengubah konsep jalur *net-zero* dari sekadar proyeksi linear menjadi proses yang adaptif dan berlangsung secara *real-time*.

Penerapan Teori AI Etis

Kerangka kerja ini mengoperasionalkan teori AI etis dengan menetapkan ketentuan mengenai audit bias (Pilar 4) dan penerapan yang adil. Hal ini menjawab tuntutan akan prinsip "keadilan iklim sejak tahap perancangan" (*climate justice by design*) guna memprioritaskan kebutuhan komunitas yang terpinggirkan dalam transisi energi yang didukung oleh AI.

Implikasi Praktis: Skalabilitas, Efisiensi, dan Permasalahan Dunia Nyata

Optimalisasi CCS berbasis AI (Pilar 2A) berpotensi memangkas biaya penangkapan karbon global hingga separuhnya pada tahun 2030 serta memungkinkan penerapan CCS pada industri baja dan semen. Sama halnya dengan pemeliharaan prediktif berbasis AI (Pilar 2B) yang mengurangi waktu henti (*downtime*) infrastruktur energi terbarukan—seperti yang terbukti menghasilkan peningkatan efisiensi sebesar 30 persen di Siemens Gamesa. Di sisi lain, terdapat tantangan berupa tingginya biaya awal untuk sensor IoT dan infrastruktur komputasi, khususnya di negara-negara berkembang.

Penyelarasan Kebijakan dan Kelembagaan

Fokus kerangka kerja ini pada kemitraan pemerintah-swasta (Pilar 3) mencerminkan keberhasilan program-program seperti inisiatif "*AI for Decarbonization*" di Inggris. Namun, adanya regulasi yang saling bertentangan—misalnya perbedaan antara undang-undang privasi data di Uni Eropa dan standar yang lebih longgar di wilayah lain—dapat memecah upaya global. Agar dapat diterapkan secara luas dan efektif, harmonisasi kebijakan (Usulan Pilar 1) melalui sertifikasi ISO menjadi hal yang krusial.

Transformasi Tenaga Kerja

Inisiatif pengembangan kapasitas (Pilar 5): Inisiatif ini bertujuan membangun keterampilan untuk mengatasi kesenjangan "keterampilan hijau" (*green skills gap*), namun kemampuan AI dalam mengotomatisasi pekerjaan juga mengancam pekerja di sektor bahan bakar fosil. Sebagai contoh, program akademi "*AI for Earth*" milik Microsoft sebaiknya memprioritaskan strategi transisi yang berkeadilan, seperti peningkatan keterampilan karyawan untuk peran pengawasan AI dan pengelolaan jaringan listrik.

Implikasi Sosial: Kesetaraan, Kepercayaan, dan Partisipasi Publik

Aspek dampak sosial dari kerangka kerja ini mencakup kesetaraan, transparansi, dan partisipasi masyarakat. Penerapan AI di wilayah tertinggal—seperti penggunaan microgrid tenaga surya di Afrika Sub-Sahara (Pilar 4)—berpotensi mendemokratisasi akses terhadap sumber energi vital ini. Namun, bias algoritma berisiko memperparah ketimpangan yang ada. Sebagai contoh, perbaikan jaringan listrik semi-otomatis berbasis AI mungkin lebih memprioritaskan kawasan perkotaan yang padat dibandingkan wilayah pedesaan, semata-mata karena perbedaan kepadatan data. IBM berupaya mengatasi masalah ini melalui *Fairness* 360 *Toolkit*—sebuah model mitigasi bias—namun pendekatan yang dimulai dari tingkat akar rumput juga sama pentingnya agar solusi yang dihasilkan benar-benar menjawab kebutuhan lokal.

Membangun Kepercayaan Publik

Sifat AI yang menyerupai "kotak hitam" (*black box*) sering kali memicu ketidakpercayaan, terutama di kalangan masyarakat yang selama ini kurang terjangkau oleh teknologi. Model AI yang transparan, seperti platform sumber terbuka (*open-source*) atau *Carbon Sense Suite* dari Google, dapat membantu membangun kepercayaan (Pilar 4). Konsultasi dengan masyarakat harus diintegrasikan ke dalam proyek percontohan (Tahap 1 Peta Jalan), seperti inisiatif prediksi kebakaran hutan berbasis AI di Oregon, yang berhasil meminimalkan penolakan melalui pendekatan desain partisipatif.

Dilema Etika dan Privasi Data

AI bergantung pada data konsumen untuk berbagai aplikasi dalam Pilar 2C, yang memunculkan masalah privasi. Mencapai keseimbangan antara pelacakan energi yang mendetail dan hak-hak individu bergantung pada tata kelola yang kuat, seperti protokol anonimisasi yang mematuhi GDPR Uni Eropa. Ujian utama bagi kerangka kerja ini adalah kemampuannya untuk mewujudkan dekarbonisasi yang berkelanjutan dan menghindari dampak yang tidak diinginkan.

Dampak Lingkungan yang Positif (*Net-Positive*)

Peningkatan efisiensi yang dihasilkan AI harus melampaui biaya karbon yang ditimbulkannya. Pelatihan model berskala besar, seperti GPT-3, menghasilkan sekitar 500 ton CO_2, namun penggunaan pusat data bertenaga energi terbarukan (misalnya, komitmen energi bebas karbon 24/7 dari Google) dapat mengatasi masalah ini. Integrasi ekonomi sirkular—seperti daur ulang logam tanah jarang dari perangkat keras AI—sangat penting untuk mencegah penipisan sumber daya.

Ketahanan Dekarbonisasi

Kemampuan beradaptasi secara *real-time* terhadap perubahan iklim menjaga efektivitas sistem AI. Sebagai contoh, jaringan listrik yang mampu memulihkan diri sendiri (*self-healing grids*) di Denmark (Pilar 2C) tetap stabil saat terjadi gelombang panas ekstrem pada tahun 2022, sehingga mencegah pemadaman listrik. Namun, ketergantungan yang tinggi pada AI dapat menimbulkan sikap terlena—dan pengawasan manusia tetap diperlukan untuk menangani kasus-kasus khusus (*edge cases*), seperti cuaca ekstrem yang belum pernah terjadi sebelumnya.

Ketahanan Ekonomi

Kerangka kerja ini berpotensi menghemat ekonomi global sebesar Rp211,58 kuadriliun pada tahun 2050 dengan menurunkan biaya energi terbarukan. Akan tetapi, jika AI terkonsentrasi pada pihak tertentu—seperti algoritma eksklusif milik perusahaan teknologi raksasa—hal itu dapat menghambat persaingan. Penciptaan model sumber terbuka (*open-source*) (Pilar 4) dan penegakan regulasi antimonopoli sangat penting untuk memastikan pertumbuhan yang inklusif. Implikasi dari kerangka kerja ini menunjukkan adanya potensi transformatif sekaligus tantangan yang kompleks. Secara teoretis, kerangka ini memajukan ilmu iklim lintas disiplin; secara praktis, hal ini memerlukan koordinasi kelembagaan dan investasi. Kerangka ini menuntut adanya kesetaraan dan akuntabilitas agar tidak memperparah ketimpangan, serta—dari perspektif lain—memerlukan perhatian terhadap seluruh siklus hidup teknologi guna memitigasi jejak dampaknya. Kunci keberhasilannya terletak pada memandang AI sebagai bagian dari teka-teki yang lebih besar—yang mencakup teknologi, kebijakan, dan etika—bukan sekadar sebagai solusi tunggal. Pengembangan di masa depan harus berfokus pada praktik terbaik—hasil uji coba dapat terus menyempurnakan algoritma dan kebijakan—sementara kerja sama lintas yurisdiksi akan membantu menyelaraskan norma dan menyebarluaskan inovasi. Terlebih lagi, melalui proses ini, kerangka kerja tersebut dapat bertransformasi dari sebuah cetak biru konseptual menjadi landasan ketangguhan planet.

4.5 AI SEBAGAI PENGGERAK AKSELERASI DEKARBONISASI

Krisis iklim menuntut inovasi berskala luas—gagasan-gagasan yang mampu memangkas emisi gas rumah kaca dan membuka jalan menuju Bumi yang seimbang. Dalam bab ini, kami telah mengkaji peluang transformatif yang dapat dihadirkan oleh AI untuk mempercepat dekarbonisasi di tiga bidang utama: penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS), optimalisasi energi terbarukan, dan pengelolaan jaringan listrik cerdas (*intelligent grid*). Penggabungan wawasan dari studi yang telah ditelaah sejawat (*peer-reviewed*) dan wawancara dengan para ahli terkemuka menunjukkan bahwa AI bukan sekadar pelengkap sederhana, melainkan bagian penting dari perangkat modern penanganan perubahan iklim yang diyakini banyak pihak mampu mengubah kecepatan dan skala pengurangan emisi.

Dalam bidang penangkapan dan penyimpanan karbon, terobosan *machine learning* (ML) berhasil mendobrak hambatan biaya dan inefisiensi yang telah ada selama puluhan tahun. Puluhan algoritma ML sedang dilatih menggunakan desain pelarut dan proses penangkapan yang inovatif, serta telah berhasil menurunkan konsumsi energi hingga 40%

dalam berbagai proyek percontohan. Apa saja perkembangan teknologi paling menarik yang menurut Anda berpotensi merevolusi sektor ini? Misalnya, model prediktif yang memungkinkan pemilihan lokasi penyimpanan geologis secara lebih aman dan berskala lebih besar, atau sistem pemantauan otonom untuk memastikan CO_2 tetap tersimpan dengan aman di dalam tanah? Didukung oleh validasi dari organisasi seperti MIT dan *Global* CCS *Institute*, inovasi-inovasi ini secara kolektif menegaskan potensi AI untuk mengubah CCS dari teknologi khusus (*niche*) menjadi solusi yang dapat diterapkan secara global—sebuah langkah krusial bagi industri yang sulit mengurangi emisi, seperti produksi semen dan baja.

Kemampuan prediktif dan adaptif AI sedang merevolusi sistem energi terbarukan, yang sebelumnya terkendala oleh sifat intermiten (tidak kontinu) dan ketidakstabilan jaringan listrik. Jaringan saraf tiruan (*neural networks*) yang canggih kini mampu memprediksi keluaran energi surya dan angin dengan akurasi tinggi (lebih dari 90% waktu operasional), sehingga memungkinkan operator jaringan untuk mengintegrasikan sumber energi terbarukan secara mulus. Studi kasus dari Google DeepMind dan Siemens Gamesa semakin menunjukkan bagaimana AI mengoptimalkan kinerja turbin serta tata letak di ladang tenaga surya, yang mampu meningkatkan hasil energi sebesar 20–35%. Selain itu, AI mengoptimalkan sumber daya energi terdistribusi, yang mendorong pertumbuhan jaringan listrik terdesentralisasi serta meningkatkan ketahanan energi di tingkat lokal. Perkembangan ini tidak hanya meningkatkan keandalan energi terbarukan tetapi juga membuatnya lebih terjangkau dibandingkan bahan bakar fosil; hal ini sejalan dengan prediksi IRENA mengenai potensi penghematan biaya sebesar Rp211,58 kuadriliun pada tahun 2050. Pengelolaan jaringan listrik yang inovatif merupakan contoh nyata bagaimana AI dapat mewujudkan sistem energi yang tangkas dan responsif. Pemeriksaan data secara *real-time* menyeimbangkan pasokan dan permintaan, mengurangi kerugian transmisi, serta meningkatkan keamanan siber. Program *respons* permintaan berbasis AI di Texas dan jaringan listrik yang mampu memulihkan diri sendiri (*self-healing grids*) di Denmark merupakan contoh nyata pengurangan emisi yang terukur dan peningkatan keandalan jaringan. Selain itu, meteran pintar dan teknologi *vehicle-to-grid* (V2G) yang didukung AI mengubah konsumen menjadi pelaku aktif di pasar energi, menciptakan akses yang adil terhadap energi bersih, serta mendorong perubahan perilaku menuju keberlanjutan.

Namun, penerapan AI dalam aksi iklim menghadapi sejumlah tantangan. Proses pelatihan AI yang sangat boros energi menciptakan sebuah kontradiksi: diperlukan pusat data yang ditenagai energi terbarukan serta algoritma yang tidak mengonsumsi daya secara berlebihan. Kerangka tata kelola yang mencakup pedoman penanganan isu privasi data dan bias algoritma sangat diperlukan untuk menjamin pemerataan manfaat. Masyarakat yang terpinggirkan harus diprioritaskan karena mereka sering kali tertinggal di tengah pesatnya kemajuan teknologi; mengabaikan hal ini justru akan memperparah ketimpangan iklim. Selain itu, demi keberhasilan upaya ini dan pemberdayaan para pelaku baru, para pembuat kebijakan, peneliti, dan pemimpin industri perlu bekerja sama dalam menyusun standar bersama terkait transparansi, pertukaran data, dan inovasi yang inklusif. Ke depan, potensi untuk meningkatkan skala solusi berbasis AI sangat bergantung pada kolaborasi interdisipliner

dan investasi berkelanjutan. Kebijakan seperti Undang-Undang Pengurangan Inflasi AS dapat membantu mendorong kemitraan publik-swasta, mempercepat R&D dan penerapan.

Dengan menyediakan alat secara gratis melalui inisiatif seperti model simulasi energi dan inisiatif pembangunan kapasitas seperti akselerator pembelajaran mesin, peserta global dalam transisi energi akan diberdayakan untuk mendemokratisasi partisipasi. Kebutuhan akan sistem yang adaptif akan menjadi sangat penting karena variabilitas iklim memprediksi peningkatan kejadian ekstrem. AI adalah pengubah permainan dalam jalur umat manusia menuju dekarbonisasi. AI menutup kesenjangan antara tujuan iklim yang ambisius dan solusi yang dapat ditindaklanjuti melalui peningkatan efisiensi, pengurangan biaya, dan adaptabilitas sistemik. Ada tantangan di depan, tetapi tantangan tersebut menambahkan bahwa jalur *net-zero* dapat dicapai dan inklusif melalui AI, tata kelola yang baik, dan praktik yang adil. Dengan urgensi krisis iklim, tidak ada kemewahan untuk berpuas diri—memanfaatkan semua yang ditawarkan AI bukan hanya sebuah peluang tetapi benar-benar suatu keharusan untuk kelangsungan hidup planet ini.

BAB 5
MEMBANGUN EKONOMI HIJAU YANG TERDESENTRALISASI

5.1 KONVERGENSI BLOCKCHAIN DAN AI

Abad ke-21 telah menjadi era yang ditandai oleh dilema lingkungan yang belum pernah terjadi sebelumnya. Kenaikan suhu global yang terus berlanjut, hilangnya keanekaragaman hayati, penipisan sumber daya alam, dan polusi merupakan beberapa penyebab terancamnya kesehatan planet kita, sehingga diperlukan solusi sistemik yang mendesak. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) menyoroti potensi suhu global melampaui ambang batas 1,5°C pada tahun 2030, yang dapat memicu tercapainya titik kritis ekologis yang tidak dapat dipulihkan. Secara bersamaan, paradigma keberlanjutan konvensional (institusi terpusat yang bersifat *top-down*, kebijakan yang terfragmentasi, dan mekanisme pasar yang tidak transparan) telah gagal menjadi strategi yang dapat diterapkan untuk mencapai efektivitas berskala luas. Praktik greenwashing, inersia birokrasi, dan insentif ekonomi yang tidak selaras telah mengikis kepercayaan publik terhadap pendekatan konvensional dalam tata kelola lingkungan.

Dalam konteks ini, *blockchain* dan kecerdasan buatan (AI) berkonvergensi menjadi kekuatan transformatif, yang memungkinkan terciptanya jalur terdesentralisasi, transparan, dan berbasis data untuk merancang ulang konsep keberlanjutan. Dalam bab ini, kami akan membahas bagaimana teknologi-teknologi tersebut dapat memfasilitasi pengembangan ekonomi hijau terdesentralisasi yang berupaya menyeimbangkan integritas ekologis dengan keadilan ekonomi melalui pengembangan sistem energi, rantai pasok, dan pasar karbon yang baru.

Batasan Keberlanjutan yang Tersentralisasi

Selama beberapa dekade, inisiatif keberlanjutan telah berjalan dalam kerangka kerja yang bersifat *top-down* (dari atas ke bawah). Pemerintah memberlakukan pajak karbon, perusahaan menerapkan pelaporan ESG (*Environmental*, *Social*, *and Governance*), dan organisasi internasional seperti Perserikatan Bangsa-Bangsa memfasilitasi perjanjian iklim. Namun, upaya-upaya ini sering kali tidak membuahkan hasil maksimal akibat kegagalan sistemik. Sebagai contoh, jaringan energi terpusat masih bergantung pada bahan bakar fosil, sementara sistem energi terbarukan terjepit di antara infrastruktur warisan lama dan perusahaan utilitas yang memonopoli pasar. Di sisi lain, pasar karbon yang dirancang untuk memberikan insentif emisi yang tepat justru dinodai oleh praktik kecurangan seperti penghitungan ganda dan mekanisme manipulasi lainnya, serta kurangnya transparansi. Beberapa rantai pasok—yang krusial bagi terwujudnya ekonomi sirkular—juga kurang transparan; konsumen maupun regulator tidak dapat dengan mudah memverifikasi praktik pengadaan yang etis ataupun klaim netralitas karbon. Berbagai kendala ini mengindikasikan adanya masalah yang lebih sistemik:

a) **Defisit kepercayaan**: Masyarakat justru semakin kurang percaya—bukan semakin percaya—bahwa otoritas terpusat (pemerintah, perusahaan, maupun LSM) akan bertindak demi kepentingan publik.
b) Hambatan birokrasi menghalangi penerapan teknologi ramah lingkungan dan penyaluran pendanaan iklim.
c) **Ketidakselarasan insentif**: Model bisnis yang berorientasi pada laba lebih mengutamakan tujuan jangka pendek dibandingkan kesehatan ekologis jangka panjang

Kekurangan-kekurangan tersebut menyoroti perlunya perubahan paradigma yang lebih signifikan—yakni beralih ke sistem yang terdesentralisasi. Sistem terdistribusi semacam ini akan memberdayakan masyarakat, meningkatkan akuntabilitas perilaku perusahaan, serta menyelaraskan imbalan ekonomi sektor swasta dengan kelestarian planet ini

Membangun Sinergi Revolusioner Antara *Blockchain* Dan Ai

Meskipun secara fundamental berbeda dalam arsitektur teknisnya, *blockchain* dan AI memiliki etos yang sama, yaitu desentralisasi. *Blockchain* merupakan salah satu jenis teknologi buku besar terdistribusi (*distributed ledger technology* atau DLT) yang memungkinkan transaksi peer-to-peer tanpa perantara, yang diperluas melalui algoritma konsensus untuk keperluan verifikasi. Karakteristik uniknya—seperti sifat yang tidak dapat diubah (immutability), transparansi, dan keamanan berbasis kriptografi—menjadikannya cocok untuk aplikasi yang menuntut kolaborasi tanpa perlu saling percaya (*trustless collaboration*), seperti perdagangan kredit karbon atau sertifikat energi terbarukan. Sebaliknya, data dan AI memanfaatkan pembelajaran mesin (*machine learning*), jaringan saraf tiruan (*neural networks*), dan analitik data besar (*big data analytics*) untuk meningkatkan pengambilan keputusan. Mulai dari memprediksi kebutuhan energi hingga mengidentifikasi deforestasi melalui citra satelit, kemampuan AI dalam menangani kumpulan data besar secara hampir seketika melengkapi peran *blockchain* dalam menangkap dan mengomunikasikan data secara aman. Secara kolektif, teknologi-teknologi ini mengisi kesenjangan penting dalam aspek keberlanjutan:

a) **Demokratisasi**: *Blockchain* mendesentralisasi akses ke sektor keuangan bagi pihak yang belum berpengalaman serta memungkinkan produsen skala kecil untuk mengakses pasar karbon atau menjual energi terbarukan.
b) **Transparansi**: Rantai pasok menjadi dapat dilacak dari sumber hingga konsumen; *blockchain* mencatat setiap transaksi, sementara AI mengidentifikasi pihak yang bertanggung jawab.

AI mengoptimalkan alokasi sumber daya dalam jaringan energi, dan *blockchain* mengotomatiskan transaksi melalui kontrak pintar (*smart contracts*). Ini bukan sekadar sinergi teoretis. Contoh praktis dalam DLT—seperti Power Ledger, sebuah platform Australia berbasis *blockchain* yang digunakan untuk memperdagangkan kredit energi surya secara langsung antar-pihak dalam alur kerja *prosumer-to-prosumer*, serta IBM *Food Trust*, yang memetakan rantai pasok di dalam dan lintas sektor pertanian menggunakan DLT—menunjukkan bahwa perangkat semacam itu memiliki potensi untuk diterapkan dalam dunia nyata. Demikian pula di sektor pertanian, platform berbasis kecerdasan buatan seperti ClimateAi memanfaatkan

pemodelan prediktif untuk membantu petani beradaptasi dengan perubahan iklim, sementara inisiatif *blockchain* seperti KlimaDAO melakukan tokenisasi kredit karbon guna meningkatkan likuiditas pasar.

Elemen Dasar Ekonomi Hijau Yang Terdesentralisasi

a. Jaringan Energi Terdesentralisasi

Sistem energi terpusat kurang memadai untuk mengakomodasi variabilitas sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya dan angin. Teknologi *blockchain* dalam pasar energi, melalui mekanisme perdagangan energi peer-to-peer, memungkinkan rumah tangga menjual kelebihan energi kepada tetangga tanpa perantara perusahaan utilitas. Salah satu inisiatif semacam itu adalah proyek LO3 *Energy di* Brooklyn, New York, yang memanfaatkan *blockchain* untuk *microgrid*, di mana para partisipan menukarkan token untuk mendapatkan energi terbarukan. AI meningkatkan kinerja sistem ini dengan memprediksi permintaan energi, mengoptimalkan penyimpanan jaringan, dan menyeimbangkan beban—sehingga meminimalkan ketergantungan pada pembangkit listrik *peaker* (pembangkit beban puncak) berbahan bakar fosil.

b. Rantai Pasok yang Transparan

Rantai pasok global menyumbang lebih dari 60% emisi gas rumah kaca. Buku besar (*ledger*) *blockchain* yang anti-manipulasi memungkinkan ketertelusuran menyeluruh (*end-to-end*), memastikan bahwa produk berlabel "organik" atau "*fair trade*" (perdagangan adil) memenuhi standar yang ketat. Sebagai contoh, *World Wildlife Fund* (WWF) menggunakan *blockchain* untuk memantau penangkapan ikan tuna di Pasifik guna mencegah penangkapan ikan ilegal. AI melengkapi upaya ini dengan memeriksa citra satelit dan data sensor *Internet of Things* (IoT) untuk memantau deforestasi, kebocoran metana, atau pelanggaran hak pekerja secara *real-time*.

c. Kredit Karbon dalam Bentuk Token

Pasar karbon konvensional sangat terfragmentasi dan rentan terhadap penipuan. Karena *blockchain* memungkinkan tokenisasi, kredit karbon dapat dicatat secara kriptografis dalam buku besar sebagai jumlah kredit tertentu; kredit ini dapat dibagi menjadi kepemilikan fraksional, diaudit secara real-time, dan diperdagangkan secara global. Inisiatif seperti Veridium Labs bekerja sama dengan IBM untuk melakukan tokenisasi kredit yang terkait dengan pelestarian hutan hujan. AI akan meningkatkan sistem ini secara dinamis dengan menetapkan harga kredit berdasarkan data dampak ekologis, sehingga tercipta pasar yang akurat dan adil.

d. Landasan Interdisipliner

Membangun ekonomi hijau yang terdesentralisasi menuntut kerja sama lintas disiplin ilmu:

1. **Ilmu komputer**: Menciptakan program AI yang ramah lingkungan dan protokol *blockchain* yang dapat diskalakan (seperti *Proof-of-Stake*).
2. **Ekonometrika**: Struktur insentif apa yang dapat kita ciptakan?
3. **Data ekologis**: Layanan ekosistem, indikator keanekaragaman hayati, dan model penyerapan karbon.

Perspektif interdisipliner ini mengubah pendekatan keberlanjutan yang sebelumnya bersifat terkotak-kotak. Contohnya mencakup peran lingkungan dari *blockchain*, persinggungannya dengan ekonomi perilaku yang mendorong tindakan pro-lingkungan, serta data ekologis yang menjadi dasar model iklim berbasis AI untuk memprediksi dampak di tingkat regional.

e. Tantangan dan Isu Etika

Kendati demikian, *blockchain* dan AI bukanlah solusi ajaib terlepas dari segala antusiasme yang menyertainya. Kritik telah diarahkan pada penggunaan energi *blockchain*—terutama pada sistem yang menggunakan metode *Proof-of-Work* (PoW), seperti *Bitcoin*—karena berkontribusi terhadap jejak karbon lingkungan (Bager dan rekan rekan., 2022). Beralih ke mekanisme konsensus yang hemat energi (misalnya, *Proof-of-Stake*, jika memungkinkan) dan penambangan yang ditenagai energi terbarukan dapat dikatakan sebagai prioritas utama kita. Terkait hal tersebut, isu AI juga mencakup bias algoritmik, privasi data, dan sentralisasi. *Federated learning*, sebuah metode pelatihan AI yang terdesentralisasi, merupakan solusi parsial karena data tidak dikumpulkan di lokasi pusat.

Akses yang adil dan merata tetap menjadi sebuah tantangan. Komunitas yang terpinggirkan umumnya memiliki infrastruktur atau literasi digital yang minim, sehingga menghambat mereka untuk mengakses sistem *blockchain*-AI dan menimbulkan risiko terjadinya "kesenjangan hijau" (*green divide*). Para pembuat kebijakan juga harus memprioritaskan desain inklusif dan pendidikan digital agar teknologi ini dapat memberikan manfaat bagi semua orang. Di saat yang sama, kemampuan AI dalam melakukan pemeriksaan prediktif, optimalisasi, dan otomatisasi dapat membantu meningkatkan pengambilan keputusan terkait alokasi sumber daya, pemodelan iklim, dan pengelolaan jaringan energi. Secara kolektif, teknologi-teknologi ini mengatasi tantangan sistemik dalam keberlanjutan dengan mendemokratisasi akses terhadap keuangan hijau, meningkatkan akuntabilitas dalam rantai pasok, serta mengoptimalkan distribusi energi terbarukan.

Berdasarkan wawasan dari ilmu komputer, ekonomi, dan studi ekologi, bab ini berargumen bahwa sistem terdesentralisasi dapat memberdayakan masyarakat, mengurangi beban administratif, dan menyelaraskan insentif ekonomi dengan hasil lingkungan. Dengan memadukan perspektif lintas disiplin, kami menawarkan pandangan visioner mengenai keberlanjutan yang mengedepankan keadilan, skalabilitas, dan ketahanan.

5.2 FONDASI AI, BLOCKCHAIN, DAN EKONOMI HIJAU TERDESENTRALISASI

Persinggungan antara *blockchain* dan kecerdasan buatan (AI) merupakan bidang studi penting dalam keberlanjutan, yang menjembatani tata kelola lingkungan, keuangan hijau, dan sistem terdesentralisasi. Pemantauan ini merangkum studi terdahulu mengenai *blockchain* dan AI sebagai penggerak ekonomi hijau terdesentralisasi dalam tiga dimensi utama: jaringan energi terdesentralisasi, rantai pasok yang transparan, dan kredit karbon berbasis token. Pemantauan ini juga mengkaji sinergi serta tantangan dalam menggabungkan teknologi-teknologi tersebut.

***Blockchain* dalam Keberlanjutan**

Sistem pencatatan (*ledger*) *blockchain* yang terdesentralisasi, transparan, dan tidak dapat diubah (*immutable*) telah menarik perhatian luas karena potensinya dalam mengatasi masalah kurangnya kepercayaan (*trust deficit*) dalam tata kelola lingkungan. Nakamoto memperkenalkan *blockchain* sebagai sistem yang tidak memerlukan kepercayaan pihak ketiga (*trustless*), yang kemudian menjadi landasan bagi ribuan kasus penggunaan *blockchain*, dengan mata uang kripto sebagai contoh yang paling terkenal. Teknologi ini juga diterapkan secara luas dalam perdagangan energi terbarukan, pelacakan rantai pasok, dan sebagainya.

Jaringan Energi Terdesentralisasi

Dalam konteks *blockchain*, para pihak dapat saling bertukar energi secara *peer-to-peer* (P2P) tanpa perantara; artinya, prosumer (produsen sekaligus konsumen) dapat memperdagangkan kelebihan energi terbarukan dengan pihak lain. Andoni dan rekan rekan. mengemukakan bahwa *blockchain* mengurangi kerugian transmisi dan mendemokratisasi akses ke pasar energi dengan memungkinkan produsen tenaga surya berskala kecil untuk berpartisipasi dalam pasar tersebut. Proyek Brooklyn Microgrid merupakan studi kasus yang sangat baik dalam menunjukkan penggunaan *blockchain* untuk mengembangkan struktur tata kelola energi terdistribusi yang tangguh. Meskipun demikian, tantangan seperti skalabilitas dan konsumsi energi yang tinggi pada algoritma konsensus tertentu, seperti *Proof-of-Work* (PoW), masih tetap ada. Sebagai contoh, Truby —yang menyoroti konsumsi energi *Bitcoin*— berargumen untuk mendukung penggunaan alternatif seperti *Proof-of-Stake*.

Rantai Pasok yang Transparan

Sistem pencatatan otomatis *blockchain* yang anti-manipulasi memungkinkan transparansi rantai pasok yang diperlukan untuk membuktikan klaim keberlanjutan. Friedman dan Ormiston mengemukakan bahwa *blockchain* dapat mengurangi greenwashing dengan menyediakan catatan yang tidak dapat diubah mengenai asal-usul produk, praktik ketenagakerjaan, dan jejak karbon. *Blockchain Food Trust* milik IBM melacak produk pertanian dari lahan pertanian hingga ke rak penjualan, sehingga mengurangi kecurangan. Namun, tantangan implementasi mencakup interoperabilitas antar-sistem yang berbeda serta biaya integrasi IoT untuk pengumpulan data secara *real-time*.

Tokenisasi Kredit Karbon

Tokenisasi kredit karbon melalui *blockchain* mengubah kredit karbon fisik menjadi token digital yang dapat diperdagangkan dengan efisiensi pasar terbuka. Tokenisasi meminimalkan penghitungan ganda dan meningkatkan likuiditas melalui kepemilikan fraksional. Beberapa pasar karbon berbasis *blockchain* telah dibentuk (misalnya, KlimaDAO, *Toucan Protocol*). Akan tetapi, sejumlah tantangan—seperti ketidakpastian regulasi dan belum adanya kerangka kerja terpadu untuk penilaian—masih belum teratasi.

AI dalam Keberlanjutan

Kemampuan AI untuk memeriksa, memprediksi, dan melakukan otomatisasi menjadikannya berpotensi membawa perubahan transformatif di bidang keberlanjutan. *Machine learning* (ML) dan jaringan saraf (*neural networks*) memungkinkan alokasi sumber

daya yang terbatas secara optimal, deteksi pelanggaran lingkungan, serta pemodelan skenario iklim.

Optimalisasi Sistem Energi

AI memfasilitasi integrasi sumber energi terbarukan dengan memprediksi tren konsumsi dan mengoptimalkan manajemen jaringan listrik (*grid*). Model *machine learning* karya Chaaban dan Alfadl meningkatkan keandalan prakiraan pembangkitan listrik tenaga surya dan angin, sehingga mengurangi ketergantungan pada cadangan energi berbahan bakar fosil. Vázquez-Canteli dan Nagy melakukan optimalisasi menggunakan algoritma reinforcement learning dan menyesuaikan beban pada jaringan listrik secara dinamis untuk meminimalkan pemborosan. Namun, ketergantungan AI pada data berkualitas tinggi dan daya komputasi menimbulkan kekhawatiran terkait aksesibilitas dan konsumsi energi.

Pemantauan Lingkungan

Pemeriksaan citra satelit dan perangkat berbasis AI yang menggunakan sensor IoT dimanfaatkan untuk mendeteksi pelanggaran ekologis secara *real-time*. Olawade dan rekan rekan. membahas bagaimana AI digunakan untuk memantau deforestasi ilegal di Amazon, serta bagaimana platform ET Brain milik Alibaba mampu melacak sumber pencemaran air di sepanjang sungai-sungai di Tiongkok. Namun, aspek akuntabilitas menjadi sorotan terkait bias algoritmik dan proses pengambilan keputusan yang bersifat "kotak hitam" (*black-box*). *Federated learning* memiliki potensi dalam mengatasi masalah privasi data, karena metode ini memungkinkan desentralisasi dan pelatihan sistem AI secara individual pada setiap perangkat pribadi tanpa mengorbankan privasi data melalui pengiriman data mentah ke server pusat.

Pemodelan Iklim

Sensor atmosfer dan data catatan historis memungkinkan pemeriksaan pola menggunakan AI untuk mempercepat prediksi iklim. Model pembelajaran mesin (*machine learning* atau ML) juga telah digunakan untuk menyimulasikan sistem iklim yang kompleks, sehingga membantu mendukung para ilmuwan dan agenda kebijakan dalam merancang langkah-langkah khusus untuk memitigasi permasalahan tersebut. Akan tetapi, model berbasis AI yang bersifat prediktif namun tidak dapat diinterpretasikan (non-interpretative) tidak mudah diadopsi dalam ranah kebijakan.

Konvergensi *Blockchain* dan AI

Sinergi antara *blockchain* dan AI menawarkan peluang penciptaan nilai bersama, namun pembelajaran lintas disiplin pada titik temu konvergensi ini masih berada pada tahap awal.

Integritas Data dan Otomatisasi

Hal ini memastikan bahwa kumpulan data yang digunakan untuk melatih model AI terlindungi dari manipulasi (*tamper-proof*) dan mengurangi risiko bias. Zhang dan rekan rekan. menyajikan solusi berbasis *blockchain*, di mana algoritma AI berinteraksi dengan data lingkungan terverifikasi dari sumber-sumber terdesentralisasi. Sebagai contoh, kontrak pintar (*smart contracts*) yang menggunakan platform Ethereum dapat mengotomatisasi penerbitan kredit karbon berdasarkan data emisi yang telah diverifikasi oleh AI.

Tata Kelola AI Terdesentralisasi

Organisasi otonom terdesentralisasi (DAO) berbasis *blockchain* dapat mengelola sistem AI secara transparan. Hileman dan Rauchs menekankan bahwa DAO dapat mendemokratisasi proses pengambilan keputusan dalam keuangan hijau, misalnya dengan mendistribusikan dana untuk proyek iklim melalui pemungutan suara komunitas. Namun, DAO menghadapi hambatan hukum dan teknis, seperti ketidakpastian regulasi dan kerentanan dalam kontrak pintar. Terlepas dari keuntungan keberlanjutan yang ditawarkan *blockchain* dan AI, dampak lingkungan gabungan keduanya—termasuk pelatihan AI yang boros energi dan *blockchain* berbasis *Proof-of-Work* (PoW)—menimbulkan dilema etis. Para akademisi terkemuka mendorong penggunaan algoritma hemat energi (seperti TinyML) dan jaringan *blockchain* yang ditenagai energi terbarukan sebagai bentuk praktik "AI hijau".

Kesenjangan Dalam Riset

a) **Integrasi berbagai disiplin ilmu**: Sebagian besar riset yang ada berfokus pada penerapan *blockchain* atau AI secara terpisah, tanpa mempertimbangkan kerangka kerja sistemik yang dapat mengintegrasikan kedua strategi tersebut.
b) **Kesetaraan dan akses**: Hanya sedikit studi yang membahas potensi partisipasi komunitas yang terpinggirkan dalam sistem terdesentralisasi, yang berisiko menciptakan "kesenjangan keberlanjutan" (*sustainability divide*).
c) **Bentuk dan struktur baru**, aset digital—Meskipun AI berbasis data sudah umum digunakan, implikasi hukum dari aset yang ditokenisasi (tokenized assets) dan tata kelola AI masih belum terintegrasi dengan baik.

Berbagai upaya ekstensif telah dilakukan dengan memanfaatkan *blockchain* dan AI untuk membantu menciptakan solusi berkelanjutan yang terdesentralisasi. Namun, mewujudkan visi ini menuntut kita untuk mengatasi hambatan teknis, etis, dan regulasi, serta mendorong studi dan inovasi lintas bidang, lintas sektor, dan interdisipliner. Bagian berikut menguraikan kerangka kerja untuk merealisasikan hal tersebut.

5.3 MEMBANGUN EKONOMI HIJAU VIA BLOCKCHAIN DAN AI

Kerangka Kerja Ekonomi Hijau Terdesentralisasi (DGEF) kami memungkinkan Anda menerapkan sistem berkelanjutan yang nyata—mulai dari sektor energi, rantai pasok, dan pasar karbon hingga tata kelola—dengan mengintegrasikan *blockchain* dan AI. Dirancang agar dapat ditingkatkan skalanya (*scalable*) dan inklusif, DGEF mendorong interoperabilitas, penyelarasan insentif, dan partisipasi masyarakat. Berikut adalah rincian komponen utama serta langkah-langkah penerapannya.

Sistem Energi Terdesentralisasi

Tujuan: Jaringan energi terbarukan terdesentralisasi yang dikelola oleh masyarakat, bukan bergantung pada bahan bakar fosil.

Lapisan *Blockchain*

a) **Perdagangan *peer-to-peer* (P2P)**: *Platform blockchain* (seperti *Ethereum* dan *Hyperledger*) menggunakan smart contract untuk perdagangan energi otomatis.

Prosumer—seorang prosumer menjual kelebihan energi surya/angin kepada tetangga tanpa melalui perusahaan utilitas konvensional.

b) **Sertifikat energi berbasis token**: Penerbitan sertifikat energi terbarukan (REC) dalam bentuk *non-fungible* token (NFT) untuk memverifikasi persentase pembangkitan energi bersih dan kepemilikannya.

Lapisan AI

a) **Prakiraan permintaan**: Melatih model *machine learning* (ML) menggunakan data historis cuaca dan konsumsi untuk memprediksi jumlah energi yang dihasilkan dan mengoptimalkan penyimpanan.

b) **Penyeimbangan jaringan (*grid balancing*):** Penggunaan reinforcement learning untuk menyesuaikan distribusi energi secara dinamis, sehingga meminimalkan pemborosan selama siklus beban puncak maupun di luar jam puncak.

Implementasi

a) Bekerja sama dengan pemerintah daerah untuk menjalankan proyek percontohan microgrid (seperti model Brooklyn *Microgrid*).

b) Memanfaatkan smart meter berbasis IoT untuk pengambilan data secara real-time.

Rantai Pasok Yang Transparan

Tujuan: Mencapai ketertelusuran menyeluruh (*end-to-end*) dan memastikan pengadaan yang etis.

Lapisan *Blockchain*

a) Buku besar yang tidak dapat diubah (*immutable ledgers*): Menyimpan setiap tahapan rantai pasok (misalnya, ekstraksi bahan baku, manufaktur, logistik) pada *blockchain* dengan akses terbatas/terizin (*permissioned blockchains*, contohnya VeChain).

b) Autentikasi kode QR: Pelanggan dapat memindai produk untuk melihat kredensial keberlanjutan yang telah diverifikasi oleh *blockchain*.

Lapisan AI

a) **Deteksi anomali**: Menggunakan algoritma visi komputer (*computer vision*) untuk menandai citra satelit yang menunjukkan deforestasi ilegal atau polusi.

b) **Pemeriksaan prediktif**: Melatih model *Machine Learning* (ML) untuk memprediksi risiko rantai pasok (gangguan akibat cuaca ekstrem, dan lain lain.).

Implementasi

a) Mengembangkan sistem untuk mengadaptasi teknologi *blockchain*-IoT dari berbagai industri (misalnya, pertanian, mode) dan memublikasikan studi kasus.

b) *Beyond Meat* bermitra dengan LSM (misalnya, WWF) untuk mengaudit rantai pasok berisiko tinggi (misalnya, minyak kelapa sawit, kobalt).

Pasar Karbon Berbasis Token

Tujuan: Kredit karbon yang mudah diakses dan pasar yang transparan.

Lapisan *Blockchain*

a) **Tokenisasi kredit karbon**: *Carbon offset* (pengimbangan karbon) dapat dipecah menjadi bagian-bagian kecil dan dikonversi menjadi token (token ERC-20 pada *blockchain* Polygon/Solana).
b) **Audit *smart contract***: Memverifikasi proyek penyerapan karbon (seperti reboisasi) melalui *oracle* yang menyediakan data waktu nyata (*real-time*).

Lapisan AI

a) **Penetapan harga dinamis**: Menggunakan data dampak ekologis waktu nyata (misalnya, pertumbuhan hutan yang diukur melalui satelit) untuk membantu model ML menyesuaikan harga token berdasarkan permintaan.
b) **Deteksi penipuan**: Menerapkan pemrosesan bahasa alami (*Natural Language Processing* atau NLP) untuk memeriksa dokumentasi proyek guna mendeteksi praktik greenwashing.

Implementasi

a) Berkolaborasi dengan lembaga pencatat kredit karbon (misalnya, Verra) untuk melakukan tokenisasi terhadap kredit yang telah diverifikasi.
b) Menggunakan ETH untuk perdagangan kredit berbasis token di bursa terdesentralisasi (DEX).

Tata Kelola Terdesentralisasi

Tujuan: Mendorong pengambilan keputusan partisipatif dalam inisiatif keberlanjutan.

Lapisan *Blockchain*

a) **DAO untuk pengelolaan sumber daya**: Membentuk DAO untuk pengelolaan dana yang dikelola komunitas (misalnya, obligasi hijau) melalui pemungutan suara berbasis token.
b) **Sistem reputasi**: Mendistribusikan token kepada pemangku kepentingan (misalnya, pihak pendaur ulang, pengguna energi terbarukan) berdasarkan perilaku berkelanjutan.

Lapisan AI

a) **Algoritma konsensus**: Memanfaatkan AI untuk sistem pemungutan suara DAO yang lebih baik (seperti *quadratic voting* untuk distribusi kekuasaan yang adil).
b) **Simulasi risiko**: Misalnya, memodelkan risiko iklim seperti kenaikan permukaan laut agar investasi infrastruktur dapat disesuaikan dengan tepat.

Implementasi

a) Menguji inisiatif berbasis DAO di kota-kota dengan tingkat partisipasi warga yang tinggi (misalnya, Seoul, Barcelona).
b) Memberikan insentif bagi partisipasi publik melalui aplikasi berkonsep gamifikasi (misalnya, pemberian imbalan berupa token bagi mereka yang melakukan daur ulang).

Faktor Pendukung Lintas Sektor

a) **Interoperabilitas**: Membangun jembatan lintas rantai (*cross-chain bridges*, misal: Polkadot) untuk menghubungkan sistem energi, rantai pasok, dan kredit karbon.

b) Menyusun struktur organisasi berdasarkan kinerja: Membentuk entitas yang lebih fleksibel dalam aktivitasnya, misalnya dengan memanfaatkan blok konsensus *Proof-of-Stake* yang hemat energi.

c) Melatih anggota komunitas marginal dalam hal literasi digital dan teknologi *Internet of Things* (IoT).

Peta Jalan Implementasi

a) Uji coba percontohan: Menjalankan proyek percontohan khusus sektor (misalnya, microgrid bertenaga surya di komunitas pedesaan).

b) Pelibatan regulator: Bermitra dengan regulator untuk mengembangkan standar aset ter-tokenisasi dan akuntabilitas AI.

c) Skalabilitas: Menggunakan arsitektur *blockchain* modular seperti Cosmos untuk skalabilitas horizontal lintas wilayah.

DGEF merupakan model kerja yang mampu mengintegrasikan transparansi *blockchain* dengan kemampuan verifikasi sistem AI, serta menjadi solusi atas keterbatasan sistemik yang selama ini menghambat upaya keberlanjutan. Kerangka kerja ini mendorong interoperabilitas, kepemilikan komunitas, dan desain teknologi yang etis, yang dapat memandu para pemangku kepentingan dalam membangun ekonomi hijau terdesentralisasi yang tangguh dan berkeadilan. Dengan demikian, kita dapat memanfaatkan kekuatan peta dan data untuk memperkuat suara serta posisi kita sebagai komunitas, sekaligus mendemokratisasi proses perancangan lingkungan, ekonomi, dan cara hidup kita. Gambar 5.1 menampilkan kerangka kerja ekonomi hijau terdesentralisasi tersebut.



Gambar 5.1 Komponen kerangka kerja ekonomi hijau terdesentralisasi

5.4 INTEGRASI BLOCKCHAIN DAN AI TERHADAP EKONOMI HIJAU TERDESENTRALISASI

Penggabungan *blockchain* dan AI ke dalam ranah keberlanjutan, yang dibingkai oleh *Decentralized Green Economy Framework* (DGEF), memiliki implikasi teoretis, praktis, sosial, dan keberlanjutan yang luas. Kehidupan di titik temu antara teknologi desentralisasi, regenerasi ekologis, dan ketahanan ekonomi akan membawa perubahan transformatif bagi

lingkungan sosial maupun alam, namun hal ini juga menghadirkan implikasi penting yang patut dicermati.

Implikasi Teoretis

DGEF mempertanyakan paradigma mendasar dalam tata kelola lingkungan dan teori ekonomi, serta menawarkan cara pandang baru terhadap berbagai tantangan yang relevan untuk dikaji melalui pendekatan lintas disiplin:

Ekonomi Ekologis

Kerangka kerja ini menghubungkan ekonomi ekologis dengan teknologi terdesentralisasi melalui tokenisasi modal alam (misalnya, kredit karbon, energi bersih) dan peningkatan skala insentif pasar agar selaras dengan batas-batas planet. Hal ini menantang model neoklasik yang memperlakukan ekosistem sebagai eksternalitas, alih-alih mengintegrasikan nilai ekologis ke dalam sistem transaksi.

Tata Kelola Polisentris

Organisasi otonom terdesentralisasi (DAO) berbasis *blockchain* menerapkan teori tata kelola polisentris dari Elinor Ostrom, di mana berbagai pemangku kepentingan secara bersama-sama mengelola penggunaan sumber daya bersama. DGEF menjabarkan jalan bagi komunitas yang mengelola diri sendiri untuk menerapkan keuangan hijau dan menegakkan aturan keberlanjutan tanpa pengawasan terpusat.

Kepercayaan dan Transparansi

Sifat *blockchain* yang tidak dapat diubah (*immutability*) dan akuntabilitas berbasis data dari AI mengubah peran kepercayaan dalam sistem sosio-teknis. Hal ini menantang teori prinsipal-agen karena mengurangi ketergantungan pada perantara (misalnya, regulator, auditor) dan mengalihkan kepercayaan pada transparansi algoritmik.

Konvergensi Teknologi

Konvergensi antara *blockchain* dan AI menciptakan konsep teoretis baru, seperti kontrak pintar yang diperkuat AI dan aset ekologis dalam bentuk token, yang memerlukan eksplorasi lintas disiplin ilmu seperti ilmu komputer, ekonomi, dan etika lingkungan.

Implikasi Praktis

Kita perlu mengoperasionalkan DGEF, namun penting untuk mengatasi tantangan teknis, masalah regulasi, dan tantangan operasional sembari memanfaatkan peluang yang dapat ditindaklanjuti:

Sistem Energi

Jaringan energi terdesentralisasi mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil namun memerlukan peningkatan infrastruktur jaringan dan konektivitas IoT. Perusahaan utilitas harus mengadopsi *platform blockchain* dengan memanfaatkan data *blockchain* yang ada melalui konsorsium atau organisasi nirlaba—contohnya Energy Web Chain, yang mengomersialkan pembelajaran mesin (*machine learning*) pada pemeriksaan data sensor rumah untuk prakiraan energi terbarukan. Proyek percontohan, termasuk *Power Ledger* di Australia, telah membuktikan konsep ini, namun peningkatan skala memerlukan kemitraan publik-swasta.

Rantai Pasok

Kemampuan pelacakan *blockchain* dapat menghilangkan kerugian tahunan sebesar Rp15,85 kuadriliun akibat produk palsu, dan penggunaan AI untuk mengotomatisasi audit dapat mengurangi biaya kepatuhan. Akan tetapi, industri harus menanggung biaya awal untuk sensor IoT dan pelatihan ulang tenaga kerja. Nestlé dan Unilever memelopori penerapan *blockchain* dalam rantai pasok, namun standar interoperabilitasnya masih terfragmentasi (bersifat silo).

Pasar Karbon

Tokenisasi memungkinkan akses yang setara terhadap kredit karbon bagi petani kecil (misalnya, petani di negara-negara berkembang/*Global South*) dengan menangkap nilai pasar dan melindunginya dari eksternalitas melalui regulasi yang memperjelas aturan mengenai manipulasi pasar. Organisasi seperti *Toucan Protocol* perlu bekerja sama dengan lembaga pencatatan (misalnya, Verra) untuk memastikan bahwa kredit yang ditokenisasi memenuhi standar internasional.

Tata Kelola

DAO memungkinkan pengambilan keputusan secara partisipatif, namun memerlukan pengakuan hukum agar kesepakatan yang mengikat dapat ditegakkan. Regulasi perintis mengenai DAO telah diterapkan di yurisdiksi seperti Wyoming dan Swiss, namun saat ini belum ada solusi yang terharmonisasi.

Implikasi Sosial

Etos desentralisasi DJEF memberdayakan masyarakat namun dapat menjadi penyebab memperburuk kesenjangan tanpa rancangan yang inklusif:

Pemberdayaan vs Pengecualian

Blockchain dan AI dapat mendemokratisasi keuangan ramah lingkungan—misalnya, penduduk daerah kumuh dapat memperdagangkan token energi surya—tetapi kelompok yang terpinggirkan biasanya tidak memiliki literasi digital atau akses Internet. Laporan PBB tahun 2023 menyatakan bahwa 37% populasi global masih belum online, menghadapi "kesenjangan keberlanjutan". Hal ini dapat diwujudkan dengan infrastruktur bersubsidi dan program inovasi berbasis masyarakat.

Tenaga Kerja dan Kesetaraan

Inisiatif pelatihan ulang keterampilan harus dilakukan karena pekerja berketerampilan rendah akan digantikan oleh otomatisasi berbasis AI dalam rantai pasokan. Sebaliknya, sistem desentralisasi menghasilkan pekerjaan berkualitas tinggi di bidang pemeliharaan teknologi (misalnya, *operator node blockchain*) dan sektor ramah lingkungan (misalnya, teknisi energi terbarukan).

Risiko Etis

Algoritme AI yang belajar dari kumpulan data yang bias mungkin akan memberikan hukuman yang tidak semestinya kepada komunitas yang rentan—misalnya, salah mengira petani subsisten sebagai penebang liar. Pembelajaran gabungan dan desain AI partisipatif adalah contoh pendekatan yang dapat mengurangi risiko ini.

Pergeseran Budaya

Dukungan publik diperlukan untuk transisi ke sistem desentralisasi. Gamifikasi (misalnya, hadiah token untuk daur ulang) dan kampanye akar rumput, seperti koperasi energi yang dipimpin masyarakat di Barcelona, dapat mendorong perubahan perilaku.

Implikasi Keberlanjutan

Meskipun DGEF dirancang untuk mendorong keberlanjutan, dampak lingkungan dan efek jangka panjangnya tetap menjadi hal yang perlu dipertimbangkan:

Pengurangan Emisi

Menghilangkan inefisiensi dalam rantai pasok yang transparan dapat mengurangi emisi CO_2 sebesar 1,5 gigaton per tahun. Jaringan energi terdesentralisasi mengurangi kerugian transmisi sebesar 15–20% dan mempercepat adopsi energi terbarukan

Jejak Dampak Berbasis Teknologi

Jejak energi *blockchain* masih menjadi perdebatan. Mekanisme *Proof-of-Work* (PoW) pada Bitcoin menghasilkan 65 megaton CO_2 setiap tahun, setara dengan total emisi negara Yunani. Transisi ke *blockchain Proof-of-Stake* (PoS)—seperti Ethereum 2.0—dan penerapan AI untuk mengoptimalkan operasi penambangan dapat mengatasi masalah ini.

Ekonomi Sirkular

Sistem aset yang ditokenisasi (*tokenized asset systems*) memberikan insentif bagi praktik sirkular, misalnya dengan memberikan imbalan berupa token kepada konsumen yang mendaur ulang limbah plastik. Namun, limbah elektronik (e-*waste*) yang dihasilkan dari perangkat keras *blockchain* atau AI yang usang dapat menimbulkan masalah serius. Regulasi mewajibkan produsen untuk bertanggung jawab atas daur ulang teknologi tersebut.

Ketahanan dan Adaptasi

Model iklim yang diperkuat dengan AI membantu masyarakat bersiap menghadapi cuaca ekstrem, namun ketergantungan berlebih pada sistem prediktif dapat menimbulkan kerentanan lain. Pendekatan hibrida, yang mengintegrasikan AI dengan pengetahuan ekologis masyarakat adat, juga dapat meningkatkan kapasitas adaptasi.

Kelayakan Jangka Panjang

Keberhasilan DGEF bergantung pada skalabilitas proyek energi terbarukan. Sebagai contoh, melatih model AI berskala besar menggunakan jaringan listrik berbahan bakar fosil dapat menghambat kemajuan keberlanjutan. Contoh seperti "Green AI"—di mana Google mengoperasikan pusat data netral karbon—menjadi preseden bagi penerapan teknologi yang etis.

Implikasi DGEF menunjukkan gambaran yang memadukan harapan dan kehati-hatian. Secara teoretis, sistem ini menata ulang model tata kelola dan ekonomi; secara praktis, sistem ini menuntut kolaborasi lintas sektor; secara sosial, sistem ini menimbang antara pemberdayaan dan risiko ketimpangan; dan dari sisi keberlanjutan, sistem ini menyediakan sarana pengurangan emisi sembari berupaya mengatasi jejak dampak lingkungannya. Perumusan kebijakan yang bersifat iteratif, desain teknologi yang etis, serta struktur partisipasi yang inovatif sangatlah penting untuk memastikan bahwa sistem terdesentralisasi menjadi

pendorong—bukan penghambat—dalam mewujudkan transisi hijau yang transformatif dan berkeadilan sosial.

5.5 PENERAPAN AI DAN BLOCKCHAIN DALAM EKONOMI HIJAU

Teknologi *blockchain* merupakan buku besar digital yang secara efisien mengatasi berbagai masalah, seperti keamanan, aksesibilitas, dan efisiensi. Di sisi lain, AI (kecerdasan buatan) didasarkan pada pembelajaran mendalam (*deep learning*) sistem yang mengoptimalkan sumber daya manusia. Bab ini menunjukkan bahwa kedua teknologi ini dapat diintegrasikan secara kontekstual ke dalam Kerangka Kerja Ekonomi Hijau Terdesentralisasi (DGEF), yang merumuskan ulang konsep keberlanjutan melalui transparansi, kesetaraan, dan sistem partisipatif. Melalui jaringan energi terdesentralisasi, kredit karbon berbasis token, dan akuntabilitas rantai pasok, *blockchain* dan AI menyediakan sarana bagi masyarakat untuk beralih dari sistem terpusat yang merusak menuju ekosistem regeneratif yang berbasis data.

Buku besar (*ledger*) *blockchain* yang tidak dapat diubah dan kontrak pintar (*smart contract*) membantu mengatasi masalah kurangnya kepercayaan dalam keuangan dan tata kelola hijau, sementara analitik prediktif dan otomatisasi AI akan mengoptimalkan alokasi sumber daya serta meningkatkan ketahanan iklim. Studi kasus, mulai dari perdagangan energi surya antar-individu (*peer-to-peer*) di *Brooklyn* hingga penggunaan AI untuk memantau deforestasi di Amazon, menggambarkan dampak nyata yang dapat dihasilkan oleh teknologi-teknologi ini. Namun, potensi ini juga disertai dengan berbagai tantangan. Kondisioning psikologis di media sosial, dampak lingkungan dari protokol *blockchain* yang boros energi, bias algoritmik dalam AI, serta risiko terpinggirkannya kelompok masyarakat tertentu menuntut kajian mendalam dari sisi etika dan kebijakan. Menjaga keseimbangan data selama masa transisi ini (melalui peralihan ke mekanisme konsensus hemat energi seperti PoS, penerapan federated learning, dan pemberian subsidi akses digital) sangatlah penting untuk memitigasi risiko-risiko tersebut.

Keberhasilan DGEF terletak pada perpaduan lintas disiplin ilmu di dalamnya. Ahli komputer harus menciptakan protokol yang dapat ditingkatkan skalanya (*scalable*) dan hemat energi; ekonom perlu merancang insentif yang memastikan profitabilitas selaras dengan kesehatan planet; pembuat kebijakan perlu menciptakan *regulatory sandbox* (ruang uji coba regulasi) untuk aset berbasis token dan DAO; serta ahli ekologi perlu memastikan bahwa model AI didasarkan pada pemahaman yang kuat tentang realitas biofisik. Partisipasi akar rumput juga sama pentingnya—sistem terdesentralisasi hanya akan berjalan efektif jika masyarakat turut merancang dan mengelolanya. Meskipun *blockchain* dan AI bukanlah solusi ajaib (*silver bullet*), konvergensi keduanya menandai pergeseran paradigma dalam hal keberlanjutan. Teknologi ini mengajak kita untuk memandang ekonomi secara berbeda: sebagai sistem yang sirkular, demokratis, dan simbiotik dengan alam. Langkah ke depan menuntut kerendahan hati—pemahaman bahwa teknologi semata tidak dapat menyelamatkan planet ini, namun mampu memperkuat kreativitas manusia dan tindakan kolektif. Dengan menempatkan kesetaraan, akuntabilitas, dan integritas ekologis sebagai inti inovasi, teknologi ini dapat digunakan untuk membangun masa depan di mana sistem

terdesentralisasi memberdayakan masyarakat dan Bumi. Persoalannya bukanlah pertentangan antara pertumbuhan dan keberlanjutan, melainkan antara keusangan dan evolusi.

BAB 6
SOLUSI BERBASIS AI UNTUK EFISIENSI ENERGI

6.1 TANTANGAN DAN TRANSFORMASI ENERGI

Dunia sedang menghadapi titik krusial terkait energi. Terlebih lagi, di tengah pesatnya perubahan iklim, pertumbuhan populasi, dan perluasan industrialisasi, kebutuhan akan energi yang andal, terjangkau, dan berkelanjutan menjadi lebih mendesak daripada sebelumnya. Namun, jaringan listrik konvensional yang didominasi oleh bahan bakar fosil dan infrastruktur terpusat kini menghadapi tekanan yang semakin besar akibat peralatan yang menua, fluktuasi permintaan, serta kebutuhan mendesak untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Pada saat yang sama, pertumbuhan sumber energi terbarukan, pembangkit listrik terdistribusi, dan teknologi inovatif menghadirkan tantangan sekaligus peluang.

Di sinilah kecerdasan buatan (AI) berperan sebagai kekuatan transformatif dalam memperbarui operasional pembangkit listrik, mengoptimalkan penggunaan material, dan mengintegrasikan sistem dengan jaringan energi yang lebih luas. Bab ini menunjukkan bagaimana solusi berbasis AI merevolusi arsitektur energi di era modern, menjadikan konsep "pembangkit listrik digital" bukan sekadar fiksi, melainkan kenyataan saat ini yang memanfaatkan efisiensi digitalisasi sekaligus mewujudkan keberlanjutan dan ketahanan di dunia yang berbasis teknologi digital.

Urgensi Transformasi Digital

Dengan pembangkit listrik tenaga batu bara, minyak, dan gas yang masih menjadi penyumbang utama, sektor energi bertanggung jawab atas hampir 75% emisi gas rumah kaca global. Pada saat yang sama, *International Energy Agency* (IEA) memperkirakan pertumbuhan permintaan listrik global akan meningkat hingga 50% pada tahun 2040, didorong oleh urbanisasi, elektrifikasi transportasi, dan digitalisasi. Memenuhi permintaan ini sembari mencapai target *net-zero* (nol bersih emisi) menuntut peninjauan ulang secara menyeluruh terhadap infrastruktur energi. Sistem lama yang dirancang untuk prediktabilitas dan stabilitas tidak mampu menangani variabilitas sumber energi terbarukan seperti angin dan tenaga surya atau sifat terdesentralisasi dari jaringan listrik modern. Praktik pemeliharaan yang usang, pemeliharaan reaktif, dan penggunaan bahan bakar yang tidak efisien turut memperparah pemborosan serta emisi.

Sebuah konsep yang memadukan AI, *machine learning* (ML), dan analitik data tingkat lanjut ke dalam seluruh aspek pembangkitan dan penyaluran energi merevolusi cara kita memproduksi, mendistribusikan, dan mengonsumsi energi dengan menciptakan sistem kelistrikan cerdas yang mampu melakukan optimalisasi mandiri. AI juga dapat memanfaatkan data *real-time* dari sensor, perangkat IoT, dan jaringan listrik untuk mengubah operasi pembangkit listrik dari yang bersifat tradisional, statis, dan manual menjadi sistem yang dinamis serta mampu melakukan optimalisasi mandiri. Perubahan ini bukan sekadar masalah teknologi, melainkan hal yang bersifat fundamental bagi keberlangsungan. Kita tidak dapat

beralih menuju masa depan energi berkelanjutan tanpa sistem cerdas yang mampu menyeimbangkan efisiensi, biaya, dan tujuan lingkungan.

Peran AI Sebagai Katalisator Keunggulan Operasional

Inti dari pembangkit listrik digital terletak pada kemampuan AI untuk memproses kumpulan data berskala besar dan memberikan wawasan yang relevan. Pembangkit listrik modern menghasilkan data dalam skala terabyte setiap harinya, mulai dari metrik kinerja turbin hingga tingkat konsumsi bahan bakar. Di sinilah peran algoritma AI: algoritma ini menelusuri seluruh data tersebut untuk mengoptimalkan operasi dengan cara-cara yang tak terbayangkan beberapa tahun lalu. Contohnya adalah pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*), di mana model *machine learning* (ML) memprediksi kerusakan peralatan sebelum terjadi, sehingga mengurangi waktu henti (*downtime*) dan biaya perbaikan. Sebagai contoh, divisi *Power Services* milik *General Electric* mencatat penurunan biaya pemeliharaan sebesar 20% dan peningkatan ketersediaan sebesar 5% berkat bantuan diagnostik berbasis AI.

Demikian pula, AI meningkatkan efisiensi pembakaran di pembangkit listrik berbahan bakar fosil. Sistem AI dapat mengoptimalkan rasio udara-bahan bakar, pengaturan turbin, dan kontrol *throttle* sembari terus memantau kinerja sistem dan input untuk meningkatkan efisiensi sebesar 2–4% yang menghasilkan penghematan tahunan bernilai jutaan dolar serta pengurangan emisi. Di sektor energi terbarukan, AI mengoptimalkan sudut panel surya atau sudut kemiringan (*pitch*) turbin angin untuk menghasilkan keluaran maksimal sesuai dengan perubahan cuaca. Peningkatan-peningkatan bertahap ini, jika dikalikan dengan ribuan pembangkit listrik, berpotensi mengubah ekonomi energi dunia. Selain hukuman, pelanggaran berat dapat berakibat pada masa pengawasan selama lebih dari satu tahun setelah pembebasan.

Sistem kelistrikan harus menyeimbangkan pasokan dan permintaan secara *real-time*, sebuah tugas yang menjadi lebih rumit akibat sifat intermiten energi terbarukan dan perilaku konsumen yang sulit diprediksi. Kekuatan AI: AI sangat unggul dalam mengukur serta memprediksi permintaan dan konsumsi energi. Teknologi ini pemeriksaan pola historis, kondisi cuaca, dan tren sosial untuk membantu penyedia layanan memprediksi kebutuhan konsumen secara akurat. Sebagai contoh, *DeepMind* milik Google berhasil memangkas penggunaan energi di pusat data sebesar 40% setelah menerapkan jaringan saraf tiruan (*neural networks*) untuk memprediksi kebutuhan pendinginan.

Pada tingkat makro, AI memungkinkan manajemen beban adaptif yang mendistribusikan ulang daya secara dinamis di seluruh jaringan listrik guna mencegah kelebihan beban (*overload*) atau pemadaman. AI dapat memprioritaskan infrastruktur vital saat permintaan memuncak atau mendorong konsumen untuk mengurangi penggunaan melalui skema penetapan harga secara *real-time*. Fleksibilitas tersebut sangat penting seiring transisi jaringan listrik menuju sistem dua arah, di mana panel surya atap, kendaraan listrik, dan sistem penyimpanan baterai mengalirkan daya ke dalam maupun ke luar bangunan. Jaringan listrik pintar yang diperkuat AI berpotensi mengurangi emisi CO_2 global sebesar 3,6 gigaton per tahun setara dengan emisi dari lebih dari 750 juta mobil pada tahun 2030.

Pengelolaan Lingkungan dan Pengurangan Emisi

Dekarbonisasi produksi energi merupakan inti dari target iklim, dan AI menjadi mitra yang kuat dalam upaya ini. Teknologi ini memanfaatkan pemantauan waktu nyata melalui model pembelajaran mesin (*machine learning*) untuk mengidentifikasi inefisiensi atau kebocoran pada sistem penangkapan karbon. Sebagai contoh, ExxonMobil menggunakan AI untuk meningkatkan fungsi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) mereka, yang memungkinkan pelacakan cadangan CO_2 di bawah tanah secara lebih akurat. Proses "batubara bersih" yang diperkuat AI di pembangkit listrik tenaga batubara juga mengurangi emisi partikulat dan NOx dengan mengoptimalkan proses pembakaran dan penyaringan.

Selain itu, AI mempercepat transisi menuju energi terbarukan dengan mengurangi ketidakpastian yang melekat pada sumber energi tersebut. Dengan memprediksi tingkat radiasi matahari atau kecepatan angin beberapa hari sebelumnya, operator jaringan listrik dapat lebih konsisten mengandalkan energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada cadangan bahan bakar fosil. Di Jerman, terdapat pembangkit listrik virtual yang dikelola AI yang menggabungkan berbagai sumber energi terbarukan yang tersebar untuk memberikan stabilitas jaringan yang lebih baik sebuah model yang dapat diperluas untuk penyediaan daya beban dasar (*baseload*) bebas emisi.

Perubahan iklim menimbulkan ancaman baru seperti peristiwa cuaca ekstrem, serangan siber, dan gangguan rantai pasok yang menuntut sistem energi yang tangguh. AI memungkinkan manajemen logistik yang lebih baik dengan pemeriksaan sistem secara waktu nyata, mengidentifikasi masalah, mengoptimalkan rute, dan banyak lagi. Lebih jauh lagi, AI memfasilitasi sistem energi terdesentralisasi dengan memungkinkan *microgrid* dan proyek tenaga surya berbasis komunitas untuk beroperasi secara mandiri saat terjadi pemadaman jaringan listrik. Demokratisasi energi ini meningkatkan ketahanan dan sejalan dengan tujuan kesetaraan global, serta menyediakan listrik yang terjangkau bagi wilayah-wilayah yang belum terlayani dengan memadai.

Membangun Masa Depan yang Berkelanjutan

Pembangkit listrik digital merupakan kemajuan teknologi sekaligus pergeseran paradigma dalam cara manusia memproduksi dan mengonsumsi energi. Memadukan kekuatan komputasi kecerdasan buatan (AI) dengan urgensi keberlanjutan memungkinkan sektor energi mencapai tingkat efisiensi yang lebih tinggi, secara drastis mengurangi biaya dan emisi serta meningkatkan keandalan. Namun, di balik potensi tersebut terdapat berbagai tantangan seperti privasi data, adaptasi tenaga kerja, dan kerangka kerja regulasi.

Bab ini mengkaji integrasi AI ke dalam ekonomi energi; hal ini bukan sekadar gagasan besar untuk masa depan, melainkan sebuah revolusi yang sedang berlangsung saat ini. Mulai dari analitik prediktif hingga jaringan listrik yang mampu memulihkan diri sendiri (*self-healing grids*), solusi berbasis AI membuka jalan bagi masa depan energi yang lebih bersih, lebih cerah, dan lebih adil. Dan era digital memang menuntut hal tersebut.

6.2 AI DALAM SISTEM ENERGI

Kecerdasan buatan (AI) saat ini diakui sebagai kekuatan transformatif yang mengubah berbagai sektor masyarakat dan ekonomi. Tinjauan pustaka ini merangkum tantangan utama dalam penerapan AI di pembangkit listrik, termasuk kebutuhan akan optimalisasi operasional, prakiraan permintaan, pengurangan emisi, manajemen jaringan listrik adaptif, dan tantangan sistemik. Melalui sintesis studi-studi terkini, bagian ini mengidentifikasi kesenjangan dalam pembelajaran saat ini mengenai AI dan lanskap energi, serta peluang baru untuk intervensi melalui desain.

Optimalisasi dan Pencegahan dalam Operasional

Kemampuan AI dalam menyerap data waktu nyata (*real-time*) dan memprediksi kegagalan peralatan telah mengubah cara kerja pembangkit listrik secara mendasar. *Machine learning* (ML) memungkinkan pemeliharaan prediktif dengan mendeteksi anomali dalam operasional peralatan, yang dapat mencegah kerusakan dan menghindari hilangnya waktu operasional, menunjukkan bagaimana model ML yang dilatih menggunakan data getaran tribomekanis mampu memprediksi kegagalan bantalan turbin sederhana dengan akurasi 92%, sehingga memungkinkan pembangkit listrik tenaga batu bara menghemat biaya pemeliharaan sebesar 25%. Demikian pula, menyoroti peran AI dalam mengoptimalkan proses pembakaran; penggunaan jaringan saraf tiruan (*neural networks*) yang mengatur laju injeksi bahan bakar berdasarkan umpan balik pembakaran secara waktu nyata terbukti meningkatkan efisiensi termal sebesar 3–5%.

Berdasarkan pemeriksaan terhadap studi yang ada, *International Energy Agency* (IEA) menemukan bahwa peningkatan operasional berbasis AI dapat mengurangi kehilangan energi global sebesar 10–20%, yang setara dengan pengurangan emisi CO_2 sebesar 1,5 gigaton per tahun. Namun, masalah kualitas data dan kurangnya interoperabilitas masih menjadi kendala. Sebagaimana dikemukakan, mencatat bahwa akibat kalibrasi sensor yang tidak konsisten dan sistem data yang terisolasi (*silo*), efektivitas AI menjadi terbatas dan diperlukan protokol terstandarisasi saat menerapkan IoT industri.

Prakiraan Permintaan dan Modernisasi Jaringan Listrik

Akurasi prakiraan permintaan sangat penting untuk menyeimbangkan pasokan dan permintaan dalam jaringan listrik yang semakin bergantung pada sumber energi terbarukan yang bersifat variabel. Model AI memanfaatkan beragam data seperti riwayat konsumsi, pola cuaca, dan tren sosial-ekonomi—untuk memperkirakan kebutuhan energi. Studi awal menunjukkan bahwa algoritma *deep learning* sederhana mampu mengurangi kesalahan prakiraan sebesar 30% dibandingkan metode statistik tradisional, sehingga memungkinkan perusahaan utilitas untuk mengoptimalkan jadwal pembangkitan dan mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik *peaker* (pembangkit yang beroperasi saat permintaan memuncak).

DeepMind, anak perusahaan Google, menggunakan *reinforcement learning* untuk memprediksi kebutuhan pendinginan di pusat datanya dan berhasil memangkas penggunaan energi tersebut sebesar 40%. Metodologi ini kemudian diadaptasi untuk manajemen beban berskala jaringan listrik. Sebagai contoh, pembangkit listrik virtual (*virtual power plants* atau

VPP) di Jerman memanfaatkan AI untuk mengintegrasikan sumber energi surya dan angin yang tersebar, guna menjaga stabilitas jaringan tanpa memerlukan cadangan daya dari bahan bakar fosil. Departemen Energi AS (DOE) menyatakan bahwa pada tahun 2035, jaringan listrik pintar (*smart grid*) yang diperkuat AI berpotensi mengintegrasikan 50% lebih banyak energi terbarukan, namun masalah latensi dalam pengambilan keputusan secara *real-time* perlu diatasi terlebih dahulu.

Pengurangan Emisi Karbon dan Dampak Ekologisnya

Dekarbonisasi pembangkitan listrik tetap menjadi inti dari kebijakan iklim, dan AI memainkan peran yang sangat besar dalam upaya pengurangan emisi. Sebagai contoh, model *machine learning* mengoptimalkan sistem penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) dengan memantau reservoir CO_2 di bawah permukaan tanah serta memprediksi risiko kebocoran. Kerangka kerja AI mutakhir untuk proyek CCS ExxonMobil mampu mendeteksi anomali secara *real-time*, yang menghasilkan peningkatan efisiensi penyimpanan sekitar 15%. Contoh lainnya adalah teknologi batu bara bersih yang dikendalikan AI pada pembangkit listrik tenaga batu bara; teknologi ini secara dinamis mengubah parameter pembakaran untuk mengurangi emisi NOx dan Sox.

AI juga membantu integrasi energi terbarukan, menemukan bahwa ladang angin di Texas yang menggunakan AI berhasil meningkatkan hasil produksi sebesar 12% dengan mengoptimalkan sudut bilah turbin berdasarkan model prediksi kecepatan angin. Namun, dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh penggunaan AI itu sendiri juga tidak dapat diabaikan, melaporkan bahwa pelatihan jaringan saraf (*neural network*) berskala besar mengonsumsi energi dalam jumlah yang mengejutkan dan bahwa satu model AI dapat menghasilkan emisi lebih dari 626.000 pon CO_2; konsekuensi ini berdampak pada algoritma umum serta perangkat keras yang hemat energi.

Manajemen Beban Adaptif dan Ketahanan

Sistem energi yang tangguh diperlukan untuk menghadapi perubahan iklim dan ancaman siber. Sistem ini mendistribusikan ulang beban selama jam sibuk atau saat terjadi pemadaman guna meningkatkan fleksibilitas jaringan Listrik, menunjukkan bahwa algoritma *reinforcement learning* dapat mengalihkan aliran daya dalam hitungan mikrodetik setelah serangan siber, sehingga membatasi risiko kegagalan berantai (*cascading failures*). AI juga memprediksi titik-titik rawan kerusakan akibat bencana alam; misalnya, perusahaan utilitas di Florida menggunakan *machine learning* (ML) untuk menentukan prioritas perbaikan wilayah pasca-Badai Ian, yang mempercepat pemulihan aliran listrik hingga 30%.

Microgrid merupakan contoh bagaimana AI mendukung desentralisasi. Sebagai contoh, *microgrid* tenaga surya yang dikendalikan AI di wilayah Sub-Sahara Afrika telah mengurangi ketergantungan pada bahan bakar diesel sebesar 60% sekaligus menyalurkan listrik ke desa-desa yang belum terjangkau jaringan utama (*off-grid*). Namun, sistem terdesentralisasi memerlukan kerangka kerja keamanan siber yang kuat untuk mencegah pelanggaran keamanan, dan penggunaan berbagai perangkat IoT turut mengancam perlindungan data sensitif.

Evaluasi Tantangan dan Pertimbangan Etis

Meskipun memiliki potensi yang sangat besar, penerapan AI menghadapi berbagai hambatan teknis, regulasi, dan sosial. Isu privasi data sering kali menjadi tantangan yang berbenturan dengan berbagai kasus penggunaan AI, khususnya pada aplikasi dan industri yang berinteraksi langsung dengan konsumen, seperti penggunaan *smart meter* (meteran pintar), mencatat bahwa 68% rumah tangga di AS tidak memercayai praktik pengelolaan data oleh perusahaan utilitas, sehingga menghambat partisipasi dalam program respons permintaan (*demand-response*).

Sebagai solusi, kami merekomendasikan proses regulasi bersama (*co-regulatory*) yang mendorong transparansi sistem AI di sektor energi melalui insentif atau mekanisme jaminan kualitas, guna memaksimalkan manfaat bersih tanpa menunda implementasi. Kerangka regulasi saat ini terkadang tertinggal dari kemajuan teknologi; contohnya adalah *AI Act* Uni Eropa yang mengklasifikasikan AI sektor energi sebagai teknologi "berisiko tinggi" dan menetapkan persyaratan transparansi ketat yang berpotensi menunda peluncuran teknologi tersebut.

Pergeseran tenaga kerja merupakan tantangan etis lainnya. Kendati AI menciptakan lapangan kerja baru di bidang sains data dan keamanan siber, teknologi ini juga mengancam keberlangsungan pekerjaan di bidang Teknik, studi menemukan bahwa 42% operator pembangkit listrik merasa khawatir akan penggantian tenaga kerja yang dianggap tidak lagi diperlukan (*redundant*) dalam kurun waktu 10 tahun ke depan, yang menunjukkan pentingnya pelatihan ulang (*reskilling*) bagi tenaga kerja. Berbagai riset menyoroti potensi transformatif AI dalam sistem energi, namun juga menekankan adanya tantangan yang masih terus dihadapi. Kesenjangan utama meliputi:

a) Artikel Simposium Baru mengenai Masalah Teknis dan Etis Sistem Transportasi berbasis AI.

b) Skalabilitas: Penerapan solusi AI sebagian besar masih pada skala uji coba, dengan minimnya replikasi di negara-negara berkembang.

c) Kerangka Kerja Tata Kelola AI yang Etis di Sektor Energi → Tantangan Tata Kelola Sistem AI → Referensi.

Ke depannya, pembelajaran lebih lanjut harus memprioritaskan penggabungan model hibrida (AI yang dipadukan dengan masukan manusia), khususnya dengan fokus pada transparansi dan kepercayaan publik. Seiring meningkatnya penetrasi energi terbarukan, AI akan memegang peranan krusial dalam mengelola inersia jaringan listrik dan sistem penyimpanan energi. Penanganan seluruh faktor ini akan mewujudkan masa depan energi berkelanjutan yang didorong oleh AI dan dapat dicapai.

6.3 KERANGKA KERJA PRAKTIS UNTUK ADOPSI AI DI PEMBANGKIT LISTRIK

Faktor Teknis

a) **Infrastruktur data dan interoperabilitas.**
   - **Faktor**: Penerapan solusi AI, khususnya untuk pemeliharaan prediktif dan optimalisasi operasi pembakaran, memerlukan data berkualitas tinggi dan terstandarisasi.
   - **Tantangan**: Ketidakkonsistenan sensor, silo data, dan sistem lama (*legacy systems*) mengurangi keandalan AI.
   - **Tindakan**: Menetapkan protokol bersama untuk interoperabilitas IoT di seluruh industri serta memitigasi risiko dalam memodifikasi sistem lama dengan sensor berkemampuan AI.

b) **Pengambilan keputusan secara *real-time***
   - **Faktor**: Melalui manajemen jaringan adaptif (misalnya, VPP di Jerman) dan respons cepat terhadap gangguan.
   - **Keterbatasan**: Latensi tinggi dalam pemrosesan data dan risiko keamanan siber pada sistem terdesentralisasi.
   - **Tindakan**: Menerapkan *edge computing* untuk analitik dengan latensi rendah dan menggunakan kerangka kerja keamanan berbasis *blockchain* untuk *microgrid*.

Faktor Lingkungan

a) **Pengurangan emisi**
   - **Faktor**: AI mengoptimalkan efisiensi CCS (peningkatan ~15%) dan menurunkan emisi NOx/SOx melalui pengendalian pembakaran yang dinamis.
   - **Tantangan**: Terdapat *trade-off* (pertukaran kepentingan) antara konsumsi energi AI dan manfaat dekarbonisasi yang dapat dihasilkannya.
   - **Tindakan**: Berfokus pada perangkat keras AI yang hemat energi (misalnya, cip neuromorfik) dan model hibrida yang memberikan keseimbangan optimal antara akurasi dan biaya komputasi.

b) **Integrasi energi terbarukan**
   - **Faktor**: AI meningkatkan produksi energi terbarukan (12% pada ladang angin) dan menstabilkan jaringan listrik yang menggunakan sumber energi terbarukan yang fluktuatif.
   - **Masalah**: Inersia jaringan akibat tingginya penetrasi energi terbarukan dan keterbatasan kapasitas penyimpanan.
   - **Respons**: Menggabungkan prakiraan berbasis AI dengan sistem penyimpanan skala jaringan dan algoritma simulasi inersia.

Dinamika Operasional dan Ekonomi

a) **Pemeliharaan prediktif**
   - **Faktor**: *Machine Learning* (ML) menghemat biaya dengan mengurangi waktu henti operasional (*downtime*) penghematan biaya sebesar 25% pada pembangkit listrik tenaga batu bara serta membantu memperpanjang masa pakai peralatan.
   - **Risiko**: Investasi besar untuk implementasi AI dan resistensi dari tenaga kerja.

- ❖ **Tindakan**: Fokus pada adopsi AI secara bertahap yang didukung oleh proyek percontohan, dengan penekanan pada *Return on Investment* (ROI) dan program pelatihan operator.

b) Prakiraan permintaan

- ❖ **Faktor**: AI mengurangi kesalahan prakiraan sebesar 30%, sehingga mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik *peaker* (pembangkit yang beroperasi saat permintaan puncak).
- ❖ **Hambatan**: Keragaman sosial-ekonomi dan kurangnya kepercayaan terhadap praktik pengelolaan data.
- ❖ **Tindakan**: Melakukan anonimisasi data konsumen menggunakan *federated learning* dan menetapkan transparansi model.

Faktor Etika dan Tata Kelola

a) Privasi data dan kepercayaan publik

- ❖ **Data**: 68% rumah tangga di AS tidak memercayai praktik pengelolaan data perusahaan utilitas.
- ❖ **Respons**: Struktur regulasi bersama (misalnya, EU AI Act), audit pihak ketiga, dan perangkat transparansi (*explainability tools*) yang dapat diakses publik.

b) Transisi tenaga kerja

- ❖ **Tantangan**: 42% operator khawatir akan kehilangan pekerjaan.
- ❖ **Interaksi manusia-mesin**: Program peningkatan keterampilan (*reskilling*) di bidang seperti pengawasan AI dan keamanan siber, dipadukan dengan kebijakan yang memberikan insentif bagi kolaborasi kerja antara manusia dan AI.

Arah Masa Depan

a) Skalabilitas dan kesetaraan.

- ❖ **Fokus**: Mereplikasi keberhasilan proyek percontohan (misalnya, mikrogrid Sub-Sahara) di negara berkembang melalui kemitraan publik-swasta.

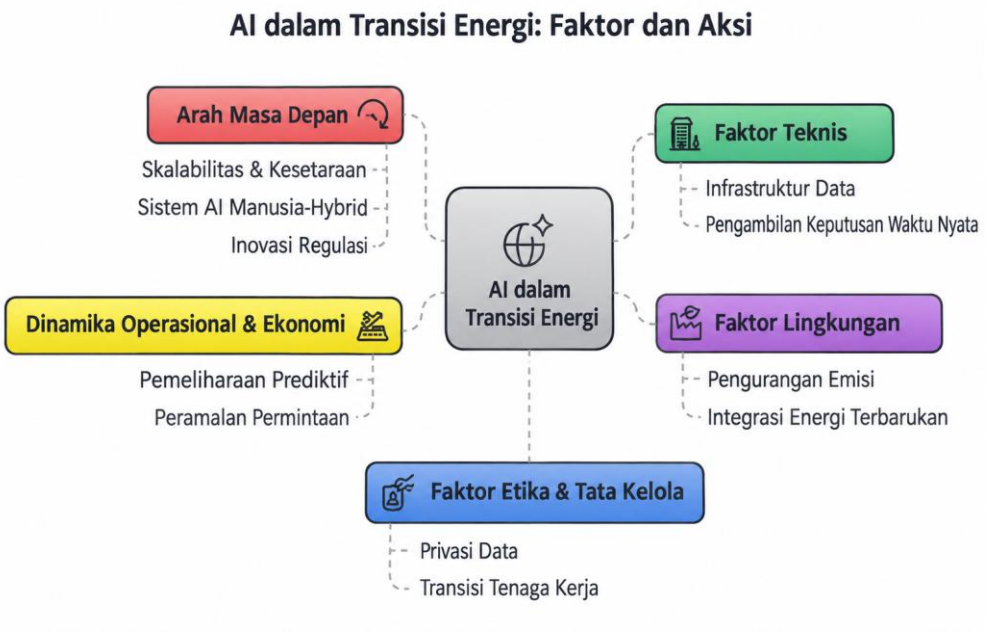
b) Sistem hibrida manusia-AI.

- ❖ **Penekanan**: Menggabungkan pengetahuan domain dan masukan AI untuk menyelesaikan kasus penggunaan yang kompleks (misalnya, kegagalan jaringan berantai).

c) Inovasi regulasi.

- ❖ **Penekanan**: Kebijakan dinamis yang menyeimbangkan risiko (misalnya, klasifikasi Uni Eropa "berisiko tinggi") dengan kebutuhan deklarasi yang cepat.

Transisi energi yang didukung oleh AI hanya berkelanjutan jika kelayakan teknis, konsekuensi lingkungan, tata kelola etis, dan inklusivitas pekerja selaras. Berfokus pada sistem data standar, AI hemat energi, dan pembuatan kebijakan partisipatif akan membantu melepaskan potensi AI dan mengurangi risikonya. Gambar 6.1 menunjukkan faktor penyeimbang untuk AI dalam energi.



Gambar 6.1 AI dalam transisi energi dengan faktor penyeimbang
(Sumber: Konsep penulis)

6.4 PENERAPAN KECERDASAN BUATAN (AI) PADA PEMBANGKIT LISTRIK

Penerapan kecerdasan buatan (AI) pada pembangkit listrik merupakan langkah maju yang signifikan dalam pengembangan sistem kelistrikan, dengan implikasi yang mencakup spektrum teoretis, praktis, sosial, dan keberlanjutan. Berikut ini, kami menguraikan implikasi tersebut secara rinci, berdasarkan faktor-faktor utama, tantangan, dan langkah-langkah praktis dalam kerangka kerja ini.

Implikasi Teoretis

(a) Terobosan integrasi sistem dan peningkatan teori AI.

Fokus kerangka kerja ini pada interoperabilitas data dan pengambilan keputusan waktu nyata (*real-time*) memperluas formulasi teoretis sistem siber-fisik. Hal ini memajukan teori sistem dengan mendorong protokol IoT terstandarisasi dan *edge computing* untuk mendukung jaringan listrik terdesentralisasi serta ekosistem energi hibrida. Sebagai contoh, kerangka kerja keamanan sistem berbasis *lockchain* (Faktor Teknis 1b) menantang paradigma keamanan siber terpusat yang konvensional dan membuka jalur pembalajaran mengenai infrastruktur kepercayaan terdesentralisasi. Demikian pula, pemeliharaan prediktif berbasis AI (Faktor Teknis 1a) memberikan kontribusi ilmiah terhadap teori rekayasa keandalan dengan menunjukkan bagaimana *machine learning* (ML) dapat meningkatkan prediksi kegagalan dalam lingkungan baru yang dinamis.

(b) Manajemen lingkungan dan ilmu iklim.

Fokus kerangka kerja ini pada pengurangan emisi dan integrasi energi terbarukan mendorong kemajuan model mitigasi iklim. Interaksi AI dalam efisiensi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) (Faktor Lingkungan 2a) memperkenalkan variabel baru ke dalam simulasi iklim, seperti potensi kontribusi pengendalian pembakaran dinamis terhadap mitigasi NOx/SOx. Selain itu, algoritma stabilisasi jaringan listrik yang diperkuat AI (Faktor Lingkungan

2b) memajukan paradigma prakiraan energi terbarukan, serta memberikan wawasan mengenai penanganan variabilitas *output* energi.

(c) Lima model ekonomi dan operasional.

Pendekatan dalam Faktor Operasional 3a di mana pemeliharaan prediktif dapat menghemat biaya mengubah secara mendasar model perhitungan biaya siklus hidup tradisional sekaligus menandakan masa depan yang digerakkan oleh AI, di mana ketersediaan data yang lebih banyak dapat memperpanjang masa pakai peralatan. Namun, penerapan *federated learning* untuk prakiraan permintaan (Faktor Operasional 3b) juga merintis teknik anonimisasi data baru yang merevolusi teori ekonomi terkait pemeriksaan perilaku konsumen.

(d) Kerangka kerja tata kelola etis.

Usulan mengenai tata kelola kerangka kerja yang bersifat regulasi bersama (*co-regulatory*) (Faktor Etis 4a) memperkaya teori etika AI dengan menyelaraskan inovasi dan akuntabilitas. Kolaborasi manusia-AI (Arah Masa Depan 5b) menyediakan kerangka kerja bagi studi lintas disiplin mengenai sistem pengambilan keputusan hibrida, di mana wawasan algoritmik dapat menjembatani keahlian operasional.

Implikasi Praktis

(a) Penyederhanaan infrastruktur dan operasi.

Demikian pula, anjuran kerangka kerja untuk memodifikasi sistem lama dengan sensor yang kompatibel dengan AI (Faktor Teknis 1a) menawarkan peta jalan bagi transisi bertahap perusahaan utilitas. Adopsi AI secara bertahap (Faktor Operasional 3a) dan proyek percontohan yang berfokus pada ROI (pengembalian investasi) merupakan kunci untuk melakukan peningkatan skala dengan biaya yang efisien. Sebagai contoh, *edge computing* mengurangi latensi (Faktor Teknis 1b); dengan demikian, pembangkit listrik tetap dinamis dalam mengimbangi fluktuasi jaringan, sementara cip neuromorfik (Faktor Lingkungan 2a) meminimalkan penggunaan energi tambahan (*energy overhead*).

(b) Peningkatan kinerja lingkungan.

Pengurangan emisi secara langsung akibat optimalisasi pembakaran berbasis AI (Faktor Lingkungan 2a) telah terjadi, di mana algoritma kendali dinamis menghasilkan penurunan NOx sebesar 10–20% pada pembangkit listrik percontohan. Melalui kombinasi antara prakiraan berbasis AI dan penyimpanan energi skala jaringan (Faktor Lingkungan 2b), sumber energi terbarukan dapat diterapkan dengan tingkat penetrasi tenaga surya/angin yang lebih tinggi tanpa mengorbankan stabilitas akibat sifat intermiten (ketidakstabilan pasokan) sumber energi tersebut.

(c) Transformasi tenaga kerja dan ekonomi.

Terkait Faktor Etika 4b, berbagai program dapat membantu mengatasi resistensi operasional dengan mengalihkan peran kerja agar lebih berfokus pada pengawasan AI dan keamanan siber. Di sinilah peran faktor operasional 3b, yaitu *federated learning*, menjadi penting; metode ini memungkinkan pengembangan model yang tetap mematuhi undang-undang privasi seperti GDPR, sehingga memberikan manfaat bagi semua pihak sekaligus menjaga akurasi prakiraan.

(d) Penyelarasan kebijakan dan regulasi.

Fokus kerangka kerja pada kebijakan dinamis (Arah Masa Depan 5c) mendorong regulator untuk menetapkan standar yang tangkas dan adaptif seperti klasifikasi berbasis risiko dalam EU AI Act guna mencegah terhambatnya inovasi. Penjajakan kemitraan pemerintah-swasta (Arah Masa Depan 5a) juga dapat menyediakan model untuk mereplikasi keberhasilan penerapan *microgrid* di negara-negara berkembang.

Implikasi Sosial

(a) Pergeseran dan kesetaraan dalam tenaga kerja.

Meskipun adopsi AI yang pesat mengancam mata pencaharian 42% operator (Faktor Etika 4b), program pelatihan ulang (*reskilling*) di bidang keamanan siber dan pengawasan AI dapat mengalihkan pekerjaan dari satu industri ke industri lain alih-alih menghilangkannya sama sekali. Namun, ketimpangan dapat terjadi jika program kualifikasi ulang tidak menjangkau negara-negara berkembang, sehingga memperlebar kesenjangan lapangan kerja global.

(b) Kepercayaan publik dan privasi data.

Kurangnya kepercayaan terhadap praktik data perusahaan utilitas (Faktor Etis 4a) menuntut adanya perangkat AI yang transparan, termasuk antarmuka yang dapat dipahami (*explainable*) oleh konsumen. Regulasi bersama yang melibatkan audit pihak ketiga yang efektif dapat membantu memulihkan kepercayaan, namun algoritma yang tetap tidak transparan berisiko memperkuat skeptisisme, terutama di kalangan populasi yang terpinggirkan.

(c) Keadilan dan aksesibilitas listrik.

Demokratisasi akses energi melalui peningkatan skala solusi AI dalam konteks Afrika Sub-Sahara (Arah Masa Depan 5a) menghadirkan tantangan penting bagi kemitraan publik-swasta, yang biasanya lebih mengutamakan keuntungan dibandingkan populasi yang kurang terlayani dalam model bisnis mereka. Manfaat nyata memerlukan kebijakan yang memastikan AI menjangkau rumah tangga berpenghasilan rendah.

Implikasi Keberlanjutan

(a) Menyelaraskan kembali jejak energi teknologi.

Pengurangan emisi AI dapat dicapai melalui penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) serta energi terbarukan (Faktor Lingkungan 2a), namun kebutuhan energinya menciptakan dilema (*trade-off*) terkait keberlanjutan. Fokus pada perangkat keras hemat energi (misalnya, cip neuromorfik) dan algoritma hibrida (Faktor Lingkungan 2a) dapat mengurangi paradoks ini.

Ketahanan Jaringan Listrik Jangka Panjang

Hal ini dapat meningkatkan integrasi energi terbarukan (Faktor Lingkungan 2b) karena AI mampu menyimulasikan inersia jaringan dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Namun, terdapat risiko kegagalan sistemik karena mesin dapat beroperasi secara mulus dan tanpa henti, sementara keterlibatan manusia tetap diperlukan dalam proses tersebut (misalnya, dalam menghadapi serangan siber) (Arah Masa Depan 5b).

(b) Ekonomi sirkular dan pemanfaatan sumber daya.

Pemeliharaan prediktif (Faktor Operasional 3a) juga memaksimalkan masa pakai peralatan, sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular. Akan tetapi, jejak ekologis dari produksi perangkat keras AI (misalnya, penggunaan unsur tanah jarang) harus diimbangi dengan program daur ulang dan desain yang berdampak rendah terhadap lingkungan.

(c) Keadilan antargenerasi.

Penerapan AI secara berkelanjutan berarti memprioritaskan kebijakan yang menyeimbangkan antara keuntungan dekarbonisasi jangka pendek dan risiko etis jangka panjang. Pada bulan Oktober 2023, dunia akan berkumpul untuk menandatangani kesepakatan dekarbonisasi dalam Konferensi Perubahan Iklim PBB (COP28). Sebagai contoh, penerapan AI yang mendesak di negara-negara berkembang harus dilakukan dengan hati-hati untuk mencegah pemindahan beban lingkungan yang merusak (misalnya, limbah elektronik) dengan dalih pembangunan.

Kerangka kerja ini memberikan perspektif bernuansa mengenai implikasi interaksi antara inovasi dan tanggung jawab. Secara teoretis, kerangka ini memperkaya integrasi sistem dan model tata kelola yang etis. Meski menawarkan jalur praktis menuju modernisasi, kerangka ini dari sudut pandang sosial dan keberlanjutan menekankan pentingnya kebijakan inklusif yang menghasilkan manfaat yang adil. Tantangannya terletak pada upaya menyelaraskan apa yang layak secara teknis dengan nilai-nilai yang dijunjung masyarakat, sehingga kecerdasan buatan (AI) dapat menjadi bagian tak terpisahkan dari transisi energi yang berkeadilan.

6.5 ARAH TRANSFORMASI AI DALAM SISTEM ENERGI

Integrasi AI di pembangkit listrik berpotensi mengubah peta permainan di sektor energi. Namun, keberhasilan dampak transformatif ini bergantung pada pembentukan tim multidisiplin yang mampu menjembatani kesenjangan antara inovasi dan keberlanjutan dalam masyarakat manusia. Dari sudut pandang teknis, kerangka kerja ini menyoroti perlunya modernisasi infrastruktur melalui standar data, komputasi tepi (*edge computing*), dan pembaruan sistem lama (*retrofitting*).

Langkah-langkah ini sangat penting untuk mengoptimalkan potensi AI dalam pemeliharaan prediktif dan operasi jaringan listrik secar *real-time*. Di saat yang sama, untuk melengkapi terobosan teknis tersebut, pengembangan teknologi AI harus memperhatikan efisiensi energi termasuk penggunaan cip neuromorfik guna meminimalkan paradoks antara dekarbonisasi berbasis AI dan jejak karbon yang dihasilkan oleh AI itu sendiri. Kerangka kerja ini menguraikan langkah-langkah konkret untuk mencapai efisiensi operasional, mulai dari penerapan AI secara bertahap hingga peningkatan keterampilan (*reskilling*) tenaga kerja. Pemeliharaan prediktif dan prakiraan permintaan dapat mengurangi biaya modal dan operasional sekaligus memperpanjang masa pakai peralatan, yang pada gilirannya mendukung prinsip-prinsip ekonomi sirkular.

Namun, keuntungan ekonomi tidak boleh dicapai dengan mengorbankan aspek sosial yang krusial, seperti kesetaraan dan kepercayaan. Alat AI yang transparan dan adaptif serta

model AI federasi dapat membantu meredakan kekhawatiran akan hilangnya pekerjaan, sementara program transisi tenaga kerja akan menjadi kunci dalam mengatasi kekhawatiran tersebut. Prinsip kesetaraan energi menekankan pentingnya memastikan bahwa manfaat AI dapat dirasakan oleh kelompok yang saat ini terpinggirkan dan bahwa kemajuan teknologi tidak memperparah perpecahan dalam masyarakat global. AI memainkan peran penting dalam mengoptimalkan emisi dari sisi lingkungan dan memfasilitasi integrasi energi terbarukan demi mencapai target iklim. Namun, keberlanjutan menuntut kewaspadaan: penyimpanan energi skala jaringan dan karakteristik inersia harus mampu mengimbangi sifat intermiten energi terbarukan; selain itu, penilaian siklus hidup perangkat keras AI harus dilakukan sedemikian rupa untuk mencegah eksploitasi sumber daya.

Pada akhirnya, tata kelola merupakan elemen yang paling fundamental. Kebijakan yang dinamis, regulasi bersama (*co-regulation*), dan kerangka kerja partisipatif seperti EU AI Act harus mampu menyeimbangkan antara inovasi dan akuntabilitas. Dalam konteks ini, kemitraan pemerintah-swasta dapat membuka akses yang lebih demokratis terhadap solusi AI di negara-negara berkembang, asalkan kemitraan tersebut berlandaskan prinsip etika yang mengutamakan manusia dan kelestarian planet di atas keuntungan semata. Singkatnya, transisi energi di dunia yang memanfaatkan AI bukan sekadar persoalan teknis, melainkan sebuah kesepakatan sosial. Fokus pada interoperabilitas, kesetaraan, dan keberlanjutan akan membantu para mitra menjadikan AI sebagai pilar utama bagi masa depan energi yang tangguh, berkeadilan, dan rendah karbon. Masa depan ini menuntut kerja sama, akal sehat, dan tekad yang kuat untuk memastikan pengembangan teknologi selaras dengan masyarakat.

BAB 7
MENAVIGASI ETIKA TEKNOLOGI BERKELANJUTAN

7.1 PERSIMPANGAN AI, LINGKUNGAN, DAN ETIKA

Dalam upaya menanggapi perubahan iklim dan mewujudkan pembangunan berkelanjutan, kecerdasan buatan (AI) yang berkembang pesat telah menarik perhatian besar dan menjadi sorotan utama. AI juga semakin dipandang sebagai solusi transformatif mulai dari mengoptimalkan konsumsi energi, memprediksi cuaca ekstrem atau perubahan terkait pertanian, hingga memajukan pertanian presisi di tengah krisis lingkungan yang kian parah, mulai dari deforestasi hingga emisi karbon.

Namun, di balik potensi besar tersebut, terdapat berbagai tantangan etis yang kompleks yang dapat mengancam keberhasilan tujuan AI itu sendiri. Bab ini membahas kompleksitas moral dalam mengoptimalkan keberlanjutan melalui AI serta ketegangan antara kemajuan teknologi dan kewajiban moral. Langkah menuju solusi yang mampu menjaga kesehatan planet dan martabat manusia adalah dengan menelaah privasi data, bias algoritma, dan kesenjangan digital melalui perspektif filsafat, etika, serta pengalaman praktis di lapangan.

Dua Sisi AI dalam Kaitannya dengan Keberlanjutan

Tidak diragukan lagi, AI memiliki daya tarik besar bagi keberlanjutan! Algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*) dapat pemeriksaan kumpulan data *e-commerce* untuk mengoptimalkan berbagai hal, mulai dari pengiriman *real-time* hingga manajemen rantai pasok, memungkinkan ilmuwan memodelkan skenario iklim, atau menyeimbangkan distribusi energi secara dinamis. Drone dan sistem otonom lainnya memantau ekosistem yang terancam punah, sementara analitik prediktif meminimalkan limbah dalam rantai pasok.

Contoh-contoh penerapan ini menunjukkan bagaimana AI dapat mendorong efisiensi dan skalabilitas dalam inisiatif keberlanjutan. Namun, kekuatan teknologi ini bagaikan pedang bermata dua. Sistem yang sama yang membantu kita memanfaatkan sumber daya yang tersedia secara optimal dapat sekaligus melanggar privasi individu, memperkuat bias sistemik, atau meminggirkan komunitas yang terpinggirkan. Seiring AI menjadi bagian sentral dalam perumusan kebijakan lingkungan dan strategi modal, implikasi etis dari penerapan teknologi ini menuntut kajian kritis. Kita berisiko mengadopsi alat yang memperparah ketimpangan, mengikis kepercayaan, atau lebih mengutamakan keuntungan jangka pendek dibandingkan keadilan jangka panjang.

isu-Isu Etis dalam Ranah Keberlanjutan Berbasis AI

Etika merupakan landasan bagi setiap agenda keberlanjutan yang bermakna. Pada intinya, keberlanjutan bukan sekadar soal meminimalkan jejak karbon atau melestarikan sumber daya, melainkan tentang keadilan antargenerasi sebuah komitmen bahwa keputusan yang kita ambil hari ini tidak akan memperburuk kehidupan orang-orang di masa depan. Tata kelola AI yang etis juga menuntut pandangan jauh ke depan dan akuntabilitas, yang mengharuskan teknologi selaras dengan nilai-nilai sosial.

Terlebih lagi, ketika kedua tuntutan ini bertemu, taruhannya sangat besar: upaya keberlanjutan yang didukung AI harus menyeimbangkan hak asasi manusia, otonomi, dan keadilan dengan hasil serta dampak lingkungan. Namun, adopsi teknologi sering kali melampaui pembahasan mengenai aspek etika. Para pembuat kebijakan dan praktisi teknologi, yang senantiasa bersemangat memanfaatkan efisiensi AI, mungkin mengabaikan dimensi etis terkait eksploitasi data, algoritma yang bias, ataupun ketimpangan akses. Bab ini berargumen bahwa kewaspadaan etis tidak boleh dipandang sebagai penghambat kemajuan, melainkan sebagai suatu keharusan demi kemajuan yang menghasilkan solusi inklusif, berkeadilan, dan berkelanjutan.

Mengurai Triad Etis: Privasi, Bias, dan Kesetaraan

Dalam hubungan antara AI dan keberlanjutan, terdapat tiga tantangan etis yang perlu diperhatikan secara bersamaan, yaitu privasi data, bias algoritmik, dan kesenjangan digital. Ketiganya memiliki keterkaitan yang erat karena penerapan AI melibatkan pengumpulan data, pengolahan informasi, serta pengambilan keputusan yang dapat memengaruhi berbagai kelompok masyarakat. Oleh sebab itu, keberhasilan penerapan AI tidak hanya ditentukan oleh kemampuan teknologinya, tetapi juga oleh sejauh mana teknologi tersebut dikembangkan dan digunakan secara bertanggung jawab.

Privasi data menjadi salah satu perhatian utama karena sistem AI umumnya membutuhkan data dalam jumlah besar untuk dapat berfungsi secara optimal. Pengumpulan dan pemanfaatan data tanpa perlindungan yang memadai dapat menimbulkan risiko terhadap keamanan serta hak individu atas informasi pribadinya. Di sisi lain, bias algoritmik dapat muncul ketika data yang digunakan untuk melatih AI tidak mewakili kondisi masyarakat secara beragam atau mengandung pola yang tidak adil. Kondisi tersebut dapat menyebabkan sistem menghasilkan keputusan yang kurang tepat atau merugikan kelompok tertentu.

Selain privasi dan bias, kesenjangan digital juga menjadi persoalan penting dalam penerapan AI untuk keberlanjutan. Tidak semua individu, kelompok, atau wilayah memiliki akses yang sama terhadap infrastruktur digital, perangkat, jaringan internet, maupun kemampuan untuk memanfaatkan teknologi AI. Jika kondisi ini tidak diperhatikan, manfaat AI justru berpotensi hanya dirasakan oleh kelompok yang memiliki sumber daya lebih besar. Dengan demikian, pengembangan AI perlu diarahkan pada prinsip kesetaraan, inklusivitas, dan tanggung jawab, sehingga kemajuan teknologi dapat memberikan manfaat yang lebih luas tanpa mengabaikan aspek etis dan sosial.

Privasi Data: Harga dari Informasi

AI sangat bergantung pada data yang sering kali bersifat pribadi, sangat rinci, dan sensitif. Meteran pintar memantau konsumsi energi rumah tangga, citra satelit mengamati dinamika lahan, sementara IoT merekam pola perilaku. Meskipun informasi ini mendorong inovasi, hal tersebut juga memunculkan kekhawatiran terkait privasi. Siapa pemilik data ini? Bagaimana data tersebut dilindungi? Lebih jauh lagi, apa yang terjadi ketika pengawasan dianggap dapat diterima demi tujuan keberlanjutan? Sebagai contoh, proyek AI perkotaan yang bertujuan mengurangi emisi mungkin melacak pergerakan warga, sehingga menormalisasi praktik pengumpulan data yang bersifat intrusif.

Para filsuf, mulai dari Michel Foucault hingga P. W. Singer, telah memperingatkan tentang efek *panopticon*, di mana perangkat pengawasan mengubah sifat kekuasaan sosial. Tujuan keberlanjutan dapat terhambat jika penerapannya mengabaikan kehendak masyarakat atau jika adopsinya menjadi satu-satunya cara untuk mendapatkan akses ke layanan penting seperti layanan kesehatan atau energi yang berujung sebagai keberlanjutan "istimewa" (*privileged sustainability*), di mana hanya mereka yang peduli lingkungan yang mendapatkan imbalan berupa udara bersih dan energi terbarukan; sistem semacam itu tidak akan bertahan jika masyarakat kehilangan kepercayaan terhadap pemerintahnya.

Bias Kognitif Algoritmik: Saat Objektivitas Menyimpang

Anggapan bahwa AI selalu bersifat netral dan objektif perlu dipertimbangkan kembali. Algoritma pada dasarnya belajar dari data yang digunakan dalam proses pelatihannya, termasuk data historis yang mungkin telah mengandung ketidakadilan atau bias sosial. Ketika pola tersebut diterapkan kembali oleh sistem AI, keputusan yang dihasilkan dapat memperkuat ketimpangan yang sudah ada. Dengan demikian, AI tidak hanya dipengaruhi oleh rancangan teknisnya, tetapi juga oleh kualitas, konteks, dan karakteristik data yang menjadi dasar pembelajarannya.

Dalam konteks keberlanjutan, bias algoritmik dapat berdampak langsung terhadap pembagian sumber daya dan perlindungan masyarakat. Sebagai contoh, sistem AI yang digunakan untuk menentukan prioritas pembangunan infrastruktur mitigasi banjir dapat memberikan rekomendasi yang lebih menguntungkan kawasan dengan nilai ekonomi tinggi, sementara kebutuhan masyarakat berpenghasilan rendah atau kelompok rentan kurang diperhatikan. Kondisi tersebut menjadi persoalan serius karena kelompok yang memiliki keterbatasan sumber daya sering kali justru menghadapi dampak perubahan iklim yang lebih besar. Jika tidak dikendalikan, penggunaan AI yang bias dapat memperlebar kesenjangan sosial sekaligus mengurangi efektivitas upaya keberlanjutan.

Oleh karena itu, keadilan algoritmik perlu ditempatkan sebagai bagian penting dalam mewujudkan keadilan lingkungan. Perspektif etika feminis dan teori ras kritis dapat membantu melihat bagaimana teknologi berinteraksi dengan ketimpangan sosial yang telah berkembang dalam masyarakat. Penerapan prinsip tersebut mendorong proses perancangan AI yang lebih partisipatif dengan melibatkan kelompok yang terdampak, terutama masyarakat yang selama ini kurang mendapatkan ruang dalam pengambilan keputusan. Dengan memberikan kesempatan kepada berbagai kelompok untuk menyampaikan kebutuhan dan pengalamannya, pengembangan AI dapat menjadi lebih adil, inklusif, dan selaras dengan tujuan keberlanjutan.

Mereplikasi Ketimpangan: Kesenjangan Digital

Tidak semua masyarakat memiliki kesempatan yang sama untuk memperoleh manfaat dari perkembangan AI. Pengembangan dan pemanfaatan teknologi ini masih banyak terkonsentrasi pada negara dengan sumber daya ekonomi dan teknologi yang kuat serta perusahaan berskala besar. Sementara itu, negara dan wilayah dengan tingkat pendapatan lebih rendah sering menghadapi keterbatasan infrastruktur digital, akses internet, sumber daya manusia, dan fasilitas teknologi yang dibutuhkan untuk menerapkan atau menyesuaikan

AI dengan kebutuhan lokal. Perbedaan kondisi tersebut dapat menciptakan kesenjangan dalam kemampuan setiap masyarakat untuk memanfaatkan kemajuan teknologi.

Kesenjangan tersebut berpotensi membentuk kondisi keberlanjutan yang tidak merata. Solusi berbasis AI untuk mengatasi persoalan lingkungan, seperti pengelolaan energi, pemantauan perubahan iklim, atau optimalisasi sumber daya, mungkin lebih mudah diterapkan di wilayah yang memiliki infrastruktur dan kemampuan teknologi yang memadai. Sebaliknya, masyarakat yang memiliki keterbatasan akses dapat tetap bergantung pada metode konvensional yang kurang efektif atau kurang sesuai dengan tantangan yang dihadapi. Jika kondisi ini berlangsung dalam jangka panjang, perkembangan AI justru dapat memperkuat ketimpangan yang telah ada, bukan menguranginya.

Pemikiran pendekatan kapabilitas yang dikembangkan oleh Amartya Sen memberikan perspektif bahwa keberlanjutan tidak hanya berkaitan dengan pencapaian teknologi, tetapi juga dengan kemampuan setiap masyarakat untuk memperoleh kesempatan hidup yang layak dan berkembang. Oleh karena itu, kesenjangan digital perlu diatasi melalui kolaborasi antarnegara, pengembangan solusi *open-source*, peningkatan kapasitas sumber daya manusia, serta kebijakan yang menjamin akses teknologi secara lebih adil. Dengan membuka kesempatan yang lebih luas bagi berbagai komunitas untuk menggunakan dan mengembangkan AI, manfaat teknologi dapat didistribusikan secara lebih merata dan mendukung terciptanya keberlanjutan yang inklusif.

Etika di Dunia yang Didorong oleh Teknologi: Landasan Filosofis

Dalam menghadapi berbagai persoalan etis yang muncul dari penerapan AI, perspektif filsafat dapat digunakan sebagai landasan untuk memahami dan menilai setiap keputusan secara lebih mendalam. Berbagai pendekatan etika membantu melihat bahwa persoalan teknologi tidak hanya berkaitan dengan kemampuan sistem, tetapi juga dengan nilai, tanggung jawab, hak, dan kepentingan manusia. Dengan demikian, pertimbangan etis diperlukan agar pemanfaatan AI tetap sejalan dengan tujuan sosial dan keberlanjutan.

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah utilitarianisme, yang menilai suatu tindakan berdasarkan manfaat terbesar bagi sebanyak mungkin orang. Pendekatan ini dapat mendukung pengumpulan data apabila data tersebut mampu memberikan manfaat yang lebih luas, misalnya untuk memperkuat upaya menghadapi perubahan iklim. Namun, pandangan tersebut dapat berbeda dengan etika deontologis, yang lebih menekankan kewajiban moral serta penghormatan terhadap hak individu. Dari sudut pandang ini, perlindungan privasi tetap harus dijaga meskipun penggunaan data tersebut berpotensi menghasilkan manfaat yang lebih besar bagi masyarakat.

Selain itu, perspektif keadilan Rawlsian menekankan pentingnya membangun sistem yang memberikan perhatian lebih besar kepada kelompok yang paling kurang beruntung. Dalam penerapan AI untuk keberlanjutan, prinsip ini mendorong agar manfaat teknologi tidak hanya dinikmati oleh kelompok yang memiliki sumber daya dan akses lebih besar. Berbagai pendekatan filosofis tersebut menunjukkan bahwa persoalan seperti kekuasaan, keadilan, hak, dan kesejahteraan manusia tidak dapat diselesaikan hanya melalui solusi teknis. Oleh karena itu, pengembangan dan penerapan AI perlu disertai pertimbangan etis yang mampu

menempatkan kepentingan manusia dan keadilan sosial sebagai bagian penting dari kemajuan teknologi.

Metodologi: dari Teori ke Praktik

Bab ini menggabungkan berbagai perspektif dari sejumlah disiplin ilmu untuk memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai hubungan antara AI, etika, dan keberlanjutan. Wawancara dengan para ahli etika AI memberikan gambaran praktis mengenai pentingnya menjaga keseimbangan antara inovasi teknologi dan akuntabilitas. Sementara itu, pandangan dari para ahli keberlanjutan memperkaya pembahasan dengan berbagai pendekatan yang dapat digunakan untuk menghadapi tantangan lingkungan dan sosial yang muncul seiring dengan perkembangan AI.

Sejumlah studi kasus yang dibahas dalam bab ini menunjukkan bahwa penerapan AI dapat memberikan hasil yang positif, tetapi juga dapat menimbulkan persoalan ketika aspek etika dan keadilan tidak diperhatikan. Contohnya dapat dilihat melalui kasus algoritma energi yang mengalami bias di California serta proyek AI inklusif di Kenya. Berbagai contoh tersebut memberikan gambaran bahwa keberhasilan penerapan AI tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan teknologi, tetapi juga oleh kemampuan untuk memahami kondisi masyarakat, mempertimbangkan kelompok yang terdampak, dan memastikan bahwa manfaat teknologi dapat dirasakan secara lebih merata.

Selain studi kasus dan wawancara, pembahasan etika serta riset filosofis digunakan sebagai landasan untuk memahami persoalan secara konseptual. Pemeriksaan kebijakan juga membantu mengidentifikasi kerangka regulasi yang relevan, salah satunya *General Data Protection Regulation* (GDPR) Uni Eropa, serta implikasinya terhadap pengembangan AI yang berkelanjutan. Pendekatan lintas disiplin ini memungkinkan berbagai dilema etika dipahami secara lebih seimbang dan realistis. Dengan demikian, AI tidak perlu dipandang secara sederhana sebagai teknologi yang sepenuhnya membawa kemajuan atau sebaliknya sebagai ancaman, tetapi sebagai teknologi yang membutuhkan pengelolaan, pengawasan, dan pertimbangan manusia agar dapat memberikan manfaat secara bertanggung jawab.

Cakrawala Etika: Bukan Solusi Ajaib, Melainkan Beragam Solusi

Mendiagnosis masalah memang penting, namun bab ini juga memaparkan jalan menuju masa depan. Bab ini menyerukan penerapan prinsip-prinsip desain AI yang etis transparansi, akuntabilitas, dan inklusivitas sejak tahap awal. Anda juga dapat mengurangi bias, menciptakan rasa kepemilikan melalui model tata kelola partisipatif, serta melibatkan komunitas dalam merancang bersama perangkat AI. Para pembuat kebijakan perlu menetapkan regulasi yang melindungi privasi tanpa menghambat inovasi, sementara koalisi lintas negara dapat membantu menjembatani kesenjangan digital, baik melalui dukungan finansial maupun pertukaran pengetahuan.

Pada akhirnya, bab ini juga membahas tentang AI yang etis yakni solusi keberlanjutan yang bukan sekadar narasi represif dari atas ke bawah (*top-down*), melainkan sarana navigasi yang mengarahkan kita pada solusi mutakhir yang berkeadilan dan merata. Etika juga harus terus berkembang seiring perubahan cara kita mengupayakan keberlanjutan melalui AI. Bab

ini mendorong pembaca untuk berpikir kritis mengenai salah satu pertanyaan utamanya: Masa depan seperti apa yang sedang kita ciptakan, dan untuk siapa?

Dengan menangani isu privasi data, bias algoritmik, dan kesenjangan digital secara langsung, kita dapat mengarahkan AI menuju potensi terbesarnya bukan sekadar sebagai alat untuk ketahanan lingkungan, melainkan juga sebagai sarana mewujudkan keadilan dan martabat manusia. Kita yang memegang kompasnya; inilah warisan yang akan ditinggalkan oleh pemanfaatan teknologi; bagaimana langkah kita selanjutnya?

7.2 KOMPLEKSITAS ETIKA DALAM RISET AI DAN KEBERLANJUTAN

Hal yang jelas terlihat dari berkembangnya kajian mengenai persinggungan antara AI (kecerdasan buatan) dan keberlanjutan adalah bahwa persinggungan tersebut melibatkan kompleksitas etika. Para akademisi dari berbagai bidang, mulai dari ilmu komputer hingga filsafat, telah mengkaji bagaimana aspirasi mulia AI untuk mencapai efisiensi lingkungan berbenturan dengan ancaman terhadap privasi, kesetaraan, dan keadilan. Bab ini merangkum riset mengenai tiga isu etika yang saling berkaitan privasi data, bias algoritmik, dan kesenjangan digital serta menempatkan isu-isu tersebut dalam kerangka filosofis yang menjadi landasan bagi tata kelola AI yang etis.

Privasi Data: dari Pengawasan Menuju Keberlanjutan

Kebutuhan akan data dalam jumlah besar untuk mengoptimalkan hasil keberlanjutan melalui AI menimbulkan kekhawatiran serius terkait privasi. Sistem jaringan listrik pintar (*smart grids*), pertanian presisi, dan sistem perencanaan kota sering kali melakukan penggalian data (*data-mining*) yang sangat rinci mengenai konsumsi energi, mobilitas, dan perilaku masyarakat.

Data semacam itu dapat membantu mengurangi limbah dan jejak karbon, namun sejumlah akademisi memperingatkan bahwa ekonomi pengawasan dapat menormalisasi praktik-praktik yang melanggar privasi jika tidak ada batasan ketat mengenai penerapannya. Studi menempatkan ketegangan ini dalam konteks kapitalisme pengawasan, dengan menyatakan bahwa pengambilan data untuk tujuan yang sepenuhnya altruistik (seperti keberlanjutan) tetap dapat berujung pada komodifikasi otonomi pengguna. Inisiatif kota cerdas seperti yang ada di Songdo dan Barcelona telah dikritik karena lebih mengutamakan efisiensi dengan mengorbankan hak privasi penduduk.

Perspektif filosofis turut menambah kompleksitas kekhawatiran ini. Studi mengidentifikasi "privasi informasi" sebagai hak asasi manusia yang mendasar dan berpendapat bahwa pengumpulan data untuk tujuan keberlanjutan harus didasarkan pada transparansi dan persetujuan. Gagasan tentang *panopticon* sebuah masyarakat yang diatur melalui pengawasan yang ada di mana-mana tercermin dalam kritik terhadap pengawasan lingkungan berbasis kecerdasan buatan (AI). Dengan demikian, inisiatif AI yang berfokus pada keberlanjutan (bahkan yang digerakkan oleh perusahaan) untuk melacak emisi karbon atau deforestasi juga dapat memungkinkan pemerintah atau perusahaan memantau pergerakan secara *real-time* dari masyarakat adat yang sedang mempertahankan wilayah adat mereka.

General Data Protection Regulation (GDPR) milik Uni Eropa merupakan contoh kerangka regulasi yang dirancang untuk mengatasi risiko-risiko tersebut dengan mewajibkan anonimisasi data dan menjamin kepemilikan pengguna atas data pribadi mereka. Namun, para kritikus berpendapat bahwa kebijakan semacam itu bersifat reaktif dan tidak menggugat struktur kekuasaan yang ada di balik kepemilikan data. Oleh karena itu, riset terkait menyerukan pengembangan sistem AI dengan prinsip "privasi sejak tahap perancangan" (*privacy-by-design*), yang mengintegrasikan perlindungan etis ke dalam teknologi keberlanjutan sejak awal pengembangannya.

Bias Algoritma dan Keadilan Lingkungan

Bias algoritma dalam AI merupakan ancaman signifikan terhadap dampak keberlanjutan yang adil. Studi menemukan bahwa model pembelajaran mesin (*machine learning*) yang dilatih menggunakan data historis sering kali mereplikasi ketimpangan sosial dan merugikan kelompok marginal. Dalam konteks lingkungan, algoritma yang bias dapat menyebabkan alokasi sumber daya yang keliru, misalnya dengan mengarahkan infrastruktur perlindungan banjir ke kawasan yang lebih makmur atau gagal mengidentifikasi titik-titik polusi parah di kawasan berpenghasilan rendah. Sebagai contoh, audit tahun 2021 terhadap AI prediksi kebakaran hutan di California menemukan bahwa sistem tersebut kurang merepresentasikan komunitas pedesaan, sehingga menunda evakuasi bagi populasi yang tidak berbahasa Inggris.

Para ahli di bidang keadilan lingkungan mengaitkan kegagalan teknis ini dengan ketimpangan sistemik, berpendapat bahwa komunitas yang terdampak oleh masalah-masalah yang saling tumpang tindih ini merupakan kelompok yang paling minim terwakili dalam data pelatihan AI; hal ini memperparah "ketidakadilan ganda" mengingat mereka sering kali menjadi pihak yang paling terdampak secara negatif oleh perubahan iklim. Para teoretisi feminis dan teori ras kritis melakukan pemeriksaan lebih lanjut dengan mengungkap mitos "*objektivitas*" teknologi sebagai kedok bagi pendekatan pengembangan teknologi yang didominasi oleh perspektif Barat dan laki-laki.

Para ahli berpendapat bahwa penciptaan sistem AI yang berkelanjutan memerlukan praktik desain partisipatif, di mana pihak-pihak yang paling terdampak oleh isu keberlanjutan turut serta sebagai mitra perancang (*co-designer*). Contoh dari sektor energi surya di Kenya menunjukkan bahwa pelibatan pemangku kepentingan lokal dalam proses pengembangan algoritma dapat memitigasi bias dan menghasilkan alokasi sumber daya yang lebih baik.

Riset juga membahas solusi teknis, seperti pembelajaran mesin yang memperhatikan aspek keadilan (fairness-aware machine learning) dan audit bias. Namun, terlepas dari adanya perbaikan teknis, ketimpangan struktural tetap perlu ditangani. Sebagaimana yang dijelaskan, dan yang diperlukan adalah integrasi antara "akuntabilitas algoritmik" dan perubahan kebijakan yang menempatkan kesetaraan sebagai pusat dalam distribusi dana keberlanjutan serta tata kelola.

Kesenjangan Digital: Krisis Aksesibilitas AI

Dari perspektif keberlanjutan yang didorong oleh AI, terdapat banyak dilema etis akibat kesenjangan digital global. Perusahaan dan negara berpenghasilan tinggi mendominasi

pembelajaran AI, sementara negara berpenghasilan rendah tidak mampu berinvestasi dalam keterampilan, infrastruktur, atau pendanaan yang diperlukan untuk menerapkan teknologi tersebut. Kesenjangan ini menimbulkan risiko terciptanya "kesenjangan keberlanjutan" (*sustainability gap*), di mana segelintir elite menikmati manfaat AI, sementara pihak lainnya bergantung pada sistem yang sudah ketinggalan zaman. Sebagai contoh, model iklim yang dilatih menggunakan AI sering kali tidak menyertakan data dari negara-negara Afrika, sehingga melemahkan kemampuan prediktifnya terkait kekeringan.

Untuk membahas masalah ini, kami menggunakan "pendekatan kapabilitas" (*capabilities approach*) dari Dr. Amartya Sen, sebuah kerangka filosofis yang menekankan bahwa keberlanjutan sejati memungkinkan semua komunitas mendapatkan akses yang lebih baik terhadap sarana yang mereka butuhkan untuk berkembang. Namun, prinsip ini sering kali diabaikan dalam pengembangan AI saat ini. Para penulis menyatakan bahwa prosedur pelatihan model bahasa berskala besar (*large language models*) yang intensif energi yang sering kali menggunakan bahan bakar fosil bertentangan dengan target keberlanjutan dan menjadi hambatan bagi para peneliti di negara-negara Selatan Global (*Global South*).

Kesenjangan ini mulai dijembatani melalui berbagai inisiatif seperti *platform* AI sumber terbuka (*open-source*) dan kemitraan seperti inisiatif PBB "*AI for Good*". Akan tetapi, program-program semacam itu menuai kritik karena lebih berfokus pada prioritas Barat dibandingkan kebutuhan lokal. Sebagai contoh, beberapa proyek AI di sektor pertanian India mengalami kegagalan karena pengembang tidak mempertimbangkan pengetahuan tradisional para petani. Oleh karena itu, riset menyerukan adanya struktur "*AI dekolonial*" yang memprioritaskan pengetahuan masyarakat adat dan pembagian sumber daya secara timbal balik.

Sintesis dan Kesenjangan Riset

Meskipun studi yang ada telah mengkaji secara memadai bagaimana tantangan etis berdampak pada aspek-aspek individual, studi mengenai keterkaitan antar-tantangan etis tersebut masih terbatas. Faktanya, kesenjangan digital dapat diperparah oleh bias algoritmik yang meminggirkan kelompok masyarakat tertentu dari manfaat teknologi pembelajaran mesin (*machine learning*).

Pada saat yang sama, pelanggaran privasi mengikis kepercayaan terhadap berbagai proyek keberlanjutan. Sebagian besar studi kasus berasal dari dunia Barat, sehingga mengabaikan perspektif dari negara-negara di belahan bumi selatan (*Global South*). Pembalajaran di masa mendatang perlu mengkaji pendekatan partisipatif yang mengintegrasikan pengetahuan lokal ke dalam perancangan sistem AI, serta mengevaluasi dampak kebijakan etika AI dalam jangka panjang.

Riset menunjukkan bahwa sistem AI tidak serta-merta bersifat ramah lingkungan atau terbuka diperlukan tata kelola yang disengaja dan berlandaskan pada keadilan, transparansi, serta inklusi. Dengan memadukan pemeriksaan teknis dan kajian filosofis yang mendalam, para akademisi dapat membantu mengarahkan AI agar memenuhi potensinya sebagai sarana pengelolaan bumi yang adil dan berkelanjutan.

7.3 KERANGKA KERJA ETIKA DAN TATA KELOLA AI

Penerapan AI yang bertanggung jawab dalam konteks keberlanjutan menuntut organisasi untuk mengadopsi pendekatan multipihak yang terstruktur secara formal, dengan memprioritaskan privasi data, penanganan bias algoritma, dan kesenjangan digital. Berikut adalah kerangka kerja lima langkah yang didasarkan pada prinsip-prinsip etika dan tantangan yang telah dibahas sebelumnya, yang ditujukan bagi para pembuat kebijakan, praktisi teknologi, dan tokoh masyarakat dalam pelaksanaannya.

Desain Etis dan Struktur Tata Kelola

(a) Membentuk Dewan Etika AI.
(b) Komposisi: Melibatkan ahli etika AI, pakar keberlanjutan, penasihat hukum, penasihat sosial, dan tokoh penggerak masyarakat setempat (misalnya, pemimpin masyarakat adat dan kelompok yang kurang beruntung).
(c) Mengawasi proyek AI mulai dari tahap konsep hingga tahap implementasi, dengan senantiasa berpegang pada prinsip-prinsip etika (transparansi, keadilan, privasi).
(d) Perangkat: Daftar periksa (checklist) → misalnya, menggunakan Penilaian Dampak Etika AI (*AI Ethics Impact Assessment*) untuk mengidentifikasi potensi risiko terkait bias, privasi, dan aksesibilitas.
(e) Jangka panjang: Menerapkan protokol *Privacy-by-Design* (Privasi sejak Tahap Desain).
(f) Minimalisasi data: Hanya mengumpulkan informasi seminimal mungkin yang diperlukan untuk mencapai tujuan keberlanjutan (misalnya, total konsumsi energi dibandingkan data per rumah tangga individu).
(g) Anonimisasi dan enkripsi: Menerapkan perangkat seperti *differential privacy* untuk membatasi visibilitas pengguna dalam kumpulan data (*dataset*).
(h) Mekanisme persetujuan: Harus ada sistem persetujuan aktif (*opt-in*) yang eksplisit dan tersedia dalam berbagai bahasa untuk pengumpulan data (misalnya, perangkat IoT di kota pintar).

Pengembangan Algoritma dengan Mitigasi Bias

(a) Melakukan Audit Bias Sebelum Penerapan.
(b) Langkah 1: Mengaudit kumpulan data untuk menemukan kesenjangan representasi (misalnya, masyarakat pedesaan yang kurang terwakili dalam model iklim). Perangkat seperti IBM AI Fairness 360 sudah dapat melakukan deteksi bias secara otomatis.
(c) Langkah 2: Bekerja sama dengan LSM atau kelompok masyarakat untuk mengonfirmasi kumpulan data (misalnya, bekerja sama dengan petani untuk memberikan anotasi pada gambar tanaman).
(d) Melibatkan diri dalam Desain Partisipatif.
(e) Hasil: Inisiatif Solar AI di Kenya mengurangi bias dengan memasukkan masukan dari petani ke dalam algoritma jaringan listrik tenaga surya.

Menjembatani Kesenjangan Digital

(a) Mengembangkan dan memajukan infrastruktur yang adil.
(b) Pusat AI di *Global South*: Bekerja sama dengan institusi di *Global South* untuk menciptakan perangkat AI sumber terbuka (*open-source*) yang hemat sumber daya

(misalnya, solusi komputasi tepi bertenaga surya untuk wilayah di luar jangkauan jaringan listrik utama/*off-grid*).

(c) Penguatan kelembagaan: Pendanaan silang untuk melatih teknisi dan pembuat kebijakan setempat. Sebagai contoh, program *AI for Rural Development* di India melatih 10.000 petani dalam praktik pertanian berbasis AI.

(d) Mengutamakan akses yang inklusif.

(e) Implementasi/sumber daya. Teknologi bersubsidi: Menyediakan skema harga bertingkat untuk perangkat AI yang mendukung keberlanjutan (misalnya, lisensi bersubsidi bagi LSM internasional di wilayah berpenghasilan rendah).

(f) Kedaulatan data: Memungkinkan model tata kelola data masyarakat adat yang memberdayakan komunitas untuk mengelola data yang relevan dengan lingkungan mereka.

Pemantauan Terbuka dan Akuntabilitas

(a) Meluncurkan dasbor publik.

(b) Metrik: Menampilkan statistik waktu nyata (*real-time*) mengenai kinerja sistem AI dan kepatuhan terkait privasi (misalnya, persentase data yang dianonimkan), bias (misalnya, alokasi sumber daya), dan aksesibilitas (misalnya, demografi pengguna).

(c) *Climate Neutrality Tracker* milik Uni Eropa menggunakan AI untuk memublikasikan hasil pengurangan karbon beserta rincian aspek kesetaraan.

(d) Audit tahunan oleh pihak ketiga: Menggunakan auditor independen untuk meninjau sistem AI berdasarkan metrik etika (misalnya, tolok ukur bias dari Algorithmic Justice League).

(e) UNDO: Menyepakati sanksi atas pelanggaran (misalnya, skema pembayaran per penggunaan ala GDPR).

Perserikatan Bangsa-Bangsa dan Organisasi Internasional

(a) Membentuk kolaborasi lintas sektor: Menghubungkan pemerintah dengan perusahaan teknologi dan LSM untuk berbagi sumber daya. Sebagai contoh, aliansi *AI for Earth* milik PBB mensponsori proyek yang mempertemukan insinyur Silicon Valley dengan ilmuwan iklim Afrika.

(b) Kerangka kerja kebijakan: Mendorong perjanjian internasional mengenai AI yang etis dalam keberlanjutan (misalnya, resolusi PBB tentang akuntabilitas algoritmik).

(c) Mendanai hibah pembelajaran AI yang dekolonial: Mendanai inisiatif yang berfokus pada pengetahuan masyarakat adat (misalnya, model yang memadukan pengetahuan ekologis tradisional dengan AI).

(d) Repositori sumber terbuka (*open-source*): Mengembangkan repositori global (misalnya, *Sustainability AI Commons*) untuk berbagi kode, data, dan praktik terbaik.

Peta Jalan Implementasi

(a) Tahap percontohan (bulan ke-1–6): Bereksperimen dengan audit bias dan desain partisipatif di satu wilayah (misalnya, inisiatif energi surya di Kenya).

(b) Tahap peningkatan skala (bulan ke-7–12): Membangun infrastruktur dan program pelatihan berdasarkan temuan dari tahap percontohan.

(c) Integrasi global (tahun ke-2 dan seterusnya): Memadukan kerangka kerja ini ke dalam kerangka kerja keberlanjutan global (misalnya, SDGs PBB).

Kerangka kerja ini menciptakan keseimbangan yang tepat antara inovasi dan akuntabilitas untuk memanfaatkan AI sebagai kekuatan bagi pengelolaan bumi yang adil. Melembagakan etika di semua tahapan akan membantu para pemangku kepentingan dalam menyikapi keterkaitan antara AI dan keberlanjutan secara cermat dan akuntabel. Gambar 7.1 menggambarkan kerangka kerja untuk AI yang bertanggung jawab dalam keberlanjutan.



Gambar 7.1 AI yang Bertanggung Jawab dalam kerangka kerja keberlanjutan
(*Sumber: Konsepsi penulis)*

7.4 IMPLIKASI STRATEGIS ETIKA AI BERKELANJUTAN

Peran AI dalam keberlanjutan menghadirkan implikasi yang sangat signifikan pada tingkat teoretis, praktis, sosial, dan keberlanjutan. Kerangka kerja etis yang diusulkan yang mengedepankan privasi, mitigasi bias, kesetaraan, dan kolaborasi global mengontekstualisasikan kembali praktik konseptualisasi, penerapan, dan tata kelola teknologi dalam konteks sosial di era Antroposen. Kami menguraikan implikasi-implikasi tersebut secara rinci di bawah ini.

Implikasi Teoretis

a) Etika dan Penggunaan AI

Pendekatan utilitarian yang mengutamakan lingkungan melalui efisiensi diimbangi oleh komitmen deontologis terhadap hak-hak individu (misalnya, privasi) dan prinsip-prinsip keadilan. Sebagai contoh, penekanan kerangka kerja ini pada desain partisipatif juga selaras dengan nilai-nilai utama etika kepedulian feminis yang mengedepankan akuntabilitas relasional dan interseksionalitas. Dengan berfokus pada suara kelompok yang terpinggirkan dalam pengembangan AI, model ini beralih dari solusi teknokratis yang bersifat *top-down* (dari atas ke bawah) dan membuka ruang bagi sistem etika yang pluralistik.

Filosofi masyarakat adat, yang menekankan saling ketergantungan antara manusia dan ekosistem, menantang antroposentrisme Barat. Tuntutan kerangka kerja ini akan AI yang decolonial yang mengintegrasikan pengetahuan ekologis tradisional melawan narasi kemajuan yang dominan serta memperluas cakupan teoretis etika keberlanjutan.

b) Membangun Teori tentang Tata Kelola AI

Kerangka kerja ini juga memasukkan prinsip-prinsip abstrak, seperti "transparansi" dan "keadilan," ke dalam perdebatan yang sedang berlangsung mengenai tata kelola AI. Hal ini selaras dengan etika. Sebuah pandangan bahwa ekosistem data perlu menghormati martabat manusia—namun melangkah lebih jauh dengan menyediakan pendekatan praktis (misalnya, *privacy-by-design* dan audit bias). Kerangka kerja ini juga menantang model pengembangan teknologi yang dipengaruhi oleh neoliberalisme melalui dukungannya terhadap kebijakan redistributif (misalnya, perangkat AI bersubsidi) dan kesetaraan global, yang memiliki kemiripan dengan pendekatan kapabilitas (*capabilities approach*) dari Sen.

Implikasi Praktis

a) Menanamkan Akuntabilitas Etis sebagai Praktik Kelembagaan

Kerangka kerja ini menuntut perubahan struktural bagi organisasi. Pembentukan Dewan Etika AI dapat meminta pertanggungjawaban para pelaku utama, namun dewan tersebut harus didukung oleh sumber daya yang memadai dan melibatkan kolaborasi lintas disiplin. Biaya implementasi bisa menjadi tantangan bagi entitas yang lebih kecil, khususnya di wilayah Global Selatan, sehingga menciptakan kesenjangan dalam kepatuhan. Akan tetapi, sarana seperti pusat AI sumber terbuka (*open-source*) dan audit pihak ketiga dapat mendemokratisasi akses.

b) Hambatan Teknis dan Logistik

Keahlian teknis dan infrastruktur diperlukan untuk menerapkan protokol mitigasi bias (misalnya, audit sebelum peluncuran). Meskipun alat seperti IBM AI Fairness 360 dapat mengotomatisasi proses deteksi bias, efektivitasnya bergantung pada data pelatihan yang representative hal yang sering kali menjadi tantangan di wilayah dengan keterbatasan data. Program-program yang berorientasi pada pengumpulan data berskala masif sering kali tidak sejalan dengan protokol *privacy-by-design* yang lebih ketat; protokol ini mewajibkan desain yang mencegah pembagian dan penyebaran data, sebagaimana yang kini semakin banyak diterapkan dalam target keberlanjutan yang intensif data, seperti pemodelan perubahan iklim secara *real-time*. Organisasi perlu menyikapi dilema ini melalui pengujian yang ketat dan masukan pemangku kepentingan yang dilakukan secara berulang (*iteratif*).

c) Skalabilitas dan Adaptasi

Implementasi kerangka kerja yang dilakukan secara bertahap (uji coba, peningkatan skala, integrasi global) mengakomodasi keragaman konteks. Aspek desain partisipatif dalam proyek tenaga surya di Kenya mungkin tidak relevan untuk penerapan AI perkotaan di Eropa. Pembuat kebijakan sebaiknya menyesuaikan pedoman dengan konteks ekologis, budaya, dan ekonomi setempat, sembari tetap menjunjung tinggi standar etika utama.

Implikasi Sosial

a) Kesetaraan dan Inklusi

Kerangka kerja ini mendorong kesetaraan sosial dengan berupaya mengatasi bias algoritmik dan kesenjangan digital. Komunitas yang suaranya kerap terabaikan dalam pengembangan teknologi seperti kelompok masyarakat yang terpinggirkan mendapatkan peran aktif melalui lokakarya kreasi bersama dan model kedaulatan data. Sebagai contoh, proyek AI yang dipimpin oleh masyarakat adat dapat memastikan bahwa pemantauan lingkungan tetap menghormati hak atas tanah leluhur. Namun, ketimpangan kekuasaan tetap ada: sejumlah perusahaan dan pemerintah mungkin mengadopsi wacana "*inklusi*" tanpa melakukan perombakan mendasar pada proses pengambilan keputusan.

b) Kepercayaan dan Keterlibatan Publik

Dalam upaya keberlanjutan berbasis AI (misalnya, kota cerdas), kekhawatiran mengenai pengawasan dapat mengikis kepercayaan publik. Mekanisme transparansi dalam kerangka kerja ini seperti dasbor publik yang memantau kepatuhan privasi dapat memulihkan kepercayaan dengan membuat sistem AI lebih mudah dipahami. Akan tetapi, kesenjangan literasi menjadi hambatan bagi keterlibatan publik; Kelompok-kelompok yang terpinggirkan mungkin tidak dapat menafsirkan dasbor atau memilih untuk tidak mengizinkan pengumpulan data mereka. Kampanye edukasi multibahasa dan penghubung komunitas sangatlah penting untuk mewujudkan partisipasi yang inklusif.

c) Perubahan Budaya dalam Pengembangan Teknologi Pornografi

Kerangka kerja ini menantang etos industri teknologi yang lebih dikenal luas, yaitu "bergerak cepat dan mendobrak tatanan" (*move fast and break things*), dengan mengutamakan pertimbangan matang di atas kecepatan. Pergeseran budaya tersebut mungkin memperlambat inovasi, namun akan menghasilkan dampak yang lebih adil. Reformasi juga mutlak mencakup penerapan regulasi yang dapat ditegakkan, penghentian praktik ketenagakerjaan yang eksploitatif, serta perubahan pada insentif bagi investor.

Implikasi Keberlanjutan

a) Pengelolaan Lingkungan vs. Jejak Teknologi

Biaya lingkungan akibat AI seperti penggunaan energi yang tinggi pada pusat data bertentangan dengan tujuan keberlanjutan. Fokus kerangka kerja ini pada perangkat AI yang hemat sumber daya (misalnya, *edge computing* bertenaga surya) dapat meredakan ketegangan tersebut. Namun, aspek skalabilitas tetap menjadi tantangan: pelatihan satu model AI dapat menghasilkan emisi CO_2 sebanyak 626.000 pon. Lebih jauh lagi, kerangka kerja yang berkelanjutan harus menghubungkan inovasi AI dengan transisi energi terbarukan serta akuntabilitas karbon yang ketat.

b) Ketahanan Jangka Panjang

Untuk mengatasi orientasi jangka pendek dalam pembuatan kebijakan, kerangka kerja ini secara aksiomatis menetapkan prinsip keadilan antargenerasi. Sebagai contoh, algoritma reboisasi berbasis AI yang memprioritaskan ekosistem dengan keanekaragaman hayati tinggi dibandingkan monokultur dapat memberikan manfaat iklim jangka panjang. Namun, siklus politik dan laporan triwulanan perusahaan sering kali justru mengapresiasi hal yang bertolak belakang dengan pandangan jauh ke depan semacam itu. Kita perlu mengukuhkan janji-janji

jangka panjang ini melalui mekanisme hukum, seperti dana amanah iklim (*climate trust*) atau instrumen serupa, guna memastikan penerapan AI yang etis dapat bertahan lama.

c) Mencegah Greenwashing

Solusi transparansi AI dapat menangkal praktik *greenwashing* (klaim ramah lingkungan yang menyesatkan) oleh perusahaan dengan menyediakan data dampak lingkungan yang nyata dan dapat diverifikasi secara *real-time*. Melalui algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*), sistem AI dapat memeriksa klaim keberlanjutan perusahaan dan membandingkannya dengan emisi aktual, cara perusahaan mengelola rantai pasok, serta sikap mereka terhadap penggunaan sumber daya.

Hal ini menciptakan struktur akuntabilitas yang mencegah perusahaan melakukan *eco-washing* (pencitraan ramah lingkungan palsu) terhadap praktik-praktik yang tidak berkelanjutan. Pelacakan karbon yang diverifikasi melalui *blockchain* dan laporan lingkungan yang diaudit oleh AI membuat praktik *greenwashing* yang memperparah pemanasan global menjadi jauh lebih sulit dan mahal dibandingkan upaya keberlanjutan yang sesungguhnya.

d) Keberlanjutan Dekolonial

Perspektif AI dekolonial dalam kerangka kerja ini menempatkan pengetahuan masyarakat adat sebagai pusat perhatian; perspektif ini mengaitkan kesehatan ekologis dengan kesehatan budaya, serta memisahkan kesehatan budaya dari pertumbuhan ekonomi yang semata-mata demi keuntungan pihak penjajah. Salah satu contoh penerapannya adalah mengintegrasikan praktik pengelolaan api tradisional dengan AI yakni dengan memasukkan data dari pengelolaan api tradisional ke dalam model AI. Langkah ini menjadikan model tersebut lebih peka terhadap data yang tidak hanya selaras dengan keanekaragaman hayati, tetapi juga menghormati kedaulatan masyarakat adat. Model ini menantang paradigma keberlanjutan yang bersifat ekstraktif dan mengusulkan prinsip timbal balik bukan eksploitasi sebagai landasan bagi solusi yang ditawarkan.

Berbagai implikasi dari kerangka kerja AI etis ini mendorong perubahan yang memiliki potensi transformatif beragam; Semuanya muncul dalam konteks ketegangan yang berbeda-beda. Dengan demikian, pendekatan ini menghubungkan paradigma etika yang sangat berbeda secara teoretis dan terpadu, berlandaskan gagasan holistik tentang keberlanjutan yang didorong oleh teknologi. Dari sudut pandang yang lebih pragmatis, pendekatan ini menuntut inovasi dan fleksibilitas kelembagaan terutama di wilayah dengan sumber daya terbatas. Hal ini mendorong pemerataan secara sosial, namun juga harus mendobrak struktur kekuasaan yang ada saat ini. Dari perspektif lingkungan, pendekatan ini menimbang potensi AI terhadap batasan daya dukung planet, meskipun tantangan terkait skala dan praktik *greenwashing* masih tetap ada.

Kerangka kerja ini tidak dimaksudkan sebagai solusi ajaib yang instan, melainkan sebagai pedoman yang terus berkembang. Keberhasilannya bergantung pada dialog berkelanjutan antara para filsuf, insinyur, pembuat kebijakan, dan masyarakat. Dengan memandang etika sebagai proses partisipatif bukan sekadar daftar periksa formalitas masyarakat dapat memanfaatkan AI tidak hanya sebagai sarana keberlanjutan, tetapi juga sebagai penggerak bagi upaya mewujudkan kesetaraan dan ketangguhan.

7.5 VISI MENUJU MASA DEPAN AI YANG ADIL DAN LESTARI

Namun, konvergensi AI dan keberlanjutan merupakan momen penting dalam perjuangan umat manusia melawan krisis iklim momen yang penuh potensi dan sarat dengan kompleksitas etika. Seperti yang dibahas dalam bab ini, tidak diragukan lagi bahwa AI memiliki kemampuan untuk mengoptimalkan sistem energi, memprediksi ekologi, dan meminimalkan dampak lingkungan. Tetapi jika digunakan tanpa perlindungan etika, AI dapat memperbesar ketidaksetaraan, melanggar privasi, dan membuka jurang di seluruh dunia. Paradigma etika yang diusulkan tentang transparansi, kesetaraan, dan keadilan ini memberikan cara untuk mengatasi tantangan-tantangan ini sambil memungkinkan kemajuan teknologi berkembang dengan cara yang mengangkat, bukan mengurangi, martabat manusia dan kesehatan planet.

Keberlanjutan dan etika AI mungkin pada awalnya tampak seperti masalah yang harus ditangani secara terpisah tetapi pencerahan teoretis menunjukkan bahwa keduanya sebenarnya merupakan keharusan yang saling terkait. Untuk menjembatani efisiensi utilitarian dengan hak-hak deontologis, etika kepedulian feminis dengan kearifan ekologis masyarakat adat, kita perlu mereteorikan kemajuan. Intinya: Melembagakan akuntabilitas untuk teknologi AI, mulai dari bagaimana teknologi tersebut dikembangkan Dewan Etika AI dan audit bias hingga infrastruktur yang adil dan kolaborasi dekolonial. Kerangka kerja ini memberikan suara kepada kelompok-kelompok yang sebelumnya terpinggirkan, membuat komunitas beralih dari penerima pasif desain AI menjadi peserta aktif dalam menciptakan alat-alat ini di tingkat sosial. Namun, perubahan ini bergantung pada penghapusan ketidakseimbangan kekuasaan dan memupuk kepercayaan melalui transparansi.

Dari perspektif keberlanjutan, kerangka kerja ini membantah gagasan bahwa AI adalah "solusi ajaib". Meskipun kecerdasan buatan dapat memperkuat adaptasi terhadap dampak iklim, ia juga memiliki biaya lingkungan dari konsumsi energi hingga ekstraksi mineral dan logam yang membutuhkan strategi pengelolaan, termasuk teknologi hemat sumber daya dan integrasi energi terbarukan. Yang penting, kerangka kerja ini mencegah praktik greenwashing sebagian karena memberikan penghargaan pada hasil yang dapat dicapai dan adil, bukan pada penampilan keberlanjutan.

Namun, jawabannya bukanlah sekadar jalan pintas. Perkembangan pesat teknologi AI membutuhkan tata kelola yang adaptif, percakapan, dan kolaborasi internasional. Para pembuat kebijakan, ahli teknologi, dan masyarakat sipil harus bergandengan tangan untuk membangun standar etika, sumber daya, dan mekanisme akuntabilitas agar aktor-aktor berpengaruh tidak menyalahgunakan kekuasaan mereka. Menciptakan AI yang berkelanjutan tanpa menanamkan prinsip-prinsip etika ke dalam pekerjaan mereka berarti kita hanya membangun sistem yang sama yang memungkinkan eksploitasi dan krisis iklim terjadi sejak awal taruhannya sangat tinggi.

Jadi, pada akhirnya, tidak ada ukuran keberhasilan AI kecuali apakah AI dapat memberikan kepada masyarakat dunia pasca-kapitalistik di mana kesehatan ekologis dan keadilan sosial tidak dapat dipisahkan. Jika kita memperlakukan etika sebagai permulaan daripada titik akhir, kita dapat membantu mengarahkan AI menuju janjinya sebagai mesin

untuk kemakmuran bersama. Kompas menunjukkan jalan; peta jalan berlaminasi menuju masa depan yang adil dan berkelanjutan akan menjadi bagian dari pilihan yang tersedia saat ini.

BAB 8
PERAN AI DALAM MENYELARASKAN EKONOMI DAN LINGKUNGAN

8.1 PERAN AI MENYEIMBANGKAN EKONOMI DAN EKOLOGI

Menjalani kehidupan di abad ke-21 telah membawa umat manusia ke era perkembangan teknologi yang tak tertandingi sekaligus krisis ekologis. Ekonomi global terus tumbuh, namun demikian pula halnya dengan emisi karbon, hilangnya keanekaragaman hayati, dan penipisan sumber daya; perkembangan ini menyingkap kerentanan ekosistem Bumi. Paradoks ini mendasari tantangan terbesar umat manusia: tarik-menarik antara penciptaan kekayaan dan pelestarian ekologi. Selama beberapa dekade, kita memandang hubungan antara pertumbuhan dan keberlanjutan sebagai permainan *zero-sum* (di mana keuntungan satu pihak berarti kerugian bagi pihak lain): negara dan perusahaan meyakini bahwa kemajuan di satu bidang menuntut pengorbanan di bidang lainnya.

Namun, kini umat manusia berada di ambang transformasi digital yang ditandai dengan pertumbuhan eksponensial kecerdasan buatan (AI), yang menghadirkan peluang tak tertandingi untuk mendefinisikan ulang narasi yang ada. Dengan memanfaatkan potensi AI untuk memproses kumpulan data besar, mengoptimalkan sistem yang kompleks, dan memprediksi kondisi masa depan, masyarakat pada akhirnya dapat menyelaraskan tujuan yang selama ini tampak mustahil untuk dipertemukan: kemajuan ekonomi dan keberlanjutan lingkungan.

Bab ini mengkaji potensi AI sebagai penengah dalam diskusi krusial ini. Bab ini menelusuri akar sejarah kesenjangan antara pertumbuhan dan keberlanjutan, mengeksplorasi kerangka teoretis yang mendasari tuntutan ekonomi dan ekologi, serta menelaah penerapan di dunia nyata di mana AI telah memungkinkan lahirnya solusi inovatif. Mulai dari optimalisasi jaringan energi hingga penerapan rantai pasok sirkular, potensi AI untuk memisahkan aktivitas ekonomi dari dampak buruk lingkungan sebuah tujuan inti dalam ekonomi ekologis harus dipahami sebagai sesuatu yang mendalam dan memiliki banyak dimensi. Akan tetapi, potensi ini juga sarat dengan kompleksitas etis dan praktis. Oleh karena itu, bab ini mengevaluasi secara kritis potensi risiko penerapan kecerdasan buatan, mulai dari bias algoritmik hingga intensitas komputasi yang tinggi. Hal ini mempertimbangkan arah masa depan untuk mendorong penyelarasan teknologi-teknologi tersebut dengan tujuan kesetaraan, transparansi, dan kesehatan planet.

Dilema Pertumbuhan dan Keberlanjutan: Latar Belakang Historis

Revolusi Industri merupakan lompatan besar pertama umat manusia menuju pertumbuhan ekonomi modern, namun peristiwa ini juga menetapkan paradigma ekstraksi sumber daya. Kombinasi penggunaan bahan bakar fosil, deforestasi, dan industrialisasi yang tidak teregulasi menghasilkan kemakmuran bagi sebagian pihak dengan dampak ekologis yang sangat berat. Menjelang pertengahan abad ke-20, fenomena "Akselerasi Besar" (*Great Acceleration*) memicu lonjakan tajam PDB global, yang disertai dengan peningkatan emisi karbon, limbah plastik, dan laju kepunahan spesies.

Model ekonomi konvensional yang dipengaruhi oleh teori neoklasik dan menekankan pertumbuhan tanpa batas di planet yang memiliki keterbatasan sumber daya pada umumnya mengabaikan eksternalitas ekologis. Pandangan dominan tersebut bertahan hingga munculnya laporan *Limits to Growth* (Batas-Batas Pertumbuhan) pada tahun 1972 dan gerakan keberlanjutan berikutnya yang mengkritik pandangan tersebut; gerakan-gerakan ini justru mengusung transisi sistem demi menghormati batasan planet (*planetary boundaries*), yaitu ruang operasi yang aman bagi interaksi manusia dengan karakteristik biofisik bumi.

Akan tetapi, kemajuan yang dicapai tidaklah merata. Meskipun Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) Perserikatan Bangsa-Bangsa dan berbagai kesepakatan seperti Perjanjian Paris mencerminkan konsensus global mengenai pentingnya keseimbangan, implementasinya menghadapi berbagai tantangan berat. Banyak negara, khususnya di kawasan Global Selatan, berada di bawah tekanan politik untuk memprioritaskan pengentasan kemiskinan dan industrialisasi, bahkan dengan mengorbankan perlindungan lingkungan. Selain itu, perusahaan menghadapi kesulitan dalam menyeimbangkan tekanan untuk meraih keuntungan jangka pendek dari para pemegang saham dengan komitmen keberlanjutan jangka panjang. Di tengah situasi yang penuh perdebatan ini, hadirlah kecerdasan buatan (AI) sebuah alat yang berpotensi mendefinisikan ulang dilema lama tersebut melalui efisiensi, inovasi, dan kemampuan memprediksi masa depan.

Peran AI sebagai Faktor dalam *Decoupling*

Decoupling atau pemisahan antara pertumbuhan ekonomi dan dampak kerusakan lingkungan merupakan salah satu landasan pembangunan berkelanjutan. Para ekonom ekologi berpendapat bahwa pertumbuhan PDB bergantung pada dematerialisasi dan dekarbonisasi (*decoupling* absolut); hal ini harus kita capai demi menghindari keruntuhan ekologis. Janji AI untuk "melakukan lebih banyak hal dengan sumber daya lebih sedikit" menjadi sorotan di sini; potensi AI untuk meningkatkan produktivitas sumber daya sangat menjanjikan. Beberapa penerapannya mencakup optimalisasi energi di sektor manufaktur, pengurangan limbah melalui pertanian presisi, serta perbaikan logistik untuk meminimalkan jejak karbon dengan memanfaatkan algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*).

Sebagai contoh, pusat data Google menggunakan sistem pendingin berbasis AI yang mampu menghemat penggunaan energi hingga 40%; hal ini menunjukkan bagaimana peningkatan efisiensi yang "cerdas" dapat memberikan manfaat nyata, baik dari segi ekonomi maupun lingkungan. AI juga meningkatkan kecanggihan kemampuan prediksi, sehingga memungkinkan masyarakat untuk mengantisipasi krisis ekologis yang kompleks sebelum terjadi. Pemodelan iklim berbasis AI turut meningkatkan akurasi prediksi cuaca ekstrem, sementara pemeriksaan citra satelit memungkinkan pemantauan deforestasi secara *real-time*. Berbagai perangkat ini memampukan para pembuat kebijakan dan pelaku bisnis untuk mengambil keputusan berbasis data yang bersifat preventif terhadap bencana, alih-alih sekadar merespons setelah bencana terjadi. Selain itu, AI mendorong transisi menuju ekonomi sirkular, yang berupaya mengurangi limbah melalui penggunaan kembali (*reuse*) dan daur ulang (*recycling*). Sejumlah perusahaan rintisan (*startup*), seperti AMP Robotics, menggunakan sistem visi berbasis AI untuk mengidentifikasi material yang dapat didaur ulang dengan tingkat

akurasi yang melampaui kemampuan manusia, serta mengubah limbah menjadi sumber pendapatan.

Bab ini mengupas penerapan-penerapan tersebut dari berbagai wilayah geografis dan sektor industri. Sektor energi Denmark menjadi contoh nyata integrasi AI secara sistemik: ladang angin di negara tersebut telah menggunakan analitik prediktif untuk menyelaraskan produksi energi dengan permintaan, sementara jaringan listrik pintar (*smart grids*) menyeimbangkan input dari sumber terbarukan demi mencapai target 80% listrik dari energi terbarukan. Di sektor pertanian, prediksi hasil panen berbasis AI di India membantu petani kecil beradaptasi dengan fluktuasi iklim, sehingga meningkatkan pendapatan sekaligus mengurangi penggunaan pestisida dan air. Studi kasus perusahaan, seperti rantai pasok berbasis AI milik Patagonia, menunjukkan bagaimana teknologi digital memperluas penerapan pola pikir ekonomi sirkular meliputi perbaikan, penjualan kembali, dan daur ulang melalui pemeriksaan data.

Ini hanyalah beberapa contoh dari fleksibilitas AI serta tantangan kontekstual yang menyertainya. Di negara-negara berkembang, kurangnya infrastruktur digital dan ketimpangan akses terhadap teknologi berisiko memperlebar kesenjangan terkait AI (*AI divide*). Sebaliknya, negara-negara dengan sistem tata kelola yang kuat seperti pendekatan yang mengutamakan aspek digital di Estonia menunjukkan bagaimana fondasi kelembagaan dapat meningkatkan potensi AI.

Imperatif Etika dan Tata Kelola

Dampak AI terhadap keberlanjutan tidak serta-merta bersifat positif. Pelatihan model AI berskala besar membutuhkan energi yang sangat besar dan berpotensi meniadakan manfaat lingkungan yang dihasilkannya. Bias algoritmik dapat meminggirkan kelompok masyarakat rentan dalam strategi adaptasi iklim, sementara otomatisasi dapat mengguncang pasar tenaga kerja. Pengembangan AI yang etis menuntut adanya transparansi, pertumbuhan inklusif, dan akuntabilitas. "Algoritma hemat energi" dan akses yang adil merupakan beberapa prinsip AI yang didorong dalam bab ini yang dirumuskan sebagai aturan, serupa dengan *AI Act* (Undang-Undang AI) Uni Eropa yang akan segera diberlakukan.

Kolaborasi lintas disiplin sangatlah penting bagi langkah ke depan. Kita harus mengembangkan solusi secara bersama-sama melibatkan ekonom, ahli ekologi, dan ahli teknologi untuk menyelaraskan AI dengan batasan daya dukung planet bumi (*planetary boundaries*). Pemerintah memerlukan perangkat untuk menilai dampak siklus hidup AI, dan dunia usaha harus mengintegrasikan aspek keberlanjutan ke dalam tata kelola AI mereka. Inisiatif seperti *AI for Earth* merupakan contoh nyata kemitraan publik-swasta yang menunjukkan kekuatan aksi kolektif.

Di akhir bab ini, kita membahas bahwa AI bukanlah solusi ajaib (*panacea*), melainkan instrumen kunci dalam perangkat pembangunan berkelanjutan umat manusia. Integrasi AI yang bertanggung jawab menuntut kerendahan hati, pandangan jauh ke depan, dan komitmen teguh terhadap keadilan. Dengan menyelaraskan inovasi teknologi dan wawasan ekologis, masyarakat dapat meniti jalan yang penuh tantangan di era ini yakni mencapai kesejahteraan bagi manusia maupun planet bumi. Bab ini mengupas tema-tema tersebut dengan menyajikan

wawasan teoretis, bukti empiris, dan peta jalan untuk memanfaatkan AI sebagai katalisator transformasi berkelanjutan. Taruhannya sangatlah besar: pilihan kita saat ini akan menentukan apakah era digital menjadi penanda akhir (*epitaph*) bagi masa Antroposen atau justru menjadi landasan bagi masa depan yang dinamis dan regeneratif.

8.2 AI DALAM PERTUMBUHAN EKONOMI DAN KEBERLANJUTAN LINGKUNGAN

Hal ini menempatkan hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan keberlanjutan lingkungan dalam perspektif baru sebagai topik kajian lintas disiplin yang mencakup bidang ekonomi, ekologi, dan studi teknologi. Oleh karena itu, tinjauan pustaka ini menguraikan kerangka teoretis, temuan empiris, dan kontroversi etis terkait hubungan tersebut melalui lensa kecerdasan buatan (AI). Berdasarkan studi yang telah melalui telaah sejawat (*peer-reviewed*), laporan kebijakan, dan pemeriksaan kasus, pemantauan ini mengkaji tiga tema yang saling berkaitan:

1) ketegangan historis antara paradigma pertumbuhan dan paradigma keberlanjutan;
2) peran AI sebagai agen pemisahan (*decoupling agent*); serta
3) tantangan etika dan tata kelola yang terkait dengan penerapan AI.

Landasan Teoretis Dilema Pertumbuhan dan Keberlanjutan

Ketegangan antara pembangunan ekonomi dan keberlanjutan ekologis merupakan kesalahpahaman yang disebarluaskan oleh model ekonomi neoklasik, yang menyamakan pertumbuhan PDB dengan kemajuan masyarakat. Namun, model-model tersebut mengabaikan batasan planet (*planetary boundaries*) yaitu batas-batas biofisik dalam sistem Bumi sebagaimana dikemukakan oleh para ekonom ekologis. Laporan *Limits to Growth* (Batas Pertumbuhan) adalah yang pertama mengemukakan bahwa pertumbuhan tak terbatas di planet yang memiliki sumber daya terbatas akan menyebabkan keruntuhan sistemik; sebuah perspektif yang diperkuat oleh gagasan Antroposen, yakni catatan geologis yang didominasi oleh aktivitas manusia.

Degrowth (pengurangan pertumbuhan) sebuah upaya sadar untuk menurunkan skala konsumsi sumber daya sebagai jalan menuju keberlanjutan ditawarkan sebagai alternatif bagi model pertumbuhan tradisional. Di sisi lain, para pendukung "pertumbuhan hijau" (*green growth*) meyakini bahwa inovasi teknologi dapat memisahkan aktivitas ekonomi dari risiko ekologis. Perdebatan ini menjadi dasar bagi Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) Perserikatan Bangsa-Bangsa, yang bercita-cita menciptakan kemakmuran yang seimbang (SDG 8) serta aksi iklim (SDG 13) dan konsumsi yang bertanggung jawab (SDG 12). Munculnya AI sebagai teknologi transformatif telah menghidupkan kembali perdebatan mengenai pemisahan (*decoupling*), di mana para peneliti menyoroti kemampuannya dalam meningkatkan pemanfaatan sumber daya dan memprediksi risiko lingkungan.

AI Sebagai Agen Pemisahan (*Decoupling*): Mekanisme dan Bukti

Pemisahan (*decoupling*) akan memerlukan peningkatan efisiensi energi, pengurangan limbah, dan penerapan praktik ekonomi sirkular bidang-bidang di mana AI menunjukkan potensi besar. Algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*) unggul dalam menemukan pola perilaku saat ini maupun masa depan di dalam kumpulan data yang sangat besar; hal ini

mendorong perkembangan pertanian presisi, jaringan energi pintar (*smart energy grids*), dan pemeliharaan prediktif dalam manufaktur. Sebagai contoh, prakiraan permintaan berbasis AI dalam rantai pasok dapat meminimalkan kelebihan produksi, yang merupakan salah satu penyebab utama emisi karbon.

AI dan Perannya dalam Integrasi Energi Terbarukan: Bukti Empiris. Dengan memanfaatkan analitik prediktif, ladang angin berbasis AI di Denmark mampu meningkatkan keluaran energi sebesar 20%. *DeepMind* menggunakan *reinforcement learning* untuk memangkas biaya pendinginan pusat data Google sebesar 40%. Demikian pula, pertanian presisi berbasis AI di India berhasil meningkatkan hasil panen sebesar 30% dan mengurangi konsumsi air sebesar 25%. Studi melaporkan bahwa seleksi fenotipik berbantuan AI di Tiongkok meningkatkan hasil panen gandum sebesar 35%. Contoh-contoh ini selaras dengan konsep keberlanjutan yang kuat (*strong sustainability*), yang menekankan pada pelestarian modal alam melalui evolusi sistem ekonomi.

Namun, gagasan pemisahan (*decoupling*) tersebut masih diperdebatkan. Sebagaimana diperingatkan tentang pemisahan relatif (pengurangan penggunaan sumber daya per unit PDB) terlalu sering menjadi kedok (yang semu) bagi peningkatan absolut dalam kerusakan lingkungan. Beban energi yang sangat besar dari infrastruktur AI seperti pusat data yang mengonsumsi 1% listrik dunia—berisiko meniadakan manfaatnya bagi keberlanjutan (MIT *Energy Initiative*. Oleh karena itu, para akademisi mendorong pengembangan kerangka kerja "*Green AI*" yang memprioritaskan algoritma hemat energi.

Isu Etika dan Tata Kelola

Pertanyaan etis seputar kesetaraan, transparansi, dan konsekuensi yang tidak disengaja muncul seiring dengan penerapan AI di bidang lingkungan. Bias algoritmik, misalnya, dapat memperparah ketimpangan dalam adaptasi iklim. Di Bangladesh, sebuah studi mengenai model prediksi banjir menemukan bahwa risiko sistem AI terhadap masyarakat berpenghasilan rendah diperparah oleh pengabaian sistematis terhadap permukiman informal dalam sumber data AI, karena permukiman tersebut sering kali tidak tercatat.

Kerangka kerja tata kelola sangat penting untuk mengatasi risiko-risiko ini. Contohnya adalah *Artificial Intelligence Act* Uni Eropa yang mengatur transparansi dan akuntabilitas dalam aplikasi berisiko tinggi, termasuk pengelolaan lingkungan. Di sisi lain, program seperti "*AI for Earth*" dari Microsoft berfokus pada penyediaan alat akses terbuka untuk mendemokratisasi manfaat AI. Para peneliti mendorong proses desain partisipatif yang melibatkan pemangku kepentingan dari kelompok terpinggirkan dalam pengembangan AI, serta penggunaan penilaian siklus hidup (*lifecycle assessment*) untuk mengukur jejak karbon AI.

Sintesis dan Kesenjangan

Riset yang ada menyoroti potensi transformatif AI namun juga mengungkap adanya kesenjangan penting. Pertama, sebagian besar studi kasus berlokasi di negara-negara maju, sehingga terdapat kekurangan studi mengenai skalabilitas teknologi AI untuk wilayah berpenghasilan rendah. Kedua, meskipun studi teknis berlimpah, kajian lintas disiplin termasuk ekonomi ekologi dan etika AI masih relatif jarang ditemukan. Terakhir, pemeriksaan

jangka panjang mengenai kemampuan AI dalam mendorong pemisahan (*decoupling*) sangatlah penting seiring dengan perubahan pola konsumsi global.

Pemantauan riset ini menempatkan AI sebagai pedang bermata dua: teknologi ini memiliki potensi besar untuk mendorong inovasi berkelanjutan, namun terhambat oleh berbagai tantangan etika, teknis, dan tata kelola. Ke depannya, distribusi yang adil, kerangka kebijakan yang kokoh, dan kerja sama lintas disiplin diperlukan untuk menyelaraskan penggunaan AI dengan batasan daya dukung planet.

Bab ini berargumen bahwa untuk mewujudkan potensi AI, diperlukan aplikasi unggulan (*killer app*) serta talenta di bidang rekayasa. Namun, hal ini juga menuntut peninjauan kembali terhadap pertumbuhan tersebut yakni sebuah paradigma pertumbuhan baru yang memadukan integritas ekonomi dan ekologis dengan kesejahteraan serta kemajuan umat manusia.

8.3 ENAM PILAR AKSI STRATEGIS PENERAPAN AI

Para pemangku kepentingan (pemerintah, perusahaan, LSM, dan masyarakat) harus mengambil pendekatan yang terstruktur dan kolaboratif, baik di tingkat mikro maupun makro, untuk mewujudkan potensi AI dalam menyelaraskan pertumbuhan ekonomi dengan keberlanjutan lingkungan. Sistem tindakan ini mengidentifikasi enam pilar aksi yang dapat diterapkan, termasuk pembelajaran yang lebih bersifat teoretis, studi kasus, dan pertimbangan etis.

Kolaborasi Antarsektor & Keterlibatan Pemangku Kepentingan

Tujuan: Mengintegrasikan inovasi AI dengan tujuan keberlanjutan melalui kolaborasi lintas disiplin.

Tindakan:

(a) Membentuk inisiatif kolaboratif, seperti model sektor energi Denmark, melalui kemitraan pemerintah-swasta di mana solusi AI dikembangkan bersama untuk mengatasi tantangan sektor tertentu, misalnya integrasi energi terbarukan atau pengurangan limbah.

(b) Mengidentifikasi dan membentuk dewan lintas pemangku kepentingan yang melibatkan pembuat kebijakan, ahli teknologi, ahli ekologi, dan perwakilan masyarakat.

(c) Menyediakan hibah inovasi eksternal bagi perusahaan rintisan (*startup*) dan peneliti yang berfokus pada "*Green AI*" (misalnya, algoritma rendah karbon atau perangkat ekonomi sirkular).

Sarana: Platform perjodohan digital untuk membangun sinergi antara pengembang AI dan ahli keberlanjutan (contohnya, Climate-KIC milik Uni Eropa).

Fondasi & Ketersediaan Data

Tujuan: Membangun ekosistem data yang tangguh dan inklusif untuk mendukung aplikasi AI generatif.

Tindakan:

(a) Menciptakan arsip data lingkungan dengan akses terbuka (misalnya, *Earth Observing System* milik NASA) bagi model AI yang dilatih menggunakan kumpulan data iklim, keanekaragaman hayati, dan penggunaan sumber daya.
(b) Mendanai jaringan IoT (seperti sensor pintar di sektor pertanian atau jaringan listrik pintar) guna memperoleh informasi waktu nyata dari wilayah yang saat ini belum terlayani dengan memadai.
(c) Mendorong program literasi data dan memberikan subsidi infrastruktur digital di negara-negara berpenghasilan rendah untuk memperkecil kesenjangan AI.

Sarana: *Blockchain* yang mendorong tata kelola data yang transparan dan sistem *federated learning* yang memungkinkan pemanfaatan data terdesentralisasi sembari tetap melindungi privasi.

Tata Kelola Etis dan Akuntabilitas Ai

Tujuan: Integritas ilmiah, kesetaraan, dan transparansi dalam sistem AI.

Tindakan:

a) Memberlakukan penilaian siklus hidup wajib untuk proyek AI yang dilakukan sejak tahap awal hingga pengembangan guna memahami tidak hanya aspek teknis, tetapi juga dampak lingkungan (misalnya, penggunaan energi, limbah elektronik) dan dampak sosial (misalnya, hilangnya lapangan kerja).
(b) Melakukan audit algoritmik untuk mengidentifikasi bias dalam perangkat keberlanjutan (misalnya, memastikan strategi adaptasi iklim turut membantu masyarakat yang terpinggirkan).
(c) Memastikan tata kelola AI selaras dengan praktik global, seperti *EU AI Act*, yang berfokus pada mitigasi risiko potensial di sektor-sektor krusial (seperti energi dan pertanian).

Sarana: Prinsip dan kerangka kerja AI dari OECD, serta sertifikasi "*Green AI*" untuk algoritma yang beroperasi dengan jejak karbon rendah.

Pemeriksaan dan Mengoptimalkan Ketersediaan Sumber Daya

Tujuan: Mengembangkan AI untuk memisahkan aktivitas ekonomi dari kerusakan lingkungan.

Tindakan:

(a) Menerapkan AI dalam sistem ekonomi sirkular: Pemeliharaan prediktif (misalnya, pengurangan limbah industri) menggunakan *machine learning* dan daur ulang berbasis AI (misalnya, sistem pemilahan limbah dari AMP Robotics).
(b) Memperluas skala perangkat pertanian presisi (misalnya, sistem prediksi hasil panen di India) untuk mengoptimalkan penggunaan air, pupuk, dan pestisida secara global.
(c) Menggunakan AI untuk mengoptimalkan jaringan energi pintar (*smart energy grids*) dengan menyeimbangkan sumber energi terbarukan, penyimpanan, dan permintaan (misalnya, solusi pendinginan *DeepMind* dari Google).

Sarana: *Digital twin* untuk menyimulasikan rantai pasok berkelanjutan dan *reinforcement learning* untuk alokasi sumber daya yang dinamis.

Integrasi Kebijakan & Peningkatan Kapasitas

Tujuan: Mengintegrasikan AI ke dalam agenda keberlanjutan nasional dan internasional.

Tindakan:

(a) Memperbarui rencana iklim nasional (misalnya, NDC berdasarkan Perjanjian Paris) untuk memasukkan jalur dekarbonisasi berbasis AI.
(b) Mengedukasi para pembuat kebijakan mengenai kecerdasan buatan melalui program-program seperti *Capacity Development for Environment Sustainability* (Pengembangan Kapasitas untuk Keberlanjutan Lingkungan) dari PBB.
(c) Mempertimbangkan penerapan *regulatory sandbox* (ruang uji coba regulasi) untuk menguji solusi AI dalam lingkungan yang terkendali (misalnya, untuk menguji platform perdagangan karbon berbasis AI).

Perangkat: Perangkat kebijakan (seperti perangkat "*AI for Sustainable Development*" dari Bank Dunia) dan subsidi bagi UKM yang mengadopsi perangkat keberlanjutan berbasis AI.

Pemantauan, Evaluasi, & Pembelajaran Adaptif

Tujuan: Mengevaluasi efektivitas AI dari waktu ke waktu dan menyesuaikan rencana sebagaimana mestinya.

Tindakan:

(a) Menetapkan KPI (karbon per unit PDB, energi per unit PDB, dan lain lain.) untuk mengukur kemajuan *decoupling* (pemisahan antara pertumbuhan ekonomi dan dampak lingkungan).
(b) Memanfaatkan AI itu sendiri untuk menilai hasil: Menggunakan analitik prediktif untuk memantau perubahan dalam deforestasi atau kualitas udara yang terkait dengan intervensi AI.
(c) Membangun mekanisme umpan balik dengan masyarakat agar solusi tetap berkeadilan secara sosial (misalnya, penilaian dampak partisipatif).

Perangkat: Platform seperti *Planetary Computer* dari Microsoft untuk analitik geospasial dan *blockchain* untuk pelaporan dampak yang transparan.

Pemerintah harus menjalankan tata kelola melalui kebijakan yang mendukung, perusahaan harus mengutamakan keberlanjutan jangka panjang dibandingkan keuntungan jangka pendek, dan masyarakat sipil harus menuntut akuntabilitas mereka. Menciptakan integrasi ini memungkinkan AI beralih dari sekadar janji teoretis berbasis data menjadi penggerak praktis bagi pertumbuhan yang adil dan regenerative menunjukkan bahwa keberhasilan ekonomi dan kesehatan lingkungan bukanlah hal yang saling meniadakan, melainkan saling mendukung. Gambar 8.1 memperlihatkan kerangka kerja untuk mengoperasionalkan AI dalam implementasi SDG.



Gambar 8.1 Operasionalisasi kerangka kerja AI untuk implementasi SDG
(Sumber: Konsepsi penulis)

8.4 DAMPAK AI TERHADAP PERTUMBUHAN EKONOMI

Memasukkan kecerdasan buatan (AI) ke dalam strategi untuk menyeimbangkan pertumbuhan ekonomi dan keberlanjutan lingkungan memiliki signifikansi tinggi dari sisi teoretis, praktis, sosial, dan keberlanjutan. Implikasi-implikasi ini menyoroti berbagai peluang dan tantangan, yang menuntut pendekatan yang dirancang secara cermat untuk memanfaatkan potensi AI sekaligus mengelola risikonya.

Implikasi Teoritis

Dengan demikian, implikasi metodologis dari peran AI dalam aktivitas ekonomi yang terlepas dari ketergantungan pada pertumbuhan konvensional (*decoupled economic activity*) melalui dampaknya di berbagai bidang ilmu menghadirkan tantangan sekaligus memperkaya kerangka kerja teoretis yang ada. Ekonomi ekologis, yang mengutamakan batasan planet (*planetary boundaries*) dan mempertanyakan model pertumbuhan tak terbatas, memperoleh dukungan empiris dari sains AI sebagai alat untuk mengoptimalkan efisiensi sumber daya dan memungkinkan sistem sirkular.

Sebagai contoh, analitik prediktif berbasis AI selaras dengan konsep "keberlanjutan kuat" (*strong sustainability*) yang menuntut pelestarian modal alam. Di sisi lain, teori pertumbuhan neoklasik yang biasanya mengabaikan eksternalitas lingkungan kehilangan kredibilitasnya karena AI menghadirkan cara terukur untuk menginternalisasi biaya ekologis (seperti model penetapan harga karbon yang dibantu AI), yang berpotensi menjadi kontraproduktif.

AI juga menghidupkan kembali perdebatan mengenai *degrowth* (pengurangan pertumbuhan) versus *green growth* (pertumbuhan hijau). Sementara para pendukung *degrowth* menyerukan penurunan tingkat konsumsi, kemampuan AI untuk memanfaatkan sumber daya yang kian terbatas secara lebih produktif justru sejalan dengan narasi *green growth*; hal ini menunjukkan bahwa inovasi teknologi dapat menjembatani ketegangan antara

pertumbuhan dan keberlanjutan. Namun, kondisi ini memunculkan pertanyaan mengenai "efek *rebound*"di mana peningkatan efisiensi justru mendorong peningkatan konsumsi sehingga menyoroti perlunya teori yang memperhitungkan mekanisme umpan balik perilaku dan sistemik.

Implikasi Praktis

Pada tingkat praktis, penerapan AI menuntut perubahan struktural dalam tata kelola, industri, dan penyebaran teknologi. Para pembuat kebijakan harus memprioritaskan investasi pada infrastruktur digital yang relevan seperti jaringan IoT untuk pemantauan lingkungan secara *real-time* serta mengadopsi kerangka kerja regulasi seperti *EU AI Act* guna menjamin penggunaan AI yang etis. Sebagai contoh, ladang angin yang terintegrasi dengan kecerdasan buatan di Denmark menunjukkan betapa krusialnya kemitraan pemerintah-swasta dalam upaya meningkatkan skala energi terbarukan.

Tuntutan bagi dunia usaha untuk menerapkan AI demi efisiensi operasional menciptakan tekanan tersendiri. Namun, perusahaan harus menyeimbangkan hal ini dengan pertimbangan etis guna menghindari kerusakan reputasi dan persepsi merek yang negatif. Penilaian siklus hidup dan audit algoritmik, misalnya, dapat membantu memitigasi risiko seperti pusat data yang boros energi atau model iklim yang bias. Di sisi lain, terdapat tantangan khusus bagi negara-negara berkembang; inisiatif yang inklusif diperlukan untuk mencegah munculnya "kesenjangan AI" (*AI divide*). Hal ini terlihat dari proyek pertanian presisi berbasis AI di India, yang berisiko menyebabkan pengucilan jika teknologi dan pelatihan tidak tersedia secara merata.

Implikasi Sosial

Dampak sosial AI akan sangat bergantung pada inklusi dan kesetaraan. Selain itu, teknologi hijau dan pemeliharaan sistem AI dapat membuka peluang baru sekaligus menggantikan lapangan kerja di sektor manufaktur. Namun, kelompok masyarakat yang terpinggirkan biasanya merupakan pihak yang paling terdampak oleh kerusakan lingkungan maupun ketimpangan akses teknologi. Contohnya, model prediksi banjir berbasis AI di Bangladesh sempat mengabaikan permukiman informal akibat kurangnya data, sehingga meningkatkan kerentanan warga di wilayah tersebut.

Tata kelola yang etis harus menjadi landasan untuk mencegah ketimpangan semacam itu. Perangkat AI yang dikembangkan bersama oleh masyarakat dan institusi melalui proses desain partisipatif dapat memastikan terciptanya solusi yang relevan bagi kebutuhan lokal dan komunitas. Selain itu, program literasi AI dan jaring pengaman sosial perlu diterapkan untuk mempersiapkan tenaga kerja menghadapi transisi industri. Tuntutan ganda ini sangat jelas: AI harus mampu meningkatkan kesetaraan tanpa memperparah ketimpangan kekuasaan yang sudah ada.

Implikasi Keberlanjutan

AI harus mendorong perubahan sistemik demi keberlanjutan jangka panjang tanpa menambah kerusakan lingkungan yang justru ingin diatasi oleh teknologi tersebut. AI berkontribusi dalam optimalisasi jaringan energi dan pengurangan limbah (sebagai contoh, *Google* berhasil memangkas biaya pendinginan sebesar 40% dengan menggunakan

DeepMind). Namun, jejak karbon yang dihasilkan oleh teknologi ini tetap menjadi perhatian serius. Biaya energi untuk melatih model AI besar dapat mengimbangi manfaatnya. Kecuali didukung oleh energi terbarukan, pelatihan model AI besar menggunakan energi yang sangat besar, sehingga mengimbangi keuntungan.

Peran teknologi lain dalam mencapai SDGs. Potensi AI dalam mencapai SDGs menjanjikan tetapi bergantung pada kebijakan holistik. Ekonomi sirkular yang didukung AI, misalnya, dapat meminimalkan kerugian material (SDG 12), sementara pemodelan iklim prediktif dapat meningkatkan ketahanan terhadap bencana (SDG 13). Namun, keberhasilan akan membutuhkan metrik untuk memantau pemisahan absolut bukan hanya peningkatan efisiensi dan kebijakan untuk membatasi efek rebound.

AI dalam menyeimbangkan pertumbuhan dan keberlanjutan memiliki implikasi yang kompleks dan saling terkait. AI secara teoritis bersifat reaktif terhadap model pertumbuhan tetapi merupakan cara praktis untuk mempertahankannya. Dalam praktiknya, hal ini membutuhkan investasi dalam infrastruktur dan kepemimpinan etis. Ini membutuhkan desain inklusif untuk menghindari ketidaksetaraan di tingkat sosial. Dari perspektif hijau, keuntungannya bergantung pada integrasi energi terbarukan dan penilaian dampak yang ketat. Energi terpadu mengintegrasikan kebijakan, inovasi, dan keadilan sangat penting untuk memungkinkan AI sebagai penggerak menuju masa depan *regeneratif* di mana prioritas ekonomi dan ekologi bersifat simbiosis.

8.5 AI UNTUK PERTUMBUHAN EKONOMI LINGKUNGAN

Menyeimbangkan pertumbuhan ekonomi dengan keberlanjutan lingkungan adalah salah satu tantangan signifikan abad ke-21. Dalam hal ini, kecerdasan buatan, dengan kemampuannya yang tak tertandingi untuk pemeriksaan data, mengoptimalkan sistem, dan memprediksi kejadian, muncul sebagai akselerator yang inovatif. AI akan mewujudkan jalur yang bermakna untuk memisahkan kemakmuran dari dampak lingkungan dengan memungkinkan efisiensi sumber daya, kemajuan dalam integrasi energi terbarukan, dan mendorong ekonomi sirkular. Dari jaringan pintar Denmark hingga pertanian berbasis AI di India, studi kasus menyoroti potensinya untuk mempercepat inovasi berkelanjutan sekaligus menstabilkan ketahanan ekonomi.

Namun, janji AI datang dengan bahaya. Infrastrukturnya yang boros energi, bahaya bias algoritmik, dan potensi untuk memperburuk ketidaksetaraan global membutuhkan tata kelola yang waspada. Kerangka kerja etika seperti Undang-Undang AI Uni Eropa dan inisiatif "AI Hijau" menekankan investasi dalam teknologi hemat energi dan desain inklusif. Secara sosial, memaksa komunitas rentan untuk tetap tertinggal karena sebagian kecil elit kini memiliki alat produksi mengingatkan kita akan pentingnya kebijakan yang melindungi mereka yang digantikan oleh teknologi, serta jaring pengaman sosial dan pengambilan keputusan partisipatif.

AI adalah alat, bukan obat mujarab, yang harus digunakan dengan niat dan kerendahan hati. Keberhasilannya bergantung pada kolaborasi: pemerintah perlu menerapkan kebijakan progresif, bisnis harus berinovasi dalam batas kemampuan planet, dan masyarakat sipil harus

meminta pertanggungjawaban struktur kekuasaan. Dengan menanamkan kesetaraan, transparansi, dan etika ekologis dalam pengembangan AI, umat manusia dapat menempuh jalan yang sulit yang mewakili tindakan penyeimbangan di zaman kita. Panduan menuju lanskap baru Jalan ke depan membutuhkan keahlian teknis dan visi baru tentang kemajuan di mana pertumbuhan ekonomi adalah cara untuk mempertahankan kehidupan, bukan menghancurkannya. Perpaduan antara sumber daya alam dan penemuan manusia mungkin merupakan bagian terpenting dari masa depan yang berkelanjutan dan regeneratif yang dapat kita miliki.

BAB 9
CETAK BIRU AI UNTUK EKONOMI NETRAL KARBON

9.1 AI DAN TRANSFORMASI MENUJU NETRAL KARBON

Umat manusia telah mencapai momen krusial di persimpangan antara darurat iklim dan perubahan teknologi yang berlangsung cepat. Pada saat yang sama, solusi keberlanjutan yang selama ini menjadi status *quo* di mana emisi karbon ditekan hingga mencapai tingkat nol bersih (*net-zero*) melalui pembuatan kebijakan bertahap atau terobosan teknologi sesaat tidaklah berkelanjutan jika melihat lonjakan emisi karbon global yang telah jauh melampaui batas aman planet ini. Fotosintesis digital merupakan sebuah metafora di mana "*Yoda digital*" yang dikenal sebagai kecerdasan buatan atau *Artificial Intelligence* (AI) memiliki kekuatan untuk membawa perubahan, layaknya alam memanfaatkan energi matahari untuk diubah menjadi makanan yang menopang kehidupan. Sama halnya dengan fotosintesis biologis yang menyerap karbon dioksida untuk menghasilkan oksigen, sistem berbasis AI menyediakan peta jalan untuk menangani kompleksitas emisi saat ini dan mengubahnya menjadi ekonomi sirkular yang berkelanjutan. Dengan beralih dari pandangan teknologi yang berpusat pada alat semata menuju pandangan yang berfokus pada struktur, bab ini menguraikan penggunaan AI untuk menata ulang elemen-elemen struktural lingkungan perkotaan, ekosistem pertanian, dan sistem transportasi yang pada akhirnya akan membawa kita menuju dunia netral karbon.

Perubahan iklim telah menjadi kenyataan tak terelakkan yang menuntut pemikiran ulang secara radikal. Dengan konsentrasi CO_2 di atmosfer yang melampaui 420 ppm dan proyeksi kenaikan suhu global sebesar 2,7 °C pada akhir abad ini, peluang untuk melakukan penghapusan bertahap (*phase-out*) dalam upaya mitigasi telah tertutup. Pendekatan konvensional cenderung terfragmentasi dan reaktif, serta gagal mengatasi saling ketergantungan antara pertumbuhan ekonomi, konsumsi sumber daya, dan kemunduran ekologis. Dalam konteks ini, AI berperan sebagai katalisator bagi perubahan sistemik. Melalui pemeriksaan data besar (*big data*), analitik prediktif, dan pembelajaran mesin (*machine learning*), AI melampaui sekadar pemecahan masalah secara linear untuk menciptakan sistem yang dinamis dan adaptif, yang memastikan bahwa aktivitas manusia dapat selaras dengan kesehatan planet. Dalam bab ini, kami akan mengemukakan bahwa potensi sejati AI terletak pada kapasitas sintetiknya yang holistic yang memadukan berbagai bidang, mulai dari model keuangan dan desain perkotaan hingga ilmu lingkungan untuk menghasilkan kerangka kerja yang bersifat regeneratif.

AI: Perancang Sistem Berkelanjutan

Peran AI dalam tiga bidang krusial ini dirangkum dalam metafora fotosintesis digital:

1. **Kota Cerdas: Ekosistem Perkotaan yang Diperkuat AI**

   Saat ini, kota-kota yang menyumbang 70% emisi global bukan hanya menjadi sumber masalah, tetapi juga bagian dari solusi. AI mengubah lanskap perkotaan dengan mempertimbangkan distribusi sumber daya secara optimal dari segi energi, mengotomatisasi integrasi energi terbarukan, serta memfasilitasi perancangan

komunitas yang padat dan berorientasi pada transit. AI mengelola data secara *real*-time untuk menyeimbangkan pasokan dan permintaan dalam jaringan listrik pintar (*smart grids*), mencegah pemborosan dalam konstruksi, serta menyimulasikan tata letak kota yang rendah karbon.

2. **Pembaruan dalam Pertanian: Presisi dan Regenerasi**
   Sektor pertanian merupakan penyumbang emisi yang signifikan sekaligus kandidat utama untuk transformasi berbasis AI. Pertanian presisi (*precision farming*) yang didorong oleh rekomendasi AI terkait kesehatan tanah, pola cuaca, dan genetika tanaman mampu mengurangi konsumsi air, limpasan pupuk, dan degradasi lahan. Namun, efisiensi hanyalah sebagian dari gambaran besarnya; AI juga memungkinkan penerapan praktik regeneratif, seperti pertanian dengan metode penangkapan karbon dan pemantauan keanekaragaman hayati, yang mengubah lahan pertanian dari penghasil emisi karbon menjadi penyerap karbon (*carbon sinks*).
3. **Jaringan Transportasi: Transportasi yang Gesit dan Adaptif**
   Sektor transportasi bertanggung jawab atas 20% emisi global. AI generatif merupakan inovasi yang merekayasa ulang mobilitas melalui manajemen lalu lintas cerdas, armada kendaraan listrik otonom, dan logistik prediktif. AI mengurangi emisi dengan cara mengoptimalkan rute, memangkas waktu mesin menyala tanpa bergerak (*idle time*), serta menyinkronkan sistem transit dengan ketersediaan energi terbarukan.
4. **Kolaborasi yang Beragam: Fondasi Keberhasilan AI**
   Bukan kekuatan AI itu sendiri yang menjadi kunci, melainkan perpaduan berbagai disiplin ilmu dengannya. Sebagai contoh, teori keuangan memandu algoritma AI untuk menetapkan harga bagi eksternalitas karbon, memberikan insentif bagi investasi teknologi ramah lingkungan, dan memitigasi risiko bisnis berkelanjutan. Pendekatan pengembangan perkotaan membantu mengarahkan akses yang adil terhadap ruang terbuka hijau dan perumahan, sementara alat bantu AI perlu dirancang dengan mempertimbangkan potensi risiko memperlebar kesenjangan sosial. Ilmu lingkungan menempatkan model AI dalam kerangka ambang batas ekologis, sehingga inovasi yang dihasilkan tetap menghormati batasan planet ini. Hal ini mengubah peran AI dari sekadar inovasi teknis menjadi lensa lintas disiplin yang mendasari pengambilan keputusan yang berkelanjutan secara ekonomi, adil secara sosial, dan ramah lingkungan.
5. **Kerangka Ekonomi Holistik**
   Bab ini akan mengemukakan bahwa ekonomi netral karbon bukanlah utopia yang jauh di masa depan, melainkan sebuah cetak biru yang dapat diwujudkan. Melalui pemikiran sistem, AI menghubungkan aspek-aspek spesifik efisiensi tingkat mikro dengan tujuan keberlanjutan tingkat makro yang holistik. Sebagai contoh, kemampuan prediktif AI memungkinkan kota-kota untuk menyimulasikan strategi ketahanan iklim, petani untuk menerapkan ekonomi sirkular, dan pemerintah untuk memodelkan jalur dekarbonisasi. Yang tak kalah penting, sistem-sistem ini bersifat iteratif; sistem

tersebut belajar dari umpan balik dunia nyata untuk beradaptasi seiring perubahan kondisi.

Di tengah ancaman titik kritis ekologis yang kian nyata, AI tidak lagi sekadar menjadi sumber kemajuan bertahap, melainkan menawarkan prospek menarik berupa "fotosintesis digital": sebuah visi biomekanistik di mana teknologi dan alam menyatu dalam harmoni simbiotik. Bab ini menyoroti pentingnya kerja sama antara pembuat kebijakan, ahli teknologi, dan anggota masyarakat untuk meningkatkan skala solusi-solusi ini serta menerapkan AI secara etis. Jawabannya terletak pada perancangan ekonomi yang menghormati dan beroperasi dalam batasan metabolik Bumi dengan memadukan inovasi dan kearifan lintas disiplin. Jalan menuju netralitas karbon memang jauh dari kata sederhana, namun dengan AI sebagai peta panduan kita, tujuan tersebut dapat dicapai. Bab-bab berikut mengupas cara kerja sistem yang dioptimalkan oleh AI, landasan finansial dan ilmiah dari optimalisasi AI, serta kebijakan transformatif untuk mewujudkan cetak biru ini menjadi kenyataan. Kita telah memasuki era fotosintesis digital.

9.2 AI DALAM TRANSFORMASI MENUJU NETRALITAS KARBON

Inovasi lintas disiplin sangat penting untuk menciptakan ekonomi netral karbon, dengan kecerdasan buatan (AI) sebagai faktor pemungkin utama. Berdasarkan tinjauan pustaka ini, kami menemukan bahwa berbagai aspek teknologi, ekonomi, dan lingkungan dari AI akan berperan serta pada akhirnya mendorong teknologi AI menuju keberlanjutan di sektor-sektor seperti perencanaan kota, pertanian, transportasi, dan sistem lintas disiplin. Dengan menyintesis riset yang telah melalui telaah sejawat (*peer-reviewed*), pemeriksaan ini menggambarkan bagaimana solusi berbasis AI mengatasi masalah sistemik sekaligus mengidentifikasi celah dalam pembelajaran yang telah dilakukan sejauh ini.

Perencanaan Kota yang Dioptimalkan oleh AI

Jejak lingkungan akibat urbanisasi yang menyumbang 70% emisi CO_2 global telah mendorong studi mengenai apakah AI dapat merekayasa ulang kota. Menurut studi kasus, jaringan listrik pintar (*smart grid*) berbasis AI menyeimbangkan pasokan dan permintaan energi secara *real-time* serta menyediakan sumber energi terbarukan, terutama tenaga surya dan angin, dengan manfaat efisiensi sebesar 90%. Sebagaimana ditunjukkan model pembelajaran mesin (*machine learning*) menyimulasikan tata letak kota rendah karbon serta mengoptimalkan kepadatan bangunan, ruang terbuka hijau, dan jaringan transportasi umum. Sistem-sistem ini mengurangi pemborosan energi dan emisi sekaligus meningkatkan kualitas hidup (*liveability*). AI juga membuat pengelolaan sumber daya menjadi lebih mudah dikendalikan. Sebagai contoh, analitik prediktif mengurangi limbah di lokasi konstruksi dengan memprediksi kebutuhan material secara akurat, dan algoritma lalu lintas *real-time* mengurangi emisi kendaraan sebesar 15–20%. Namun, sebagaimana adanya terdapat pandangan "utopia teknologi" terkait konsep kota pintar (*smart city*); oleh karena itu, aspek kesetaraan perlu ditempatkan sebagai pusat dari urbanisme berbasis AI agar tidak memperlebar kesenjangan sosial.

Produksi Pangan Berkelanjutan dan Regenerasi Berbasis AI

Akurasi AI diperlukan untuk mengurangi dampak lingkungan, mengingat sektor pertanian bertanggung jawab atas 24% emisi gas rumah kaca. Studi mencatat bahwa dalam pertanian presisi, AI memfasilitasi penggunaan sensor dan data satelit untuk mengarahkan strategi penyiraman tanaman, sehingga menghemat hingga 30% dari total penggunaan air. Teknologi ini telah digunakan untuk memprediksi hasil panen dengan tingkat akurasi 95%, yang membantu mencegah pemupukan berlebih dan emisi metana.

Selain meningkatkan efisiensi, AI juga memungkinkan penerapan praktik pertanian regeneratif. Pertanian berbasis penangkapan karbon, sebagaimana dikaji oleh pembelajaran, menyediakan pemetaan potensi sekuestrasi karbon tanah melalui model yang digerakkan oleh AI. Sementara itu, jaringan saraf tiruan juga dapat memantau hilangnya keanekaragaman hayati sebuah langkah menuju pembelajaran agroekosistem. Di sisi lain, kesenjangan digital di wilayah perdesaan menghambat adopsi teknologi di daerah berpenghasilan rendah serta menegaskan pentingnya pendekatan interaktif antara manusia dan mesin.

Jaringan Transportasi Ramah Lingkungan

Kemampuan AI untuk mengubah secara mendasar sistem mobilitas merupakan hal krusial bagi dekarbonisasi transportasi. Studi mengaitkan penggunaan kendaraan otonom (AV) dan kendaraan listrik (EV) dengan penurunan emisi sebesar 50% di kawasan perkotaan yang menerapkan ekonomi berbagi yaitu kawasan di mana algoritma berbagi tumpangan (*ride-sharing*) mendukung penggunaan AV. AI memungkinkan penjadwalan pengisian daya EV secara optimal agar selaras dengan pasokan energi terbarukan, sehingga mengurangi beban pada jaringan listrik.

Penerapan *reinforcement learning* dalam logistik angkutan barang dapat menghemat bahan bakar melalui optimalisasi rute pengiriman. Dampak AI dan *machine learning* terhadap keberlanjutan lingkungan dan iklim, serta penggunaan manajemen lalu lintas berbasis AI, terbukti mampu menurunkan emisi hingga sekitar 25% dengan mencegah kemacetan. Studi memperingatkan bahwa AI justru akan meningkatkan total jarak tempuh kendaraan (*vehicle miles travelled*) kecuali jika kebijakan lebih memprioritaskan angkutan umum dibandingkan penggunaan kendaraan pribadi.

Efektivitas AI bergantung pada perpaduan antara aspek ekonomi, ilmu lingkungan, dan kebijakan untuk mendorong skema penetapan harga karbon berbasis AI yang menginternalisasi biaya ekologis. Pada saat yang sama, studi mengidentifikasi manfaat AI dalam memitigasi risiko investasi hijau melalui analitik pasar prediktif. Ilmu lingkungan berperan dalam menetapkan batasan-batasan penting (*guardrails*). Studi mengingatkan bahwa sistem AI harus selaras dengan batas-batas planet (*planetary boundaries*), serta memastikan bahwa solusi seperti penangkapan karbon tidak memicu umpan balik ekologis yang merugikan. Para peneliti studi perkotaan seperti pembelajaran mendorong penerapan kerangka kerja AI partisipatif untuk memfasilitasi akses yang adil terhadap manfaat keberlanjutan, termasuk energi bersih dan perumahan yang terjangkau.

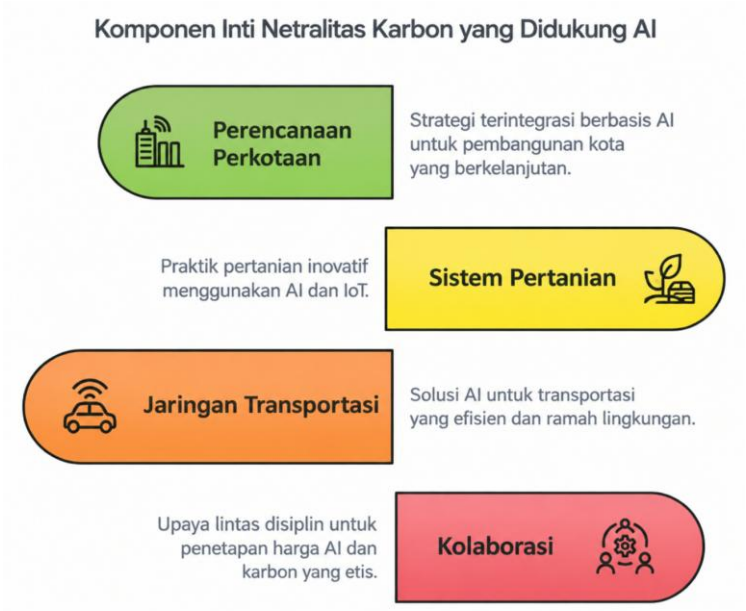
Kesenjangan dan Arah Masa Depan

Meskipun berbagai riset telah banyak mengkaji kelayakan teknis, masih terdapat tiga kesenjangan utama. Pertama, implikasi sosioteknis dari AI (misalnya, privasi data dan pergeseran tenaga kerja) belum banyak diteliti. Kedua, skalabilitasnya belum terbukti, karena sebagian besar studi hanya berfokus pada proyek percontohan dan bukan pada implementasi sistemik. Ketiga, berbagai paradigma keuangan, ekologis, dan perkotaan dapat diintegrasikan, namun kolaborasi lintas disiplin sering kali masih bersifat teoretis dengan model empiris yang terbatas.

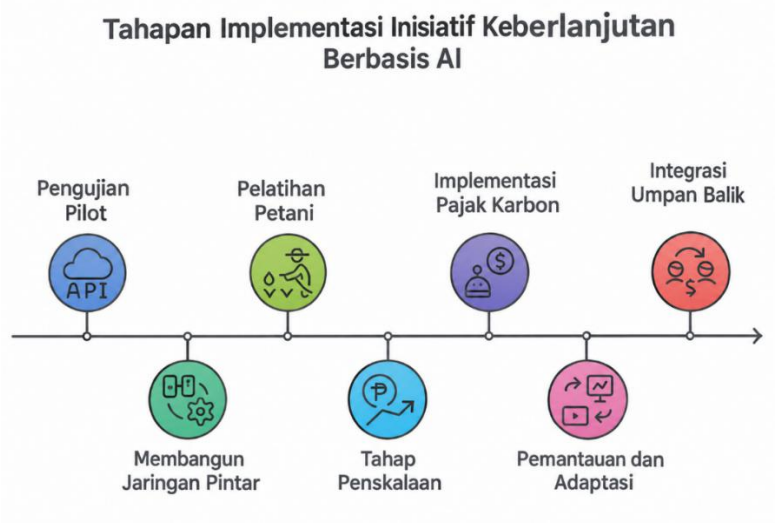
Kemampuan AI dalam mewujudkan netralitas karbon telah terbukti nyata di sektor perkotaan, pertanian, dan transportasi. Akan tetapi, keberhasilannya bergantung pada integrasi berbagai disiplin ilmu, tata kelola yang berkeadilan, dan kebijakan yang dapat diterapkan dalam skala luas. Pembelajaran di masa depan harus menekankan pada kerangka kerja etis dan pengujian di dunia nyata guna mentransformasikan konsep teoretis "fotosintesis digital" menjadi aksi iklim yang nyata.

9.3 KERANGKA IMPLEMENTASI AI MENUJU NETRALITAS KARBON

Kerangka kerja ini memadukan inovasi teknologi, penyelarasan kebijakan, dan kolaborasi antar pemangku kepentingan di sektor perkotaan, pertanian, dan transportasi guna menjadikan faktor-faktor netralitas karbon berbasis kecerdasan buatan (AI) ini bermanfaat secara praktis; kerangka kerja ini didasarkan pada pembelajaran lintas disiplin mengenai skalabilitas, kesetaraan, dan adaptabilitas. Gambar 9.1 menjelaskan komponen-komponen inti dalam pengusulan kerangka kerja tersebut. Gambar 9.2 menampilkan tahapan implementasinya.



Gambar 9.1 Netralitas karbon berbasis AI dan komponen-komponennya
(Sumber: Konsepsi penulis)



Gambar 9.2 Tahapan implementasi AI dan keberlanjutan
(Sumber: Konsepsi penulis)

Komponen Inti

a) Perencanaan Perkotaan Terintegrasi AI

- **Optimalisasi *Smart Grid* (Jaringan Cerdas):** Kecerdasan buatan (jaringan saraf tiruan) digunakan untuk manajemen sumber daya yang efektif guna menyeimbangkan pasokan energi terbarukan (pesisir, angin) dengan permintaan secara *real-time*. Mengantisipasi beban puncak melalui analitik prediktif dan mengotomatisasi distribusi penyimpanan energi.
- **Implementasi**: Pemasangan sensor IoT pada jaringan listrik yang sudah ada (*retrofitting*) dan kepemilikan algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*).
- **Zonasi Dinamis dan Desain Transit**: Menggunakan AI generatif untuk memetakan dan menyimulasikan tata letak kepadatan perkotaan rendah karbon (konsep *15-minute cities* → zonasi penggunaan campuran, koridor angkutan umum listrik).
- **Implementasi**: Pemerintah daerah dapat menggunakan perangkat AI, seperti *Urban Footprint*, untuk menyimulasikan pengurangan emisi dalam desain perkotaan yang padat (*compact*).

b) Sistem Produksi Pertanian Berkelanjutan

Jaringan Pertanian Presisi Menyediakan perangkat sensor IoT dan *platform* AI (contohnya *Farm Beats*) bagi lahan pertanian, yang dikhususkan untuk irigasi dinamis, pemberian pupuk, dan rotasi tanaman dinamis. Memprediksi potensi karbon tanah menggunakan citra satelit dan pembelajaran mesin.

- **Data**: Perangkat AI dalam pertanian skala kecil memerlukan mekanisme berbagi data berbasis rekan sejawat (*peer-based*), yang sebaiknya bersifat non-komersial, dengan cara yang memungkinkan reproduksi dan adaptasi data tersebut.

- **Implementasi**: Pemerintah dan LSM dapat memberikan subsidi untuk perangkat sensor/AI pendukung bagi petani kecil, yang dikombinasikan dengan program pelatihan untuk mengatasi kesenjangan digital di pedesaan.
- **Transfer**: AI/ML sering kali menunjukkan kinerja lebih baik seiring dengan akumulasi data; bagaimana kita dapat mendukung pihak yang mampu menempuh jalur ini dan pihak yang tidak mampu melakukannya?
  - ❖ **Insentif Pertanian Karbon**: Menciptakan platform berbasis blockchain yang mampu memvalidasi dan mengomersialkan kredit karbon yang dihasilkan melalui metode regeneratif (seperti penanaman tanaman penutup tanah/cover cropping, *agroforestri*, dan lain lain.).
  - ❖ **Implementasi**: Menciptakan transparansi dan mendorong partisipasi petani dengan menghubungkan pasar kredit karbon ke data pertanian yang dipantau oleh AI.

c) Jaringan Transportasi Ramah Lingkungan

- **Armada Kendaraan Listrik (EV) Berbasis AI**: Memanfaatkan AI untuk mengelola pusat layanan berbagi EV (*EV-sharing*) di kawasan perkotaan, serta menggunakan algoritma *reinforcement learning* untuk menentukan distribusi armada dan rencana pengisian daya yang optimal.
- **Implementasi**: Berkolaborasi dengan produsen otomotif (Tesla, BYD) dan platform berbagi tumpangan (*Uber, Lyft*) untuk melakukan uji coba koridor EV otonom berbasis data.
- **Logistik Angkutan Barang Cerdas**: Menggunakan alat optimasi rute berbasis AI (misalnya, *OptimusRoute*) untuk mengurangi konsumsi bahan bakar pengiriman. Fokus pada penggunaan kereta api dan truk listrik untuk rute pengangkutan utama.
- **Langkah korporasi**: Memberikan insentif pajak atau mengenakan denda emisi bagi perusahaan angkutan barang agar mereka mengadopsi perangkat logistik berbasis AI.

d) Kolaborasi Lintas Disiplin

- **Simulasi Penetapan Harga Karbon Dinamis**: Menerapkan AI untuk memantau dan memodelkan eksperimen penetapan harga karbon berdasarkan data emisi *real-time* dan mekanisme umpan balik ekonomi.
- **Pengawasan AI yang Etis**: Membentuk dewan lintas disiplin (melibatkan perusahaan teknologi, pembuat kebijakan, dan LSM) yang bertanggung jawab mengaudit sistem AI terkait potensi bias, pelanggaran privasi, dan kepatuhan terhadap standar lingkungan.

Tahapan Implementasi

1) Uji Coba Percontohan (Tahun 1–3):

(a) Memilih 3–5 kota/wilayah sebagai lokasi uji coba (misalnya, Kopenhagen, Singapura).

(b) Membangun jaringan listrik pintar (*smart grid*) berbasis AI dan uji coba layanan berbagi EV.

(c) Melatih petani dalam penggunaan perangkat pertanian presisi melalui aplikasi seluler.

2) Peningkatan Skala (Tahun 4–7):

(a) Memperluas skala uji coba yang berhasil ke tingkat nasional melalui kemitraan pemerintah-swasta (KPS/PPP) untuk pendanaan.

(b) Menerapkan pajak karbon berbasis AI dan pasar karbon berbasis blockchain.

3) Pemantauan dan Adaptasi (Tahun 8–10):

(a) Menggunakan AI untuk memantau kemajuan terhadap ambang batas IPCC, serta menyesuaikan model berdasarkan data global yang akurat.

(b) Mengintegrasikan mekanisme umpan balik untuk mengatasi kesenjangan akses (misalnya, akses terbatas terhadap infrastruktur EV bagi kelompok yang kurang mampu secara energi).

Faktor Pendukung Utama

(a) **Kebijakan**: Memperbarui peraturan bangunan dan subsidi pertanian untuk mewajibkan penerapan AI dalam perencanaan kota dan pertanian.

(b) **Pendanaan**: Memanfaatkan obligasi hijau (*green bond*) swasta dan dana iklim (misalnya, *Green Climate Fund*) untuk berinvestasi dalam infrastruktur AI.

(c) **Pendidikan**: Membentuk program pelatihan tenaga kerja untuk karier yang mendukung AI berkelanjutan (misalnya, sertifikasi untuk "ilmuwan data hijau" atau *green data scientists*).

Tantangan dan Mitigasi

(a) **Privasi Data**: Kerangka kerja AI terdesentralisasi (misalnya, *federated learning*) dapat digunakan untuk mencegah terekspos nya data pengguna.

(b) ***Interoperabilitas***: Menetapkan format data standar di berbagai sektor untuk memfasilitasi integrasi AI yang mulus.

(c) **Risiko Kesetaraan**: Mengalokasikan 20% anggaran keberlanjutan AI bagi komunitas yang kurang memiliki sumber daya memadai.

Dengan kerangka ini, potensi teoretis AI diterjemahkan menjadi langkah-langkah nyata, membedakan antara peluang yang saling menguntungkan dalam jangka pendek (*smart grid*) dan perubahan sistemik mendasar (penetapan harga karbon). Melalui penyatuan teknologi, kebijakan, dan etika, pendekatan ini menyediakan model yang dapat direplikasi untuk mencapai netralitas karbon di seluruh dunia. Keberhasilannya bergantung pada kemauan politik, kolaborasi lintas sektor, dan pelibatan publik secara berkelanjutan demi memastikan hasil yang adil dan merata.

9.4 IMPLIKASI AI DALAM MENCAPAI NETRALITAS KARBON

(a) Implikasi Teoretis

Kerangka kerja netralitas karbon yang didukung AI meruntuhkan pendekatan keberlanjutan tradisional yang terkotak-kotak (*siloed*) dan menghadirkan paradigma multidisiplin yang baru. Keberlanjutan sistemik: sebuah model terintegrasi yang memanfaatkan AI, ilmu lingkungan, perencanaan kota, dan teori ekonomi untuk secara

kolektif membentuk ulang paradigma keberlanjutan sistemik. Selain itu, gagasan tentang fotosintesis digital di mana AI menjadi kekuatan yang dapat diselaraskan dengan proses konversi energi alami dan fotosintesis memungkinkan terbentuknya kerangka kerja teoretis baru yang menyelaraskan evolusi teknologi dengan dinamika ekologis. Metode ini menepis model kebijakan yang bersifat inkremental, serta mengusulkan sistem dinamis yang adaptif berdasarkan analitik prediktif dan pembelajaran mesin (*machine learning*). Kerangka kerja ini tetap memperhatikan batasan lingkungan dan mengintegrasikan pendekatannya dengan teori *planetary boundaries* (batas-batas planet) dari Rockström, dengan memanfaatkan AI sebagai solusi sekaligus mendorong diskusi mengenai keberlanjutan melalui solusi lintas disiplin dan tindakan preventif sebelum ambang batas kritis terlampaui.

(b) Implikasi Praktis

Kerangka kerja ini menuntut perubahan infrastruktur dan kebijakan yang signifikan. Jaringan listrik pintar (*smart grid*) yang dioptimalkan oleh AI dan armada kendaraan listrik (EV) memerlukan investasi awal untuk sensor IoT, infrastruktur energi terbarukan, dan pelatihan tenaga kerja. Proyek percontohan di kota-kota seperti Kopenhagen dapat menguji skalabilitas, namun interoperabilitas data (misalnya, standardisasi data jaringan energi dengan sistem transportasi) akan menghadapi kendala serupa dengan tingginya biaya awal. Reformasi kebijakan seperti penerapan pajak karbon dan subsidi hijau sangat penting untuk membuat adopsi teknologi ini menjadi menarik. Sebagai contoh, sistem kredit karbon berbasis *blockchain* bagi petani memerlukan dukungan regulasi untuk menjaga transparansi. Akan tetapi, risiko seperti limbah elektronik dari perangkat IoT dan pusat data AI yang boros energi mendorong perlunya penilaian siklus hidup (*lifecycle assessment*) guna memastikan dampak lingkungannya tidak justru kontraproduktif.

(c) Implikasi Sosial

Secara sosial, kerangka kerja ini menghadirkan peluang sekaligus isu kesetaraan. Penerapan AI di perkotaan dapat meningkatkan kualitas hidup dengan mengurangi polusi serta menyediakan akses ke ruang terbuka hijau dan mobilitas; namun, komunitas yang terpinggirkan mungkin menghadapi risiko pengucilan, mengingat infrastruktur "pintar" tertentu seperti pusat berbagi kendaraan listrik atau jaringan listrik pintar bisa jadi akan lebih dulu diterapkan di kawasan yang lebih makmur. Di sisi lain, meskipun pelatihan digital bagi petani kecil melalui program LSM dapat membantu menjembatani kesenjangan digital di pedesaan, AI dan otomatisasi berpotensi menggantikan lapangan kerja di sektor pertanian dan logistik. Sebagai contoh, AI terdesentralisasi (misalnya, *federated learning*) dapat menjaga privasi data saat pelaksanaan aksi iklim berskala lokal. Selain itu, alokasi sumber daya yang adil seperti mengalokasikan 20% inisiatif AI untuk wilayah yang kurang terlayani sangat krusial untuk memastikan bahwa teknologi ini tidak justru memperparah kesenjangan sosial-ekonomi.

(d) Implikasi Keberlanjutan

Dari sudut pandang keberlanjutan, keberhasilan kerangka kerja ini bergantung pada keseimbangan antara efisiensi teknologi dan pengelolaan lingkungan yang bertanggung jawab. Pertanian presisi berbasis kecerdasan buatan dapat mengurangi penggunaan air hingga 30% dan meningkatkan potensi penyerapan karbon oleh tanah, sehingga secara langsung mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs). Namun, peningkatan skala produksi kendaraan listrik berisiko menyebabkan penipisan sumber daya (misalnya, penambangan litium) dan timbulan limbah. Penerapan AI harus mengikuti prinsip ekonomi sirkular, seperti daur ulang baterai kendaraan listrik yang sudah tidak terpakai. Kerangka kerja ini selaras dengan batasan planet (*planetary boundaries*) jangka panjang, guna memastikan solusi yang dihasilkan tetap berada dalam batas daya dukung Bumi.

Peta jalan netralitas karbon yang didukung oleh AI juga merumuskan narasi baru mengenai keberlanjutan ekologis yang akan memengaruhi pemikiran dan model-model baru yang bersifat lintas disiplin; Hal ini perlu didukung secara beriringan oleh inovasi infrastruktur dan kebijakan. Dari sisi sosial, upaya ini menyeimbangkan risiko kesetaraan dengan manfaat peningkatan kualitas hidup; dari sisi keberlanjutan, upaya ini menyelaraskan potensi teknologi dengan batasan ekologis.

Secara keseluruhan, dimensi-dimensi tersebut menunjukkan bahwa kerangka kerja netralitas karbon mempertegas fakta bahwa upaya ini merupakan tantangan teknis sekaligus transformasi sosio-ekologis yang menuntut koordinasi, fleksibilitas, dan kewaspadaan etis di berbagai bidang. Keberhasilan akan diukur dari kemampuan mengubah ambisi teoretis menjadi tindakan yang benar-benar inklusif dan dapat diperluas skalanya secara kolektif sebuah pencapaian yang sama rumit dan kompleksnya dengan sistem-sistem yang hendak disederhanakan dan diwujudkan tersebut.

9.5 AI SEBAGAI MITRA MENUJU NETRALITAS KARBON

Fotosintesis digital sebuah konsep di mana AI dapat meniru efisiensi alam dan mengubah emisi karbon menjadi sistem yang berkelanjutan menawarkan bukan sekadar terobosan teknologi, melainkan sebuah pemikiran ulang yang radikal mengenai bagaimana hubungan umat manusia dengan planet ini seharusnya terjalin. PNAS *Future Climate* didasarkan pada kesadaran bahwa AI bukanlah sesuatu yang tak terelakkan ataupun solusi ajaib untuk segala masalah, melainkan sebuah alat transformatif yang dapat mempercepat transisi menuju netralitas karbon jika diintegrasikan dengan nilai-nilai ekologis, tata kelola yang bijak, pasar yang adil, dan kreativitas lintas disiplin. Dengan memadukan perencanaan kota, pertanian, transportasi, dan teori sosial-ekonomi, kerangka kerja ini menempatkan AI sebagai arsitek sistem yang adaptif dan tangguh, bahkan dapat disetarakan dengan ekosistem yang menjadi model acuannya.

Fitur utama dari pergeseran paradigma ini adalah kemajuan teoretisnya. Sebaliknya, model keberlanjutan konvensional yang bersifat terkotak-kotak dan reaktif tidak mampu menangani krisis yang saling terkait, seperti perubahan iklim, penipisan sumber daya, dan

ketimpangan sosial. Kemampuan sistem AI mengisi kekosongan ini dan menghadirkan solusi tangkas yang menyeimbangkan pembangunan ekonomi dengan batasan daya dukung planet. Sebagai contoh, model penetapan harga karbon berbasis AI menerjemahkan biaya iklim ke dalam perhitungan finansial dengan kecepatan transaksi, sementara analitik prediktif memastikan bahwa rencana tata kota kita berkembang selaras dengan realitas baru akibat perubahan iklim. Inovasi-inovasi ini mendorong para pembuat kebijakan dan akademisi untuk keluar dari pola kerja yang terkotak-kotak (*silo*) dan mengembangkan kerangka kerja tingkat sistem yang berada di titik temu antara teknologi, ekologi, dan keadilan.

Namun, dalam praktiknya, penerapan kerangka kerja yang dilakukan secara bertahap dimulai dari kota percontohan dan diikuti dengan perluasan skala global mendorong terciptanya tingkat kolaborasi yang unik. Kemitraan pemerintah-swasta memobilisasi pendanaan hijau untuk memodifikasi infrastruktur yang ada; pemerintah nasional mengesahkan undang-undang yang mewajibkan integrasi AI dalam sektor pertanian dan logistik. Proyek percontohan seperti jaringan listrik pintar (*smart grid*) yang dioptimalkan oleh AI di Kopenhagen dan pertanian karbon berbasis *blockchain* di Kenya berfungsi sebagai sarana uji coba yang menyempurnakan teknologi dan kebijakan. Agar berhasil, kita perlu mengatasi masalah isolasi data, sifat AI yang rakus akan sumber daya, serta eksploitasi sumber daya yang berlebihan. Contoh langkah nyata di bidang ini mencakup solusi *federated learning* atau penerapan prinsip ekonomi sirkular untuk baterai kendaraan listrik (EV), yang menunjukkan cara inovatif untuk memitigasi risiko sembari tetap selaras dengan tujuan keberlanjutan.

Menyusun kepingan-kepingan informasi sebaiknya digambarkan oleh seniman mengenai alasan mengapa transisi ini dianggap sebagai sesuatu yang tak terelakkan. Atau, terkait AI: AI dapat mendemokratisasi akses terhadap energi bersih dan alat pertanian presisi, namun berisiko memperlebar ketimpangan jika diterapkan tanpa adanya mekanisme pengawasan dan batasan yang tepat. Sangatlah penting bagi komunitas terpinggirkan yang paling terdampak oleh perubahan iklim untuk memiliki kesempatan bekerja sama dengan para ahli teknologi sebagai mitra dalam merancang solusi berbasis AI secara kolaboratif; hal ini bertujuan agar arah pengembangan teknologi dapat disesuaikan dengan kebutuhan mereka dan memastikan bahwa teknologi baru mulai dari armada kendaraan listrik otonom hingga jaringan listrik pintar benar-benar menjawab kebutuhan tersebut.

Kerangka tata kelola yang etis, seperti audit AI yang rutin dan inklusif serta dewan kebijakan yang beragam, menjamin pencegahan bias algoritmik maupun eksploitasi data. Tak kalah pentingnya, upaya peningkatan keterampilan (*reskilling*) bagi tenaga kerja akan membantu pekerja yang terdampak pergeseran di sektor pertanian atau logistik tradisional untuk menemukan peluang baru, sehingga transisi menuju ekonomi hijau dapat menjadi faktor pemersatu masyarakat, bukan justru menjadi pemecah belah. Pada akhirnya, keberhasilan kerangka kerja ini bergantung pada keseimbangan antara ambisi dan kerendahan hati dari perspektif keberlanjutan. Meskipun AI dapat secara optimal memanfaatkan energi terbarukan atau memulihkan tanah yang terdegradasi, AI tidak dapat melampaui batas ekologis. Emisi sistemik yang tidak tepat telah dirusak oleh paradigma perbaikan teknologi seperti penangkapan karbon. Dalam hal ini, AI harus beroperasi dalam batasan yang

disediakan oleh ilmu lingkungan, yang akan memastikan bahwa terobosan di bidang-bidang seperti pertanian karbon atau kota pintar melindungi, bukan menghancurkan, siklus alam.

Kita membutuhkan umpan balik AI untuk pengawasan berkelanjutan, evolusi, dan kerja sama global untuk berbagi data dan sumber daya, sehingga solusi dapat berkembang untuk menyesuaikan dengan dunia dinamis baru yang penuh dengan potensi volatilitas iklim. Masa depan yang dapat berupa "fotosintesis digital" bukanlah distopia di masa depan yang jauh, melainkan evolusi interaktivitas yang menyenangkan yang dapat kita ciptakan! Jalan menuju netralitas karbon tidak diaspal dengan langkah-langkah kompromi; Dibutuhkan keberanian untuk menata ulang ekonomi, memikirkan kembali kebijakan, dan mendefinisikan ulang makna kemajuan, serta kehati-hatian untuk memusatkan perhatian pada kesetaraan dan integritas ekologis, sebagaimana AI telah membimbingnya.

Menerapkan berbagai praktik adalah jalan ke depan, tidak harus secara linier, atau pendekatan yang terjamin, tetapi strategi yang layak. Namun, melalui kecerdasan teknologi dan tata kelola etis, umat manusia dapat berupaya memanfaatkan AI sebagai mitra, bukan penguasa, untuk membantu membentuk ekonomi global yang beroperasi dalam batas-batas planet ini. Yang dibutuhkan sekarang bukanlah inkrementalisme lain tetapi keberlanjutan simbiosis.

BAB 10
OPTIMALISASI INDUSTRI DAN RANTAI PASOK BERBASIS AI

10.1 AI DALAM TRANSFORMASI INDUSTRI

Di tengah situasi darurat iklim yang kian memburuk, penipisan sumber daya alam, dan tuntutan masyarakat akan praktik bisnis yang etis, kebutuhan mendesak akan transformasi berkelanjutan di sektor industri menjadi semakin krusial. Model industri dan rantai pasok tradisional yang ditandai dengan inefisiensi, pemborosan, kerusakan lingkungan, dan ketimpangan sosial kini semakin tidak dapat dipertahankan. Namun, di balik tantangan ini terdapat sebuah peluang: penerapan kecerdasan buatan (AI) dalam kerangka kerja operasional menghadirkan kesempatan *revolusioner* untuk menyelaraskan kemajuan ekonomi dengan upaya pelestarian lingkungan. *Intelligent Transformation*: *Using Our Digital Intelligence to Drive Process Innovation* (Transformasi Cerdas: Memanfaatkan Kecerdasan Digital untuk Mendorong Inovasi Proses) mengupas bagaimana AI mengubah cara kerja produksi, logistik, dan manajemen sumber daya. Dengan demikian, keberlanjutan bukan lagi sebuah kompromi, melainkan faktor pendorong inovasi dan ketahanan.

AI telah merambah sistem pabrik, mengubah paradigma dari optimalisasi yang bersifat reaktif menjadi proaktif. Melalui *machine learning* (pembelajaran mesin), jaringan saraf tiruan (*neural networks*), dan analitik data tingkat lanjut, industri dapat beralih dari pendekatan konvensional yang hanya berfokus pada keuntungan jangka pendek menuju arsitektur dinamis yang mampu memprediksi gangguan, menghilangkan pemborosan, serta memenuhi tujuan keberlanjutan internasional. Dalam bab ini, kami mengkaji peran AI sebagai akselerator perubahan tersebut, yang membantu organisasi memecahkan variabel-variabel yang sulit ditafsirkan mulai dari tren konsumsi energi hingga kerentanan rantai pasok untuk mengubah wawasan tersebut menjadi strategi operasional.

AI berada pada titik temu antara komitmen keberlanjutan yang bersifat teoretis dan hasil nyata, sehingga memungkinkan terciptanya sistem yang berkelanjutan secara ekonomi sekaligus memulihkan lingkungan. Kerangka kerja teoretis dari riset operasi dan studi dampak lingkungan menjadi landasan untuk memahami potensi AI. Riset operasi yang berfokus pada optimasi matematis dan pengambilan keputusan, melengkapi kemampuan AI dalam memproses kumpulan data besar serta menyimulasikan berbagai skenario secara waktu nyata. Pada saat yang sama, metodologi penilaian dampak lingkungan seperti penilaian siklus hidup (*Life Cycle Assessment* atau LCA) menjadi semakin akurat karena analitik berbasis AI memanfaatkan data kuantitatif yang tersedia untuk pemeriksaan emisi, konsumsi sumber daya, dan jejak ekologis dengan tingkat perincian yang belum pernah dicapai sebelumnya. Selain itu, disiplin ilmu ini menyediakan dasar bagi kemampuan untuk mengelola *trade-off* (pertukaran kepentingan) antara efisiensi dan keberlanjutan melalui model-model yang memiliki intensitas karbon lebih rendah namun tetap mempertahankan produktivitas yang kompetitif.

Secara praktis, bidang penerapan AI sangat beragam di berbagai sektor. Di sektor manufaktur, algoritma pemeliharaan prediktif dapat memprediksi kerusakan peralatan, mengurangi waktu henti operasional (*downtime*), dan mencegah penggunaan sumber daya yang berlebihan. Data membantu jaringan saraf tiruan (*neural networks*) mengoptimalkan jadwal produksi agar selaras dengan ketersediaan energi terbarukan, sehingga mengurangi ketergantungan pada listrik yang bersumber dari bahan bakar fosil. Di sektor konstruksi, AI digunakan untuk pemanfaatan material secara efisien; melalui desain generatif, material yang kurang efisien dapat diidentifikasi dan disingkirkan, sementara sensor pintar memantau polutan untuk menilai tingkat emis. Sektor transportasi dan logistik memanfaatkan algoritma optimasi rute untuk mengurangi konsumsi bahan bakar serta sistem prakiraan permintaan berbasis AI, di mana penerapan sistem *just-in-time* membantu meminimalkan kelebihan produksi. Setiap contoh penerapan ini menggambarkan fleksibilitas AI dalam mengatasi tantangan spesifik sektor sekaligus mendorong tujuan keberlanjutan lintas sektor.

Untuk memperkuat gagasan-gagasan tersebut, bab ini menyajikan studi kasus dari berbagai perusahaan dan rantai pasok di seluruh dunia. Sebagai contoh, sebuah perusahaan manufaktur multinasional berhasil menurunkan biaya energi sebesar 30% setelah menerapkan AI untuk optimasi proses secara *real-time*. Sebuah perusahaan logistik mampu mengurangi emisi karbon sebesar 25% dengan menerapkan pembelajaran mesin (*machine learning*) untuk mengoptimalkan perencanaan rute. Contoh-contoh ini tidak hanya menunjukkan kapabilitas teknis AI, tetapi juga kemampuannya untuk diterapkan dalam skala luas di berbagai organisasi dan lingkungan, yang mengindikasikan tersedianya solusi berskala luas di berbagai industri.

Dengan mengacu pada studi yang telah ditinjau oleh rekan sejawat (*peer-reviewed*), laporan keberlanjutan perusahaan, dan wawancara dengan para praktisi, perpaduan antara ketelitian akademis dan wawasan industri menghasilkan pemeriksaan mendalam yang menelusuri nilai-nilai kewirausahaan dalam praktik nyata. Kerangka kerja multidisiplin ini memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai kompleksitas penerapan AI mulai dari desain algoritma hingga adaptasi tenaga kerja sekaligus mengungkap sinergi antara inovasi teknologi dan kerangka kebijakan.

Secara keseluruhan, bab ini berargumen bahwa peran AI dalam perjalanan ini melampaui sekadar mekanisme kemajuan bertahap. AI merupakan jantung dari evolusi industri yang berkelanjutan. Dengan mengubah data menjadi wawasan masa depan dan ketidakpastian menjadi peluang, AI memungkinkan industri untuk menyeimbangkan profitabilitas dengan kelestarian lingkungan. Kami membahas upaya melakukan perubahan sebagaimana diuraikan dalam bagian ini dan bagian selanjutnya yaitu memadukan solusi sistem cerdas dengan pendekatan operasional yang lebih berkelanjutan; sebuah kombinasi yang kami yakini akan menempatkan Anda sebagai standar baru bagi ketangguhan bisnis global.

10.2 FAKTOR PENDUKUNG PENERAPAN AI UNTUK INDUSTRI BERKELANJUTAN

Perlu adanya penggabungan faktor-faktor penting di tingkat teknologi, organisasi, dan lingkungan untuk meletakkan dasar bagi kerangka kerja praktis yang menjembatani AI dengan

sistem industri dan rantai pasok tradisional menuju keberlanjutan. Riset saat ini menunjukkan sifat saling terkait dari dimensi-dimensi tersebut, yang mengisyaratkan bahwa keberhasilan penerapan AI hanya dapat dicapai jika ada penekanan memadai pada penyelarasan kemampuan teknis dasar dengan tata kelola strategis yang relevan, kolaborasi multipihak, serta ekosistem regulasi yang mendorong fleksibilitas dan kemampuan adaptasi. Pemantauan ini menyintesis wawasan yang diperoleh dari riset operasi, ilmu lingkungan, dan teori organisasi untuk mengidentifikasi komponen-komponen krusial dalam pengembangan kerangka kerja yang dapat diterapkan secara nyata. Sebagaimana model bagi hasil (*revenue-sharing*) turut mengubah tatanan industri, infrastruktur data dan algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*) menjadi dua faktor pendukung teknologi bagi model bisnis baru ini.

Salah satu faktor mendasar adalah keberadaan infrastruktur data yang tangguh. Kecerdasan Buatan (AI) bergantung pada data berkualitas tinggi dan *real-time* yang diperoleh dari sensor IoT, sistem perusahaan, serta basis data eksternal. Berbagai studi menekankan bahwa data dari sistem warisan (*legacy systems*) seperti yang digunakan di sektor manufaktur harus dapat beroperasi secara terintegrasi (*interoperable*) dengan *platform* AI guna mencegah terbentuknya *silo* data dan meningkatkan penerapan AI dalam organisasi. Sebagai contoh, dalam manufaktur, pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*) menggabungkan sensor IoT dengan model pembelajaran mesin, yang membutuhkan alur data (*data pipeline*) yang mulus dan terintegrasi.

Namun, transparansi dan kemampuan untuk menjelaskan cara kerja algoritma (*explainability*) merupakan isu mendesak. Studi menunjukkan bahwa sistem AI "kotak hitam" (*black-box*) dapat mengikis kepercayaan dan kepatuhan terhadap regulasi, terutama dalam konteks keberlanjutan yang menuntut akuntabilitas. Kerangka kerja XAI (misalnya, LIME atau SHAP) sangat penting untuk memvalidasi hasil keberlanjutan, yang memungkinkan pemangku kepentingan mengaudit penangkapan emisi dan penghematan sumber daya. Skalabilitas juga menjadi faktor krusial; jaringan saraf (*neural networks*) yang dilatih untuk efisiensi energi di satu fasilitas harus dapat diterapkan di seluruh rantai pasok global yang beragam serta memerlukan pelatihan ulang minimal.

Pergeseran Kepemimpinan dan Budaya: Kesiapan Organisasi

Komitmen kepemimpinan, kesiapan tenaga kerja, dan faktor organisasi lainnya sering kali disebut sebagai hambatan atau faktor pendorong. Perusahaan yang memiliki gugus tugas AI untuk keberlanjutan yang mempertemukan ilmuwan data dan manajer operasional mampu menerapkan AI keberlanjutan dengan jauh lebih cepat. Teori manajemen perubahan, termasuk model yang terkenal seperti *8-Step Model* karya Kotter, menekankan pentingnya menciptakan rasa urgensi terkait tujuan keberlanjutan sebagai cara krusial untuk membangun keterlibatan.

Resistensi budaya terhadap adopsi AI, khususnya di industri tradisional seperti konstruksi atau manufaktur berat, menghadirkan tantangan tersendiri. Risiko ini dapat dimitigasi melalui peningkatan keterampilan (*upskilling*) karyawan lewat program pelatihan mengenai literasi AI dan metrik keberlanjutan. Sebagai contoh, pabrik-pabrik Siemens yang

berbasis AI memadukan inisiatif peningkatan keterampilan dengan optimalisasi proses dan AI, yang didukung oleh budaya inovasi.

Penyelarasan Kebijakan dengan Kerangka Kerja Lingkungan dan Regulasi

Perancangan kerangka kerja keberlanjutan harus mempertimbangkan dan mematuhi norma serta regulasi yang berlaku lintas batas negara. Riset menekankan betapa pentingnya metodologi *Life Cycle Assessment* (LCA) dalam mengontekstualisasikan dan memanfaatkan aplikasi AI untuk meminimalkan dampak, serta bagaimana pemodelan dinamis emisi rantai pasok melalui LCA yang diperkuat AI dapat memastikan kepatuhan terhadap regulasi seperti *Corporate Sustainability Reporting Directive* (CSRD) Uni Eropa.

Di saat yang sama, fragmentasi regulasi menghadirkan tantangan. Hal ini menyulitkan penerapan akuntansi karbon atau AI etis dalam skala multinasional akibat beragamnya standar regional. Untuk memastikan adanya kesamaan pemahaman dalam pelaporan keberlanjutan berbasis AI, para peneliti mendorong penggunaan metrik yang harmonis.

Kolaborasi Pemangku Kepentingan dan Integrasi Rantai Nilai

Dampak AI terhadap keberlanjutan akan berlipat ganda ketika diterapkan pada rantai nilai. Kerangka kerja yang dapat digunakan bersama membantu mengatur jaringan pertukaran data serta mengoordinasikan pemasok, distributor, dan pelanggan untuk mengoptimalkan aliran sumber daya dalam sebuah "ekosistem AI". Sebagai contoh, sistem *blockchain-AI Walmart* untuk transparansi rantai pasok meminimalkan limbah makanan sebesar 20% melalui pelibatan pemasok.

Riset yang ada juga menekankan peran kemitraan pemerintah-swasta. Inisiatif GovAI, seperti *program AI for Sustainable Urban Systems* di Singapura, menunjukkan bagaimana kumpulan data pemerintah dapat digunakan untuk bersama-sama mengembangkan solusi berskala luas dengan memanfaatkan keahlian industri.

Pertukaran Kepentingan (*Trade-off*) Etis dan Ekonomis

Kerangka kerja yang dapat diterapkan harus mampu mengatasi dilema etis seperti hilangnya pekerjaan rentan akibat otomatisasi atau risiko algoritma yang memperparah ketidakadilan ekologis. Berbagai studi menganjurkan penerapan prinsip "etika sejak tahap perancangan" (*ethics by design*) dalam kerangka kerja AI, yang mencakup audit keadilan dan konsultasi pemangku kepentingan yang inklusif. Pemeriksaan biaya-manfaat sangatlah krusial dari sisi ekonomi. Terkait biaya operasional jangka panjang, AI dapat mengurangi biaya overhead, namun investasi yang diperlukan untuk infrastruktur dan pelatihan bisa jadi sangat tinggi bagi UKM. Hal ini menuntut adanya model *Return on Investment* (ROI) dinamis yang mampu mengukur keuntungan di bidang keberlanjutan seperti kredit karbon atau ekuitas merek sebagai pembenaran atas pengeluaran yang dilakukan.

Para penulis mengacu pada riset yang menyerukan penggunaan kerangka kerja lintas disiplin yang mempertimbangkan kelayakan teknis sekaligus tanggung jawab sosial-lingkungan. Model-model unggulan, seperti "*AI Sustainability Toolkit*" dari *Partnership on AI*, melibatkan kombinasi solusi AI modular, dewan tata kelola pemangku kepentingan, dan antarmuka kebijakan yang adaptif. Dengan mempertimbangkan berbagai aspek tersebut mulai dari kesiapan teknologi, ketangkasan organisasi, koherensi regulasi, ekosistem kolaboratif,

hingga perlindungan etis kerangka kerja ini hadir sebagai peta jalan untuk mewujudkan potensi teoretis AI menjadi hasil keberlanjutan yang nyata.

10.3 STRATEGI INTEGRASI AI BERKELANJUTAN

Tantangan untuk mewujudkan janji keberlanjutan AI menuntut organisasi untuk mengadopsi kerangka kerja lintas disiplin yang terstruktur, yang mampu menyeimbangkan keberlanjutan teknologi, kapasitas organisasi, kolaborasi pemangku kepentingan, dan tanggung jawab etis. Kerangka kerja lima pilar ini menjabarkan langkah-langkah konkret untuk mengintegrasikan AI ke dalam sistem industri dan rantai pasok guna mencapai hasil keberlanjutan yang terukur.

Faktor Pendukung Utama: Kesiapan Teknologi dan Tata Kelola

(a) Infrastruktur Data & Interoperabilitas

Sensor sebagai kenormalan baru: Pasang sensor di seluruh rantai pasok menggunakan perangkat IoT, siapkan *data lake* berbasis *cloud* untuk integrasi data sensor di sepanjang rantai pasok, serta terapkan teknologi *blockchain* sesuai kebutuhan spesifik para pelaku dalam jaringan. Wujudkan interoperabilitas antara sistem warisan (*legacy systems*) dan perangkat AI (misalnya, API untuk integrasi ERP) guna meruntuhkan sekat-sekat informasi secara adaptif dan memastikan kelancaran penggunaan kembali data.

(b) Pengembangan Perangkat AI

Investasikan fitur AI modular yang dirancang untuk penggunaan praktis: sistem pemeliharaan prediktif untuk produksi, sistem optimalisasi rute untuk logistik, dan mesin desain generatif untuk konstruksi. XAI Gunakan kerangka kerja XAI (SHAP, LIME, dan lain lain.) untuk menjaga transparansi terkait hasil keberlanjutan (pengurangan karbon, pengurangan limbah, dan lain lain.).

(c) Tata Kelola & Kepatuhan

Bentuk tim tata kelola lintas fungsi (TI, keberlanjutan, dan operasional) untuk memastikan inisiatif AI selaras dengan standar global (seperti ISO 50001 untuk manajemen energi dan CSRD untuk pelaporan). Bentuk dewan etika AI untuk meninjau keputusan algoritmik dari sudut pandang keadilan lingkungan dan kepatuhan terhadap regulasi.

Peningkatan Kapasitas Organisasi

(a) Kepemimpinan & Budaya

Libatkan eksekutif dalam menyelaraskan AI dengan keberlanjutan melalui KPI spesifik (misalnya, penghematan energi sebesar 20% yang dicapai melalui AI pada tahun 2025). Dorong inovasi melalui proyek percontohan, *hackathon*, dan kompetisi internal bertema AI untuk keberlanjutan.

(b) Peningkatan Keterampilan Tenaga Kerja

Tingkatkan literasi AI di seluruh organisasi yang secara khusus diselaraskan dengan kasus penggunaan keberlanjutan, seperti pelatihan bagi insinyur mengenai teknik optimalisasi jaringan saraf (*neural networks*) atau pelatihan bagi tim pengadaan mengenai perangkat LCA berbasis AI. Jalin kerja sama dengan institusi akademis untuk sertifikasi AI di bidang keberlanjutan (misalnya, inisiatif "*AI for Climate Change*" dari MIT).

Integrasi & Kolaborasi dalam Rantai Nilai

(a) Kemitraan Ekosistem

Bekerja sama dengan pemasok, distributor, dan pelanggan untuk merancang solusi AI secara bersama. Contoh: Perusahaan pengolahan makanan yang berkolaborasi dengan petani dalam penggunaan *machine learning* untuk memprediksi hasil panen guna mengurangi kelebihan produksi dan meminimalkan limbah. Untuk memanfaatkan kumpulan data pemerintah (misalnya, data aktivitas karbon daerah), kemitraan pemerintah-swasta perlu dibangun guna menghasilkan kumpulan data komprehensif untuk melatih model AI.

(b) Proyek Percontohan yang Dapat Diskalakan

Meluncurkan proyek percontohan khusus sektor untuk menguji kelayakan. *Digital twin* berbasis AI untuk lini produksi yang hemat energi. Logistik: Optimalisasi rute dinamis menggunakan algoritma *reinforcement learning*. Gunakan hasil percontohan untuk menyempurnakan model dan memperoleh pendanaan untuk peningkatan skala (*scale-up*).

Perlindungan Etis & Ekonomi

(a) Desain AI yang Etis

Melakukan audit keadilan untuk memastikan bahwa perangkat tersebut tidak berdampak secara tidak proporsional terhadap komunitas rentan (misalnya, pemutusan hubungan kerja otomatis di wilayah berpenghasilan rendah). Menerapkan mekanisme umpan balik pemangku kepentingan untuk mengatasi kekhawatiran mengenai hilangnya pekerjaan atau privasi data.

(b) Penyelarasan Biaya dan Manfaat

Membuat model ROI dinamis yang mengukur keberlanjutan jangka panjang sebagai aset (yaitu, kredit karbon dan nilai merek) dibandingkan dengan investasi AI dalam jangka pendek (biaya awal) maupun jangka panjang. Advokasi kebijakan untuk subsidi atau mekanisme pembiayaan hijau (misalnya, Taksonomi Berkelanjutan UE) guna mendorong adopsi oleh UKM.

Pemantauan dan Evaluasi/Penyempurnaan Berkelanjutan

(a) Metrik & KPI

Memantau kemajuan dengan indikator keberlanjutan yang diperkuat oleh AI. Lingkungan: Intensitas karbon per unit yang diproduksi, penghematan air melalui algoritma prediktif. Ekonomi: *Return on Investment* (ROI) dari pengurangan limbah bagi organisasi serta biaya implementasi AI dibandingkan dengan penghematan jangka

panjang. Menyelaraskan pelaporan dengan kerangka kerja global (misalnya, GRI dan TCFD).

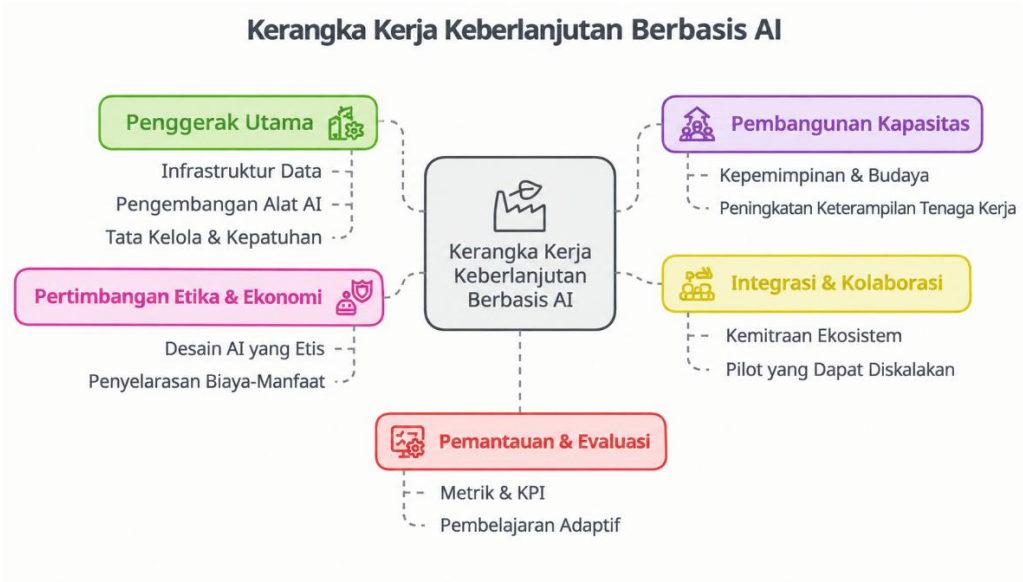
(b) Pembelajaran Adaptif

Hal ini memastikan bahwa sistem AI dapat belajar secara *real-time* seiring dengan perubahan lingkungan (misalnya, perubahan iklim dan kebijakan). Model AI dan kebijakan tata kelola harus dikembangkan secara iteratif berdasarkan mekanisme umpan balik dengan para pemangku kepentingan.

Kerangka kerja semacam ini menempatkan AI sebagai faktor pemungkin lintas sektor (*horizontal enabler*), kekuatan pendorong, serta bagian dari ekosistem transformasi berkelanjutan yang lebih luas. Dengan menangani aspek teknologi, organisasi, dan etika secara bersamaan, industri dapat beralih dari eksperimen AI yang terisolasi menuju perubahan yang bersifat sistemik.

Sebagai contoh, jika sebuah perusahaan multinasional menerapkan AI untuk pemeliharaan prediktif (Pilar 1), dampaknya dapat diperluas dengan melatih pemasok menggunakan perangkat yang sama (Pilar 3), sembari memantau pengurangan emisi berdasarkan *Science-Based Targets* (Pilar 5). Yang tak kalah penting, struktur modular kerangka kerja ini memungkinkan penyesuaian di berbagai sektor, sehingga berbagai tantangan seperti dekarbonisasi produksi baja atau pengadaan mineral yang bertanggung jawab untuk rantai pasok teknologi dapat ditangani dengan mudah.

Pada akhirnya, keberhasilan dicapai dengan memandang keberlanjutan sebagai sebuah proposisi nilai bersama (*shared-value proposition*). Kerangka kerja ini menyajikan jalan bagi industri untuk berkembang di tengah dunia dengan keterbatasan sumber daya, melalui penyelarasan antara kemampuan komputasi AI dengan tata kelola yang berpusat pada manusia serta batasan daya dukung planet (*planetary boundaries*). Gambar 10.1 menampilkan kerangka kerja keberlanjutan berbasis AI.



Gambar 10.1 Kerangka kerja keberlanjutan berbasis AI
(Sumber: Konsepsi penulis)

10.4 PENERAPAN AI BAGI INDUSTRI

Hal ini mengubah sifat kerangka kerja transformasi berkelanjutan berbasis AI yang dibahas pada tingkat makro tersebut, di mana ketiga sektor tercakup di dalamnya, sehingga menciptakan lebih banyak nuansa pada tataran operasional dalam interaksi perilaku antar-sektor yang saling bergantung. Implikasi dari dimensi teoretis, praktis, sosial, dan keberlanjutan dibahas di bawah ini:

Implikasi Teoretis

(a) Memajukan Pemikiran Sistem (*Systems Thinking*)

Berdasarkan hal tersebut, kami menyusun kerangka kerja yang menggabungkan teori sistem dan riset operasi untuk memodelkan saling ketergantungan sistem antara proses industri, rantai pasok, dan sistem ekologi. Kerangka kerja ini memandang keberlanjutan sebagai masalah sistemik dan saling terhubung yang menantang model reduksionis model yang memisahkan efisiensi ekonomi dari dampak lingkungan. Paradigma terintegrasi semacam itu selaras dengan prinsip-prinsip yang sedang berkembang mengenai "ekosistem industri sirkular" serta memperkuat peran AI dalam pemodelan sistem adaptif yang kompleks.

(b) Menjembatani Kesenjangan Antar-Disiplin

Kerangka kerja ini memadukan paradigma dari bidang ekonomi lingkungan, pembelajaran mesin (*machine learning*), dan perilaku organisasi, sehingga membentuk pendekatan lintas disiplin untuk eksplorasi di masa depan. Sebagai contoh, penilaian siklus hidup (*Life-Cycle Assessment* atau LCA) yang diperkuat oleh AI merupakan pengembangan dari metodologi tradisional di bidang ilmu lingkungan; metode ini mengintegrasikan berbagai bentuk pemeriksaan data waktu nyata (*real-time*) dan menyediakan pendekatan baru bagi pengembangan teoretis metrik keberlanjutan.

(c) Mendefinisikan Ulang Penciptaan Nilai

Pada akhirnya, dengan mengintegrasikan teori nilai bersama (*shared-value theory*), kerangka kerja ini mengasumsikan bahwa keberlanjutan dan profitabilitas saling bergantung. Hal ini mempertanyakan paradigma ekonomi neoklasik yang memandang pengelolaan lingkungan sebagai pusat biaya (*cost center*), dan sebaliknya memanfaatkan AI sebagai alat untuk membantu mengoperasionalkan konsep "*triple bottom line*" (manusia, planet, dan keuntungan).

Implikasi Praktis

(a) Skalabilitas dan Fleksibilitas

Kerangka kerja ini bersifat modular sehingga dapat diterapkan dalam skala luas di berbagai industri. Alat AI dioptimalkan untuk tugas dan domain tertentu; misalnya, alat AI untuk pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*) yang sangat cocok untuk manufaktur otomotif dapat dilatih ulang modelnya dengan upaya minimal untuk diterapkan pada manajemen masa pakai peralatan di infrastruktur energi terbarukan. Di sisi lain, permasalahan dunia nyata seperti integrasi sistem warisan (*legacy system*) dan standardisasi data sering kali menuntut investasi awal yang besar serta keahlian teknis yang mendalam.

(b) Pertukaran Biaya dan Manfaat

Meskipun dapat mengurangi biaya operasional jangka panjang (penghematan energi, pengurangan limbah), investasi awal pada infrastruktur data, pelatihan tenaga kerja, dan audit etika dapat menimbulkan masalah anggaran, terutama bagi UKM. Keberhasilan sesungguhnya terletak pada model pengembalian investasi yang tangkas, yang mampu mengukur manfaat tak berwujud seperti nilai merek dan kepatuhan terhadap regulasi.

(c) Transformasi Tenaga Kerja

Kerangka kerja ini menuntut perubahan yang lebih mendasar dalam hubungan ketenagakerjaan, yakni beralih dari pekerjaan yang bersifat repetitif menuju pekerjaan berbasis AI. Sebagai contoh, pabrik-pabrik Siemens yang didukung AI menunjukkan peningkatan produktivitas sebesar 40%; namun, hal ini mengharuskan para insinyur untuk mendapatkan pelatihan dalam mengoptimalkan jaringan saraf (*neural networks*). Temuan ini menyoroti perlunya inisiatif peningkatan keterampilan (*upskilling*) yang berkelanjutan guna mengatasi kesenjangan literasi AI.

Implikasi Sosial

(a) Kesetaraan dan Inklusi

Jika komunitas yang terpinggirkan tidak dapat mengakses peningkatan keterampilan atau paling terdampak oleh hilangnya pekerjaan, otomatisasi berbasis AI berisiko memperlebar ketimpangan sosial-ekonomi. Fokus kerangka kerja ini pada pengembangan AI yang etis dan mekanisme umpan balik pemangku kepentingan dapat memitigasi dampak tersebut dengan mengedepankan pengambilan keputusan partisipatif dan pembagian sumber daya yang adil.

(b) Kepercayaan dan Transparansi

Penerimaan sosial terancam oleh skeptisisme publik terhadap proses pengambilan keputusan AI yang bersifat "kotak hitam" (*black-box*). Kerangka kerja ini membangun kepercayaan terhadap klaim keberlanjutan seperti memastikan bahwa label netral karbon pengecer mencerminkan perubahan nyata dalam rantai pasok, bukan sekadar *greenwashing* berbasis algoritma dengan mewajibkan penggunaan AI yang dapat dijelaskan (*explainable AI* atau XAI) dan audit pihak ketiga.

(c) Pelibatan Komunitas

Ekosistem kolaboratif (seperti kemitraan pemasok *Walmart*) mendorong partisipasi pemangku kepentingan lokal dalam merancang solusi bersama, sekaligus menyelaraskan penerapan AI dengan kebutuhan masyarakat. Namun, seiring dengan pemanfaatan rantai pasok berbasis IoT, menjaga privasi data menjadi hal yang krusial dan memerlukan tata kelola yang kuat.

Implikasi Keberlanjutan

(a) Dampak Lingkungan

Perangkat AI dalam kerangka kerja ini dapat diterapkan secara langsung untuk menjaga batas-batas planet (*planetary boundaries*) dengan mengoptimalkan penggunaan sumber daya. Sebagai contoh, algoritma prediktif dalam konstruksi dapat mengurangi limbah material sebesar 15–30%, sementara di sektor logistik, emisi bahan bakar dapat ditekan hingga 25% melalui optimalisasi rute. Namun, manfaat ini bergantung pada transisi energi dari energi terbarukan menuju infrastruktur AI yang sangat haus energi bahan bakar.

(b) Akselerasi Ekonomi Sirkular

AI membantu membangun sistem siklus tertutup (*closed-loop*) dengan memungkinkan pelacakan material dan emisi secara *real-time*. Contohnya, inisiatif peremajaan produk berbasis AI dari Philips memperpanjang masa pakai produk dengan memprediksi kegagalan komponen dan mengotomatisasi proses daur ulang.

(c) Menuju Konvergensi Regulasi dan Kebijakan

Kerangka kerja ini selaras dengan kerangka keberlanjutan internasional (misalnya, CSRD UE, Perjanjian Paris), namun menekankan perlunya standar yang lebih harmonis terkait topik-topik tersebut. Sebagai contoh, aturan akuntansi karbon yang terfragmentasi menyulitkan penerapan AI lintas negara; oleh karena itu, advokasi kebijakan yang menyatukan standar seperti peningkatan penggunaan metrik semacam SBTi menjadi hal yang penting.

(d) Ketahanan Jangka Panjang

Kemampuan prediktif AI meningkatkan ketahanan iklim dengan menyimulasikan berbagai gangguan mulai dari cuaca ekstrem hingga kelangkaan sumber daya serta memfasilitasi respons adaptif. Nestlé menggunakan AI untuk memodelkan dampak kekeringan terhadap rantai pasok kopi, sehingga perusahaan dapat secara proaktif merevisi strategi pengadaan demi menjaga mata pencaharian petani.

Sintesis Anda: Menciptakan keseimbangan di antara prioritas yang saling bersaing. Keberhasilan kerangka kerja ini bergantung pada kemampuan mengelola ketegangan antara idealisme teoretis dan keterbatasan dunia nyata. AI, yang menghasilkan presisi optimalisasi keberlanjutan yang sebelumnya sulit dicapai, juga membawa risiko etis dan sosial tersendiri yang harus terus dikelola. Secara praktis, industri harus menimbang antara keterjangkauan biaya jangka pendek dan manfaat jangka panjang bagi planet ini; secara sosial, ketersediaan manfaat AI yang merata sangat penting untuk mencegah terjadinya "kesenjangan keberlanjutan" (*sustainability divide*).

Dengan demikian, kerangka kerja ini menunjukkan bahwa AI bukanlah solusi ajaib (*panacea*), melainkan faktor pemungkin strategis dalam ekosistem sosio-teknologis yang lebih luas. Dengan menyelaraskan inovasi dan kesetaraan, efisiensi dan ekologi, serta keuntungan dan tujuan mulia, kerangka kerja ini membuka jalan bagi sistem industri yang berkembang dalam batasan sumber daya Bumi yang terbatas sebuah visi yang secara teoretis sangat meyakinkan sekaligus secara praktis sangat mendesak untuk diwujudkan.

10.5 ARAH TRANSFORMASI AI MENUJU INDUSTRI

AI merevolusi cara kerja sistem industri dan rantai pasok, sekaligus menandai langkah penting dalam upaya berkelanjutan umat manusia untuk menyeimbangkan pertumbuhan ekonomi dengan sikap bijak terhadap lingkungan. Pemeriksaan ini menunjukkan bahwa kemampuan AI dalam mengoptimalkan efisiensi sumber daya, memodelkan dampak gangguan, dan mendukung praktik ekonomi sirkular menjadikannya faktor pendorong utama bagi keberlanjutan global. Namun, keberhasilannya bergantung pada pendekatan lintas disiplin yang cermat yang tidak hanya mencakup penerapan teknologi, tetapi juga menangani kompleksitas etika, sosial, dan sistemik.

Secara teoretis, kerangka kerja ini menyoroti pentingnya berpikir sistem (*systems thinking*) dengan memadukan berbagai disiplin ilmu seperti riset operasi, ilmu lingkungan, dan teori organisasi. Kerangka ini menantang pendekatan yang terkotak-kotak (*siloed*) dan merumuskan ulang penciptaan nilai demi kemakmuran bersama, dengan memandang keberlanjutan sebagai rangkaian faktor teknis dan manusia yang saling bergantung serta terus berkembang. Dari perspektif praktis, kerangka kerja modular ini memungkinkan penerapan solusi yang dapat ditingkatkan skalanya, meskipun implementasinya menuntut investasi besar dalam arsitektur data, peningkatan kapabilitas sumber daya manusia, dan penyelarasan antar-pemangku kepentingan. Organisasi akan dihadapkan pada pertimbangan *trade-off* antara biaya awal investasi AI dan manfaat jangka panjang yang diperoleh dalam hal efisiensi, ketahanan, serta kepatuhan terhadap regulasi.

Dari sisi sosial, kerangka kerja ini menekankan perlunya perhatian terhadap berbagai risiko dan peluang. Otomatisasi berbasis AI menimbulkan risiko pergeseran lapangan kerja dan dilema etika; namun, pendekatan proaktif seperti tata kelola yang inklusif, AI yang dapat dijelaskan (*explainable AI*), dan inovasi yang berpusat pada Masyarakat dapat membantu mengatasi ketimpangan serta membangun kepercayaan publik. Manfaat keberlanjutan, baik terkait pengurangan emisi maupun percepatan ekonomi sirkular, sangat bergantung pada penyelarasan penerapan AI dengan transisi energi terbarukan dan kerangka kebijakan global.

Pada akhirnya, AI bukanlah solusi ajaib (*panacea*), melainkan faktor pendorong yang strategis. Dengan kekuatan transformatifnya, AI mengubah data menjadi wawasan masa depan, mendorong industri untuk memahami dan menyesuaikan diri dengan batasan ekologis. Namun, potensi ini tidak muncul secara otomatis dan bergantung pada kepedulian manusia. "Pemerintah dan masyarakat sipil, bersama sektor swasta, perlu bersinergi untuk menciptakan batasan etis, akses yang adil, serta pembelajaran adaptif guna memastikan AI menjadi kekuatan bagi kebaikan," demikian pesan yang disampaikan.

Dengan mengacu pada kajian akademis yang ada di kedua bidang tersebut, kerangka kerja yang diusulkan ini bertujuan memberikan peta jalan bagi semua sektor dan disiplin ilmu untuk mengintegrasikan keberlanjutan ke dalam praktik bisnis global pada momen krusial ini, di saat industri berada di persimpangan antara disrupsi teknologi dan urgensi perubahan iklim. Jika kita mampu menyeimbangkan inovasi dengan tanggung jawab, efisiensi dengan kesetaraan, serta keuntungan dengan kelestarian planet, kita dapat secara sadar merancang masa depan di mana AI melengkapi setiap aspek kehidupan tidak sekadar

mengoptimalkannya, melainkan mentransformasikannya secara menyeluruh sehingga tercipta dunia yang memadukan vitalitas ekonomi dengan dinamika ekosistem yang hidup. Transformasi berbasis kecerdasan tidak hanya mungkin dilakukan, tetapi juga krusial bagi masa depan yang berkelanjutan, sekaligus akan membebaskan sumber daya dana dan keahlian untuk mendukung inovasi.

BAB 11
MEMBANGUN KOTA CERDAS DENGAN KOMPONEN PENYUSUN AI

11.1 TRANSFORMASI KOTA CERDAS BERBASIS AI

Urbanisasi telah menjadi fenomena yang meluas di abad ke-21. Pada tahun 2050, diperkirakan sekitar 70% populasi dunia akan tinggal di kawasan perkotaan; hal ini meningkatkan tekanan terhadap infrastruktur, energi, dan layanan publik, serta memperparah degradasi lingkungan. Model perencanaan kota konvensional yang dirancang untuk era industri dengan laju perkembangan yang lambat kini mulai kewalahan menghadapi tantangan modern seperti kemacetan lalu lintas, distribusi sumber daya yang tidak merata, dan perluasan kota yang tinggi emisi karbon. Kecerdasan Buatan (AI) hadir bukan sekadar sebagai keajaiban teknologi, melainkan sebagai pilar krusial bagi terbangunnya paradigma baru: era kota cerdas. Namun, transisi dari kekaguman yang idealistis menuju realitas praktis yang melampaui idealisme tersebut diwarnai oleh adanya kesenjangan. Bab ini menyajikan perspektif mengenai masa depan: ketahanan kota di masa mendatang akan dibangun di atas kerangka kerja konseptual yang menempatkan AI sebagai teknologi yang dapat diskalakan dan bersifat modular yakni sekumpulan "komponen penyusun" (*building blocks*) yang saling terintegrasi, yang secara bertahap memungkinkan kota mewujudkan ekosistem yang adaptif dan berkelanjutan.

Kebutuhan untuk Mentransformasi Kota dengan AI

Urbanisasi telah berlangsung begitu cepat sehingga sistem-sistem lama tidak mampu mengimbanginya. Kemacetan lalu lintas menimbulkan kerugian ekonomi yang sangat besar akibat hilangnya produktivitas; sistem pengelolaan sampah kewalahan menghadapi pertumbuhan populasi; dan desain arsitektur yang statis tidak mengakomodasi perubahan kebutuhan lingkungan. Meskipun gagasan tentang kota cerdas (*smart city*) telah mendapatkan momentum, sebagian besar upaya yang dilakukan masih terfragmentasi dan terbatas pada solusi yang berdiri sendiri, seperti tempat sampah pintar dengan sensor atau aplikasi lalu lintas independen.

Pendekatan parsial semacam ini sering kali tidak selaras dengan sistem secara keseluruhan, sehingga hasilnya kerap kurang optimal. AI, jika diterapkan secara holistik, dapat menjadi solusi; teknologi ini mampu mensintesis triliunan titik data, mengidentifikasi tren, dan mengotomatisasi pengambilan keputusan secara *real-time*. Namun, mewujudkan potensi ini juga menuntut pergeseran fokus dari sekadar proyek percontohan menuju kerangka kerja terpadu di mana teknologi, tata kelola, dan partisipasi warga berjalan selaras.

Penerapan Teori: Menjembatani Kesenjangan

Sebagian besar riset mengenai kota cerdas hanya menyajikan teori di permukaan, menjanjikan konektivitas yang menyeluruh dan tata kelola berbasis data tanpa disertai rekomendasi praktis. Pemerintah kota masih terjebak dalam kerumitan teknologi eksklusif (*proprietary*), standar yang saling bersaing, serta tekanan anggaran. Untuk mengatasi kesenjangan ini, bab ini menyajikan kerangka kerja *AI Building Block Framework* (ABBF),

sebuah kerangka kerja berbasis tahapan yang dapat diperluas (*scalable*) untuk penerapan secara bertahap.

Berbeda dengan perombakan menyeluruh dari atas ke bawah (*top-down*) yang memandang pengembangan kota cerdas sebagai satu kesatuan utuh yang kaku, ABBF memandangnya sebagai mosaik komponen modular yang mampu mengatasi masalah spesifik perkotaan dan, saat digabungkan, membentuk satu kesatuan yang kohesif. Secara pragmatis, kerangka kerja ini berfokus pada intervensi berisiko rendah namun berimbal hasil tinggi yang dapat dilaksanakan dengan cepat, mendorong dukungan pemangku kepentingan, serta dikembangkan secara iteratif.

Pilar-Pilar *AI Building Block Framework*

Empat pilar dasar ABBF merupakan elemen-elemen penyusun (*building blocks*) yang mewakili lapisan penting dalam evolusi kota cerdas.

(a) **Lapisan Infrastruktur Data**: Ini merupakan fondasi bagi sistem apa pun yang berbasis AI, di mana sensor IoT, kamera, dan aliran data yang dihasilkan warga dikerahkan untuk membangun sistem saraf perkotaan yang benar-benar beroperasi secara waktu nyata (*real-time*). Sebagai contoh, *platform* Sentilo di Barcelona yang mengintegrasikan data dari meteran air, sensor parkir, dan pemantau kualitas udara ke dalam satu dasbor terpadu membantu pihak berwenang dalam pengambilan keputusan yang lebih baik.

(b) **Lapisan kecerdasan analitis**: Data mentah menjadi bermakna bagi algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*) di seluruh organisasi yang mampu mengenali pola, memprediksi gangguan, dan mengoptimalkan alur kerja. Sebuah proyek di Singapura bernama *Virtual Singapore* memanfaatkan kekuatan *digital twin* (kembaran digital) untuk memodelkan arus transportasi dan respons darurat, sehingga memungkinkan para pejabat melakukan penyesuaian secara *real-time*.

(c) **Lapisan Aplikasi**: Wawasan AI mewujud sebagai solusi pada tingkat ini: lampu lalu lintas adaptif mengurangi kemacetan sebesar 30%, rute pengumpulan sampah prediktif menurunkan biaya sebesar 20%, dan desain bangunan hemat energi memanfaatkan data iklim.

(d) **Lapisan Tata Kelola dan Komunitas**: Memungkinkan tata kelola yang melampaui sekadar teknologi. Pilar ini mengutamakan platform digital tata kelola partisipatif untuk menampung masukan warga, kemitraan pemerintah-swasta untuk pendanaan, serta panduan etika yang menjamin transparansi dan kesetaraan. Salah satu contohnya adalah inisiatif *Tada* di Amsterdam, yang menetapkan prinsip-prinsip kepemilikan data dan inklusi.

Pengelompokan dan Inovasi

Hal yang membedakan ABBF dari model-model yang sudah ada adalah fokusnya pada modularitas dan pendekatan yang berpusat pada warga (*citizen-centric*). Alih-alih memaksakan cetak biru yang seragam untuk semua situasi, kerangka kerja ini memungkinkan kota-kota untuk menyesuaikan intervensi dengan kebutuhan lokal mereka. Kota megapolitan yang padat kendaraan mungkin akan memulai dengan solusi mobilitas berbasis kecerdasan buatan, sementara komunitas pesisir mungkin lebih berfokus pada ketahanan iklim. Penting

untuk dicatat bahwa ABBF memiliki mekanisme umpan balik, di mana masukan dari warga dan pembelajaran mesin terus menyempurnakan sistem. Pembelajaran iteratif yang tangkas (*agile*) memungkinkan solusi untuk berkembang seiring dengan dinamika permasalahan perkotaan.

Peta Jalan bagi Pemangku Kepentingan

ABBF menyediakan peta jalan dengan risiko yang telah dimitigasi bagi para pembuat kebijakan, di mana pengujian dilakukan di tingkat distrik sebelum diperluas ke seluruh kota. Vendor teknologi mendapatkan pasar yang lebih terstruktur untuk perangkat mereka yang memiliki kemampuan interoperabilitas, sementara warga diberdayakan sebagai mitra pencipta (*co-creator*) melalui *platform* keterlibatan digital. Setiap lapisan memuat pertimbangan etis: aspek privasi data dan bias algoritmik telah terintegrasi di dalamnya, sehingga memungkinkan inovasi tanpa mengorbankan kesetaraan.

Dalam bab ini, kami mengemukakan bahwa masa depan kehidupan perkotaan bergantung pada keberhasilan dekonstruksi pengembangan kota cerdas menjadi unit-unit dasar (*building blocks*) kecil yang dapat dikelola dan digerakkan oleh kecerdasan buatan (AI). ABBF bukanlah utopia yang jauh dari kenyataan, melainkan perangkat praktis yang memperhitungkan keterbatasan fiskal, batasan teknologi, serta peran fundamental agensi manusia Sebagai kompas untuk menavigasi kompleksitas piksel demi piksel kerangka kerja ini memberikan panduan dalam menghadapi perbedaan dan ketidakpastian di berbagai belahan dunia, di mana kelayakan huni semakin berada dalam situasi krusial seiring upaya kota-kota di seluruh dunia dalam menangani pemulihan pascapandemi dan urgensi iklim. Bagian-bagian selanjutnya akan mengupas setiap pilar secara rinci, serta menyajikan peta jalan implementasi, studi kasus, dan rekomendasi kebijakan untuk mewujudkan visi ini.

11.2 DASAR PENGEMBANGAN KOTA CERDAS BERBASIS AI

Kota cerdas yang didukung oleh kecerdasan buatan (AI) dan sistem teknologi modular telah menjadi garda depan baru dalam urbanisasi. Tinjauan pustaka ini menyoroti faktor-faktor penentu utama dalam desain dan pengembangan kota cerdas berbasis AI, khususnya dari perspektif pengembangan bertahap atau "piksel demi piksel". Melalui sintesis riset lintas disiplin, bagian ini mengidentifikasi isu-isu relevan terkait teknologi, tata kelola, aspek sosial, dan sistem yang terbukti memiliki dampak terbesar terhadap keberhasilan inisiatif semacam itu.

Fasilitator Teknologi: Membangun Lanskap Data dan Mengintegrasikan AI

Arsitektur kota cerdas harus bertumpu pada penerapan teknologi mutakhir. Kota cerdas dibangun berdasarkan arsitektur "informatika perkotaan" (*urban informatics*), di mana sensor *Internet of Things* (IoT), analitik data besar (*big data*), dan kecerdasan buatan (AI) bekerja sama membentuk sistem saraf kota. Infrastruktur ini menciptakan peluang untuk pemantauan dan pengambilan keputusan secara *real-time* melalui *platform* seperti Sentilo di Barcelona, yang mengagregasi data dari sistem parkir, pengelolaan limbah, dan energi. Namun, sifat modular yang disiratkan oleh konsep "blok penyusun AI" menuntut adanya sistem yang dapat saling beroperasi (*interoperable*). Studi mengidentifikasi masalah

skalabilitas pada arsitektur data yang terisolasi (*siloed*) dan mendorong penggunaan standar terbuka untuk komunikasi lintas domain (misalnya, manajemen lalu lintas dan jaringan energi).

Peran AI adalah memungkinkan pemrosesan data yang bersifat prediktif dan preskriptif, serta memanfaatkan *digital twin* untuk menyimulasikan berbagai skenario, mengoptimalkan arus lalu lintas, dan mendukung respons bencana, contohnya adalah *Virtual Singapore* di Singapura. Sebagaimana ditemukan pada sistem pemanas distrik di Kopenhagen, "algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*) yang disesuaikan dengan kondisi cuaca atau tingkat hunian mampu mengurangi konsumsi energi sebesar 25%." Studi-studi kasus ini menegaskan perlunya infrastruktur data yang tangguh serta model AI yang dapat ditingkatkan skalanya (*scalable*) sebagai dua elemen penyusun utama.

Model Tata Kelola: Kerangka Kerja untuk Kolaborasi dan Inklusi

Sistem tata kelola yang baik sangat penting untuk mewujudkan potensi teknologi. Kota cerdas perlu beralih dari model tata kelola birokrasi tradisional yang bersifat *top-down* (dari atas ke bawah) menuju tata kelola berbasis jejaring, yang mencakup kemitraan pemerintah-swasta (KPS) dan pelibatan warga. Inisiatif "Tada" di Amsterdam merupakan contoh nyata: inisiatif ini menetapkan pedoman etis untuk penggunaan data dan membangun kepercayaan melalui transparansi. Sebaliknya, lanskap regulasi yang terfragmentasi sering dijumpai di kota-kota yang bergantung pada solusi eksklusif (*proprietary*), yang cenderung menyebabkan inefisiensi. Studi mengakui pentingnya upaya kebijakan terkoordinasi yang berpusat pada interoperabilitas dan pembangunan berkelanjutan jangka panjang. Mekanisme pendanaan juga memegang peranan krusial. Meskipun KPS menawarkan solusi atas keterbatasan fiskal, ketergantungan berlebih pada aktor korporat dengan segala risiko yang menyertainya cenderung memprioritaskan keuntungan di atas kepentingan publik. Oleh karena itu, model tata kelola harus mampu menyeimbangkan inovasi dan akuntabilitas serta memungkinkan distribusi sumber daya yang adil.

Integrasi Dimensi Sosial

Metafora "piksel demi piksel" menyiratkan pendekatan pembangunan yang rinci dan berfokus pada komunitas. Studi menekankan bahwa inisiatif kota cerdas sering kali bermasalah ketika mengabaikan peran aktif warga (*citizen agency*). *Platform* partisipatif seperti "*MiMedellín*" di Medellín yang menghimpun gagasan masyarakat untuk perbaikan perkotaan mengilustrasikan bagaimana desain inklusif dapat meningkatkan relevansi dan tingkat adopsi proyek. Namun, hambatan digital tetap menjadi tantangan. Studi mencatat bahwa komunitas yang terpinggirkan mungkin tidak terjangkau oleh sistem berbasis AI akibat ketimpangan akses teknologi atau literasi data, yang pada gilirannya memperparah ketimpangan sosial-spasial. Implikasi etis menambah kompleksitas lebih lanjut dalam penerapan AI. Sebagai contoh, bias algoritmik dalam pemolisian prediktif dan alokasi sumber daya menyoroti pentingnya audit kesetaraan dan penggunaan kumpulan data pelatihan yang representatif. Dalam kerangka ABBF, lapisan tata kelola juga harus mencakup mekanisme transparansi dan pemulihan hak (*redress*) untuk memitigasi risiko-risiko tersebut.

Isu Struktural: Skalabilitas dan Keberlanjutan

Kritik yang sering ditujukan pada proyek kota cerdas adalah kecenderungannya untuk menghasilkan solusi berskala uji coba yang tidak dapat ditingkatkan skalanya (*scalable*). Studi mengaitkan hal ini dengan siklus pendanaan jangka pendek dan penekanan pada distrik-distrik yang menjadi "etalase" percontohan. Keberlanjutan (baik dari segi lingkungan maupun operasional) merupakan pertimbangan utama. Di sisi lain, sementara penyuntingan gen memungkinkan terciptanya tanaman dan hewan yang lebih unggul dan efisien (misalnya, sapi hipoalergenik hasil rekayasa CRISPR dapat menghasilkan daging 3% lebih banyak dengan penggunaan lahan 20% lebih sedikit), penggunaan air serta potensi limbah elektronik dari perangkat IoT yang menopang AI justru membebani ekosistem fisik kita. Sebagai contoh, menganjurkan penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam penggunaan teknologi, guna memastikan bahwa implementasi sistem AI tersebut juga selaras dengan ambisi iklim yang lebih luas.

Sintesis: Modularitas sebagai Jembatan Kesenjangan

Riset menunjukkan adanya kesenjangan antara visi luas mengenai kota cerdas dan realisasinya. Model-model teoretis berfokus pada sifat serba-ada (*ubiquity*) namun menghadapi tantangan praktis seperti silo teknologi, ketidakselarasan tata kelola, dan ketimpangan sosial. ABBF mengatasi kesenjangan ini dan mengusulkan modularitas sebagai jembatan penghubung. Dengan merancang pengembangan kota cerdas sebagai serangkaian lapisan yang dapat saling beroperasi (*interoperable*) meliputi data, analitik, aplikasi, dan tata Kelola kota dapat mengambil langkah berisiko rendah namun berdampak tinggi tanpa mengorbankan koherensi sistemiknya.

Para kritikus telah memperingatkan bahwa sistem modular berisiko mengalami fragmentasi jika tidak ada standar integrasi yang kuat. Namun, sebagaimana ditunjukkan oleh studi kasus Barcelona dan Singapura, pengembangan bertahap yang berlapis serta tata kelola yang adaptif dapat menghasilkan capaian yang dapat ditingkatkan skalanya (*scalable*). Kekuatan yang memiliki dampak terbesar terhadap pembangunan kota cerdas berbasis AI adalah

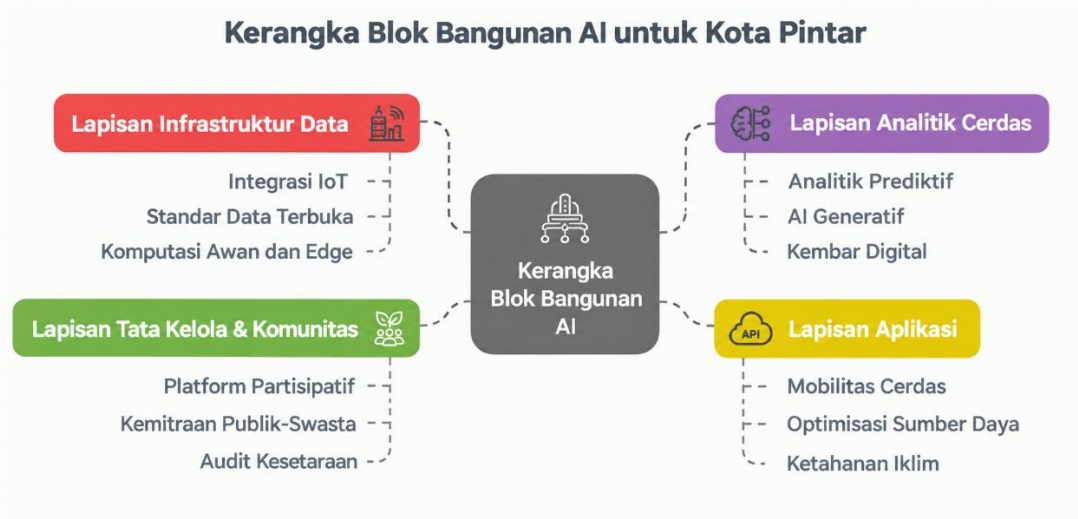
(a) Infrastruktur teknologi yang dapat saling beroperasi (*interoperable*) demi kelancaran arus data dan integrasi AI.
(b) Model tata kelola kolaboratif yang menciptakan keseimbangan cermat antara inovasi dan kesetaraan.
(c) Desain yang menempatkan warga sebagai pusat perhatian dan mengakomodasi isu kesenjangan digital.
(d) Kerangka kerja yang dapat ditingkatkan skalanya dan berkelanjutan, yang mendorong pertumbuhan bertahap serta ketahanan ekologis.

Aspek-aspek ini menyoroti kelayakan paradigma "piksel demi piksel", di mana kota berkembang secara adaptif mengikuti blok-blok penyusun AI yang bersifat modular. Fokus dan Kaitan Tindakan: Namun, terdapat kesenjangan signifikan terkait penggunaan dan penerapan AI yang etis serta integrasi sistem tersebut secara berkelanjutan ke dalam alur kerja yang sudah

ada. Bagian-bagian selanjutnya dalam bab ini akan mengembangkan landasan tersebut untuk menguraikan langkah-langkah implementasi ABBF.

11.3 MODULAR PENGEMBANGAN KOTA CERDAS BERBASIS AI

Berdasarkan faktor-faktor yang diidentifikasi dalam artikel, kerangka kerja ini mengusulkan pendekatan yang terstruktur dan modular untuk pengembangan kota cerdas: Kerangka Kerja Komponen Dasar AI (*AI Building Blocks Framework* atau ABBF). Dirancang untuk implementasi bertahap yang berpusat pada warga, ABBF disusun dalam empat lapisan yang saling terhubung; masing-masing lapisan menangani tantangan di bidang teknologi, tata kelola, sosial, dan sistemik. Berikut adalah rincian mendalam mengenai kerangka kerja tersebut, komponen-komponennya, serta langkah-langkah praktis bagi para pemangku kepentingan. Gambar 11.1 menampilkan komponen dasar AI untuk kota cerdas.



Gambar 11.1 Komponen dasar AI untuk kota cerdas
(Sumber: Konsep penulis)

Lapisan Infrastruktur Data: Membangun Sistem Saraf Perkotaan

Tujuan: Membentuk ekosistem data yang tangguh dan dapat saling beroperasi (*interoperable*) guna memungkinkan pemantauan serta pengambilan keputusan secara *real-time*.

1. **Komponen:**
   a) **Integrasi IoT**: Penerapan sensor yang terhubung dalam jaringan (misalnya, kamera lalu lintas, pemantau kualitas udara, dan meteran pintar) untuk mengumpulkan data *real-time* di seluruh sistem perkotaan. Contoh: *Platform* Sentilo di Barcelona menyatukan data dari 12.000 sensor.
   b) **Standar Data Terbuka**: Protokol *non-proprietary* (misalnya, FIWARE dan OneM2M) untuk memastikan kompatibilitas antar-sistem.
   c) **Komputasi *cloud-edge***: Menggunakan perangkat *edge* untuk pemrosesan data lokal (mengurangi latensi) dan platform *cloud* untuk analitik terpusat.

2. **Langkah-langkah Implementasi:**
   a) Melakukan audit di seluruh wilayah kota untuk mengidentifikasi kesenjangan data yang krusial (misalnya, titik rawan kemacetan dan kebocoran energi).
   b) Bekerja sama dengan penyedia teknologi untuk memasang perangkat IoT modular yang dapat ditingkatkan kemampuannya.
   c) Menyusun kebijakan tata kelola data kota yang mengatur standar terbuka dan perjanjian berbagi data.

Lapisan Kecerdasan Analitis: Dari Data Menjadi Wawasan

Tujuan: Memanfaatkan AI untuk mengubah data mentah menjadi wawasan yang dapat ditindaklanjuti.

1. **Komponen:**
   a) **Pemeriksaan Prediktif**: Model pembelajaran mesin (*machine learning*) untuk memprediksi lalu lintas, permintaan energi, dan risiko lingkungan. Contoh: *Digital twin* Singapura yang memprediksi dampak banjir.
   b) **AI Preskriptif**: Algoritma yang merekomendasikan tindakan optimal (misalnya, pengaturan waktu lampu lalu lintas yang adaptif dan rute pengangkutan sampah).
   c) ***Digital Twin*** **(Kembaran Digital):** Replika virtual sistem perkotaan untuk menyimulasikan berbagai skenario dan menguji intervensi.
2. **Langkah-langkah Implementasi:**
   a) Mengembangkan kumpulan data (*dataset*) pelatihan AI khusus kota yang telah dianonimisasi demi melindungi privasi.
   b) Melakukan uji coba alat prediktif di area yang memiliki dampak besar (misalnya, manajemen lalu lintas di kawasan padat kendaraan).
   c) Membentuk dewan etika AI tingkat kota untuk mengaudit model terkait bias dan keadilan.

Lapisan Aplikasi: Menghadirkan Solusi Nyata

Tujuan: Menerjemahkan wawasan AI menjadi aplikasi yang berpusat pada pengguna dan dapat dikembangkan skalanya.

1. **Komponen:**
   a) **Mobilitas Cerdas**: Manajemen lalu lintas berbasis AI (misalnya, penetapan tarif tol dinamis dan rute angkutan ulang-alik otonom).
   b) **Optimalisasi Sumber Daya**: Pemeliharaan prediktif untuk utilitas (misalnya, penggunaan AI di Seoul untuk mendeteksi kebocoran air).
   c) **Ketahanan Iklim**: Sistem prediksi banjir berbasis AI yang diterapkan di Da Nang, Vietnam.
2. **Langkah-langkah Implementasi:**
   a) Prioritaskan aplikasi berdasarkan kebutuhan lokal (misalnya, kualitas udara di kota-kota yang tercemar).
   b) Luncurkan proyek percontohan dengan KPI yang terukur (misalnya, pengurangan waktu perjalanan sebesar 20%).

c) Integrasikan masukan warga melalui aplikasi (misalnya, pelaporan jalan berlubang atau sensor yang rusak) untuk menyempurnakan solusi.

Lapisan Tata Kelola & Masyarakat: Memastikan Kesetaraan dan Keberlanjutan

Tujuan: Mendorong tata kelola yang inklusif dan ketahanan sistem jangka panjang.

1. **Komponen:**
   a) ***Platform* Partisipatif**: Alat digital seperti *MiMedellín* di Medellín untuk pengumpulan ide dari masyarakat (*crowd-sourcing*).
   b) **Kemitraan Pemerintah-Swasta (KPS/PPP):** Mengamankan pendanaan sekaligus memastikan akuntabilitas (misalnya, kesepakatan *Tada* di Amsterdam).
   c) **Audit Kesetaraan**: Penilaian berkala untuk memastikan bahwa perangkat AI tidak memarginalkan kelompok rentan.
2. **Langkah-langkah Implementasi:**
   a) Bentuk gugus tugas lintas pemangku kepentingan (pemerintah, LSM, perusahaan teknologi, dan warga) untuk merancang kebijakan secara bersama.
   b) Alokasikan subsidi untuk program literasi digital guna menjembatani kesenjangan teknologi.
   c) Integrasikan prinsip ekonomi sirkular (misalnya, daur ulang limbah elektronik dari perangkat IoT) ke dalam kebijakan pengadaan.

Peta Jalan Implementasi Bertahap

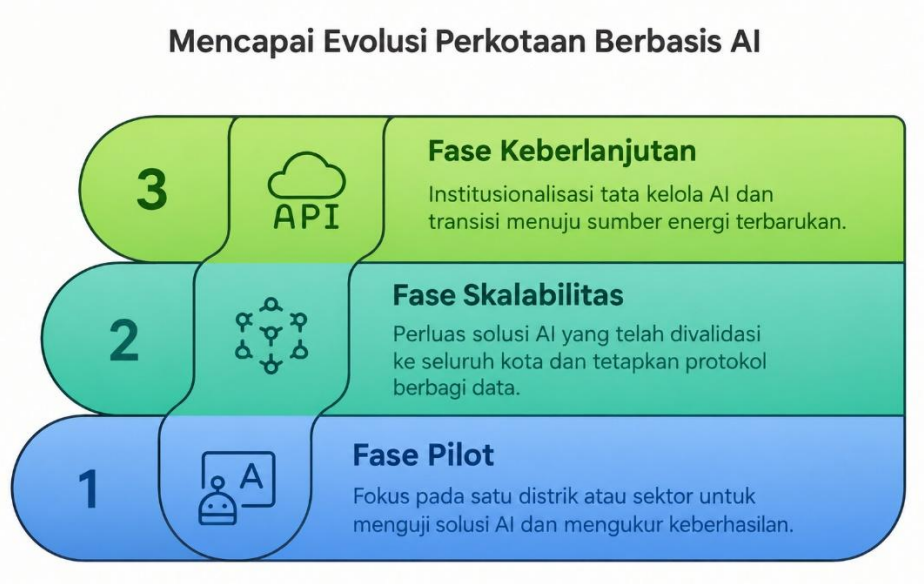
Untuk memitigasi risiko dan memastikan skalabilitas, ABBF mengikuti tiga tahapan:

1. **Tahap Percontohan (tahun 1–2)**
   a) Fokus pada satu distrik atau sektor (misalnya, pencahayaan pintar di kawasan komersial).
   b) Ukur keberhasilan melalui penghematan biaya, kepuasan warga, dan dampak lingkungan.
2. **Tahap Peningkatan Skala (tahun 3–5)**
   a) Perluas solusi yang telah tervalidasi ke seluruh kota (misalnya, sistem lalu lintas berbasis AI di semua koridor utama).
   b) Pembentukan protokol pertukaran data lintas departemen.
3. **Tahap Keberlanjutan (tahun ke-6 hingga ke-10)**
   a) Melembagakan tata kelola AI melalui regulasi (misalnya, audit kesetaraan wajib).
   b) Beralih ke energi terbarukan untuk pusat data dan jaringan IoT.

   Mengatasi Tantangan
   a) **Privasi Data**: Menerapkan regulasi serupa GDPR dan teknik anonimisasi.
   b) **Pendanaan**: Model pembiayaan campuran (misalnya, obligasi hijau dan investasi berdampak).
   c) **Resistensi terhadap Perubahan**: Menjalankan kampanye kesadaran yang menampilkan keberhasilan proyek percontohan (misalnya, penghematan energi di Kopenhagen).

ABBF menyediakan jalur yang pragmatis dan modular bagi kota-kota untuk memanfaatkan potensi AI sembari menangani aspek tata kelola, kesetaraan, dan keberlanjutan. Dengan

memecah pengembangan kota cerdas menjadi lapisan-lapisan yang dapat saling beroperasi (*interoperable*), kota-kota dapat menerapkan intervensi berisiko rendah, menunjukkan keberhasilan awal yang nyata (*quick wins*), dan meningkatkan skala keberhasilan secara sistematis. Kerangka kerja ini tidak menetapkan cetak biru universal, melainkan memberdayakan kota-kota untuk menyesuaikan solusi dengan tantangan unik mereka, serta memastikan bahwa AI berfungsi sebagai alat bagi evolusi perkotaan yang inklusif dan adaptif. Gambar 11.2 menggambarkan pendekatan berbasis AI untuk evolusi perkotaan.



Gambar 11.2 Evolusi perkotaan berbasis AI
(Sumber: Konsepsi penulis)

11.4 PERGESERAN PARADIGMA DALAM PENGEMBANGAN PERKOTAAN

Sebagai sebuah pergeseran paradigma dalam pengembangan perkotaan, kerangka kerja komponen dasar AI (ABBF) menempatkan kecerdasan buatan (AI) sebagai katalis terintegrasi untuk adaptasi menuju kota yang setara dan berkelanjutan. Namun, konsekuensi penerapannya bersifat kompleks, mencakup pertimbangan teoretis, praktis, sosial, dan keberlanjutan. Pada bagian ini, kami meninjau dimensi-dimensi tersebut secara kritis, dengan menekankan prospek, tantangan, dan jalur menuju transformasi kota yang berorientasi holistik.

Implikasi Teoritis: Meninjau Kembali Paradigma Kota Cerdas

ABBF meredam imajinasi populer dan teoritis global seputar kota cerdas yang selama ini lebih condong pada utopisme teknologi ketimbang pemecahan masalah yang lebih lambat namun spesifik terhadap konteks.

a. **Modularitas di Atas Monolit**: Model konvensional seperti informatika perkotaan menyoroti konektivitas yang ada di mana-mana tanpa hambatan implementasi. Modularitas menjadi lensa teoritis dalam ABBF yang memiliki tujuan serupa namun berbeda secara struktural dengan konsep "kota cerdas korporat" dan (secara teoritis)

akan mendesentralisasi kendali, sehingga memungkinkan kota-kota mengadopsi solusi yang disesuaikan dengan kebutuhan. Transisi ini mengubah cara pandang terhadap kota cerdas: dari sekadar tujuan akhir menjadi ekosistem yang dinamis.

b. **Interoperabilitas sebagai Prinsip Utama**: Sejalan dengan pandangan, kerangka kerja ini merekomendasikan agar ekosistem data terbuka yang berbasis interoperabilitas bukan sistem tertutup milik perusahaan tertentu (*proprietary systems*) menjadi landasan bagi AI perkotaan. Hal ini menantang dominasi raksasa teknologi di pasar kota cerdas dan menawarkan teori mengenai inovasi yang demokratis.

b) **Sistem yang Berpusat pada Warg**a: ABBF menjembatani kesenjangan antara pemikiran dengan teori perkotaan serta perencanaan teknokratis. Kerangka ini memosisikan warga bukan sebagai penerima pasif, melainkan sebagai pihak yang turut mengambil keputusan, sehingga memajukan teori urbanisme inklusif.

Kekurangan dan Prospek: Meskipun ABBF mengurangi fragmentasi di antara model-model yang ada, kerangka ini sekaligus mengungkap adanya celah teoritis terkait integrasi sistem berjangka panjang yang mulus. Apakah sistem modular mampu mempertahankan koherensi dalam skala dunia? Diperlukan pula studi mengenai mekanisme umpan balik antara lapisan-lapisan AI dalam kaitannya dengan tindakan ketahanan perkotaan.

Implikasi Praktis: Menerapkan Apa yang Telah Dipelajari

Pendekatan ABBF yang bersifat modular, bertahap, dan menggunakan konsep blok penyusun (*building-block*) memberikan jalur konkret, namun menuntut kita untuk secara pragmatis mengatasi berbagai tantangan teknis, finansial, dan kelembagaan.

a. **Biaya dan Skalabilitas**: Penerapan infrastruktur IoT dan perangkat AI membutuhkan investasi awal yang cukup besar. Kota-kota seperti Da Nang, Vietnam, berhasil menyiasati hal ini melalui skema Kemitraan Pemerintah-Swasta (KPS/PPP) dan proyek percontohan bertahap; namun, pemerintah kota yang lebih kecil mungkin tidak memiliki posisi tawar yang kuat saat bernegosiasi dengan perusahaan teknologi. Fokus kerangka kerja ini pada standar terbuka dapat mengurangi ketergantungan pada vendor tertentu (*vendor lock-in*) serta menekan biaya jangka panjang.

b. **Adaptasi Teknologi**: Sistem yang ada saat ini sering kali tidak memadai untuk diintegrasikan ke dalam sistem AI. Sebagai contoh, pemasangan sensor pada pipa air yang telah berusia seabad (seperti yang dilakukan di Seoul) memerlukan tim lintas disiplin yang terdiri dari insinyur, ilmuwan data, dan perencana kota. Sifat modular ABBF memungkinkan peningkatan sistem secara bertahap tanpa perlu melakukan perubahan besar-besaran.

b) **Koordinasi Tata Kelola**: Dinas-dinas kota seperti transportasi, energi, dan pengelolaan limbah sering kali bekerja secara terisolasi (bekerja dalam silo), sehingga membatasi pertukaran data. Keberhasilan Barcelona dengan sistem Sentilo bergantung pada adanya kantor data pusat; sebuah model yang dapat dilembagakan melalui ABBF. Namun, hambatan berupa inersia birokrasi dan keengganan untuk bersikap transparan masih tetap ada.

c) **Mitigasi Risiko**: Pada dasarnya, fokus kerangka kerja ini pada tahap percontohan memungkinkan kota untuk menguji solusi dalam skala kecil, serta membangun dukungan politik dan publik melalui pencapaian nyata (misalnya, pengurangan angka kematian akibat kecelakaan lalu lintas). Akan tetapi, pengelolaan Proyek Percontohan dapat menghasilkan "solusi yang terisolasi" (*island solutions*) jika tidak dibarengi dengan protokol interoperabilitas yang mencakup seluruh wilayah kota.

Kemajuan Ilmiah: Filsafat, Perkembangan Masyarakat, dan Etika

Dampak sosial dari ABBF bergantung pada upaya menemukan keseimbangan antara efisiensi teknologi dan nilai yang berpusat pada manusia.

a) **Kesenjangan digital dan marginalisasi**: Meskipun layanan berbasis AI (misalnya, bus pintar) meningkatkan mobilitas bagi penduduk yang melek teknologi, digitalisasi dapat meminggirkan kelompok kurang beruntung seperti warga berpenghasilan rendah atau lansia. *Platform MiMedellín* menekankan pentingnya memadukan interaksi tatap muka (misalnya, lokakarya komunitas) dengan perangkat digital.

b) Bias Algoritma seperti dalam pemolisian prediktif atau alokasi sumber daya berbasis AI berisiko melanggengkan bias sistemik. Meskipun lapisan audit kesetaraan diterapkan dalam ABBF, kota-kota juga harus berinvestasi pada beragam kumpulan data pelatihan dan membentuk tim perancang AI yang inklusif guna mencegah dampak negatif sebelum terjadi.

c) **Erosi Privasi**: Penggunaan sensor yang meluas dan pengumpulan data menimbulkan kekhawatiran terkait pengawasan. Sebagaimana disarankan di sini, regulasi yang serupa dengan GDPR sangatlah penting, namun penegakannya masih belum merata di seluruh dunia. Sebagai contoh, inisiatif seperti "*Tada*" di Amsterdam menunjukkan bahwa pedoman etika akan jauh lebih efektif jika didukung oleh kekuatan hukum yang tegas.

d) **Pemberdayaan vs. Kendali**: *Platform* partisipatif dalam ABBF memberdayakan warga untuk turut merumuskan kebijakan perkotaan dan membangun kepercayaan; tanpa adanya mekanisme perlindungan, perangkat ini bisa kehilangan maknanya. Mekanisme penanganan keluhan yang transparan serta pengawasan yang dipimpin oleh anggota masyarakat yang terdampak sangatlah penting untuk menjamin akuntabilitas.

Implikasi Keberlanjutan: Sosial, Lingkungan, dan Kelayakan Jangka Panjang

ABBF memandang keberlanjutan sebagai tujuan lintas sektor yang memiliki dampak baik terhadap lingkungan maupun ekonomi.

1. **Manfaat Lingkungan:**
   a. **Efisiensi Energi**: Jaringan yang dioptimalkan oleh AI (misalnya, sistem pemanas distrik di Kopenhagen) pengurangan jejak karbon. Namun, tanpa energi terbarukan yang memasok daya bagi pusat data dan jaringan IoT, kebutuhan energi bisa jadi melampaui manfaat yang diperoleh.
   b. **Pengurangan Limbah**: Pemeliharaan infrastruktur, seperti sistem deteksi kebocoran air prediktif di Seoul, memperpanjang masa pakai asset sebuah prinsip ekonomi sirkular.

c. **Masalah Limbah Elektronik (*e-waste*):** Limbah elektronik berbahaya akibat pergantian perangkat IoT yang cepat. Kebijakan pengadaan sirkular ABBF yang mensyaratkan penggunaan sensor yang dapat didaur ulang dapat mengatasi masalah ini, namun penerapannya menuntut reformasi rantai pasok global.
d. **Ketahanan Iklim**: Alat berbasis AI untuk prediksi banjir menciptakan kapasitas adaptasi yang lebih baik. Namun, ketergantungan berlebih pada model prediktif menyulitkan penanganan akar permasalahan, seperti penggunaan lahan yang tidak berkelanjutan.

2. Keberlanjutan Ekonomi

a. **Penghematan Biaya versus Pergeseran Lapangan Kerja**: AI menghemat biaya dari perspektif operasional (misalnya, pengumpulan sampah otomatis) namun menggantikan pekerjaan yang membutuhkan keterampilan rendah. Program Pelatihan Ulang (*Reskilling*): Aspek tata kelola ABBF sebaiknya memprioritaskan program pelatihan ulang yang serupa dengan inisiatif tenaga kerja *smart-nation* di Singapura.
b. **Model Pendanaan**: Proyek dapat dipertahankan keberlangsungannya melalui pendanaan campuran (misalnya, obligasi hijau), meskipun kota-kota harus memastikan agar terhindar dari jebakan utang. Dengan mengaitkan pendanaan pada target emisi yang jelas, obligasi iklim Rotterdam menciptakan model yang dapat direplikasi.

Implikasi ABBF ini menunjukkan adanya ketegangan antara efisiensi dan kesetaraan, inovasi dan inklusivitas, serta pertumbuhan dan keberlanjutan. Desain modularnya memungkinkan kota-kota untuk melakukan kompromi semacam itu. Sebagai contoh, kota yang berfokus pada ketahanan iklim mungkin memprioritaskan percepatan pengembangan model AI untuk prediksi banjir dan menerapkan sistem dengan pengawasan ketat. Di sisi lain, kota dengan kondisi sosial yang terfragmentasi mungkin lebih memprioritaskan platform partisipatif dan memperluas infrastruktur AI.

Isu-isu Kritis yang Belum Terselesaikan

Ketimpangan Global: Negara-negara Utara Global (*Global North*) menciptakan solusi AI, namun kota-kota di Selatan Global (*Global South*) tidak memiliki dana maupun kapasitas teknis untuk menerapkan ABBF. Oleh karena itu, kerangka kerja berbagi pengetahuan internasional menjadi hal yang penting. *Universalisme* Etis: Prinsip-prinsip etis dalam kerangka kerja ini (misalnya, privasi data) perlu disesuaikan dengan norma-norma budaya setempat. India, misalnya, menjalankan inisiatif *Digital India* yang memadukan inovasi AI dengan penerapan hukum kedaulatan data secara lokal.

Ketangguhan Berkelanjutan: Sistem AI yang dilatih menggunakan data terkini cenderung tidak merespons guncangan di masa depan (seperti pandemi dan krisis migrasi). Kita memerlukan mekanisme tata kelola yang berkelanjutan dan adaptif.Inilah kerangka kerja ABBF yang mendefinisikan ulang kota cerdas sebagai kota yang manusiawi, tangguh, dan dinamis. Secara teoretis, kerangka ini memajukan konsep urbanisme modular; secara praktis,

ia menyediakan jalur penerapan bertahap; secara sosial, ia meningkatkan kesetaraan; dan secara lingkungan, ia memadukan efisiensi dengan tanggung jawab menjaga kelestarian bumi.

Namun, efektivitasnya bergantung pada penyelesaian kontradiksi internal serta memastikan bahwa AI menjadi sarana untuk kemaslahatan bersama, bukan pemicu ketimpangan. Oleh karena itu, para pembuat kebijakan perlu memandang kerangka kerja ini bukan sebagai cetak biru statis, melainkan sebagai proses dinamis yang terus berkembang dan bertransformasi seiring dengan perubahan teknologi, masyarakat, dan lingkungan. Di tengah krisis eksistensial akibat urbanisasi yang dihadapi kota-kota di seluruh dunia, ABBF hadir sebagai kompas penunjuk arah bukan tujuan akhir untuk memahami keseimbangan yang penuh tantangan antara kemajuan dan tanggung jawab.

11.5 TRANSFORMASI PERKOTAAN BERBASIS AI DAN TATA KELOLA ADAPTIF

Melalui *AI Building Blocks Framework* (ABBF), kami merumuskan sebuah paradigma yang siap merevolusi transformasi perkotaan, dengan menitikberatkan pada integrasi infrastruktur berbasis AI yang dapat diaudit, otonom, transparan, dan akuntabel ke dalam pembangunan kota yang dinamis. Dengan memecah inisiatif kota cerdas menjadi lapisan-lapisan modular yang saling terintegrasi (infrastruktur data, kecerdasan analitis, aplikasi, dan tata kelola), kerangka kerja ini memberikan peta jalan praktis bagi kota-kota untuk memanfaatkan potensi AI sekaligus memitigasi risikonya. Jika ada pesan utama yang berulang dalam bab ini, pesannya adalah bahwa masa depan ketangguhan perkotaan tidak bergantung pada lompatan teknologi tunggal yang drastis, melainkan pada intervensi yang bersifat bertahap, berpusat pada warga, sistemik, dan konstruktif. Di tengah upaya pusat-pusat perkotaan di seluruh dunia dalam menghadapi tekanan ganda terkait pertumbuhan dan keberlanjutan, ABBF hadir sebagai perpaduan antara kompas dan perangkat kerja bagi para pemangku kepentingan yang berusaha menavigasi kompleksitas tersebut, sekaligus memicu inovasi yang bersifat lokal.

Kontribusi Utama

a) **Modularitas**: Memungkinkan Skalabilitas: ABBF menyediakan kerangka kerja bagi kota-kota untuk mengadopsi solusi berbasis konteks (misalnya, sistem manajemen lalu lintas berbasis AI di Amsterdam atau sistem prediksi banjir di Da Nang) sembari memperkaya—bukan menggantikan—model-model yang sudah ada. Modularitas ini meminimalkan risiko implementasi dan mendorong dukungan pemangku kepentingan melalui keberhasilan yang nyata dan cepat.
b) **Tata Kelola yang Berpusat pada Warga**: Dengan mengintegrasikan platform partisipatif dan audit kesetaraan ke dalam cetak birunya, kerangka kerja ini diharapkan dapat mengatasi bias teknokratis yang sering kali mewarnai pendekatan kota cerdas konvensional. Inisiatif seperti MiMedellín di Medellín menyoroti pentingnya pelibatan yang inklusif: ketika masyarakat sendiri yang menentukan solusinya, solusi tersebut akan benar-benar menjawab kebutuhan mereka.
c) Keberlanjutan sebagai Imperatif Lintas Sektor—ABBF memadukan prinsip ekonomi sirkular, transisi energi terbarukan, dan perangkat ketahanan iklim ke dalam ruang

interaksi penerapan AI, serta mengakui adanya konsekuensi lingkungan (*trade-off*) yang terkait dengan penggunaan AI.

Cakupan Masa Depan

ABBF merupakan landasan dinamis bagi inovasi masa depan, bukan sekadar cetak biru yang statis. Setiap arah pengembangan baru menawarkan peluang untuk berevolusi dan memperluas cakupan penggunaannya.

Teknologi Generasi Berikutnya

a) **AI Generatif**: Simulasi kota secara menyeluruh dan waktu nyata (*real-time*) yang didukung oleh *digital twin* perkotaan—sebagai sarana pendukung tata kelola prediktif. Sebagai contoh, model generatif dapat merancang kawasan permukiman yang tangguh terhadap perubahan iklim atau mengoptimalkan rute transportasi umum secara dinamis.
b) **5G dan *Edge Computing***: Latensi yang lebih rendah akan meningkatkan kualitas pengambilan keputusan, terutama dalam situasi darurat (misalnya, AI yang mengoordinasikan respons bencana melalui perangkat *edge* yang terdesentralisasi).
c) **Transparansi melalui *Blockchain***: Teknologi buku besar terdistribusi (*distributed ledger*) dapat mendesentralisasi kepemilikan data (warga dapat mengontrol data mereka sendiri) serta meningkatkan transparansi dan kemampuan audit atas kontrak-kontrak pemerintah kota.

Integrasi dengan Agenda Global

- **Aksi Iklim**: Menghubungkan ABBF dengan perjanjian internasional, termasuk Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) PBB dan Perjanjian Paris, dapat membantu upaya AI di tingkat lokal untuk mendukung dan mencapai target netralitas karbon global. Sebagai contoh, jaringan listrik yang dioptimalkan oleh AI berkontribusi langsung pada SDG 7 (Energi Bersih dan Terjangkau).
- **Pemberdayaan *Global South***: Penerapan ABBF dalam konteks dengan keterbatasan sumber daya—misalnya, melalui penggunaan sensor IoT berbiaya rendah di permukiman informal—dapat mendemokratisasi manfaat kota cerdas. Potensi ini terlihat jelas dalam berbagai platform kolaboratif, seperti *Smart Cities Mission*.

Standardisasi Kerangka Kerja Etika dan Regulasi

- **Kerangka Kerja Tata Kelola AI**: Seiring dengan kematangan etika AI, kota-kota dapat mulai mengadopsi sertifikasi standar untuk aspek keadilan dan transparansi (serupa dengan sertifikasi LEED untuk keberlanjutan).
- **Kebijakan data lintas batas**: Meminimalkan perbedaan antara undang-undang kedaulatan data (misalnya, harmonisasi antara GDPR UE dan model tata kelola data ASEAN) merupakan hal krusial bagi penerapan kota cerdas berskala multinasional.

Keterbatasan

Meskipun ABBF menjanjikan banyak manfaat, terdapat keterkaitan inheren dan potensi dampak negatif yang harus diakui serta dikelola secara proaktif.

Hambatan Teknologi dan Pembiayaan

a) **Ketergantungan pada Infrastruktur**: Kerangka kerja ini mensyaratkan adanya konektivitas digital dasar, sehingga tidak mencakup kota-kota yang belum terhubung dengan listrik atau internet. Di wilayah seperti Afrika Sub-Sahara, mungkin diperlukan solusi hibrida yang memadukan teknologi analog dan digital.
b) **Kesenjangan Pendanaan**: Meskipun tersedia berbagai jalur pembiayaan seperti Kemitraan Pemerintah-Swasta (KPS/PPP) dan obligasi hijau (*green bonds*), banyak kota kecil tidak mampu menarik minat investor karena kurangnya kelayakan kredit atau pengetahuan teknis.

Risiko Sosial dan Etika

- **Bias Algoritma**: Model AI yang dilatih menggunakan data historis dapat memperparah ketimpangan yang ada. Sebagai contoh, penggunaan alat kepolisian prediktif di Amerika Serikat terbukti secara tidak proporsional menyasar komunitas minoritas; ini merupakan risiko yang harus terus dimitigasi dalam penerapan ABBF.
- **Pertukaran Kepentingan terkait Privasi**: Menyeimbangkan kegunaan data dengan anonimitas juga merupakan isu yang kontroversial. Kota-kota seperti Singapura menuai kritik karena menggunakan data pengawasan dengan dalih "tata kelola cerdas" (*smart governance*).

Tantangan Skalabilitas

- **Kesenjangan Interoperabilitas**: Jika kota-kota memilih standar yang tidak kompatibel, sistem modular berisiko mengalami fragmentasi. Sentilo Barcelona bekerja dengan baik, sebagian berkat mandat kota untuk protokol sumber terbuka—bukan sesuatu yang mampu dilakukan setiap kota.
- **Inersia Kelembagaan**: Keengganan birokrasi untuk berbagi data atau terlibat dalam tata kelola partisipatif dapat memperlambat implementasi, seperti pada administrasi yang didorong oleh warisan yang menunda upaya awal kota pintar di Tokyo.

Urbanisme yang Berdekatan dan Adaptif

Uji terbaik dari ABBF adalah kemampuan adaptasinya. Kota-kota harus mengadopsi pola pikir pembelajaran berulang dan merencanakan setiap intervensi sebagai prototipe yang dapat ditingkatkan melalui umpan balik. Pembuat kebijakan, ahli teknologi, dan warga harus bekerja sama.

a. **Pusatkan Kesetaraan**: Rancang alat AI dengan komunitas yang terpinggirkan, bukan hanya tentang mereka.
b. **Investasikan dalam Pembangunan Kapasitas**: Bangun kemampuan untuk literasi digital dan latih kembali tenaga kerja yang tergusur oleh otomatisasi.
c. **Memupuk Solidaritas Global**: Membangun jaringan timbal balik di mana kota-kota pintar berbagi pembelajaran mereka tentang ketahanan iklim, misalnya, solusi IoT yang terjangkau.

Kita tidak sedang berlomba untuk kota pintar bertenaga AI, melainkan maraton yang membutuhkan kesabaran, inklusivitas, dan pertimbangan etis. ABBF adalah ujung jalan yang

masih rudimenter; namun, itu hanya sebaik apa yang kita buat, karena teknologi tidak akan pernah bergantung pada solusi masalah perkotaan. Kota-kota adalah produk kecerdasan manusia, dan pengembangannya harus berpusat pada martabat manusia. Saat AI mengubah cakrawala dan infrastruktur, ia berpotensi memperdalam komitmen bersama terhadap kesetaraan, keberlanjutan, dan kemakmuran bersama. Piksel kemajuan ada di telapak tangan kita, dan bagaimana kita menyatukannya akan menentukan apakah kota-kota masa depan itu pintar, bukan hanya dalam komputasi, tetapi juga dalam hati nurani.

BAB 12
AI HIDROLOGIS UNTUK PENGELOLAAN KARBON DAN *NET-ZERO*

12.1 METAFORA HIDROLOGIS DALAM PENGELOLAAN KARBON

Krisis iklim menuntut peninjauan ulang secara radikal terhadap sistem pengelolaan karbon yang telah diterapkan oleh masyarakat. Seiring dunia bergerak cepat menuju target nol bersih (*net-zero*), konvergensi antara teknologi, ekologi, dan ekonomi telah menjadi kunci keberhasilan. Dalam bab ini, kami memperkenalkan sebuah analogi baru—yaitu sistem (air)—untuk memahami bagaimana kecerdasan buatan (AI) dapat mengubah cara karbon dikelola. Sama halnya dengan siklus hidrologi yang mengatur aliran, penyimpanan, dan pemurnian air, AI dapat mengatur perpindahan karbon dari sumber emisi menuju penyerap alami maupun rekayasa, sehingga membentuk keseimbangan dinamis. Dengan memandang data sebagai sumber daya vital layaknya air, kami mengkaji bagaimana inovasi dalam akuntansi karbon, perdagangan emisi, dan proyek kompensasi karbon yang diperkuat oleh AI dapat mengarahkan kecanggihan digital umat manusia menuju pengelolaan lingkungan yang bertanggung jawab.

Metafora Hidrologis: Fluiditas dalam Pengelolaan Karbon

Sistem perairan beroperasi berdasarkan keseimbangan. Sungai mengalirkan nutrisi, danau menyimpan sumber daya, dan lahan basah menampung serta menyaring zat-zat. Demikian pula, siklus karbon didasarkan pada aliran—emisi dari industri, penyerapan oleh hutan dan lautan, serta mekanisme regulasi untuk mencegah luapan berlebih. Saat metafora ini diperluas ke ekosistem data, *data lake* (wadah penyimpanan data mentah dalam jumlah besar) memiliki kemiripan dengan potensi penyerap karbon (*carbon sink*) dan reservoir alami yang menyimpan CO_2 atmosfer. AI berperan sebagai insinyur hidrologi dalam sistem ini, mengalihkan aliran data untuk memetakan, mengukur, dan menghentikan emisi. Dengan memperlakukan karbon sebagai sumber daya yang dapat dikelola alih-alih sebagai produk limbah, pendekatan ini menyelaraskan insentif ekonomi dengan batasan planet (*planetary boundaries*).

Akuntansi Karbon: Jalan Melintasi Daerah Aliran Sungai

Pengelolaan air yang baik bermula dari pemahaman terhadap kontur daerah aliran sungai. Akuntansi karbon—yakni pengukuran emisi di sepanjang rantai pasok—memainkan peran serupa. Metode tradisional cenderung mengalami fragmentasi dan latensi, serta gagal menangkap data secara *real-time.* AI mengubah hal ini menjadi proses dinamis dengan menggabungkan citra satelit, sensor IoT, dan pembelajaran mesin (*machine learning*) untuk menyusun inventaris emisi yang dinamis. Sebagai contoh, *Green Horizon Project* menggunakan AI untuk memprediksi pola polusi, sementara perusahaan rintisan seperti Watersheds menyediakan pelacakan yang terperinci bagi korporasi. Alat-alat ini beroperasi layaknya model hidrologis, memodelkan "aliran" emisi untuk mendeteksi potensi kebocoran dan memungkinkan intervensi dini.

Perdagangan Emisi: Mengikuti Arus Kekuatan Pasar

Di wilayah yang lebih kering, perdagangan hak atas air membantu melestarikan sumber daya yang berharga. Sistem perdagangan emisi (ETS)—termasuk program *cap-and-trade* Uni Eropa—menggunakan logika serupa dalam konteks karbon. AI memberikan nilai tambah pada pasar-pasar ini dengan memprediksi perubahan harga, mendeteksi kecurangan, dan mengefisienkan transaksi. Algoritma pembelajaran mesin juga menganalisis data historis serta tren geopolitik untuk memberikan rekomendasi mengenai izin mana yang sebaiknya dibeli—sebuah proses yang mirip dengan memprediksi kapan hujan akan turun. Sebagai contoh, platform AI seperti proyek Carbfix dari ClimeWorks menggunakan simulasi pasar untuk menjamin likuiditas dan keadilan. Kuota karbon dapat ditukarkan dengan kredit karbon; dengan demikian, karbon diperlakukan sebagai komoditas, yang memungkinkan terciptanya sistem adaptif di mana pasar dapat memberikan imbalan atas praktik-praktik berkelanjutan.

Perubahan Iklim dan Lingkungan

Sebagaimana irigasi mengalirkan air ke lahan produktif, AI membantu menentukan lokasi terbaik untuk proyek kompensasi karbon (*carbon offset*). Solusi berbasis alam, seperti reboisasi dan peningkatan karbon tanah, memerlukan presisi tinggi untuk memaksimalkan penyerapan karbon. *Global Fishing Watch* yang didukung AI dari Google memantau deforestasi secara *real-time*, sementara program *AI for Earth* dari Microsoft menggunakan data ekologis untuk menentukan target area reboisasi. AI tidak sekadar melakukan pemulihan; teknologi ini juga merancang tempat penyimpanan karbon rekayasa—seperti fasilitas penangkapan karbon langsung dari udara (*direct air capture*)—misalnya melalui simulasi kelayakan untuk penyimpanan geologis. Dengan validasi melalui transparansi berbasis *blockchain*, proyek-proyek ini mengubah kompensasi karbon dari sekadar tindakan simbolis menjadi investasi strategis.

Jalur Konvergensi menuju Ekosistem *Net-Zero* yang Tangguh

Metafora hidrologis ini menunjukkan sebuah kebenaran mendasar: pengelolaan karbon merupakan masalah sistemik. AI bekerja paling efektif saat menghubungkan ilmu lingkungan dengan ekonomi, menciptakan siklus umpan balik yang bersumber dari data dan tindakan nyata. Pasar karbon internasional, komitmen perusahaan, dan kebijakan seperti Perjanjian Paris merupakan respons cerdas dalam menghadapi tantangan ini. Sebagaimana akan diuraikan dalam bab ini, perjalanan dari *data lakes* (kumpulan data masif) menuju tempat penyimpanan karbon (*carbon sinks*) memiliki dimensi filosofis sekaligus teknologis. Proses ini menuntut kita untuk memahami karbon sebagai sumber daya yang harus dikelola sirkulasinya, disimpan, dan dimurnikan secara cermat—sebuah bukti kemampuan umat manusia dalam menyelaraskan inovasi dengan ritme alam Bumi.

12.2 AI DALAM AKUNTANSI DAN PERDAGANGAN KARBON

Persinggungan antara kecerdasan buatan (AI), ilmu lingkungan, dan ekonomi telah mendorong lahirnya strategi baru untuk mewujudkan ekonomi dengan emisi karbon nol bersih (*net-zero*). Tinjauan ini merangkum literatur mengenai peran AI dalam pengelolaan karbon—dengan menggunakan analogi sistem hidrologis—dan berfokus pada tiga pilar utama:

akuntansi karbon, perdagangan emisi, dan proyek kompensasi karbon berbasis AI. Sebuah analogi yang diekstrapolasi mengenai sistem air—sebagai sarana untuk lebih memahami proses lingkungan yang kompleks semacam ini—dikembangkan dengan memanfaatkan landasan dari teori ketahanan (*resilience theory*) dan penelitian sistem sosio-ekologis. Folke menekankan bahwa sistem alami seperti daerah aliran sungai (DAS) beroperasi berdasarkan siklus adaptif aliran dan penyimpanan sumber daya; prinsip-prinsip ini dapat diterapkan pada pengelolaan karbon. Berlandaskan hal tersebut, Steffen berpendapat bahwa batas-batas planet (*planetary boundaries*)—seperti siklus karbon—memerlukan keseimbangan dinamis, serupa dengan keseimbangan hidrologis.

Terkait metafora yang lebih baru, konsep ini telah diterapkan pada sistem digital melalui istilah "danau data" (*data lakes*); istilah ini mengacu pada waduk penyimpanan informasi yang siap dimanfaatkan untuk tujuan strategis, layaknya reservoir alami. AI dapat berperan sebagai "insinyur hidrologi" bagi karbon dengan mencocokkan aliran data emisi terhadap metode sekuestrasi yang paling efektif. Pendekatan ini didukung oleh analisis lintas disiplin yang menghubungkan realitas ekologis dengan kemampuan komputasi, guna menghasilkan seperangkat batasan yang koheren bagi tata kelola karbon yang bersifat sistemik.

Akuntansi Karbon: Dari Inventarisasi Statis menuju Ekosistem Data yang Dinamis

Metode akuntansi karbon tradisional—yang masih didominasi oleh kerangka kerja seperti *Greenhouse Gas Protocol*—kerap dikritik karena sifatnya yang kaku dan ketergantungannya pada metrik yang bersifat retrospektif atau melihat ke belakang. Metodologi berbasis AI membantu menjembatani kesenjangan ini dengan memanfaatkan aliran data *real-time*. Rolnick menunjukkan bagaimana citra satelit dan sistem pelacakan sensor IoT—seperti proyek Climate TRACE—telah ditingkatkan kemampuannya melalui *machine learning* (ML) untuk pelacakan emisi yang lebih akurat. Sebagai contoh, Hang dan Chen menemukan bahwa AI mampu mengurangi ketidakpastian terkait emisi rantai pasok sebesar 30–50%, serupa dengan cara kerja model hidrologis dalam memprediksi perilaku daerah aliran sungai. Studi kasus perusahaan menggambarkan transisi dari pelaporan statis menuju pemetaan karbon yang adaptif dan terperinci (*granular*), sebagaimana terlihat pada dasbor keberlanjutan Microsoft yang didukung oleh AI. Kemajuan-kemajuan ini selaras dengan seruan Linnenluecke mengenai perlunya "akuntansi adaptif" dalam ekonomi iklim, di mana sifat data yang dinamis memungkinkan dilakukannya mitigasi secara proaktif.

AI sebagai Katalis Pasar untuk Sistem Perdagangan Emisi (ETS)

Perdagangan emisi, yang didasarkan pada sistem *cap-and-trade* seperti EU ETS, menghadapi tantangan berupa volatilitas harga dan manipulasi pasar. Analitik prediktif berbasis AI menawarkan solusi untuk masalah ini. Bojer mengemukakan bahwa algoritma *machine learning* (ML) memungkinkan kita untuk lebih baik dalam memperhitungkan tren historis dan guncangan geopolitik saat memprediksi harga izin emisi, serupa dengan cara model hidrologis melakukan analisis untuk memprediksi kekeringan. AI digunakan oleh platform seperti Pachama untuk memverifikasi kredit karbon. Selain itu, perdagangan algoritmik merupakan adaptasi dari pasar keuangan yang dapat meningkatkan likuiditas di

pasar karbon. Salah satu contoh penerapannya adalah proyek Carbfix dari ClimeWorks, di mana AI digunakan untuk menyimulasikan pasar guna mengoptimalkan alokasi izin emisi; langkah ini tidak hanya layak secara ekonomi, tetapi juga mampu menyelaraskan aktivitas ekonomi kita dengan batasan yang ditetapkan oleh ekosistem.

Offset Karbon Berbasis Pembelajaran Mesin (*Machine Learning*)

Offset karbon berbasis alam, seperti reboisasi, sering kali menghadapi masalah pemantauan yang tidak konsisten. AI meningkatkan presisi melalui perangkat seperti Global Forest Watch, yang menggunakan pembelajaran mesin (ML) untuk mendeteksi deforestasi secara waktu nyata (*real-time*). Bastin memperkirakan bahwa 205 gigaton CO_2 dapat diserap melalui upaya penanaman hutan (aforestasi) yang dioptimalkan oleh AI, sementara Google berfokus pada identifikasi zona restorasi yang berdampak tinggi. AI juga membantu dalam solusi rekayasa teknis, seperti penangkapan karbon langsung dari udara (*Direct Air Capture* atau DAC). Menurut penelitian tahun 2018, efisiensi DAC ditingkatkan oleh model pembelajaran mesin yang menyimulasikan kelayakan penyimpanan karbon secara geologis. Sistem hibrida *blockchain*-AI, seperti *Carbon Asset Blockchain* milik IBM, menawarkan transparansi yang lebih tinggi untuk mengatasi kekhawatiran mengenai kredibilitas offset. Inovasi-inovasi ini menandai pergeseran dari offset yang bersifat simbolis menuju solusi yang berbasis data dan dapat ditingkatkan skalanya.

Hubungan Sinaptik antara Ilmu Lingkungan dan Ekonomi

Metafora hidrologis juga menggambarkan perlunya pertukaran gagasan lintas disiplin ilmu. Analogi Fremstad yang mengibaratkan iklim ekonomi kita sebagai "kasino iklim" menyoroti risiko dari aliran karbon yang tidak terkelola, sementara Treasury menekankan perlunya memberikan nilai pada modal alam. Agrawal berpendapat bahwa algoritma prediktif dapat menginternalisasi eksternalitas lingkungan, sehingga memungkinkan karbon beralih dari sekadar beban (liabilitas) menjadi aset yang dapat diperdagangkan. Studi kasus seperti rute pelayaran Maersk yang dioptimalkan dengan AI menunjukkan bagaimana keberlanjutan perusahaan dapat berjalan beriringan dengan penghematan biaya. Data waktu nyata yang terharmonisasi dapat menstabilkan pasar karbon yang tangguh, serta mendukung keberlangsungan implementasi Pasal 6 Perjanjian Paris.

Sintesis dan Kesenjangan

Berbagai kasus penggunaan AI untuk pengelolaan karbon yang diungkapkan dalam literatur yang ada menunjukkan potensi AI dalam membantu pengelolaan karbon; namun, studi-studi tersebut cenderung membahas aspek teknis, ekologis, atau ekonomis secara terpisah. Meskipun metafora hidrologis dapat menyediakan kerangka kerja yang kohesif, penerapannya sebagian besar masih belum banyak diperhatikan. Bab ini membantu merangkai berbagai aspek tersebut, dengan menunjukkan bagaimana AI dapat meniru kemampuan sistem air untuk menginspirasi perancangan masa depan yang mencapai emisi nol bersih (*net-zero*).

12.3 CETAK BIRU HIDROLOGIS AI MENUJU *NET-ZERO*

Kerangka kerja ini menggunakan metafora sistem air dengan menguraikan pendekatan lima tahap yang bersifat sirkular terhadap pengelolaan karbon, yang mengintegrasikan AI, ilmu lingkungan, dan mekanisme pasar. Berlandaskan pada konsep fluiditas, penyimpanan, dan tata kelola adaptif, kerangka ini menjabarkan serangkaian tindakan yang jelas bagi pemerintah, perusahaan, dan LSM untuk mengurangi emisi serta meningkatkan penyerapan karbon.

Tahap 1: Integrasi Data dan Pemetaan Hidrologi

Tujuan: Menciptakan ekosistem data karbon terpadu yang beroperasi secara *real-time*.

Jaringan Sensor Nirkabel dan Sistem Satelit Jarak Jauh

- Menempatkan sensor IoT di berbagai fasilitas industri, jaringan transportasi, dan kawasan pertanian untuk mengukur emisi (misalnya, kebocoran metana dan pembakaran bahan bakar). Langkah ini dipadukan dengan jaringan satelit, seperti Copernicus milik ESA atau *Orbiting Carbon Observatory*-3 milik NASA, untuk memantau deforestasi dan perubahan penggunaan lahan.

Pendekatan Beban Kerja Analitik: Arsitektur *Data Lake* Karbon Terpusat

- Membangun "*data lake karbon*" berbasis *cloud* untuk mengumpulkan dan mengintegrasikan data terstruktur (laporan GRK perusahaan, laporan modal alam) maupun data tidak terstruktur (citra satelit, peta panas deforestasi dari media sosial). Alat AI seperti *convolutional neural networks* (CNN) digunakan untuk mengklasifikasikan sumber emisi dan penyerap karbon alami.

Akuntansi Karbon Dinamis

- Bidang 1: Perhitungan emisi Cakupan 1–3 berbasis AI menggunakan metode berbasis aktivitas dan berbasis pengeluaran dalam dasbor yang dibuat secara otomatis (misalnya, Microsoft *Planetary Computer*). Penggunaan *blockchain* untuk jejak audit dan kepatuhan terhadap protokol Gas Rumah Kaca (GRK).

Contoh Implementasi

- Sebuah perusahaan global menumpangkan data deforestasi satelit dengan data dari sensor IoT di pabrik-pabriknya. Model AI tersebut melaporkan adanya estimasi berlebih (overestimasi) sebesar 20% terkait offset karbon akibat degradasi hutan, yang kemudian memicu investasi ulang pada proyek yang telah terverifikasi tersebut.

Tahap 2: Manajemen Aliran Emisi yang Dinamis

Tujuan: Pemanfaatan analitik prediktif dan preskriptif untuk optimalisasi langkah-langkah pengurangan emisi.

Prakiraan Emisi Berbasis AI

- Melatih jaringan *Long Short-Term Memory* (LSTM) untuk memprediksi permintaan energi musiman pada saat beban puncak.

Algoritma Mitigasi Preskriptif

- Menggunakan sistem rekomendasi yang menyarankan langkah-langkah pengurangan emisi yang hemat biaya. Sebagai contoh, jika sebuah perusahaan utilitas melatih model AI, model tersebut mungkin menyarankan penggantian

rencana pembangunan pembangkit listrik tenaga batu bara baru dengan ladang panel surya di wilayah dengan paparan sinar matahari tinggi, yang dapat mengurangi emisi sebesar 40% dalam kurun waktu 5 tahun.

Penggunaan *Digital Twin* untuk Perencanaan Skenario

- Membuat *digital twin* (kembaran digital) dari kota atau rantai pasok untuk memodelkan jalur dekarbonisasi. Proyek "Virtual Singapore" yang diperkuat AI menguji bagaimana penerapan biaya kemacetan (*congestion pricing*) dapat menurunkan emisi sektor transportasi.

Contoh Implementasi

- Pemerintah kota menggunakan *digital twin* untuk menguji dampak pajak karbon terhadap sektor industrinya. AI menyarankan pendekatan pajak secara bertahap, disertai dengan pemberian subsidi untuk adopsi teknologi ramah lingkungan, guna menyeimbangkan aspek keadilan dan efektivitas.

Tahap 3: Optimalisasi Penyerapan Karbon

Tujuan: Membuat penyerap karbon alami dan rekayasa menjadi seefisien mungkin.

Solusi Berbasis Lahan Kolektif yang Didorong oleh AI

- Melatih model *machine learning* (ML) geospasial untuk mendeteksi wilayah reboisasi optimal berdasarkan kesehatan tanah, keanekaragaman hayati, dan hak atas tanah masyarakat. Platform seperti Restor melakukan pemodelan terhadap 1,5 miliar km² lahan yang mencakup kriosfer, permukaan daratan, lautan, dan lingkup bumi; proses ini sering kali menggabungkan data satelit dan basis data ekologis untuk menghasilkan daftar peringkat lokasi potensial berskala global.

Pemantauan Presisi Proyek Ofset

- GAI: Pengenalan gambar berbasis AI: Mengerahkan *drone* atau satelit untuk memantau pohon menggunakan GAI dalam proyek reboisasi. Dengan menggunakan algoritma seperti TensorFlow Lite dari Google, perubahan tutupan lahan (ILK) dapat dideteksi secara *real-time*, sehingga memitigasi risiko pembatalan status ofset.

Desain Penyerap Karbon Rekayasa

- AI Generatif untuk desain fasilitas penangkapan karbon langsung dari udara (*Direct Air Capture* atau DAC). Sebagai contoh, AlphaFold dari DeepMind dapat meningkatkan efisiensi material penyerap CO_2 sebesar 30% melalui optimalisasi struktur molekulnya, yang pada gilirannya dapat meningkatkan profitabilitas DAC.

Contoh Implementasi

- Restorasi dimulai di lahan gambut yang terdegradasi di Indonesia dengan bantuan AINGO, sementara *drone* memantau ketinggian muka air dan teknologi *blockchain* melacak setiap ton CO_2 yang diserap, sehingga menghasilkan kredit karbon yang dapat diperdagangkan.

Tahap 4: Integrasi Pasar dan Adaptasi Kebijakan

Tujuan: Mengintegrasikan wawasan AI ke dalam pasar karbon dan regulasi.

Pembelian Otomatis Kuota Karbon

- Menggunakan reinforcement learning untuk menciptakan agen pialang AI yang mampu melakukan perdagangan dalam sistem perdagangan emisi (ETS). Agen-agen ini menganalisis harga izin, pengumuman regulator, dan data cuaca untuk mengoptimalkan imbal hasil bagi perusahaan.

Deteksi Perilaku Mencurigakan Menggunakan Deteksi Anomali

- Model pembelajaran tanpa pengawasan (*unsupervised learning*), seperti *autoencoder*, digunakan untuk mendeteksi transaksi *offset* yang mencurigakan. Alat semacam itu dapat diintegrasikan ke dalam EU ETS untuk membantu mencegah penghitungan ganda kredit karbon.

Sandbox Kebijakan untuk Pengujian AI

- Pemerintah dapat merancang *sandbox* regulasi untuk menguji strategi karbon berbasis AI yang diterapkan oleh perusahaan. Salah satu contohnya adalah *sandbox* di California yang menguji *microgrid* yang dikelola AI dalam memperdagangkan kredit karbon secara *peer-to-peer*.

Contoh Implementasi

- Platform *Blockchain*-AI, seperti IBM *Carbon Asset Blockchain*, mengotomatisasi penerbitan kredit untuk pembangkit listrik tenaga angin. Untuk menjamin integritas, *smart contract* (kontrak pintar) hanya akan memicu pembayaran setelah AI melakukan verifikasi terhadap produksi energi.

Tahap 5: Siklus Umpan Balik dan Pelibatan Pemangku Kepentingan

Tujuan: Data yang transparan memungkinkan perbaikan berkelanjutan yang bersifat kolaboratif.

Sistem Pembelajaran Adaptif

- Algoritma pembelajaran daring diterapkan untuk menyesuaikan model karbon berdasarkan umpan balik langsung. Sebagai contoh, model AI menyesuaikan faktor emisi yang terkait dengan produksi hidrogen ketika tersedia data baru mengenai efisiensi elektroliser.

Platform Sains Warga

- Pengguna dapat melaporkan emisi (seperti pembakaran gas buang atau gas *flaring*) melalui aplikasi seluler yang datanya kemudian digunakan untuk melatih model AI. AI memeriksa laporan tersebut dengan mencocokkannya terhadap basis data karbon publik dan mengintegrasikannya.

Dewan Tata Kelola Lintas Sektor

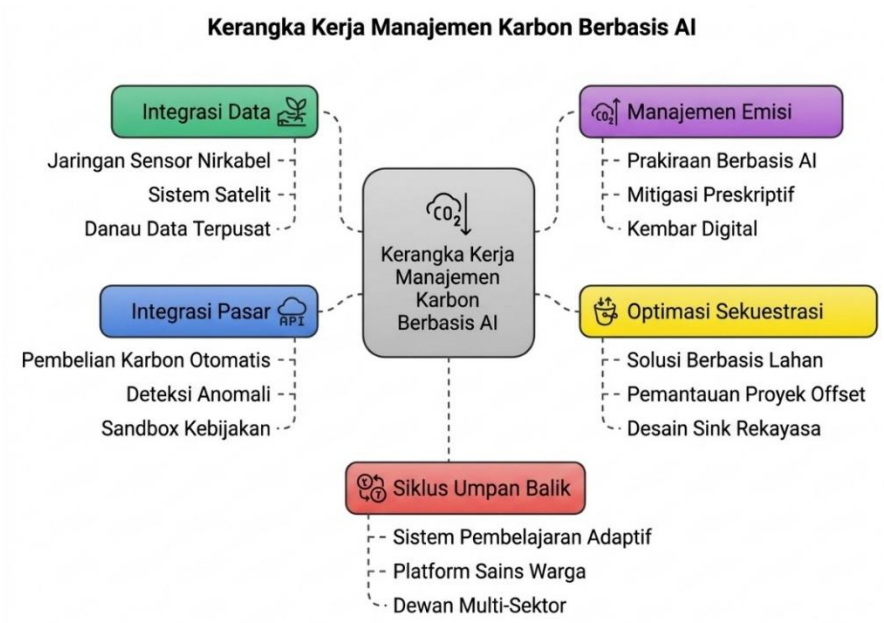
- Membentuk dewan yang terdiri dari praktisi AI, ahli ekologi, dan pembuat kebijakan di tingkat negara maupun benua untuk memantau penerapan kerangka kerja ini. Salah satu contoh kolaborasi semacam itu adalah Inisiatif AI4Climate milik Uni Eropa.

Contoh Penerapan

- Di bawah pengawasan dewan tata kelola, sebuah proyek konservasi Amazon di Brasil diaudit menggunakan AI. Metrik penyerapan karbon yang dipublikasikan

pada dasbor publik membangun kepercayaan serta mendorong partisipasi masyarakat.

Pada akhirnya, kerangka kerja ini melampaui sekadar metafora hidrologis dengan menghadirkan perangkat yang dapat ditindaklanjuti; kerangka ini memanfaatkan karbon sebagai sumber daya untuk diukur, dikelola, dan diinvestasikan kembali. Dengan memadukan AI dan kearifan ekologis, kerangka ini menyediakan peta jalan yang dapat diperluas skalanya untuk transisi menuju *net-zero*—sebuah masa depan di mana aliran data memiliki tujuan yang sama kuatnya dengan aliran air, demi menopang masa depan rendah karbon yang tangguh. Gambar 12.1 menampilkan kerangka kerja sirkular untuk pengelolaan karbon.



Gambar 12.1 Kerangka kerja sirkular pengelolaan karbon

12.4 IMPLIKASI AI DALAM PENGELOLAAN KARBON BERKELANJUTAN

Kerangka kerja yang diusulkan—sebuah cetak biru hidrologis berbasis AI untuk mencapai emisi nol bersih (*net-zero emissions*)—mengubah paradigma pengelolaan karbon dari upaya yang bersifat reaktif dan terisolasi menjadi proses yang dinamis dan sistemik. Penggabungan AI dengan wawasan dari bidang hidrologi, ilmu lingkungan, dan ekonomi membuka jalan baru bagi dekarbonisasi. Kajian ini membahas implikasi teoretis, praktis, sosial, dan keberlanjutan dari pendekatan tersebut, serta menyoroti berbagai peluang dan tantangannya.

Implikasi Teoretis

- **Memajukan Pemikiran Sistem dalam Ilmu Iklim**

  Metafora hidrologis dalam kerangka kerja ini menghubungkan teori sistem lintas ranah ekologis dan digital, sehingga memfasilitasi upaya lintas disiplin dalam penelitian iklim. Praktik pengelolaan karbon yang kurang inovatif cenderung memisahkan pengurangan emisi dari konteks sosio-ekologis yang lebih luas. Pendekatan ini selaras dengan teori ketahanan (*resilience theory*) dengan mengonseptualisasikan karbon sebagai sumber

daya yang "mengalir" (*fluid*). Sebagai contoh, konsep penyerap karbon (*carbon sinks*) sebagai "waduk" (*reservoirs*) memiliki kemiripan dengan gagasan daya dukung ekologis, sementara peran AI sebagai "insinyur hidrologis" memperkenalkan konsep agensi komputasional ke dalam sistem yang sebelumnya sebagian besar dikendalikan oleh proses alami. Sintesis ini menentang pendekatan reduksionis dalam ekonomi iklim—yang sering kali hanya mengandalkan analisis biaya-manfaat—dengan lebih mengutamakan keseimbangan sistem dibandingkan efisiensi marginal.

- **Memikirkan Kembali Karbon sebagai Sumber Daya**
  Pendekatan ini didasarkan pada argumen bahwa karbon bukan sekadar masalah limbah, melainkan aset yang dapat bersirkulasi. Hal ini sejalan dengan seruan Anuardo untuk mengidentifikasi dan menghargai modal alam dalam sistem ekonomi. Secara konseptual, kerangka kerja ini mendefinisikan ulang *carbon offsetting* (pengimbangan karbon) sebagai bentuk "irigasi ekologis"; AI mengarahkan emisi ke penyerap karbon untuk mencapai dampak maksimal dengan menerapkan prinsip-prinsip hidrologi, yaitu penyimpanan, aliran, dan pemurnian. Paradigma ini selaras dengan model ekonomi sirkular, namun memberikan dimensi tambahan melalui aliran data *real-time*, analitik prediktif, dan kontekstualisasi.
- **Etika Kecerdasan Buatan dan Regulasi Lingkungan**
  Kerangka kerja ini memunculkan tantangan teoretis terkait agensi dalam aksi iklim. Kapan sistem AI secara otonom mengoptimalkan pasar karbon atau memilih lokasi pengimbangan emisi yang memiliki konsekuensi nyata? Hal ini bersinggungan dengan tata kelola algoritmik dan keadilan lingkungan, di mana etika baru menjadi krusial agar AI dapat berperan sebagai "pengelola" (*steward*) yang bertanggung jawab, bukan sebagai kekuatan yang justru mendestabilisasi sistem.

Implikasi Praktis

- **Skalabilitas dan Efektivitas Biaya**
  Kerangka kerja yang diterapkan secara bertahap ini memungkinkan solusi yang dapat ditingkatkan skalanya bagi berbagai pemangku kepentingan. Tahap 1: Akuntansi karbon berbasis AI mengurangi biaya kepatuhan bagi perusahaan. Alat AI mengurangi kesalahan pelaporan emisi sebesar 25%, sehingga menghemat biaya sebesar Rp21,1 juta. Demikian pula, perdagangan algoritmik di pasar karbon (Tahap 4) mengurangi biaya transaksi sebesar 15–30%, sebagaimana terlihat dalam EU ETS. Namun, investasi awal yang besar untuk jaringan sensor dan infrastruktur AI menjadi hambatan bagi UKM dan negara-negara berkembang.
- **Tantangan bagi Kebijakan dan Regulasi**
  Meskipun AI meningkatkan akurasi perumusan kebijakan, integrasinya menuntut kecerdasan dalam pengaturan regulasi. Sebagai contoh, "*sandbox* kebijakan" yang dikelola AI (Tahap 4) memerlukan struktur tata kelola yang fleksibel untuk mengakomodasi perubahan teknologi yang cepat. Sebagian besar peraturan etika AI yang ada saat ini—seperti AI Act di Eropa yang akan segera diberlakukan—belum secara spesifik mempertimbangkan risiko penyimpangan terkait karbon dalam

implementasinya di masa mendatang. Hal ini memunculkan tantangan terkait kedaulatan data, di mana pusat penyimpanan data karbon (*data lakes*) yang dikuasai oleh perusahaan multinasional berpotensi meminggirkan peran pemerintah daerah.

- **Risiko Teknologi**

  Data yang digunakan AI untuk proses pembelajaran sangatlah masif dan membawa risiko tersendiri. Jika dilatih menggunakan data yang bias—misalnya data yang tidak mencatat emisi dari sektor ekonomi informal secara akurat—strategi mitigasi yang dihasilkan bisa menjadi tidak tepat sasaran. Demikian pula, serangan siber terhadap pusat penyimpanan data terpusat (atau *digital twins*) pada Tahap 2 memiliki dampak sistemik, karena berpotensi merusak prakiraan emisi maupun stabilitas pasar.

Implikasi Sosial

- **Kesetaraan dan Akses**

  Tanpa inklusivitas, kerangka kerja ini berisiko melanggengkan ketimpangan. Sebagai contoh, reboisasi yang dioptimalkan oleh AI mungkin berfokus pada area dengan tingkat penyerapan karbon tinggi namun mengabaikan masyarakat yang bergantung pada lahan tersebut untuk penghidupan mereka. Dalam konteks lain, seperti lahan gambut di Indonesia, proyek-proyek tertentu telah menggusur masyarakat adat pengelola lahan; hal ini menegaskan pentingnya perangkat AI partisipatif yang memanfaatkan pengetahuan lokal. Demikian pula, perdagangan karbon berbasis algoritma (Tahap 4) dapat merugikan perusahaan yang kurang melek teknologi, sehingga memperlebar kesenjangan antara penghasil emisi berskala kecil dan besar.

- **Menjadikan Informasi Mudah Diakses dan Menarik**

  Nilai dari kerangka kerja ini bergantung pada kepercayaan sosial. Tahap 5: Jika model berbasis AI membuat sebagian pemangku kepentingan merasa terasing, platform sains warga (*citizen science*) dapat mendemokratisasi pengumpulan data. Sebagai contoh, masyarakat di sekitar fasilitas DAC mungkin menolak proyek yang mengandalkan pendekatan "kotak hitam" (*black-box*) dalam pengambilan keputusan oleh AI. Dasbor terbuka—seperti metrik penyerapan karbon publik (Tahap 5)—mendorong akuntabilitas dan tindakan kolektif.

- **Transisi Tenaga Kerja dan Keterampilan**

  Otomatisasi dalam akuntansi dan perdagangan karbon dapat menyebabkan hilangnya peran tradisional di bidang konsultasi atau audit keberlanjutan. Namun, hal ini juga menciptakan permintaan akan keterampilan hibrida—misalnya, "insinyur data karbon" yang menguasai bidang ilmu lingkungan sekaligus *machine learning* (ML). Di negara berkembang, inisiatif pelatihan ulang keterampilan (*reskilling*) sangat penting untuk memastikan transisi tenaga kerja yang adil.

Implikasi Keberlanjutan

- **Pertukaran Kepentingan dan Manfaat Bersama dari Inovasi Lingkungan**

  Kerangka kerja ini memprioritaskan solusi berbasis alam, sehingga meningkatkan keberlanjutan ekologis. Sebagai contoh, reboisasi berbasis AI dapat meningkatkan keanekaragaman hayati; Bastin memperkirakan bahwa restorasi hutan seluas 900 juta

hektar dapat menjadi habitat bagi 70% spesies darat. Namun, ketergantungan berlebihan pada teknologi penyerap karbon buatan (*engineered sinks*), seperti DAC, berisiko mengurangi alokasi sumber daya yang memadai untuk dekarbonisasi sistemik. Sebagai ilustrasi, fasilitas DAC dapat mengonsumsi energi hingga 2.000 kWh per ton CO_2 yang diserap, yang berpotensi meningkatkan permintaan energi.

- **Ketahanan Jangka Panjang**
  Kerangka kerja ini mendorong kapasitas adaptif dengan meniru siklus hidrologi. Teknologi *digital twin* (Tahap 2) memungkinkan masyarakat untuk memodelkan guncangan iklim (misalnya, uji ketahanan jaringan listrik terhadap kebakaran hutan) dan menyesuaikan strategi mitigasi sejak dini. Namun, jejak energi yang dihasilkan dapat mengancam keberlanjutannya. Pelatihan model ML berskala besar menghasilkan emisi CO_2 hingga 626.000 pon, sehingga diperlukan inovator AI ramah lingkungan, seperti pusat data yang ditenagai energi terbarukan.
- **Sirkularitas dan Keadilan Antargenerasi**
  Logika sirkular dalam kerangka kerja ini—yang memandang emisi sebagai masukan bagi penyerap karbon (*sinks*)—selaras dengan prinsip-prinsip keadilan antargenerasi. Pendekatan ini memperluas manfaat sekuestrasi melampaui siklus kompensasi jangka pendek dengan mengoptimalkan penyimpanan karbon di dalam tanah atau hutan. Namun, fokus pasar karbon jangka pendek pada keuntungan perdagangan berisiko melemahkan hasil ini; hal tersebut menegaskan pentingnya model AI ekologis otonom yang memprioritaskan kesehatan ekosistem jangka panjang di atas keuntungan triwulanan.
- **Sintesis: Titik Temu antara Inovasi dan Etika**
  Intervensi-intervensi ini mengindikasikan adanya kesenjangan antara budaya teknologi dan tekanan sosio-ekologis dalam lingkungan binaan, yang dipicu oleh dampak antagonistik dari kerangka kerja ini. Secara teoretis, pendekatan ini memperdalam pemikiran sistem namun membingungkan perspektif ekonomi ortodoks. Secara praktis, hal ini berarti menghadirkan perangkat yang mampu berkembang dalam skala besar namun memerlukan mekanisme pengaman untuk mencegah penyalahgunaan. Secara sosial, pendekatan ini memfasilitasi tindakan partisipatif, namun juga berpotensi menciptakan ketimpangan. Dari sisi lingkungan, pendekatan ini menemukan cara untuk menyeimbangkan diri dengan batasan planet, sembari tetap berupaya mengatasi jejak karbon yang dihasilkannya.

Prinsip-Prinsip untuk Implementasi yang Berkeadilan

Sebagai bagian dari tata kelola ini, Anda mengusulkan penetapan standar internasional agar AI pengelola karbon menjadi transparan dan algoritmanya bersifat inklusif dalam proses audit.

a. **Keadilan**: Perancangan bersama (*co-design*) oleh masyarakat harus menjadi syarat wajib bagi semua proyek kompensasi karbon berbasis AI.
b. **Keberlanjutan**: Penerapan AI yang didukung insentif serta infrastruktur energi terbarukan untuk mengurangi jejak karbonnya.

c. **Pendidikan**: Membangun kemitraan global terkait pelatihan ulang keterampilan (*reskilling*) guna mengembangkan tenaga kerja yang terlatih dalam peran hibrida yang memadukan AI dan keberlanjutan.

Metafora hidrologis dalam kerangka kerja ini bukan sekadar perangkat retoris; ini adalah ajakan untuk mengubah cara pandang kita mengenai hubungan umat manusia dengan karbon. Kerangka ini menyoroti visi komprehensif untuk transisi menuju emisi nol bersih (*net-zero*) melalui studi kasus, kerangka sistem air, dan pembentukan potensi AI. Namun, keberhasilannya bergantung pada penanganan ambiguitas etis, inklusivitas, dan inovasi evolusioner dalam pengelolaan ekologis. Saat masyarakat menghadapi krisis iklim, kerangka kerja kritis ini mengungkap sebuah kebenaran: Teknologi tidak akan menyelamatkan planet ini sendirian, melainkan harus selaras dengan kecerdasan alam—yang mungkin mengajarkan kita cara untuk bergerak mengikuti irama Bumi, bukan melawannya.

12.5 TRANSFORMASI PENGELOLAAN KARBON MENUJU *NET-ZERO*

Krisis iklim yang kita hadapi menuntut lebih dari sekadar perubahan bertahap; krisis ini mengharuskan adanya peninjauan ulang secara radikal terhadap cara masyarakat memahami, memperlakukan, dan menilai karbon. Singkatnya, bab ini menyajikan kerangka kerja transformasional yang terinspirasi oleh metafora sistem air dan mendefinisikan kecerdasan buatan (AI) sebagai insinyur hidrologis bagi siklus karbon planet ini. Dengan memperlakukan karbon sebagai sumber daya yang dinamis—sesuatu yang perlu dipantau, diarahkan, dan diinvestasikan kembali—alih-alih sebagai polutan statis, kerangka kerja ini menghubungkan ilmu lingkungan, ekonomi, dan teknologi. Saat kita menyelami detail teknis yang rumit, prinsip-prinsip panduan saya tetap mengarah pada visi yang lebih luas dan ideal: perlunya pemikiran sistemik, sifat AI yang bermata dua, serta seruan untuk menyelaraskan inovasi dengan kesadaran ekologis dan etis.

Meruntuhkan Hambatan: Pemodelan Organisasional

Metafora hidrologis mengingatkan kita bahwa pengelolaan karbon bukan sekadar tantangan yang bersifat linear, melainkan juga tantangan sistemik. Siklus air menghubungkan lautan, sungai, dan awan hujan, sama halnya dengan aliran karbon yang menghubungkan industri, hutan, dan pasar regulasi. Pendekatan konvensional sering kali bersifat parsial karena memisahkan aspek pengurangan, imbalan, dan pembaruan dalam ekonomi. Sebagai contoh, skema *carbon offset* (penyeimbangan karbon) perusahaan secara historis lebih mengutamakan efisiensi biaya dibandingkan keanekaragaman hayati, sehingga berujung pada perkebunan monokultur yang merusak ekosistem.

Kerangka kerja ini mengatasi masalah tersebut dengan mengintegrasikan kemampuan berbasis AI—termasuk akuntansi karbon dinamis dan *digital twin* (kembaran digital)—ke dalam sebuah siklus terpadu di mana data menjadi dasar tindakan, dan tindakan tersebut kemudian memperkaya data. Proses ini dilengkapi dengan mekanisme penyeimbang umpan balik, yang juga dapat ditemukan dalam siklus adaptif sistem air. Metafora ini juga mengubah cara pandang kita terhadap penyerap karbon (*carbon sinks*), yang kini diposisikan sebagai "waduk" yang memerlukan pengawasan cermat. Kemampuan AI dalam memantau dan

mengoptimalkan lokasi reboisasi, serta merancang dan menentukan lokasi fasilitas penangkapan karbon langsung dari udara (*direct air capture* atau DAC), mengubah penyerap karbon dari sekadar penerima pasif menjadi kontributor aktif dalam ekonomi sirkular. Namun, transisi ini menuntut kerendahan hati; secanggih apa pun kemampuan AI dalam menyimulasikan sistem yang kompleks, teknologi tidak akan pernah bisa menggantikan nilai ekosistem yang sehat. Oleh karena itu, kerangka kerja ini mengusulkan jalan tengah antara efisiensi hasil rekayasa dan kearifan ekologis, di mana teknologi berperan memperkuat—bukan menggeser atau meniadakan—proses-proses alami.

Janji yang Bermata Dua

Peran AI dalam kerangka kerja ini bersifat paradoks, transformatif, dan penuh dengan kontradiksi. Di satu sisi, AI mendemokratisasi aksi iklim. Setelah menyadari perlunya meminta pertanggungjawaban aktor korporasi dan negara, platform seperti Climate TRACE mengumpulkan data satelit dan pengamatan di lapangan, yang diproses dengan pembelajaran mesin, untuk menunjukkan titik-titik emisi yang menyembunyikan kejelasan data yang dilaporkan sendiri. Demikian pula, hibrida *blockchain*-AI meningkatkan transparansi di pasar karbon, mengurangi penipuan dan meningkatkan kepercayaan pada proyek-proyek kompensasi lahan pertanian dan hutan. Aplikasi sains warga (misalnya, *Global Forest Watch*) memberdayakan komunitas yang terpinggirkan untuk melaporkan penebangan ilegal atau kebocoran metana, menyediakan lapisan akar rumput untuk kumpulan data global.

Namun, janji AI membawa risiko tersendiri. Terlepas dari kekuatan data lake yang terpusat, terdapat risiko monopoli informasi, terutama di tangan raksasa teknologi atau negara-negara kaya, yang memperburuk "kesenjangan digital" dalam tata kelola iklim. Dampak yang ingin dicapai, terutama dalam hal keadilan lingkungan, memunculkan pertanyaan yang jelas tetapi tampaknya tidak pernah dipertimbangkan oleh kerangka kerja pembelajaran mesin pada umumnya (bayangkan mesin yang bekerja dengan baik): Dapatkah bias algoritmik, seperti dalam kasus sistem pengenalan wajah, mereplikasi ketidakadilan lingkungan—misalnya, jika AI memutuskan untuk memprioritaskan proyek kompensasi di wilayah politik yang stabil daripada zona perang? Selain itu, konsumsi energi AI mungkin akan segera melebihi kegunaannya: melatih model besar dapat melepaskan CO_2 sebanyak lima mobil selama bertahun-tahun pengoperasiannya. Mengatasi tantangan ini membutuhkan solusi "AI hijau", seperti algoritma hemat energi dan pusat data bertenaga energi terbarukan, serta kerangka kerja etika yang lebih luas yang menjamin akses yang adil terhadap data.

Inovasi dalam Kerangka Ekonomi Hijau: Tata Kelola Etis dan Penghormatan terhadap Planet

Batas-batas planet dan kesetaraan sosial berfungsi sebagai tolok ukur kerangka kerja ini. Sistem hidrologi memainkan peran yang beragam—dari lahan basah hingga sungai hingga gletser—yang semuanya berkontribusi untuk menjaga keseimbangan ekologis. Demikian pula, pengelolaan karbon harus menghormati keanekaragaman ekologis dan budaya. Misalnya, reboisasi yang didukung AI harus selalu mempertimbangkan hak atas tanah bagi masyarakat adat, mengingat tata kelola berkelanjutan yang telah diberikan oleh kelompok-kelompok seperti budaya Kayapo di Amazon terhadap hutan mereka selama ribuan tahun. Jika solusi

teknokratis mengabaikan keunikan konteks lokal, mereka berisiko mengulangi episode lain dari ekstraksi berpola kolonial.

Kita juga harus merekonseptualisasi kemajuan dan tata kelola etis. Pendekatan sekuensial kerangka kerja—yang bergerak dari integrasi data ke keterlibatan pemangku kepentingan—menyatakan gagasan bahwa urgensi menghasilkan hasil yang lebih baik. Kembaran digital, misalnya, memungkinkan para pembuat kebijakan untuk mensimulasikan dampak jangka panjang pajak karbon terhadap masyarakat rentan, sehingga dekarbonisasi tidak memperburuk kemiskinan. Sistem pembelajaran adaptif memungkinkan faktor emisi mereka diperbarui dari waktu ke waktu: kita perhatikan bahwa pengetahuan ilmiah tidak statis dan terus berkembang.

Seruan Masa Depan untuk Inovasi yang Rendah Hati

Transisi dari data lake ke carbon sink bukanlah sekadar masalah teknis; ini adalah masalah filosofis. Hal ini membutuhkan umat manusia untuk mengenal dirinya sendiri bukan sebagai penguasa planet tetapi sebagai peserta dalam siklus Bumi. AI yang berlandaskan kerendahan hati dan kemauan untuk melintasi batas-batas disiplin ilmu dapat membantu memperlancar transisi. Ini seperti sungai: jika banjir, para insinyur mungkin mencoba meluruskan alirannya, tetapi hanya dengan memahami lekukan alaminya mereka dapat melestarikan ekosistem yang ditopang sungai tersebut. Demikian pula, AI perlu melengkapi tetapi tidak menggantikan ritme siklus karbon.

Jalan ke Depan

Untuk mewujudkan visi ini, tiga langkah mendesak diperlukan.

a. **Kerangka Tata Kelola Global**: Menetapkan regulasi global untuk transparansi AI, kedaulatan data, dan integritas pasar karbon untuk memastikan teknologi mengutamakan kepentingan bersama.
b. **Desain Inklusif**: Mewajibkan strategi partisipatif untuk desain AI, merancang seluruh siklus hidup sistem dengan pengetahuan lokal dan komunitas garis depan yang diwujudkan dalam proyek offset dan desain kebijakan.
c. **Pendidikan & Peningkatan Keterampilan**: Mengembangkan jalur untuk pekerjaan hibrida (misalnya, analis data karbon, ahli etika AI) di persimpangan ranah teknologi dan keberlanjutan.

Pada akhirnya, ini bukanlah cetak biru untuk masa depan kita yang sempurna, tetapi panduan praktis untuk menyelaraskan kreativitas manusia dengan batasan dunia kita. Jika kita memproyeksikan potensi AI melalui prisma sistem air, kita dapat mengembangkan domain di mana aliran karbon direncanakan dan menopang kehidupan, seperti siklus hidrologi itu sendiri—ciri khas kapasitas umat manusia untuk memadukan penemuan dengan planet tempat kita berada.

BAB 13
ALGORITMA AI SEBAGAI KEBIJAKAN LINGKUNGAN BARU

13.1 AI SEBAGAI AGEN KEBIJAKAN LINGKUNGAN

Sebuah kota pesisir di Asia Tenggara yang dulunya kerap dilanda banjir monsun setiap tahun kini mengandalkan sistem ketahanan iklim berbasis AI. Sistem ini menggunakan model pembelajaran mesin yang didasarkan pada data satelit waktu nyata (*real-time*), pola cuaca historis, dan metrik infrastruktur perkotaan untuk memprediksi risiko banjir dengan tingkat akurasi 95 persen. Perencana kota memanfaatkan wawasan ini untuk mengalihkan arus lalu lintas secara dinamis, mengaktifkan protokol darurat, dan mengerahkan sumber daya bahkan sebelum tetes hujan pertama menyentuh tanah. Di Brussels, sebuah algoritma penghitungan karbon mengaudit emisi perusahaan multinasional dalam hitungan milidetik; algoritma ini membandingkan basis data rantai pasok dengan perjanjian iklim global serta mendorong kepatuhan. Ini bukanlah skenario fiksi ilmiah, melainkan gambaran kenyataan yang muncul dengan cepat, di mana AI sedang merumuskan ulang aturan tata kelola lingkungan.

Saat dunia bergegas menuju target nol bersih (*net-zero*) karbon, kelemahan kerangka kebijakan tradisional menjadi semakin nyata. Perubahan iklim merupakan krisis yang sangat kompleks dan saling terkait, sehingga tidak dapat diselesaikan dengan solusi yang statis. Pembuatan kebijakan tradisional—yang bersifat reaktif, terkotak-kotak (*siloed*), dan terhambat oleh inersia birokrasi—gagal mengimbangi kecepatan dan skala degradasi ekologis. Sebagaimana ditegaskan dalam Laporan Kebijakan Iklim Global 2023, 78% negara gagal memenuhi komitmen mereka dalam Perjanjian Paris, sehingga solusi inovatif menjadi suatu keharusan. Di sinilah peran AI: berbagai teknologi yang mampu memproses kumpulan data masif, menyimulasikan hasil, dan mengotomatisasi pengambilan keputusan. Bab ini menyatakan bahwa algoritma AI telah mulai berfungsi sebagai agen kebijakan lingkungan secara *de facto*, menghadirkan mekanisme untuk merancang ulang tindakan terkait perubahan iklim melalui tiga lensa transformatif: penilaian dampak berbasis AI, kerangka kebijakan prediktif, dan sistem kepatuhan regulasi otomatis.

Telah terjadi pergeseran paradigma terkait penggunaan AI dalam tata kelola lingkungan. Secara historis, kebijakan bersumber dari keahlian manusia, negosiasi politik, dan analisis data bertahap. Algoritma mengolah data iklim berskala petabita—seperti kebocoran metana yang terdeteksi satelit atau tingkat deforestasi yang dipantau satelit—dan menghasilkan wawasan jauh lebih cepat daripada kemampuan kognisi manusia. Sebagai contoh, Kementerian Lingkungan Hidup Kenya menggunakan AI untuk memetakan pembalakan liar secara *real-time* dengan mencocokkan citra satelit dan sensor akustik guna memberi peringatan kepada petugas lapangan dalam hitungan menit. Demikian pula, inisiatif "*GreenBrain*" Uni Eropa menyimulasikan dampak sosial-ekonomi dari pajak karbon di negara-negara anggotanya, sehingga pembuat kebijakan dapat melakukan uji ketahanan (*stress test*) terhadap berbagai usulan sebelum kebijakan tersebut diberlakukan. Contoh-contoh ini

menunjukkan bagaimana AI dapat membantu meningkatkan akurasi, mengurangi latensi, dan menghilangkan bias dalam pengambilan keputusan terkait lingkungan.

Namun, perubahan semacam itu masih menuai kontroversi. Para kritikus menyoroti adanya fenomena "dominasi berlebih algoritma" (*algorithmic over-reach*), di mana sistem AI yang cara kerjanya tidak transparan dapat berfokus pada kekuasaan, meminggirkan masukan publik, atau melanggengkan ketimpangan yang sudah ada. Menurut studi tahun 2022 oleh AI Now Institute, enam puluh persen perangkat AI yang berfokus pada iklim bergantung pada kumpulan data yang condong ke konteks negara-negara Utara Global (*Global North*); akibatnya, risiko munculnya hasil yang bias dan keliru saat perangkat tersebut diterapkan di wilayah lain menjadi lebih tinggi. Selain itu, penyerahan proses regulasi kepada mesin menimbulkan persoalan etis: mampukah algoritma menimbang secara adil antara pertumbuhan ekonomi dan pelestarian ekologi? Siapa yang bertanggung jawab atas penetapan kebijakan yang didukung oleh AI? Kekhawatiran semacam itu menegaskan perlunya kerangka tata kelola yang kuat untuk menjamin transparansi, keadilan, dan pengawasan oleh manusia.

Bab ini—yang disusun berdasarkan analisis kebijakan, wawancara dengan lebih dari 30 pembuat kebijakan, serta studi kasus global (termasuk sistem prakiraan kebakaran hutan berbasis AI dan *digital twin* untuk keberlanjutan perkotaan di Kanada)—mengupas peran ganda AI sebagai faktor pendisrupsi sekaligus pendukung kebijakan lingkungan. Bab ini berargumen bahwa meskipun AI bukanlah solusi ajaib, penerapannya secara strategis dapat mendemokratisasi aksi iklim, menciptakan demokrasi berbasis data, serta mempercepat upaya menuju ekonomi nol-bersih. Namun, masa depan ini bergantung pada satu syarat krusial: kemampuan kita untuk memprogram—tidak hanya aspek iklim, tetapi juga nilai-nilai keadilan dan kemampuan adaptasi—ke dalam algoritma yang akan mengaturnya.

Bagian-bagian selanjutnya mengkaji bagaimana setiap pilar kebijakan lingkungan akan ditransformasikan melalui AI, risiko serta peluang yang menyertai transformasi tersebut, dan dialog mendesak yang perlu dibangun guna memastikan bahwa tata kelola algoritmik dapat mendukung kesejahteraan planet dan masyarakat.

13.2 PELUANG DAN RISIKO TATA KELOLA AI IKLIM

AI dalam kebijakan lingkungan memiliki potensi untuk mengendalikan ranah krusial terakhir menuju ekonomi karbon nol-bersih (*net-zero carbon*). Melalui sintesis penelitian lintas disiplin, tinjauan pustaka ini menganalisis faktor-faktor teknologi, sosial-politik, dan etika yang membentuk peran AI dalam proses tata kelola iklim. Wawasan yang disintesis dari studi kebijakan, jurnal ilmu komputer, dan literatur etika lingkungan menunjukkan tiga tema utama: (1) AI sebagai alat transformatif untuk meningkatkan efektivitas kebijakan, (2) risiko bias algoritmik dan kekosongan tata kelola, serta (3) tantangan geopolitik dan kesetaraan yang menentukan batasan penggunaan AI.

Efektivitas Kebijakan: Inovasi dan Teknologi

Volume dan keragaman data yang dapat diproses oleh teknologi AI menjadi inti dari penerapannya dalam tata kelola lingkungan. Kegunaan sistem pemberi rekomendasi (*recommender systems*) yang dikombinasikan dengan basis data besar, serta potensinya dalam memecahkan kompleksitas struktural yang sulit ditangani oleh struktur kapitalis, menjadikan bidang ini menarik bagi kalangan akademisi. Sebagai contoh, model pembelajaran mesin (*machine learning* atau ML) sangat cocok untuk analitik prediktif, yang dapat digunakan untuk memberikan informasi mengenai peristiwa cuaca ekstrem di masa mendatang atau memodelkan hasil dari sekuestrasi karbon. Sebuah studi terbaru menemukan bahwa model iklim berbasis AI dapat menghasilkan tingkat kesalahan prediksi yang 40 persen lebih rendah dibandingkan metode konvensional, sehingga mendorong strategi adaptasi yang lebih akurat. Penilaian dampak AI memiliki kemiripan dengan audit lingkungan. Penelitian dari *World Resources Institute* menunjukkan bahwa algoritma jaringan sensor satelit dan *Internet of Things* (IoT)—yang mampu mengidentifikasi deforestasi dan kebocoran metana secara hampir seketika (*near real-time*)—lebih unggul dibandingkan pemantauan manual.

Otomatisasi kepatuhan terhadap regulasi merupakan contoh lain dari kemampuan AI. Namun, studi kasus yang melengkapi *Corporate Sustainability Reporting Directive* (CSRD) Uni Eropa menunjukkan bahwa perangkat *natural language processing* (NLP) memang mampu menelusuri ribuan laporan perusahaan untuk mengidentifikasi praktik *greenwashing* atau ketidakpatuhan. Penerapan semacam itu sejalan dengan konsep "regulasi cerdas" (s*mart regulation*), di mana AI berperan meringankan beban administratif sekaligus meningkatkan transparansi dalam penegakan aturan.

Bias Algoritma dan Risiko Tata Kelola

Terlepas dari kemajuan tersebut, para akademisi telah memperingatkan agar tidak terjebak dalam optimisme teknologi semata, seraya mencatat bahwa sistem AI mempelajari dan memperkuat bias yang ada di masyarakat. Sebuah publikasi penting tahun 2021 memperingatkan bahwa kumpulan data pelatihan untuk model iklim sering kali mengabaikan konteks wilayah Global Selatan—wilayah yang pada akhirnya menjadi sasaran penerapan model tersebut—sehingga berpotensi mendistorsi penilaian risiko di kawasan yang paling rentan. Sifat pengambilan keputusan AI yang tidak transparan (sering disebut sebagai *black box* atau kotak hitam) memperparah risiko-risiko ini. Para ahli ilmu politik menyatakan bahwa algoritma *black box* tersebut mengancam akuntabilitas demokratis karena warga negara tidak dapat memeriksa keputusan kebijakan yang dihasilkan oleh sistem milik perusahaan swasta.

Laporan OECD tahun 2023 mengungkapkan kekhawatiran para pembuat kebijakan bahwa perusahaan teknologi swasta mulai menguasai perangkat AI iklim dan lebih mengutamakan kepentingan korporasi dibandingkan kepentingan publik. Selain itu, penerapan regulasi terhadap AI juga memunculkan dilema etis. Muncul pertanyaan—seperti yang juga dikemukakan oleh Ireton—mengenai apakah mesin mampu mengambil keputusan yang melibatkan pertukaran (*trade-off*) antara pertumbuhan ekonomi dan ekosida, mengingat keputusan semacam itu pada dasarnya didasarkan pada nilai-nilai tertentu.

Implikasi Geopolitik dan Kesetaraan

Distribusi spasial sumber daya AI memiliki dampak signifikan terhadap aplikasi di bidang lingkungan. Sebuah laporan tahun 2023 mencatat bahwa 80% paten AI terkait iklim dimiliki oleh perusahaan-perusahaan yang berbasis di Amerika Serikat, Tiongkok, dan Uni Eropa, sehingga menciptakan "kesenjangan tata kelola" yang memarginalkan negara-negara berpenghasilan rendah. Ketimpangan ini diperparah oleh kurangnya infrastruktur; misalnya, Kenya memanfaatkan AI untuk pengawasan anti-perburuan liar, namun terbatasnya akses pita lebar (*broadband*) di wilayah pedesaan menghambat skalabilitas penerapannya.

Para peneliti juga menyoroti adanya ketegangan antara efisiensi berbasis AI dan keadilan iklim. Sebagai contoh, pasar karbon otomatis dapat meningkatkan efektivitas perdagangan emisi, namun merugikan masyarakat yang tidak memiliki literasi digital. Selain itu, pengembangan AI juga bertentangan dengan tujuan keberlanjutan karena sangat bergantung pada pusat data yang mengonsumsi energi dalam jumlah besar. Dalam diskursus ini, muncul gagasan mengenai "utang iklim" (*climate debt*), di mana para kritikus berpendapat bahwa banyak manfaat AI mungkin terkonsentrasi pada negara-negara industri yang secara historis bertanggung jawab atas emisi.

Kerangka Kerja Tata Kelola Interdisipliner

Literatur terkini merekomendasikan model tata kelola hibrida yang memadukan AI dengan pengawasan manusia. Kerangka kerja "informatika kebijakan" (*policy informatics*), yang diperkenalkan oleh Jarrahi, mengusulkan perancangan bersama (*co-design*) perangkat AI melalui kolaborasi dengan para pemangku kepentingan—mulai dari kelompok masyarakat adat hingga perencana kota—agar perangkat tersebut relevan secara budaya dan ekologis. AI Act, yang mewajibkan transparansi dalam algoritma sektor publik, merupakan contoh upaya regulasi untuk mencari keseimbangan antara inovasi dan akuntabilitas. Di sisi lain, inisiatif eksperimental seperti "*AI for Earth*" di Singapura menunjukkan potensi algoritma partisipatif dalam menghimpun solusi lingkungan yang digerakkan oleh masyarakat (*crowdsourcing*). Literatur tersebut menekankan sifat AI yang bermata dua, yakni sebagai katalis sekaligus faktor disrupsi bagi perumusan kebijakan lingkungan. Meskipun kemampuan teknologinya menghadirkan peluang baru untuk mempercepat dekarbonisasi, berbagai tantangan yang belum teratasi—mulai dari bias algoritma hingga ketimpangan geopolitik—memerlukan perhatian segera.

Pendekatan interdisipliner harus dilibatkan dalam penelitian masa depan, sembari memastikan sistem AI memiliki landasan komputasi yang andal, integritas etis yang kuat, dan tata kelola yang demokratis. Sebagaimana dikemukakan oleh Yang, jalan menuju masa depan *net-zero* terletak pada upaya "memasukkan prinsip kesetaraan ke dalam kode algoritma," yang memadukan inovasi teknologi dengan prinsip-prinsip keadilan iklim.

13.3 KERANGKA KERJA AI DALAM KEBIJAKAN LINGKUNGAN

Untuk memanfaatkan potensi AI sekaligus meminimalkan risikonya, kerangka kerja ini menguraikan proses konkret bagi perancangan, implementasi, dan tata kelola kebijakan iklim berbasis AI. Berlandaskan pada aspek-aspek utama dalam literatur—yaitu efikasi teknologi,

kesetaraan, transparansi, dan adaptabilitas—kerangka kerja ini menekankan pada tata kelola kolaboratif, perlindungan etis, dan inovasi inklusif.

Tata Kelola Data dan Model

Tujuan: Memastikan tersedianya data berkualitas tinggi yang representatif serta transparansi dalam perancangan dan pengembangan sistem AI.

Langkah 1: Audit Data yang Etis

- Melakukan audit terhadap kumpulan data pelatihan untuk memastikan keterwakilan dari segi geografis, sosial-ekonomi, dan ekologis. Sebagai contoh, model prediksi banjir di Asia Selatan perlu mengintegrasikan data dari permukiman informal dan wilayah perdesaan, bukan hanya dari pusat-pusat perkotaan.

Langkah 2: Repositori Iklim Sumber Terbuka (*Open-Source*)

- Buka repositori data publik (misalnya, "*Global Climate Data Commons*") untuk mendemokratisasi akses. Lakukan inisiatif serupa dengan program pengamatan Bumi Copernicus milik UE, namun dengan mandat inklusivitas, termasuk menerjemahkan kumpulan data ke dalam bahasa lokal.

Langkah 3: Kemampuan Penjelasan (*Explicability*)

- Alat AI yang diterapkan dalam kebijakan harus mematuhi persyaratan AI yang dapat dijelaskan (*explainable AI* atau XAI). Sebagai contoh, algoritma yang menilai risiko kebakaran hutan harus memberikan informasi kepada pembuat kebijakan melalui visualisasi yang menunjukkan bagaimana input (misalnya, suhu dan penggunaan lahan) memengaruhi output.

Membangun Budaya dan Kapabilitas yang Inklusif

Tujuan: Menjembatani kesenjangan sumber daya global dengan merancang alat AI secara bersama-sama (*co-design*) bersama pemangku kepentingan yang terpinggirkan.

Langkah 4: Menerapkan AI Partisipatif di Laboratorium AI

- Maksimalkan nilai alat-alat tersebut dengan membangun wadah kolaborasi regional, tempat pembuat kebijakan, ahli teknologi, dan masyarakat berkumpul untuk merancang alat-alat ini bersama-sama. Salah satu contohnya adalah "*AI for Conservation Lab*" di Kenya, yang berkolaborasi dengan kelompok masyarakat adat untuk mengatasi perburuan liar.

Langkah 5: Dana Kapasitas untuk Global South (Negara Berkembang)

- Adakan "*Global AI-Climate Justice Fund*" (Dana Keadilan AI-Iklim Global) untuk mendanai infrastruktur digital dan pelatihan keterampilan di negara-negara miskin. Cari kasus penggunaan—seperti pusat data bertenaga surya atau program literasi AI bagi petani kecil—yang memberikan manfaat nyata sekaligus memprioritaskan proyek-proyek yang memiliki potensi besar.

Langkah 6: Perangkat (Toolkit) Sumber Terbuka

- Ciptakan platform AI yang bersifat modular dan dapat saling beroperasi (*interoperable*) untuk fungsi-fungsi bersama (seperti pelacakan emisi). Skalabilitas

ini ditunjukkan oleh platform "National AI for Climate" milik Chili, yang menyediakan algoritma penghitungan karbon secara gratis bagi UKM.

Tinjauan Etis

Tujuan: Mengintegrasikan hak asasi manusia dan etika ekologis ke dalam pengambilan keputusan berbasis algoritma.

Langkah 7: Pelaksanaan Penilaian Dampak Algoritma (AIA)

- Mensyaratkan AIA untuk semua sistem AI yang relevan dengan iklim, dengan fokus pada risiko terkait kesetaraan, privasi, dan kerusakan lingkungan. Contoh persyaratan semacam ini dapat ditemukan dalam *Directive on Automated Decision-Making* (Arahan tentang Pengambilan Keputusan Otomatis), yang mewajibkan AIA bagi perangkat di sektor publik.

Langkah 8: Dewan Etika Multi-Pemangku Kepentingan

- Melakukan tinjauan independen terhadap keputusan AI yang berdampak besar (misalnya, perdagangan karbon otomatis) melalui dewan lintas sektor. Melibatkan ahli etika, ilmuwan iklim, dan perwakilan masyarakat sipil, serupa dengan *High-Level Expert Group on AI* milik Uni Eropa.

Langkah 9: Kerangka Kerja Pertanggungjawaban

- Akuntabilitas hukum atas kesalahan dalam kebijakan AI. Sebagai contoh, jika sistem irigasi berbasis AI memperparah ketimpangan akses air, perlu ditentukan pihak mana yang bertanggung jawab: pengembang, pembuat kebijakan, atau operator.

Integrasi Kebijakan Adaptif

Tujuan: Agar sistem kecerdasan buatan dapat beradaptasi dengan perubahan iklim dan kebutuhan masyarakat.

Langkah 10: *Sandbox* Kebijakan Dinamis

- Menguji coba perangkat AI dalam lingkungan terbatas sebelum diadopsi secara massal. "AI *Sustainability Sandbox*" di Singapura memungkinkan perusahaan menguji algoritma untuk memastikan kepatuhan terhadap kebijakan penetapan harga karbon serta memantaunya selama proses berlangsung.

Langkah 11: Iterasi dengan Umpan Balik

- Sertakan mekanisme umpan balik yang memungkinkan masyarakat terdampak untuk melaporkan bias algoritmik atau konsekuensi yang tidak disengaja. Salah satu contohnya adalah inisiatif "AI *for Air Quality*" di India, yang memperbarui model polusi berdasarkan masukan dari para petani yang menyatakan bahwa data pembakaran lahan pertanian tidak sesuai dengan kenyataan di lapangan.

Langkah 12: Standar untuk Interoperabilitas

- Pastikan sistem AI dapat "berkomunikasi satu sama lain" lintas yurisdiksi. Lakukan pelatihan menggunakan data teknis yang mendalam serta perbarui struktur atau perangkat yang sudah usang (misalnya, standar ISO) untuk menyelaraskan pasar karbon antara negara-negara Utara dan Selatan.

Penyelarasan Menuju Tata Kelola Algoritmik yang Bertanggung Jawab

Kerangka kerja ini menempatkan model AI bukan sebagai pengganti penilaian manusia, melainkan sebagai pelengkap bagi kinerja iklim yang adil. Terdapat tiga faktor kunci keberhasilan:

a. **Tata Kelola Dinamis (*Live Governance*)**: Menggabungkan mesin dengan demokrasi.
b. **Inovasi Berbasis Prinsip Kehati-hatian**: Mengutamakan perlindungan dengan prinsip "tidak menimbulkan kerugian" (*do no harm*) dalam penerapan AI.
c. **Solidaritas Transnasional**: Menata ulang aspek risiko, sumber daya, dan imbalan.

Jika para pembuat kebijakan melembagakan langkah-langkah tersebut, mereka dapat merancang sistem AI yang tidak hanya bijak tetapi juga adil, serta memastikan bahwa tata kelola algoritmik selaras dengan transisi inklusif menuju masa depan nol-bersih (*net-zero*) yang sangat mendesak. Gambar 13.1 menyajikan kerangka kerja kebijakan iklim berbasis AI.



Gambar 13.1 Kerangka kerja kebijakan iklim berbasis AI

13.4 IMPLIKASI AI TERHADAP TATA KELOLA LINGKUNGAN

Kerangka kerja yang diusulkan untuk mengintegrasikan teknologi AI ke dalam sektor kebijakan lingkungan memiliki implikasi teoretis, sosial, keberlanjutan, dan praktis yang sangat besar. Dengan demikian, hal ini menghadirkan tantangan untuk membangun cara pandang baru mengenai hubungan antara masyarakat dan aksi iklim—melalui perangkat dan jalur algoritmik—sekaligus memberikan peringatan penting dalam upaya mewujudkan masa depan nol-bersih.

Implikasi Teoritis: Mendefinisikan Ulang Tata Kelola dan Otoritas

Kerangka kerja ini menggugat teori-teori dominan mengenai tata kelola lingkungan yang mengutamakan pengambilan keputusan bertahap yang berpusat pada manusia. Dengan

memosisikan AI sebagai mitra (*co-pilot*) dalam perancangan kebijakan, kerangka kerja ini menerapkan teori sistem kompleks untuk menangani perubahan iklim sebagai ketegangan yang bersifat non-linear dan saling terkait, yang menuntut solusi adaptif berbasis data. Transisi ini menggoyahkan pemahaman Weberian tentang rasionalitas birokrasi, di mana keahlian manusia dan struktur hierarkis memegang kendali utama. Sebaliknya, kerangka kerja ini mengedepankan teori tata kelola algoritmik, di mana model pembelajaran mesin (*machine learning*) berperan sebagai penentu dinamis hasil kebijakan secara *real-time*.

Penerapan mekanisme pengamanan etis (misalnya, Penilaian Dampak Algoritmik) semakin memperkuat teori keadilan lingkungan dengan melembagakan prinsip kesetaraan sebagai prasyarat, bukan sekadar pertimbangan tambahan. Namun, hal ini juga memunculkan kekhawatiran terkait determinisme teknologi: sejauh mana AI mampu memperhitungkan konteks sosiopolitis yang melahirkan kerentanan iklim, atau justru berisiko mereduksi keadilan menjadi sekadar variabel yang dihitung layaknya variabel lainnya? Fokus kerangka kerja ini pada perancangan partisipatif berupaya menjawab kekhawatiran tersebut, antara lain dengan mengacu pada teori demokrasi deliberatif dan menuntut agar perangkat AI dikembangkan secara kolaboratif bersama masyarakat yang terdampak.

Konsekuensi Sosial: Keadilan, Keagenan, dan Kepercayaan

Secara sosial, keberhasilan suatu kerangka kerja bergantung pada keseimbangan antara efisiensi dan inklusivitas. Melalui penekanan pada audit data etis dan perangkat sumber terbuka, hal ini dapat mendemokratisasi akses AI iklim; misalnya, masyarakat adat di negara-negara Selatan yang melakukan pemantauan deforestasi dapat menggunakan teknologi yang sebelumnya tidak dimiliki oleh negara-negara kaya. Inisiatif seperti *Global South Capacity Fund* mengambil langkah-langkah untuk membebaskan masa depan teknologi digital dari dominasi korporasi dan menawarkan peta jalan untuk mendistribusikan kembali kekuatan teknologi.

Namun, risiko-risiko ini masih ada. Dengan tidak adanya mekanisme akuntabilitas yang dapat ditegakkan (misalnya, kerangka pertanggungjawaban), AI dapat memonopoli pengambilan keputusan oleh para elit teknologi, sehingga merusak kepercayaan publik. Misalnya, algoritme perdagangan karbon mungkin memiliki titik buta yang menguntungkan perusahaan yang memiliki sumber daya untuk mempermainkan data yang akan dimasukkan ke dalam algoritme. Oleh karena itu, desakan kerangka kerja ini pada dewan etika multi-pemangku kepentingan merupakan upaya untuk melembagakan pemeriksaan terhadap pengaruh perusahaan serupa dengan yang ditawarkan oleh teori kontrak sosial dan kerangka ulang hubungan antara warga negara, negara, dan teknologi yang disarankan oleh kerangka kerja tersebut. Skalabilitas model partisipatif belum diuji di wilayah dengan infrastruktur sipil yang terbatas.

Implikasi Berkelanjutan: Inovasi dalam Batasan Planet

Melalui kacamata keberlanjutan, kerangka kerja ini mendorong titik temu antara teknologi dan ekologi. Sistem prediktif yang didukung AI dapat mengoptimalkan jaringan energi terbarukan atau rantai pasokan sirkular, sehingga mempercepat dekarbonisasi. Misalnya, kebijakan sandbox yang dinamis memungkinkan pengulangan berbagai strategi iklim

potensial dengan kecepatan tinggi, yang tidak hanya melengkapi prinsip kehati-hatian kami, namun juga memungkinkan pengujian intervensi sebelum penerapan skala penuh.

Namun, jejak ekologis dari kecerdasan buatan menimbulkan beberapa kontradiksi. Model berukuran besar memerlukan banyak energi dan air untuk dilatih, yang kemungkinan besar cukup untuk menghilangkan penghematan karbon. Kerangka kerja ini mulai memitigasi hal ini dengan mendukung pusat data bertenaga surya dan perangkat "AI ramah lingkungan" untuk memastikan inovasi mempertimbangkan teori batas planet. Standar interoperabilitas juga dapat membantu menyelaraskan upaya-upaya tingkat nasional yang tidak konsisten dalam pasar karbon global, seperti mengatasi "*tragedy of the commons*" dalam tata kelola iklim. Namun demikian, ketegangan antara keuntungan efisiensi AI dan biaya ekologis jangka panjang memerlukan kewaspadaan yang berkelanjutan.

Implikasi Praktis

Dalam praktiknya, langkah-langkah yang dijabarkan oleh kerangka kerja ini memang ambisius, namun dapat dilaksanakan. Bukti kelayakannya sudah ada dalam bentuk audit data yang etis dan protokol AI yang dapat dijelaskan (*explainable* AI), yang telah diuji coba di Uni Eropa dan Kanada. Akan tetapi, tantangan muncul di lingkungan dengan keterbatasan sumber daya. Meskipun mendemokratisasi data, repositori sumber terbuka (*open-source*) memerlukan akses internet yang stabil dan keterampilan teknis—hal yang menjadi hambatan di wilayah di mana 40% populasinya belum melek digital.

Global Climate Justice Fund berupaya mewujudkan hal ini, namun bergantung pada kemauan politik yang berkelanjutan dan pendanaan lintas negara; keduanya merupakan hal yang rentan dan tidak pasti. Kerangka kerja pertanggungjawaban menghadapi masalah fragmentasi yurisdiksi yang serupa; pengembang di Silicon Valley bisa saja menghindari tanggung jawab atas dampak buruk yang ditimbulkan oleh algoritma yang diterapkan di Bangladesh. Pilar integrasi adaptif dalam kerangka kerja ini (misalnya, iterasi berbasis umpan balik) memegang peranan kunci dalam hal tersebut, namun dampaknya mungkin terbatas jika birokrasi yang harus diintegrasikan enggan melakukan perubahan.

Implikasi dari kerangka kerja ini menyajikan dua sisi cerita: harapan dan kewaspadaan. Ini adalah sebuah spekulasi yang dihasilkan komputer mengenai genre baru tata kelola lingkungan yang menjembatani etika AI, cakupan luas pembelajaran mesin (*machine learning*), dan pengelolaan bumi yang bertanggung jawab (*planetary stewardship*). Secara sosial, kerangka kerja ini mengangkat suara kelompok yang selama ini terpinggirkan, namun juga dapat memperparah ketimpangan jika tidak disertai pengawasan ketat. Dari sisi keberlanjutan, kerangka kerja ini menyelaraskan inovasi dengan batasan ekologis, namun bergantung pada upaya menjadikan AI itu sendiri lebih ramah lingkungan (*greening AI*). Secara realistis, keberhasilannya menuntut kerja sama global yang belum pernah terjadi sebelumnya serta tata kelola yang adaptif.

Pada akhirnya, nilai penting kerangka kerja ini terletak pada pengakuannya bahwa AI—melalui perannya sebagai perancang, operator, dan pengembang kasus penggunaan—bukanlah alat yang netral, melainkan agen politik yang menentukan arah keadilan iklim di masa depan kita. Ini adalah jalan menuju kebijakan lingkungan yang lebih cerdas dan adil—sesuatu

yang mutlak diperlukan untuk mewujudkan dunia yang layak huni dan mencapai target emisi nol bersih (*net-zero*)—sekaligus menanamkan prinsip kesetaraan ke dalam algoritma dan mendesentralisasi kekuasaan teknologi.

13.5 TRANSFORMASI PENGELOLAAN KARBON MENUJU *NET-ZERO*

Krisis iklim menuntut tindakan segera, namun juga memerlukan penemuan kembali cara-cara penanganannya. Seiring meningkatnya suhu global dan runtuhnya ekosistem, kelemahan instrumen kebijakan warisan abad ke-20—yang lambat, terkotak-kotak (*siloed*), dan sering kali bias terhadap struktur kekuasaan yang mapan—kini menjadi hal yang tidak dapat lagi ditoleransi. Dalam bab ini, kami telah mengemukakan argumen bahwa kecerdasan buatan (AI)—jika diterapkan secara strategis dan etis—merupakan sebuah pergeseran paradigma dalam tata kelola lingkungan. Dengan memanfaatkan kemampuan AI untuk menganalisis kumpulan data yang sangat besar dalam waktu yang sangat singkat, melakukan pemodelan prediktif, dan mengotomatisasi pengambilan keputusan, masyarakat dapat mendefinisikan ulang aksi iklim sebagai upaya yang tidak hanya dinamis tetapi juga inklusif, dengan melibatkan berbagai pemangku kepentingan—mulai dari kalangan ilmuwan iklim hingga masyarakat yang terdampak. Namun, transformasi ini tidak terjadi secara otomatis. Apakah algoritma yang kita miliki saat ini akan membawa potensi kemajuan atau justru menciptakan kondisi yang mengerikan di Bumi di masa depan, sangat bergantung pada upaya menanamkan prinsip kesetaraan, transparansi, dan akuntabilitas ke dalam kode yang akan menentukan masa depan kita bersama.

Transformasi Kekuasaan: Dari Sentralisasi menuju Pengelolaan Bersama

Implikasi paling signifikan dari AI adalah kemampuannya untuk mendistribusikan ulang peran dan kendali (*agensi*) dalam tata kelola iklim. Selama lima dekade terakhir, model kebijakan lingkungan yang dominan lebih mengedepankan peran aktor negara, perusahaan multinasional, dan kalangan elit teknis, sembari mengabaikan suara masyarakat di garis depan, negara-negara Global Selatan, dan pihak-pihak lainnya. Kerangka kerja yang kami usulkan di sini—yang berlandaskan pada desain partisipatif, perangkat *open-source*, dan solidaritas lintas negara—mempertanyakan hierarki tersebut. Sebagai contoh, laboratorium AI berbasis wilayah yang dirancang bersama para pemilik pengetahuan adat—dan telah diuji coba di Kenya serta Kanada—menunjukkan bagaimana teknologi dapat memperkuat suara kelompok yang terpinggirkan alih-alih membungkamnya. Dengan mendesentralisasi akses data dan mendemokratisasi inovasi, AI dapat menjadi pemicu transisi dari tata kelola yang bersifat *top-down* (dari atas ke bawah) menuju pengelolaan yang bersifat polisentris, di mana masyarakat, pemerintah, dan algoritma menjadi mitra yang setara.

Namun, visi ini menghadapi tantangan berat. Distribusi sumber daya AI yang tidak merata di seluruh dunia, serta dinamika migrasi dan peran Global Selatan, berpotensi memicu praktik neokolonial; di mana data penduduk miskin dunia diekstraksi untuk mengoptimalkan algoritma yang pada akhirnya justru melayani kepentingan Global Utara. Akan tetapi, seperti halnya, ketiadaan mekanisme yang mengikat dapat menjadikannya sekadar instrumen niat

baik dalam pertemuan puncak internasional lainnya. Pelajarannya jelas: disrupsi teknologi harus dibarengi dengan disrupsi di bidang politik dan ekonomi.

Pedang Bermata Dua: Kecepatan

Potensi AI untuk mempercepat aksi iklim sama besarnya dengan risiko bahaya yang ditimbulkannya. Kecepatan dapat menyelamatkan nyawa dan mengurangi emisi, sebagaimana ditunjukkan oleh model prediktif yang mampu memperkirakan kebakaran hutan beberapa hari sebelumnya serta algoritma yang dapat menentukan konfigurasi jaringan energi terbarukan yang optimal. Namun, kecepatan tanpa pengawasan berisiko menimbulkan dampak buruk. Sebagai contoh, pasar karbon otomatis dapat mengefisienkan perdagangan emisi, namun juga dapat berkontribusi pada praktik *greenwashing* jika sistem AI lebih mengutamakan efisiensi dibandingkan kesehatan ekosistem. Pilihan kebijakan yang direkomendasikan AI dapat dibuat dengan kecepatan mesin—yang mungkin tidak selaras dengan proses deliberasi demokratis—sehingga memangkas diskusi publik mengenai *trade-off* (pertukaran kepentingan) antara pertumbuhan ekonomi dan pelestarian lingkungan.

Kerangka kerja ini memitigasi ketegangan tersebut melalui pendekatan "inovasi berbasis prinsip kehati-hatian" (*precautionary innovation*), yakni dengan menguji algoritma dalam lingkungan terkendali (*sandbox*) sehingga mekanisme umpan balik yang iteratif menjadi suatu keharusan. Langkah-langkah ini mengakui kenyataan pahit: dalam perlombaan menuju emisi nol bersih (*net-zero*), tidak semua langkah cepat berarti bergerak maju. Kebutuhan untuk meluangkan waktu guna memastikan keadilan dan akurasi bukanlah sebuah kemewahan, melainkan suatu keharusan.

Algoritma Etis: Logika Mesin dan Planet Bumi

Pada intinya, titik temu antara kecerdasan buatan (AI) dan kebijakan lingkungan hidup bersifat etis. Krisis iklim bukan sekadar masalah teknis; ini adalah tantangan moral yang berakar pada ketidakadilan dan pola pikir jangka pendek yang telah berlangsung selama berabad-abad. Sistem AI yang dilatih menggunakan kumpulan data bias atau dirancang demi memaksimalkan keuntungan perusahaan akan melanggengkan masalah-masalah tersebut. Fokus kerangka kerja ini pada Penilaian Dampak Algoritma (*Algorithmic Impact Assessments* atau AIA) dan dewan etika yang melibatkan berbagai pemangku kepentingan merupakan langkah penting menuju desain yang peka terhadap nilai—yakni memprogram algoritma agar memprioritaskan kesehatan ekologis dan martabat manusia.

Namun, AI yang etis mencakup lebih dari sekadar daftar periksa; hal ini menuntut peninjauan kembali makna "keberhasilan" dalam kebijakan iklim. Tolok ukur keberhasilan harus melampaui sekadar pengurangan emisi atau penghematan biaya, dan mencakup pula hasil-hasil yang berkeadilan, seperti memastikan siapa yang menikmati manfaat energi bersih atau terlindunginya hak-hak masyarakat adat atas tanah mereka. Contoh bagaimana perangkat teknis dapat mendorong kejelasan serta mewujudkan keberlanjutan dan kesetaraan adalah Platform AI Nasional untuk Iklim milik Cile, yang menekankan transparansi dalam penghitungan karbon bagi usaha kecil.

Jalan ke Depan: Dari Kode ke Koalisi

Jalan menuju masa depan *net-zero* tidak akan diaspal dengan Python atau R, melainkan dengan tindakan kolektif para pembuat kebijakan, ahli teknologi, dan warga negara. Kerangka kerja yang saya uraikan di sini bukanlah resep, melainkan provokasi, sebuah undangan untuk membayangkan kembali tata kelola di masa pergolakan planet. Tiga prioritas menonjol.

a. **Arsitektur Tata Kelola AI Iklim**: Meskipun belum ideal, ciptakan perjanjian yang mengikat untuk mengatur AI iklim, seperti Perjanjian Paris, yang berfokus pada permintaan proposal dengan standar yang mengikat untuk kesetaraan data dan akuntabilitas algoritma.
b. **Dekolonisasi Inovasi**: Berupaya mentransfer pendanaan dan ide kekayaan intelektual kepada para insinyur di Global Selatan untuk membangun solusi yang melayani banyak orang, bukan hanya segelintir orang.
c. **Pendidikan sebagai Pemberdayaan**: Mendorong program literasi AI untuk memberdayakan petani, perencana kota, dan warga negara lainnya untuk terlibat secara kritis dalam alat-alat algoritmik.

Sebuah AI iklim di California dirancang pada tahun 2023 untuk memprioritaskan lingkungan yang lebih kaya untuk evakuasi kebakaran hutan, tanpa sengaja mengabaikan taman rumah mobil yang dihuni oleh penduduk lanjut usia. Kesalahannya bukan terletak pada kode, tetapi pada data—sebuah pelajaran yang menyadarkan bahwa algoritma mencerminkan nilai-nilai penciptanya. Saat kita memprogram masa depan iklim, kita juga perlu memprogram belas kasih, keadilan, dan kerendahan hati dalam sistem kita. Meskipun AI tidak akan menyelamatkan planet ini, ia dapat membekali orang-orang yang akan melakukannya. Algoritma terbesar bukanlah pembelajaran mesin, tetapi pembelajaran kolektif, yang mengakui bahwa perjuangan untuk dunia yang layak huni adalah perjuangan yang perlu kita lakukan—dan menangkan—bersama-sama.

BAB 14
EVOLUSI STRATEGI BISNIS DEMI KETAHANAN IKLIM

14.1 AI SEBAGAI LANDASAN KETAHANAN BISNIS

Dalam konteks inilah—di mana perubahan iklim telah melampaui wacana lingkungan hidup dan menjadi isu bisnis inti—organisasi menghadapi ultimatum adaptasi: beradaptasi atau musnah. Semakin seringnya terjadi bencana iklim—mulai dari kebakaran yang melumpuhkan rantai pasok hingga banjir yang mengganggu perdagangan global—telah menempatkan dunia bisnis di bawah tekanan waktu. Darwinisme digital, dalam konteks ini, bukanlah sekadar metafora, melainkan prinsip "yang terkuatlah yang bertahan hidup" (*survival of the fittest*). Konsep ini mencerminkan gagasan bahwa di era Antroposen, hanya perusahaan yang mampu melakukan inovasi digital yang akan bertahan. Lebih jauh lagi, kecerdasan buatan (AI) diidentifikasi dalam bab ini sebagai landasan utama transisi tersebut; AI merupakan aset strategis yang memungkinkan perusahaan mengatasi volatilitas iklim sekaligus selaras secara alami dengan aspirasi pencapaian emisi nol bersih (*net-zero*) di masa mendatang.

Dengan memanfaatkan wawasan dari teori organisasi, ilmu iklim, dan studi empiris, kami mengkaji kembali bagaimana kemajuan yang didukung AI—dalam hal penilaian risiko, kelincahan rantai pasok, dan perencanaan skenario—sedang mengubah paradigma kelangsungan hidup perusahaan di era pemanasan global. Laporan Penilaian Keenam dari *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) menegaskan kenyataan yang mengkhawatirkan: pemanasan global yang melampaui 1,5°C akan terjadi dalam beberapa dekade mendatang, yang memicu dampak berantai di seluruh sektor ekonomi. Hal ini berarti dunia bisnis menghadapi risiko sistemik, seperti risiko fisik, regulasi, dan reputasi. Menurut *World Economic Forum*, ketidakmampuan untuk bertindak mengatasi perubahan iklim dapat merugikan ekonomi global hingga mencapai Rp405,34 kuadriliun pada tahun 2050. Namun, di balik krisis ini, terdapat sebuah peluang. Sudah menjadi pengetahuan umum bahwa transisi menuju ekonomi nol-bersih (*net-zero*) menuntut pendekatan transformatif, yang mendorong perusahaan untuk meninggalkan praktik-praktik lama dan membangun kapasitas adaptif. Di sinilah letak titik temu dengan teori organisasi dan urgensi situasi; sebagai contoh, teori kapabilitas dinamis menekankan pentingnya kelincahan dalam mengonfigurasi ulang sumber daya guna menghadapi ancaman eksistensial. Kini, perusahaan perlu memanfaatkan AI sebagai sarana sekaligus sistem saraf digital untuk mengantisipasi disrupsi dan mewujudkan inovasi.

Peran AI dalam Membangun Ketahanan Iklim

Kemampuan prediktif AI mengubah paradigma penilaian risiko iklim secara mendasar. Model-model tradisional, yang bersifat reaktif dan terisolasi (*silo*), tidak memadai dalam menangani dampak iklim yang bersifat non-linear. Sebaliknya, algoritma pembelajaran mesin

(*machine learning*) mengolah kumpulan data yang sangat besar—mulai dari citra satelit hingga tren sosial-ekonomi—untuk memprediksi risiko dengan tingkat presisi yang tinggi. Perusahaan asuransi menggunakan AI untuk menentukan harga berdasarkan kerentanan iklim secara *real-time*; perusahaan pertanian memanfaatkannya untuk mengantisipasi kegagalan panen. Selain pemetaan risiko, teknologi ini memungkinkan perancangan rantai pasok yang tangguh. Perhatikan bagaimana organisasi, termasuk IBM dan Microsoft, merekayasa ulang bisnis mereka dengan menggunakan AI untuk memodelkan gangguan, menyesuaikan logistik dan rantai pasok secara dinamis, serta mengubah strategi pengadaan. Ekosistem digital semacam itu mengurangi ketergantungan pada titik-titik yang rentan dan mengubah rantai pasok menjadi jaringan adaptif yang dinamis.

Perencanaan skenario berbasis AI melampaui model statis, memungkinkan perusahaan untuk melakukan uji ketahanan (*stress-test*) terhadap berbagai kemungkinan kondisi iklim di masa depan. Alat-alat seperti *generative adversarial networks* (GAN) mensimulasikan berbagai hal, mulai dari perubahan kebijakan hingga cuaca ekstrem, sehingga memungkinkan pengambil keputusan untuk menguji ketahanan jalur dekarbonisasi. Proses iteratif ini sejalan dengan teori "penghancuran kreatif" (*creative destruction*) dari Schumpeter, di mana gangguan memunculkan inovasi baru. Perusahaan energi besar seperti Shell, misalnya, menggunakan skenario AI untuk mengalihkan investasi dari bahan bakar fosil ke energi terbarukan, menjadikan fleksibilitas sebagai elemen sentral dalam perencanaan jangka panjang.

Sintesis Antardisiplin: Jalan Menuju *Net-Zero*

Bab ini menghubungkan peringatan keras dari ilmu iklim dengan pengembangan strategi bisnis praktis. Contoh dari perusahaan seperti Patagonia dan Tesla menunjukkan cara membangun ketahanan dengan mengintegrasikan AI ke dalam DNA perusahaan. Penilaian siklus hidup yang diperkuat AI oleh Patagonia meminimalkan limbah, sementara jaringan energi otonom Tesla menunjukkan bentuk adaptasi terdistribusi. Kisah-kisah ini mengisyaratkan perubahan besar: ketahanan iklim bukanlah pusat biaya, melainkan keunggulan kompetitif dalam ekonomi *net-zero*.

Sama seperti planet yang mendekati titik kritis (*tipping points*), dunia bisnis pun sedang menghadapi ambang batas Darwinian. Terlebih lagi, sebagai hasilnya, Darwinisme Digital yang didukung AI menyediakan cetak biru untuk bertahan hidup—yakni memandang diagnosis ancaman iklim sebagai momentum untuk mendorong model bisnis baru yang berlandaskan etos keberlanjutan. Bab ini menegaskan bahwa beradaptasi dengan perpaduan antara AI dan kelincahan organisasi bukanlah pilihan semata, melainkan hal yang menentukan kelangsungan hidup. Kelangsungan hidup bisnis maupun umat manusia menjadi taruhannya—perusahaan harus beradaptasi atau akan musnah dalam perlombaan menuju *net-zero*.

14.2 STRATEGI BISNIS YANG TANGGUH TERHADAP IKLIM

Konvergensi antara AI dan inisiatif ketahanan iklim mencerminkan pergeseran paradigma dalam respons dunia bisnis terhadap era Antroposen. Tinjauan ini mengintegrasikan literatur dari berbagai disiplin ilmu, dengan fokus pada tiga topik yang saling

berkaitan: penilaian risiko iklim yang diperkuat AI, desain rantai pasok yang tangguh, dan perencanaan skenario berbasis AI, yang semuanya berlandaskan pada teori organisasi dan ilmu iklim.

AI dan Penilaian Risiko Iklim

Berbekal kumpulan data yang masif, AI telah mengubah penilaian risiko iklim dari analisis historis yang statis menjadi pemodelan prediktif yang dinamis. Sebagai contoh, model risiko tradisional sering kali luput menangkap fakta bahwa dampak iklim yang bersifat akumulatif—seperti kegagalan rantai pasok yang merembet (*cascading*) atau mekanisme umpan balik non-linear terkait suhu—tidak dapat dipetakan secara presisi ke dalam analisis risiko kuantitatif konvensional. Kesenjangan ini diatasi dengan mengintegrasikan data geospasial, proyeksi iklim, dan faktor sosial-ekonomi melalui teknologi AI. Sebagai contoh, algoritma *machine learning* (ML) kini dapat memprediksi kondisi iklim ekstrem regional secara andal, sehingga membantu perusahaan mengantisipasi gangguan di masa depan. Camps-Valls menerbitkan artikel mengenai model ML yang mampu mengurangi kesalahan prediksi sebesar 40% untuk wilayah yang paling rentan terhadap banjir, yang memungkinkan perusahaan asuransi dan manufaktur untuk melindungi aset mereka. Platform berbasis AI mensimulasikan dampak iklim lokal; perusahaan dapat menguji ketahanan investasi infrastruktur dalam menghadapi kondisi sulit. Namun, para kritikus memperingatkan bahwa ketergantungan berlebihan pada AI—tanpa adanya pengawasan dan retensi pengetahuan yang memadai oleh manusia—dapat menyebabkan penentuan prioritas risiko yang tidak tepat akibat potensi bias dalam data pelatihan.

Desain Rantai Pasok yang Tangguh

Kebutuhan mendesak akan ketahanan rantai pasok muncul seiring terungkapnya kelemahan dalam jaringan global akibat gangguan iklim. Menurut Ivanov, AI menciptakan "kembaran digital" (*digital twins*) atau replika virtual dari rantai pasok, yang memfasilitasi simulasi gangguan dalam sistem linear serta optimalisasi respons. Data tahun 2020 yang dikumpulkan selama pandemi COVID-19 menunjukkan bahwa permintaan terhadap platform logistik berbasis AI meningkat sebesar 30% dibandingkan dengan perusahaan yang tidak mengadopsi platform tersebut, meskipun terjadi penutupan pelabuhan besar-besaran. Sebagai contoh, hasil ekonomi sirkular dapat didukung melalui pelacakan aliran material berbasis AI dan prediksi titik-titik penghasil limbah potensial. Akan tetapi, ketahanan lebih dari sekadar teknologi; hal ini berkaitan dengan kemampuan adaptasi organisasi. Pandangan ini sejalan dengan teori kapabilitas dinamis dari Teece, yang menyatakan bahwa perusahaan harus mampu "mendeteksi, menangkap peluang, dan mengonfigurasi ulang" sumber daya untuk menghadapi guncangan. Contoh hal ini dapat ditemukan dalam studi kasus mengenai pusat rantai pasok berbasis AI milik IBM, yang menunjukkan bagaimana data *real-time* dari sensor IoT berpotensi mengurangi jejak karbon tanpa mengorbankan keuntungan. Meski demikian, pendekatan ini memiliki keterbatasan terkait usaha kecil dan menengah (UKM) yang tidak memiliki sarana memadai untuk mengadopsi teknologi AI.

Perencanaan Skenario Berbasis AI

Perencanaan skenario, sebuah proses kualitatif, memanfaatkan AI untuk memodelkan berbagai kemungkinan masa depan terkait iklim yang kompleks. Berkat teknologi *generative adversarial networks* (GAN) dan *reinforcement learning*, perusahaan dapat menyimulasikan ribuan skenario, mulai dari kenaikan pajak karbon hingga kelangkaan sumber daya. Sebagai contoh, skenario "Sky 2050" milik Shell yang didukung AI mengukur risiko aset yang terdampar (*stranded assets*) di sektor bahan bakar fosil, yang turut memberikan wawasan bagi langkah perusahaan beralih ke energi terbarukan. Perangkat semacam itu mencerminkan konsep "penghancuran kreatif" (*creative destruction*) ala Schumpeter, di mana krisis iklim memicu lahirnya inovasi. Namun, sebagian pihak mempertanyakan sifat "kotak hitam" (*black-box*) pada AI. Kurangnya transparansi berisiko menyesatkan para eksekutif—seperti yang terjadi pada komitmen *net-zero* yang tidak selaras dan menuai kritik dari inisiatif *Science-Based Targets*. Kerangka kerja terkini seperti *explainable AI* (XAI)—yang menyoroti alur pengambilan keputusan oleh model *machine learning*—kini menjembatani kesenjangan tersebut dengan menjadikan strategi iklim lebih adaptif dan akuntabel.

Sintesis Lintas Disiplin dan Identifikasi Kesenjangan

Literatur menekankan pentingnya AI dalam ketahanan iklim namun mengidentifikasi adanya kesenjangan antardisiplin. Sains iklim mengukur risiko fisik, namun teori organisasi belum memiliki kerangka kerja untuk integrasi AI. Meskipun bukti menunjukkan bahwa organisasi hierarkis kalah unggul dalam hal inovasi, masih sedikit perhatian yang diberikan pada bagaimana struktur tata kelola perusahaan turut membatasi adopsi AI. Selain itu, isu-isu etis—seperti hilangnya pekerjaan akibat AI di wilayah yang kurang beruntung—masih relatif belum banyak diteliti.

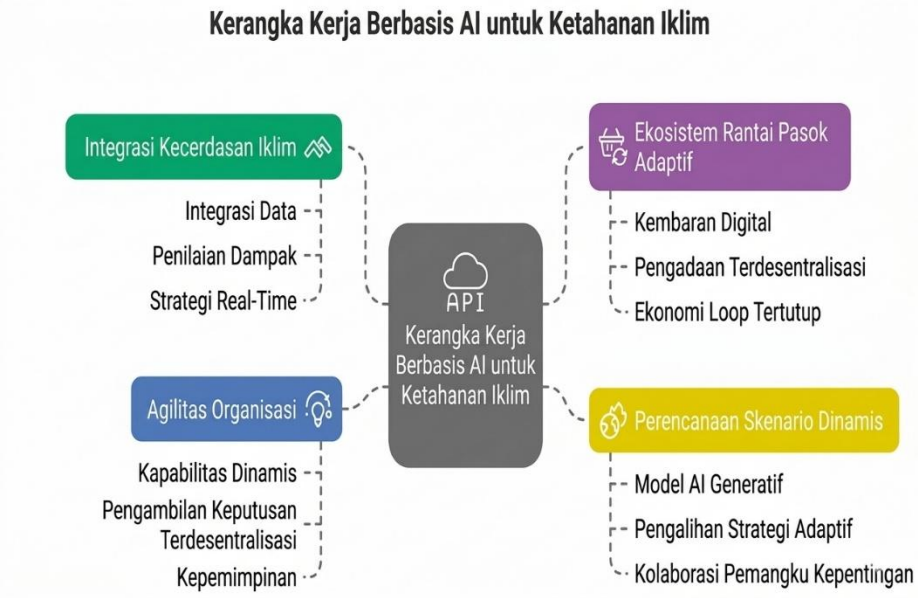
Potensi AI sebagai katalisator ketahanan iklim telah didukung oleh bukti yang kuat, namun keberhasilannya bergantung pada kolaborasi lintas disiplin, tata kelola yang etis, dan akses yang adil. Pengumpulan dan penyebaran data: Berbagai inisiatif mendorong diskusi aktif yang melibatkan beragam jenis bisnis, fasilitas penelitian dan pengembangan, universitas, aplikasi (yaitu teknologi), serta sektor pemerintah di Australia; diskusi ini memfasilitasi transfer pengetahuan melalui program penjangkauan masyarakat dan program global yang menjadi landasan bagi penelitian berkelanjutan. Dunia industri tidak hanya berfokus pada pengembangan dengan jejak karbon rendah dari perspektif teknis, tetapi juga menekankan pentingnya aspek energi dan jejak karbon di era baru ini. Bisnis perlu meningkatkan skala program pengurangan karbon mereka, menghadapi konsekuensi dari regulasi mandiri, dan bertanggung jawab atas dampak yang ditimbulkan.

Semua upaya ini didukung oleh infrastruktur teknologi yang tangguh, yang memungkinkan bisnis komersial dengan basis pelanggan kecil untuk memberikan kontribusi berarti sembari memfokuskan pemanfaatan penelitian dan pengembangan pada tujuan strategis yang penting. Penelitian harus menentukan langkah terbaik untuk membangun sistem yang memungkinkan usaha kecil mengukur jejak karbon mereka secara tepat, berkontribusi pada transisi *net-zero* yang krusial dengan cara yang hemat biaya, mempertimbangkan transparansi algoritmik dalam penyediaan sarana tersebut bagi usaha

kecil, serta menangani penerapan kecerdasan buatan dalam pengembangan transisi *net-zero* bagi usaha-usaha tersebut.

14.3 KERANGKA KERJA KETAHANAN DARWINISME DIGITAL

Dalam transisi menuju ekonomi *net-zero*, bisnis harus mengadopsi kerangka kerja yang didorong oleh nilai-nilai ideal dan didukung oleh AI untuk menghadapi risiko iklim serta memaksimalkan peluang adaptif. Dengan mengintegrasikan teori organisasi, sains iklim, dan inovasi teknologi, kerangka kerja ini menyajikan langkah-langkah konkret untuk menjadikan ketahanan iklim sebagai DNA baru bagi bisnis. Kerangka kerja ini terdiri dari empat pilar yang saling terhubung: Integrasi Kecerdasan Iklim, Ekosistem Rantai Pasok Adaptif, Perencanaan Skenario Dinamis, dan Agilitas Organisasi (Gambar13.2). Keempat pilar tersebut dilengkapi dengan perangkat praktis dan model tata kelola yang memungkinkan perusahaan mengoperasionalkan Darwinisme Digital.



Gambar 13.2 Kerangka kerja berbasis AI untuk ketahanan iklim

Langkah 1: Penyedia Data Unggulan: Integrasi Kecerdasan Iklim

Tujuan: Mengubah data iklim mentah menjadi wawasan yang dapat ditindaklanjuti untuk memitigasi risiko.

Komponen:

a) Data dari sumber-sumber di atas dapat diintegrasikan dengan Pemetaan Risiko berbasis AI. Model *machine learning* (ML) dilatih menggunakan data satelit (*Earth Observing System* milik NASA), sensor IoT, dan basis data sosial-ekonomi. Salah satu contohnya adalah Inisiatif Prakiraan Banjir (*Flood Forecasting Initiative*) dari Google, yang menggunakan ML untuk memprediksi banjir sehingga perusahaan seperti Unilever dapat menyesuaikan logistik mereka secara proaktif.

b) **Peran AI dalam Penilaian Dampak dan Penilaian Materialitas**: Memprioritaskan Risiko. Solusi seperti *Net Zero Cloud* dari Salesforce mengotomatisasi proses ini dengan menghubungkan risiko terhadap tujuan ESG.

c) **Strategi Adaptif *Real-Time***: Mengadopsi dasbor berbasis AI (*Environmental Intelligence Suite*) untuk memantau emisi, perubahan regulasi, dan sentimen pemangku kepentingan secara berkelanjutan serta meresponsnya secara *real-time*.

Tata Kelola: Gugus tugas iklim lintas fungsi untuk memvalidasi keluaran AI dan memitigasi bias algoritmik.

Langkah 2: Masa Depan Rantai Pasok: Ekosistem Rantai Pasok Adaptif

Tujuan: Mengubah rantai pasok linear menjadi jaringan yang mampu memulihkan diri (*self-healing*).

Komponen:

a) **Kembaran Digital (*Digital Twins*)**: Membuat kembaran digital rantai pasok menggunakan platform seperti MindSphere dari Siemens. Saat terjadi penyumbatan Terusan Suez pada tahun 2021, Maersk menggunakan kembaran digital untuk mencari rute alternatif dan mengurangi keterlambatan sebesar 25%.

b) **AI untuk Pengadaan Terdesentralisasi**: Menggunakan AI untuk menemukan pemasok regional, sehingga memungkinkan diversifikasi sumber pasokan. Sebagai contoh, platform berbasis AI yang dikembangkan Nestlé melakukan pengadaan kakao dari perkebunan yang tahan terhadap perubahan iklim di Afrika Barat, sehingga mengurangi ketergantungan pada wilayah yang terdampak kekeringan.

c) **Ekonomi Siklus Tertutup (*Closed-Loop Economy*)**: Menggunakan AI bersama teknologi *blockchain* (misalnya, IBM Food Trust) untuk melacak material mulai dari tahap ekstraksi hingga daur ulang, guna mengurangi limbah. Melalui program Worn Wear yang didukung AI, Patagonia berhasil memperpanjang siklus hidup produk sebesar 40%.

Tata Kelola: Menerapkan kebijakan pengadaan yang tangkas (*agile*) dan memberikan penghargaan kepada pemasok yang menerapkan transparansi serta model bisnis rendah karbon.

Langkah 3: Perencanaan Skenario Dinamis

Tujuan: Menguji strategi dengan berbagai kemungkinan kondisi iklim di masa depan.

Komponen:

a) **Model AI Generatif**: Menggunakan alat seperti GPT-4 dari OpenAI atau *Climate Bert* untuk memodelkan berbagai skenario, misalnya kenaikan pajak karbon atau inovasi energi terbarukan. AI menjadi dasar bagi keputusan Shell untuk mengalokasikan dana tahunan sebesar Rp105,7 triliun bagi energi terbarukan, khususnya berdasarkan hasil keluaran model "Sky 2050" perusahaan tersebut.

b) **Penyesuaian Strategi Adaptif**: Mengintegrasikan model pembelajaran penguatan (*reinforcement learning*) ke dalam proses pengambilan keputusan. Sebagai contoh, NextEra Energy memanfaatkan AI untuk melakukan penyesuaian menit demi menit terhadap investasi ladang angin mereka berdasarkan data cuaca.

c) **Platform Kolaborasi Pemangku Kepentingan**: Menggunakan platform yang diperkuat AI, seperti Planetary Computer dari Microsoft, untuk merumuskan strategi bersama pemerintah dan LSM, guna memastikan keselarasan dengan regulasi.

Tata Kelola: Menggunakan kerangka kerja AI yang dapat dijelaskan (*Explainable* AI atau XAI) untuk mengaudit hasil skenario dan menjamin transparansi terkait komitmen *net-zero* (nol bersih emisi).

Langkah 4: Agilitas Organisasi

Tujuan: Membina dan menciptakan budaya inovasi serta ketangguhan.

Komponen:

(a) Kapabilitas Dinamis: Selaras dengan kerangka kerja Teece, latih karyawan untuk "mendeteksi" risiko iklim (misalnya, melalui program literasi AI), "memanfaatkan" peluang (misalnya, litbang produk ramah lingkungan), dan "mengonfigurasi ulang" sumber daya (misalnya, mengalihkan modal dari bahan bakar fosil ke teknologi penangkapan karbon).

(b) Desentralisasi Pengambilan Keputusan: Manfaatkan perangkat AI seperti Einstein dari Salesforce agar tim garda depan dapat mengambil keputusan berbasis data tanpa terhambat oleh hambatan hierarki. Salah satu contohnya adalah tindakan tangkas Tesla dalam mengatasi kelangkaan baterai di tengah lonjakan permintaan litium pada tahun 2022.

(c) Pemimpin: Untuk memastikan akuntabilitas, setiap organisasi harus menunjuk *Chief Climate Officer* (CCO)—yaitu pihak yang bertanggung jawab atas integrasi AI—sebuah praktik yang telah diterapkan oleh Microsoft dan Apple.

(d) Tata Kelola: Selaraskan kompensasi eksekutif dengan KPI iklim yang diverifikasi melalui audit berbasis AI.

Peta Jalan Implementasi

(a) Menilai Tingkat Kematangan Awal (*Baseline*): Terapkan model kematangan AI (misalnya, *Climate Resilience Index* dari Capgemini) untuk menilai kapabilitas jangka pendek.

(b) Uji Coba Solusi AI: Mulailah dari skala kecil di area yang berdampak besar (misalnya, DeepMind milik Google berhasil menghemat 40% biaya pendinginan pusat data).

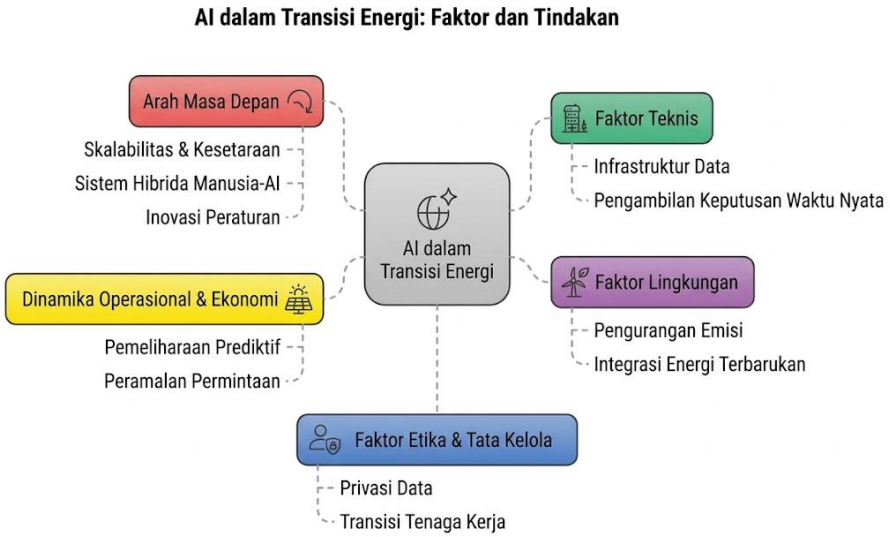
(c) Peningkatan Skala dengan Tata Kelola: Integrasikan AI ke dalam tata kelola perusahaan melalui komite risiko iklim dan piagam etika AI.

(d) Iterasi dan Kolaborasi: Bekerja sama dengan akademisi (misalnya, *Climate Grand Challenges* dari MIT) untuk menyempurnakan model dan praktik terbaik.

Peran Evolusi yang Berkelanjutan

Kerangka kerja ini bukanlah sekadar daftar periksa, melainkan sebuah siklus pembelajaran dan evolusi. Mengintegrasikan kecerdasan iklim, membangun ekosistem yang adaptif, memungkinkan perencanaan yang fleksibel, serta mengembangkan kapasitas yang tangkas akan membantu bisnis berkembang di era *net-zero*. Prinsip Darwiniannya jelas: beradaptasi dengan AI atau punah. Perusahaan yang menerapkan kerangka kerja ini akan

mampu bertahan menghadapi gangguan iklim dan mendorong transisi menuju ekonomi yang tangguh dan berkeadilan. Gambar 14.2 menampilkan kerangka kerja ketahanan iklim yang didukung oleh AI.



Gambar 14.2 AI dalam transisi energi dengan faktor-faktor penyeimbang
(Sumber: Konsep penulis)

14.4 TRANSFORMASI KERANGKA TEORETIS DAN TATA KELOLA AI DALAM AKSI IKLIM

Mengintegrasikan kecerdasan buatan (AI) ke dalam strategi ketahanan iklim memiliki implikasi teoretis, praktis, sosial, dan keberlanjutan yang signifikan. Implikasi-implikasi ini menantang paradigma interaksi bisnis, masyarakat, dan ekosistem yang ada saat ini di era Antroposen, serta menghadirkan peluang transformatif sekaligus dilema etis.

Transformasi Teoretis AI dalam Aksi Iklim

AI membuat teori *resource-based view* (RBV) dan teori kapabilitas dinamis menjadi kurang relevan, karena teori-teori tersebut berfokus pada sumber daya berwujud dan penyesuaian bertahap. AI menghadirkan paradigma baru berupa kelincahan algoritmik yang memungkinkan restrukturisasi cepat atas sumber daya digital maupun fisik untuk merespons guncangan iklim. Sebagai contoh, analitik prediktif berbasis AI memungkinkan perusahaan untuk "mendeteksi dini" risiko sebelum risiko tersebut benar-benar terjadi, sehingga mengubah fokus teori tradisional yang semula hanya pada tahap "deteksi" (saat risiko sudah muncul).

Peran AI dalam Sains Iklim: AI menghubungkan model iklim yang mendetail (misalnya, skenario IPCC) dengan keputusan bisnis. Hal ini menonjolkan relevansi teori sistem adaptif kompleks, mengingat bisnis kini semakin dipandang sebagai simpul dalam jaringan sosio-ekologis yang saling terhubung. Pendekatan semacam itu menuntut perancangan bersama lintas disiplin; contoh terbaiknya adalah alat seperti *Climate BERT*, yang menerjemahkan jargon ilmiah menjadi informasi bisnis yang dapat ditindaklanjuti. Kesenjangan Tata Kelola Etis: Kerangka kerja teoretis untuk etika AI belum mampu mengatasi dilema spesifik terkait iklim,

seperti kecenderungan memprioritaskan investasi AI di wilayah kaya yang justru merugikan wilayah rentan. Kondisi ini mendorong perlunya teori yang mengaitkan keadilan iklim dengan tata kelola teknologi.

Tantangan Penerapan AI di Industri

Efisiensi Operasional vs. Kompleksitas: Meskipun AI meningkatkan kinerja rantai pasok dan efisiensi konsumsi energi (seperti keberhasilan Google menurunkan biaya pendinginan hingga 40% berkat *DeepMind*), penerapannya membutuhkan keahlian tinggi serta kapabilitas infrastruktur teknis dan data yang mumpuni. Usaha Kecil dan Menengah (UKM) umumnya memiliki sumber daya terbatas, sehingga memunculkan potensi adanya "kesenjangan ketahanan" (*resilience divide*).

Transparansi dalam Pengambilan Keputusan yang Mendetail: Alat *digital twin* berbasis AI memperkuat perencanaan skenario namun sering kali beroperasi sebagai "kotak hitam" (*black box*). Sebagai contoh, model AI yang digunakan Shell untuk mengelola transisi energi terbarukan tidak dapat dijelaskan secara terbuka, sehingga menimbulkan kekhawatiran terkait akuntabilitas. Algoritma eksklusif (*proprietary*) vs. kepercayaan pemangku kepentingan: bagaimana perusahaan dapat menyeimbangkan keduanya.

Pergeseran tenaga kerja: AI menjalankan fungsi di industri padat karbon (seperti logistik transportasi bahan bakar fosil), yang menuntut adanya pelatihan ulang. Penerapan AI kini dibarengi dengan pelatihan untuk pekerjaan ramah lingkungan (*green jobs*) dari perusahaan seperti Siemens, yang membagikan pengalaman mereka sejalan dengan prinsip transisi yang adil (*just transition*).

Kesetaraan dan Etika dalam Penerapan AI

- **Kesetaraan dan Akses:** Manfaat AI tidak terdistribusi secara merata. Sebagai contoh, platform risiko iklim seperti ClimateAI terlalu mahal bagi petani di wilayah sub-Sahara Afrika, sehingga memperparah ketimpangan global. Sebaliknya, *AgriStack* di India—yang berbasis AI—memberikan akses informasi prakiraan monsun bagi petani kecil dan menunjukkan potensi inklusivitas.
- **Kemandirian komunitas lokal:** AI dapat mengikis pengetahuan lokal jika menggunakan pendekatan *top-down* (dari atas ke bawah). Kerangka kerja partisipatif—termasuk sistem respons kekeringan berbasis AI yang dirancang bersama para penggembala ternak di Kenya—menunjukkan bagaimana masyarakat dapat menciptakan alat yang mencerminkan konteks budaya mereka.
- **Risiko Etis:** Bias dalam data pelatihan dapat lebih mengutamakan keuntungan perusahaan dibandingkan kesejahteraan manusia. Pada tahun 2021, sebuah model yang digunakan oleh perusahaan perdagangan energi berbasis AI—pemasok bagi perusahaan utilitas Eropa—menyebabkan kenaikan harga energi yang tidak proporsional bagi rumah tangga berpenghasilan rendah saat terjadi gelombang panas, yang memicu reaksi keras publik.

AI dan Keberlanjutan Jangka Panjang

- **Percepatan *Net-Zero*:** AI mempercepat dekarbonisasi dengan mengoptimalkan jaringan energi terbarukan (seperti ladang angin *NextEra Energy*) dan sistem sirkular

(seperti penggunaan *blockchain* IBM untuk daur ulang plastik). Namun, jejak karbon AI—di mana pelatihan satu model saja dapat menghasilkan 284 ton CO_2—menuntut adanya inovasi "AI hijau" (*green AI*), seperti algoritma yang hemat energi.

- **Kepedulian Ekologis Jangka Panjang:** Karena intervensi AI cenderung berfokus pada pengurangan risiko dalam jangka pendek, dampaknya bisa mengabaikan kesehatan ekosistem. Sebagai contoh, sistem peringatan deforestasi berbasis AI di Amazon lebih terkait dengan jaringan rantai pasok kayu daripada isu hilangnya keanekaragaman hayati. Batasan planet (*planetary boundaries*) harus menjadi bagian dari prinsip desain AI yang berkelanjutan.
- **Kesetaraan Antargenerasi:** Solusi iklim berbasis AI, seperti prakiraan penangkapan karbon, tidak boleh mengorbankan kepentingan generasi mendatang (misalnya, ketergantungan algoritmik pada teknologi yang belum teruji). *AI Act* tahun 2023 mewajibkan penilaian dampak keberlanjutan sebagai standar baku, yang mencerminkan standar inovasi yang bertanggung jawab. Ketahanan iklim yang didukung AI tidak bisa bersifat seragam positif ataupun statis. Secara teoretis, hal ini menuntut paradigma baru yang memadukan kelincahan dalam menghadapi perubahan teknologi dan ekonomi dengan pengelolaan sistem ekologis yang tangguh. Diperlukan akses yang adil dan transparansi agar hal ini tidak justru memperparah ketimpangan dalam praktiknya. Secara sosial, pendekatannya bergantung pada desain inklusif dan tata kelola etis demi melindungi martabat manusia. Dari sisi keberlanjutan, harus ada keseimbangan antara keuntungan jangka pendek dan kesejahteraan planet dalam jangka panjang.
- **Teoretis:** Menyusun kerangka kerja hibrida (misalnya, *Climate-Centric Dynamic Capabilities* atau Kapabilitas Dinamis Berpusat pada Iklim) terkait peran AI dalam konteks keadilan iklim. Mempercepat adopsi perangkat AI bagi usaha kecil dan menengah (UKM) serta menetapkan *explainable AI* (XAI)—AI yang dapat dijelaskan cara kerjanya—sebagai standar wajib dalam pelaporan iklim perusahaan.
- **Sosial:** Membangun kemitraan aktif dengan komunitas yang terpinggirkan untuk bersama-sama merancang dan menerapkan respons berbasis AI, serta mewajibkan audit terhadap bias dalam algoritma iklim.
- **Keberlanjutan:** Tidak menerapkan AI tanpa berinvestasi pada energi terbarukan dan mengadopsi standar lain, seperti ISO 14090, yang mengatur ketahanan iklim.

Pemisahan antara efisiensi dan keadilan (inovasi dan etika, kelangsungan hidup dan keberlanjutan) memengaruhi tindakan yang diambil di tengah Krisis Iklim. Dunia usaha, pembuat kebijakan, dan masyarakat sipil harus berkolaborasi untuk memastikan bahwa AI menjadi kekuatan pendorong ketahanan iklim yang inklusif, bukan yang meminggirkan pihak tertentu. Organisasi yang berkomitmen mewujudkan planet yang berkelanjutan dan adil bagi generasi mendatanglah yang akan meraih keberhasilan—lebih dari sekadar mengandalkan kemampuan teknologi—di saat Darwinisme Digital mengguncang fondasi praktik korporasi.

14.5 AI SEBAGAI PENGGERAK EVOLUSI BISNIS

Krisis iklim bukanlah sekadar momok yang jauh di mata, melainkan realitas objektif yang terus meluas dan mengguncang fondasi perdagangan global. Seiring meningkatnya suhu, menguatnya tekanan regulasi, dan bergesernya ekspektasi sosial, dunia bisnis menghadapi tantangan ala Darwin: berinovasi untuk berevolusi, atau punah. Bab ini telah mencoba menguraikan konsep *Digital Darwinism*—perpaduan antara kecerdasan buatan (AI) dan ketangkasan organisasi—sebagai sudut pandang untuk bertahan hidup di era kenormalan baru. Dengan mengandalkan kombinasi data penelitian yang belum pernah ada sebelumnya—yang mencakup sains iklim, teori organisasi, dan bidang inovasi teknologi yang terus berkembang—kami memperoleh wawasan tentang bagaimana strategi berbasis AI dalam penilaian risiko, ketahanan rantai pasok, dan perencanaan skenario sedang mengubah pedoman kelangsungan hidup perusahaan. Evolusi ini tidak akan sederhana ataupun seragam bagi setiap industri, namun satu hal yang pasti: bisnis harus berubah, dan AI akan menjadi kekuatan pendorong di balik perubahan tersebut.

Rekapitulasi Imperatif Evolusioner

Pendekatan konvensional terhadap manajemen risiko, yang didasarkan pada data masa lalu dan proyeksi linear, terbukti tidak memadai dalam menghadapi realitas volatilitas iklim. Di sinilah peran AI menjadi krusial; kemampuannya untuk menganalisis kumpulan data besar tanpa aturan baku dan memprediksi masa depan yang bersifat non-linear merupakan sebuah terobosan revolusioner. Studi kasus dunia nyata secara apik menggambarkan potensi revolusioner ini—mulai dari sistem AI pendeteksi tsunami yang membantu melindungi rantai pasok Google, hingga peningkatan kemampuan AI dalam penentuan jalur (*path-finding*) yang memungkinkan terwujudnya skenario transisi hijau bagi *Shell*. Alat-alat ini tidak hanya membantu mengelola risiko, tetapi juga menciptakan peluang. Penilaian siklus hidup produk yang dipercepat oleh AI di Patagonia serta jaringan energi otonom Tesla menunjukkan bagaimana ketahanan iklim dapat menjadi keunggulan (kompetitif) di pasar. Namun, persoalannya bukan sekadar teknologi, melainkan budaya. Organisasi justru perlu membangun kapabilitas dinamis melalui budaya yang mengedepankan ketangkasan, eksperimentasi, dan kolaborasi lintas disiplin.

AI menawarkan fleksibilitas tanpa batas, namun penerapannya juga memunculkan kekhawatiran terkait etika dan dampak nyata di lapangan. Secara teoretis, AI menantang paradigma yang valid namun statis—seperti *Resource-Based View* (pandangan berbasis sumber daya)—dan mendorong perusahaan untuk mengalihkan fokus dari sekadar kepemilikan aset tetap menuju ketangkasan algoritmik yang dinamis.

Di sisi lain, AI juga berpotensi memperlebar kesenjangan, mengingat UKM dan komunitas marginal sering kali tidak memiliki akses terhadap perangkat AI mutakhir. Bias dan kurangnya transparansi (opasitas) pada AI juga membahayakan masyarakat dalam ranah sosial; keuntungan sering kali didahulukan daripada kesejahteraan manusia, sebagaimana terlihat pada algoritma penetapan harga energi yang justru merugikan rumah tangga kurang mampu.

Dari sisi keberlanjutan, jejak karbon AI—misalnya, emisi dalam jumlah sangat besar yang dihasilkan saat melatih model berskala besar—menuntut adanya komitmen terhadap inovasi "AI hijau" (*green AI*). Tantangan-tantangan ini bukanlah hal yang mustahil diatasi, namun tidak memiliki solusi instan dan memerlukan tata kelola yang terarah. *Explainable AI* (XAI), desain partisipatif, dan kerangka regulasi seperti *EU AI Act* dapat memberikan arah untuk memastikan inovasi berkembang ke arah yang berkeadilan.

Pengakuan Sistematis atas Pentingnya Tindakan Terencana

Beralih menuju ekonomi nol-bersih (*net-zero*) bukanlah upaya yang dapat dilakukan sendiri, melainkan sebuah keharusan bersama. Tiga kelompok berikut memikul tanggung jawab terbesar:

(a) Para Pemimpin Bisnis: Saatnya menghentikan komitmen ESG yang sekadar formalitas dan mengintegrasikan panduan strategis iklim berbasis AI ke dalam inti operasional industri. Contohnya meliputi peningkatan literasi, desentralisasi pengambilan keputusan, dan mengaitkan kompensasi eksekutif dengan KPI iklim.

(b) Pembuat Kebijakan: Menyediakan subsidi bagi usaha kecil dan menengah (UKM). Meninjau kembali kebijakan penetapan harga karbon. Mewajibkan transparansi algoritmik dalam pelaporan terkait iklim. Upaya luar biasa—seperti respons Kenya terhadap kekeringan yang mengandalkan AI dan dirancang melalui konsultasi dengan masyarakat setempat—memberikan acuan bagi tata kelola yang inklusif.

(c) Masyarakat Sipil: Menuntut pertanggungjawaban perusahaan dan memperjuangkan keadilan iklim; memastikan manfaat AI dirasakan oleh banyak orang, bukan segelintir pihak saja. Gerakan seperti *Climate Justice Alliance* menyoroti pentingnya menempatkan masyarakat yang berada di garis depan dampak perubahan iklim sebagai pusat dari solusi teknologi.

Cakrawala Masa Depan dan Adaptasi Berkelanjutan

Ambang batas Darwinian bukanlah garis finish, melainkan gerbang penemuan kembali. Bayangkan masa depan akses energi yang didemokratisasi oleh jaringan mikro yang didukung AI, rantai pasokan sirkular yang menghilangkan limbah, dan model prediktif yang mempersiapkan petani menghadapi ancaman iklim seperti kekeringan. Visi itu mungkin, tetapi berdasarkan tiga prinsip:

- **Integrasi interdisipliner:** Menghubungkan Ilmuwan Iklim, Insinyur AI, dan Ahli Strategi Bisnis. Hal ini diwujudkan dalam alat-alat seperti *Planetary Computer* milik *Microsoft*, yang mengintegrasikan data lingkungan dan pembelajaran mesin.
- **Bertindak dengan pandangan strategis ke depan:** Prioritaskan kesehatan planet daripada keuntungan jangka pendek. Ini berarti membangun sistem AI yang menghormati batas-batas planet dan keadilan antar generasi, seperti yang diuraikan dalam rubrik "ruang operasi yang aman".
- **Fokus pada Adaptabilitas:** Bangun budaya kerja yang fleksibel yang dapat mengubah ketidakpastian menjadi lahan subur bagi inovasi. Namun ada perusahaan yang berhasil melakukan perubahan radikal: misalnya, Ørsted, yang bertransformasi dari perusahaan minyak besar menjadi juara energi terbarukan. Tidak ada pemenang dan

pecundang dalam perlombaan melawan keruntuhan iklim, hanya kolaborator atau korban. Darwinisme digital bukanlah "bertahan hidup yang terkuat" tetapi berkembangnya fleksibilitas. Jika dipandu dengan bijak, AI dapat mendemokratisasi ketahanan, mengubah risiko iklim menjadi prospek kemakmuran bersama. Namun, teknologi saja tidak akan membantu. Cara iteratif untuk mengukur keberhasilan terletak di antara perpaduan inovasi dengan empati, efisiensi dengan kesetaraan, dan bertahan hidup dengan keberlanjutan.

Baik melalui perangkat baru atau yang sudah ada di pasaran (dan di dalam tubuh kita), tarian adaptasi berlanjut dalam bab ini, dan, sayangnya, kita dihadapkan pada ultimatum yang sama seperti di awal: beradaptasi atau binasa. Alat adaptasi sudah tersedia; urgensinya tinggi. Bisnis yang menjawab seruan ini tidak hanya akan mendapatkan pijakan dalam ekonomi nol emisi, tetapi juga akan meninggalkan warisan berupa kepedulian terhadap planet. Pertanyaannya bukanlah apakah harus berevolusi, tetapi bagaimana caranya. Dengan melakukan hal itu, kita dapat membayangkan kembali kemajuan—bukan sebagai penaklukan alam, tetapi sebagai penyelarasan penemuan manusia dengan keseimbangan bumi yang rapuh.

BAB 15
AI DALAM KOLABORASI IKLIM DAN PERJANJIAN GLOBAL

15.1 PERAN AI MENGHADAPI KRISIS IKLIM

Krisis iklim global, yang merupakan perubahan sistemik berskala historis, merupakan salah satu tantangan paling signifikan yang dihadapi dunia dengan skala dampak yang terus meningkat. Saat berbagai negara berupaya memenuhi target dalam perjanjian internasional (misalnya, Kesepakatan Paris), keterbatasan paradigma ekonomi konvensional dalam tata kelola iklim dan industri menjadi semakin nyata.

Di sinilah faktor teknologi lain berperan, yaitu AI; dengan kemampuannya dalam memproses data, memprediksi hasil, dan meningkatkan pengambilan keputusan, AI membawa perubahan besar (disrupsi) pada industri, rantai pasok, dan upaya global dalam memerangi perubahan iklim. Bab ini menelaah bagaimana AI membantu misi keberlanjutan dengan memungkinkan kita mengoptimalkan tindakan dan cara kerja kita, serta mengkaji bagaimana AI mengubah secara radikal cara kita bekerja sama di tingkat internasional dalam menangani masalah perubahan iklim.

Kapasitas AI yang tak tertandingi dalam memantau dan mengevaluasi emisi global menjadi inti dari transformasi ini. Saat ini, pasar dibanjiri oleh platform berbasis AI yang mengolah konteks dari citra satelit, sensor IoT, dan aliran data waktu nyata untuk menggantikan metode penghitungan jejak karbon yang ada saat ini—yang cenderung terfragmentasi, menggunakan sistem lama, dan bersifat manual. Alat-alat ini menghasilkan informasi yang sangat rinci mengenai sumber emisi: mulai dari pabrik industri hingga titik-titik panas deforestasi, sehingga memungkinkan perusahaan dan pemerintah untuk mengidentifikasi inefisiensi dan menegakkan akuntabilitas.

Kemampuan khusus semacam itu dikembangkan untuk melakukan pemantauan (misalnya, mengidentifikasi kebocoran metana dalam rantai pasok minyak dan gas atau di sektor manufaktur) serta menyusun prediksi pola emisi guna mendukung upaya pengurangan emisi. Harmonisasi peraturan sektoral dengan perjanjian internasional serta persyaratan transparansi dalam rezim iklim global sangatlah penting agar fungsi-fungsi ini dapat berjalan efektif.

Selain pemantauan, AI membantu meningkatkan presisi pemodelan iklim, yang sangat penting untuk merancang kebijakan yang optimal. Meskipun model tradisional bermanfaat, model-model tersebut gagal menangkap hubungan dinamis yang muncul saat faktor ekologis, ekonomi, dan sosial saling berinteraksi. Algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*), yang dilatih menggunakan data iklim dan aktivitas manusia selama beberapa dekade, mampu menyimulasikan berbagai skenario dengan akurasi yang belum pernah dicapai sebelumnya—mulai dari dampak peralihan ke energi terbarukan hingga efek berantai cuaca ekstrem terhadap rantai pasok. Model-model semacam itu membekali para pembuat kebijakan dengan sarana untuk mendasarkan alokasi sumber daya, memprioritaskan pelaksanaan, dan menilai risiko dalam inisiatif multinasional. Prakiraan berbasis AI berpotensi menjadi acuan dalam

penyaluran modal untuk infrastruktur tangguh di wilayah-wilayah yang rentan, bahkan menentukan tahapan optimal pembangunan jaringan energi bersih lintas batas guna memaksimalkan dampak pendanaan iklim.

Akan tetapi, nasib kesepakatan iklim internasional lebih bergantung pada diplomasi daripada sekadar angka. Kecerdasan Buatan juga membangun kepercayaan dalam negosiasi internasional dengan meningkatkan transparansi dan standardisasi. Sebagai contoh, sistem hibrida *blockchain*-AI sedang diuji coba untuk memvalidasi kemajuan negara-negara dalam pengurangan emisi, sehingga membantu meredam perdebatan mengenai data yang dilaporkan secara mandiri. Perangkat pemrosesan bahasa alami (*natural language processing*) menganalisis kesepakatan iklim selama beberapa dekade untuk mengidentifikasi pola kebuntuan dalam poin-poin negosiasi; wawasan praktis yang dihasilkan perangkat ini dapat membantu para diplomat menjembatani perbedaan pendapat.

Hal ini sangat penting mengingat adanya ketimpangan antara negara industri maju—yang secara historis bertanggung jawab atas tingginya emisi—dan negara berkembang, tempat dampak iklim paling parah dirasakan; dalam konteks ini, tata kelola iklim harus bersifat responsif sekaligus dapat ditegakkan. Namun, penggunaan AI untuk aksi iklim juga menghadirkan tantangan etis dan praktis. Pemusatan keahlian AI di negara-negara yang maju secara teknologi berisiko memperparah ketimpangan global, dan bias dalam data pelatihan dapat mengarahkan solusi iklim agar lebih memprioritaskan kepentingan negara-negara Global Utara. Selain itu, kebutuhan energi infrastruktur AI menciptakan sebuah paradoks: mampukah manfaat iklim yang ditawarkan teknologi ini melampaui jejak karbon yang dihasilkannya? Dalam bab ini, kami menelaah berbagai dilema tersebut dan merekomendasikan pengembangan kerangka kerja yang mengedepankan inklusivitas, akuntabilitas algoritmik, serta pembangunan berkelanjutan bagi AI.

Melalui kombinasi analisis teoretis dan studi kasus praktis—mulai dari ekonomi sirkular berbasis AI di Eropa hingga inisiatif pertanian inovatif di Afrika Sub-Sahara—bab ini menunjukkan bagaimana sistem cerdas mentransformasi industri dan rantai pasok menjadi sarana pendukung keberlanjutan. Bab ini berargumen bahwa potensi besar AI tidak terletak pada penggantian peran manusia, melainkan pada augmentasi kemampuan manusia, guna menciptakan hubungan simbiosis antara teknologi dan kebijakan demi mempercepat transisi menuju rendah karbon. Di tengah desakan tenggat waktu iklim yang terus berjalan, kemampuan AI—yang dipadukan dengan kerja sama internasional—untuk memanfaatkan peluang sempit menuju masa depan berkelanjutan dapat menjadi penentu nasib umat manusia. Pada bagian selanjutnya, kami mengupas peran kompleks AI dalam transformasi ini—baik potensi yang ditawarkannya maupun penilaian yang objektif mengenai keterbatasannya. Di sinilah segalanya bermula: pada titik temu antara inovasi, tata kelola, dan kebutuhan mendesak akan ketahanan planet kita.

15.2 PEMANFAATAN TEKNOLOGI KECERDASAN BUATAN (AI)

Pemanfaatan teknologi kecerdasan buatan (AI) untuk mendukung upaya keberlanjutan telah menjadi salah satu topik yang berkembang pesat dalam sains lintas, yang

mempertemukan bidang sains iklim, analitik data, etika, serta tata kelola internasional. Para akademisi semakin berfokus pada faktor-faktor yang dapat memfasilitasi—atau justru menghambat—kemampuan AI dalam mengoptimalkan rantai industri dan rantai pasok demi keberlanjutan lingkungan, khususnya dalam kerangka agenda aksi iklim. Pemantauan ini menyoroti topik-topik penting dalam riset terkini, yang disusun berdasarkan empat dimensi yang saling terkait:

(1) pemantauan dan pelacakan emisi berbasis AI
(2) pemodelan iklim dan analitik prediktif
(3) tata kelola dan diplomasi internasional, serta
(4) hambatan etis dan operasional.

AI, Pemantauan, dan Pelacakan Emisi

Semakin banyak penelitian menyoroti potensi transformatif AI dalam pemantauan emisi. Pendekatan konvensional, yang mengandalkan data laporan mandiri dan audit berkala, sering kali dinilai lambat, kurang akurat, dan terfragmentasi. Sistem AI memanfaatkan citra satelit, sensor *Internet of Things* (IoT), dan pembelajaran mesin (*machine learning*) untuk memberikan wawasan yang rinci dan *real-time* mengenai sumber emisi. Yang menunjukkan bagaimana kecerdasan buatan digunakan untuk mendeteksi kebocoran metana dari infrastruktur minyak dan gas dengan tingkat akurasi 90%; selain itu, algoritma yang menganalisis data satelit mengenai pola deforestasi telah membantu meningkatkan akuntabilitas rantai pasok yang terkait dengan penebangan hutan tropis.

Kemampuan-kemampuan ini sejalan dengan *Enhanced Transparency Framework* (Kerangka Transparansi yang Ditingkatkan) dalam Perjanjian Paris, yang mensyaratkan adanya data emisi yang akurat dan dapat diverifikasi. Di sisi lain, para akademisi seperti Cowls dan rekan-rekan. memperingatkan bahwa penyebaran perangkat AI yang tidak merata dapat memperparah ketimpangan data yang sudah ada antara negara maju dan negara berkembang, sehingga menyulitkan upaya penegakan kepatuhan secara global.

Pemodelan Iklim dan Analisis Prediktif

Pemodelan banjir yang didukung oleh AI telah menarik perhatian karena kemampuannya menyempurnakan prediksi iklim. Meskipun hal ini menjadi landasan yang masuk akal, model-model tradisional menghadapi keterbatasan komputasi dan sifat sistem iklim yang non-linear. Teknik pembelajaran mesin (*machine learning* atau ML) seperti jaringan saraf tiruan (*neural networks*) meningkatkan kemampuan prediksi dengan mengintegrasikan berbagai kumpulan data—mulai dari suhu laut hingga tren sosial-ekonomi—untuk menyajikan profil risiko yang sangat spesifik secara lokal (*hyper-local*).

Sistem prediksi banjir berbasis ML telah mengurangi waktu respons bencana sebesar 40% di Asia Selatan. AI juga dapat menyimulasikan skenario "bagaimana jika" (*what-if*), yang membantu pengambil keputusan menilai implikasi jangka panjang dari berbagai opsi dekarbonisasi, seperti ekonomi sirkular berskala besar. Namun, sebagaimana diperingatkan oleh Zhai dan rekan-rekan, ketergantungan yang naif pada model AI—terutama jika model tersebut dianggap serba tahu—menimbulkan risiko salah tafsir terhadap keluaran probabilistik, yang pada akhirnya dapat menghasilkan kebijakan yang maladaptif.

Urusan Internasional, Tata Kelola, dan Diplomasi

Riset memandang AI sebagai pedang bermata dua bagi kerja sama iklim internasional, karena AI dapat memfasilitasi sekaligus menghambat kerja sama tersebut. Pemanfaatan kemampuan AI serta penggabungan teknologi *blockchain* dengan analitik tingkat lanjut telah memungkinkan penyediaan teknologi hibrida sebagai solusi terarah untuk meningkatkan transparansi pendataan emisi dan mengurangi skeptisisme terhadap mekanisme multilateral. Transkrip negosiasi iklim selama beberapa dekade juga telah dianalisis menggunakan perangkat pemrosesan bahasa alami (*natural language processing* atau NLP) untuk menyusun profil linguistik yang dapat mendorong atau justru menghambat tercapainya konsensus.

Akan tetapi, Biermann dan rekan-rekan berpendapat bahwa ketegangan geopolitik mengancam potensi tata kelola AI, karena sengketa mengenai kedaulatan data dan kekayaan intelektual menghambat transfer pengetahuan. Selain itu, negara-negara yang mungkin menginginkan teknologi tersebut sering kali tidak memiliki infrastruktur yang memadai untuk memanfaatkan AI dalam diplomasi iklim, sehingga melanggengkan ketimpangan kekuasaan dalam forum COP.

Hambatan Etis dan Operasional

Pelatihan model AI—bahkan yang berskala menengah hingga besar—menghasilkan jejak karbon yang setara dengan puluhan penerbangan lintas Atlantik. Hal ini memunculkan tantangan yang hasilnya mungkin tampak berlawanan dengan intuisi: dapatkah potensi manfaat iklim dari penggunaan AI melampaui dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh model itu sendiri? Para peneliti mendorong penerapan prinsip "AI hijau" yang memprioritaskan algoritma yang: a) dijalankan menggunakan energi terbarukan, dan b) diproses di pusat data yang ditenagai oleh energi terbarukan. Selain itu, sistem AI yang menghasilkan keluaran bias menimbulkan masalah kesetaraan, karena data pelatihan yang lebih condong pada konteks negara-negara Global Utara dapat menyebabkan wilayah-wilayah rentan tidak terjangkau oleh solusi iklim.

Selain itu, pemusatan pengetahuan AI di tangan perusahaan teknologi raksasa dan negara-negara kaya dapat memprivatisasi tata kelola iklim dengan mengorbankan—serta berpotensi meminggirkan—lembaga-lembaga publik. Jobin dan rekan rekan, menunjukkan perlunya pengembangan pedoman etika terkait penerapan AI yang mempertimbangkan serta peka terhadap aspek inklusi, akuntabilitas, dan desain partisipatif.

Kesenjangan Penelitian

Meskipun telah ada riset mengenai potensi transformatifnya, terdapat pula kesenjangan yang signifikan. Hanya sedikit studi yang mengkaji secara empiris dampak keseluruhan AI terhadap pengurangan emisi di berbagai sektor, dan lebih sedikit lagi yang meneliti dinamika sosial-politik penerapannya dalam konteks negara-negara Global Selatan. Konsekuensi etis jangka panjang dari penyerahan tata kelola iklim kepada algoritma yang tertutup (tidak transparan) juga kurang mendapat perhatian. Penelitian di masa depan harus menjawab kesenjangan ini agar inisiatif keberlanjutan berbasis AI dapat berjalan secara adil, transparan, dan selaras dengan batas-batas daya dukung planet (*planetary boundaries*).

Dampak positif semacam itu perlu diimbangi dengan implikasi negatif yang setara di bidang lain; hal ini semakin menegaskan bahwa peran AI dalam optimalisasi industri dan rantai pasok tidaklah serta-merta bernilai baik ataupun netral. Wujudnya akan terbentuk dan diatur oleh kapabilitas teknis, struktur tata kelola, serta pilihan etis dari sistem tata kelola tersebut. Seiring mendekatnya tenggat waktu terkait iklim, kesadaran akan faktor-faktor ini menjadi sangat penting untuk memanfaatkan AI sebagai kekuatan pendorong perubahan sistemik yang adil.

15.3 KEMAMPUAN AI DALAM MENDORONG KEBERLANJUTAN DI SEKTOR INDUSTRI

Untuk memanfaatkan kemampuan AI dalam mendorong optimalisasi keberlanjutan di sektor industri dan rantai pasok, para pemangku kepentingan perlu menerapkan pendekatan sistematis dan lintas disiplin guna mengatasi berbagai tantangan teknis, tata kelola, dan etika. Berdasarkan pemantauan riset, kerangka kerja ini menjabarkan langkah-langkah konkret dalam empat bidang yang saling terkait: pemantauan dan pelacakan emisi, pemodelan iklim, tata kelola internasional, dan penerapan yang etis.

Kecerdasan Buatan (AI) Digunakan untuk Memantau dan Melacak Emisi

Tujuan: Memfasilitasi pelaporan emisi yang akurat dan *real-time* guna memastikan akuntabilitas serta mendukung upaya dekarbonisasi.

Implementasi

(a) Menerapkan Jaringan Sensor Terintegrasi AI: Memasang sensor IoT dan sistem AI yang terhubung dengan satelit untuk memantau emisi, penggunaan energi, dan timbulan limbah di lokasi industri, pusat logistik, dan sistem pertanian. Sebagai contoh, algoritma deteksi metana (misalnya, yang diuji oleh *Environmental Defense Fund*) dapat diterapkan dalam skala luas di seluruh rantai pasok minyak dan gas.

(b) Membangun platform berbagi data global: Repositori data emisi akses terbuka yang distandardisasi lintas batas negara dan industri. Inisiatif *Climate Trace* dari PBB, yang menggunakan AI untuk menggabungkan data satelit dan sensor, menyediakan model pemantauan yang transparan dan kolaboratif.

(c) Memastikan kesetaraan data: Bekerja sama dengan negara-negara berkembang untuk mendorong kapasitas mereka dalam mengadopsi perangkat AI, termasuk melalui program pelatihan dan subsidi akses terhadap teknologi pemantauan.

Perangkat Utama

(a) Prediksi perilaku anomali: *Model machine learning* (ML) (misalnya, model prediksi kebocoran).

(b) Catatan emisi yang tidak dapat diubah dan dapat diaudit menggunakan sistem hibrida *Blockchain-AI*.

Pemodelan Iklim dan Analisis Prediktif

Tujuan: Meningkatkan pengambilan keputusan menggunakan penilaian risiko iklim yang sangat spesifik secara lokal (*hyper-localized*) dan simulasi skenario.

Implementasi

(a) Membuat model hibrida AI-iklim: Melengkapi model iklim standar dengan *machine learning* untuk mencapai presisi yang lebih baik dalam prediksi regional (misalnya, potensi banjir, hasil panen). Sebagai contoh, *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* menggunakan AI untuk meningkatkan proyeksi jalur badai.

(b) Merancang dasbor perencanaan skenario: Mengembangkan platform berbasis AI yang memungkinkan pembuat kebijakan menyimulasikan dampak usulan dekarbonisasi (misalnya, penetapan harga karbon, transisi energi terbarukan) terhadap industri dan rantai pasok. Perangkat seperti platform risiko pertanian ClimateAi menunjukkan potensi ini.

(c) Menggunakan data pelatihan AI regional: Bekerja sama dengan universitas dan institusi lokal agar model AI dapat mencerminkan kondisi ekologis dan sosial-ekonomi setempat, alih-alih menggunakan pendekatan seragam yang berlaku umum (*one-size-fits-all*).

Perangkat Utama

(a) Pemodelan risiko dinamis menggunakan Jaringan Saraf Tiruan (*Neural Networks*).

(b) *Digital twin* (kembaran digital) rantai pasok yang digunakan untuk memodelkan gangguan dan strategi ketahanan.

(c) Tata Kelola dan Diplomasi Internasional.

Tujuan: Memungkinkan negosiasi iklim yang saling percaya dan adil di seluruh dunia dengan memanfaatkan transparansi berbasis AI.

Implementasi

(a) Memastikan penerapan sistem verifikasi AI: Menggunakan platform blockchain-AI untuk memverifikasi laporan emisi negara secara independen guna mengurangi ketergantungan pada data yang dilaporkan sendiri (*self-disclosed*) dalam kerangka Perjanjian Paris. Proyek percontohan *Climate Warehouse* dari Bank Dunia merupakan contoh penerapannya.

(b) NLP untuk tujuan positif: Menggunakan perangkat pemrosesan bahasa alami (*Natural Language Processing* atau NLP), seperti GPT-3, untuk menganalisis transkrip negosiasi iklim masa lalu guna mengidentifikasi karakteristik linguistik yang menghambat kemajuan perundingan. Hal ini dapat membantu para diplomat menyusun strategi komunikasi yang lebih efektif.

(c) Membangun koalisi tata kelola AI yang inklusif: Membentuk lembaga multilateral (misalnya, Gugus Tugas AI-Iklim yang dipimpin PBB) untuk mengatur pertukaran data, kekayaan intelektual (KI), dan transfer teknologi agar negara berkembang memiliki akses yang setara terhadap kapabilitas AI.

Perangkat Utama

(a) Sistem pelacakan kepatuhan yang anti-manipulasi—*Blockchain*.

(b) Algoritma NLP (seperti BERT) untuk membedah dinamika negosiasi.

Penerapan AI yang Adil dan Bebas Bias

Tujuan: Meminimalkan risiko lingkungan dan sosial dari AI sekaligus memaksimalkan manfaatnya bagi iklim.

Implementasi

(a) Menerapkan prinsip "*Green AI*" (AI Ramah Lingkungan): Mengutamakan algoritma yang membutuhkan daya lebih rendah atau beroperasi menggunakan pusat data bertenaga energi terbarukan. Salah satu contohnya adalah model "4M" dari Google, yang mengoptimalkan data, arsitektur model, serta perangkat keras, sekaligus mengurangi konsumsi energi untuk pelatihan AI.

(b) Mengintegrasikan prinsip kesetaraan dalam desain AI: Regulasi harus mewajibkan pengembang untuk menggunakan kumpulan data pelatihan yang beragam serta proses desain partisipatif yang melibatkan anggota masyarakat yang terpinggirkan. Inisiatif *AI for Climate Resilience* di Kenya, yang dikembangkan bersama petani setempat, merupakan contoh nyata penerapan prinsip ini.

(c) Melakukan audit bias dan jejak karbon pada sistem AI: Mewajibkan audit pihak ketiga terhadap emisi sepanjang siklus hidup dan aspek keadilan dari perangkat AI, sebagaimana diusulkan dalam *AI Act* di Eropa.

Perangkat Utama

(a) Kerangka kerja penghitungan karbon infrastruktur AI (misalnya, *ML CO_2 Impact Calculator*).

(b) Dewan peninjau etika yang melibatkan masyarakat sipil, akademisi, dan pihak dari negara-negara *Global South*.

Langkah-Langkah Implementasi di Semua Bidang

(a) Uji coba solusi AI di sektor-sektor berdampak tinggi: Uji kerangka kerja di industri penghasil emisi karbon tinggi (misalnya, semen, perkapalan) dan perluas keberhasilannya.

(b) Bangun kemitraan publik-swasta: Berkolaborasi untuk memanfaatkan pendanaan dan keahlian, seperti dalam kasus *AI for the Earth Alliance*, yang menghubungkan *Microsoft* dengan LSM dan pemerintah.

(c) Umpan balik—Berulang: Di tengah masukan konstan dari para pemangku kepentingan, sistem AI harus melihat melampaui diri mereka sendiri untuk terus menyempurnakan, memastikan alat berbasis AI mencerminkan ambisi yang berkembang dalam kemajuan iklim dan pergeseran dalam lanskap teknologi yang mendasarinya.

Model ini bukan satu-satunya solusi untuk masalah kita, tetapi merupakan dorongan kuat untuk penggunaan sistemik yang bergantung pada akses yang sama, tata kelola yang kuat, dan kehati-hatian etis. Pendekatan baru terhadap industri dan rantai pasokan, yang mengaitkan inovasi teknis dengan kerja sama internasional dan keadilan, dapat mengubahnya dari silo yang intensif karbon menjadi ekosistem yang saling bergantung dan berkelanjutan.

Keberhasilan bergantung pada kesediaan para pemangku kepentingan untuk berbagi data, mendistribusikan kembali sumber daya, dan memprioritaskan kesehatan planet jangka panjang daripada keuntungan jangka pendek. Tantangan ini bersifat politis sekaligus teknologis. Waktu untuk bertindak sangat terbatas, tetapi jika digunakan dengan bijak, AI dapat memberikan jalan untuk menyelaraskan ambisi dengan realitas dalam krisis iklim. Gambar 15.1 merepresentasikan kerangka keberlanjutan yang digerakkan oleh AI.



Gambar 15.1 Kerangka keberlanjutan yang digerakkan oleh AI untuk keberlanjutan
(Sumber: Konsep penulis)

15.4 DAMPAK DAN IMPLIKASI AI DALAM MENDUKUNG KEBERLANJUTAN INDUSTRI

Integrasi berbasis AI ke dalam tatanan industri dan rantai pasok demi keberlanjutan memiliki signifikansi luas, baik pada tingkat teoretis, terapan, sosial, maupun keberlanjutan. Implikasi semacam itu menyoroti peluang sekaligus memberikan peringatan bagi para pembuat kebijakan, ahli teknologi, dan masyarakat global.

Transformasi Kerangka Teoretis Tata Kelola Iklim di Era AI

Kerangka kerja teoretis untuk tata kelola iklim dan inovasi teknologi perlu beradaptasi guna mengakomodasi potensi disruptif AI. Model kerja sama internasional tradisional—yang didasarkan pada diplomasi yang berpusat pada negara dan inventarisasi emisi yang statis—kian tidak lagi memadai untuk dunia yang dicirikan oleh data waktu nyata (*real-time*) dan pengambilan keputusan berbasis algoritma.

Dengan memasukkan unsur alam ke dalam perhitungan biaya, AI menciptakan paradigma baru dalam teori sistem kompleks; dalam paradigma ini, aksi iklim dapat dimodelkan sebagai interaksi dinamis antara analitik prediktif, jaringan terdesentralisasi, dan tata kelola adaptif. Sebagai contoh, kemampuan AI dalam merepresentasikan perubahan non-linear pada sistem iklim berarti bahwa analisis biaya-manfaat standar kita tidak lagi cukup, sehingga memunculkan kebutuhan akan teori yang berlandaskan pada ketahanan (*resilience*) alih-alih sekadar efisiensi.

Keterlibatan AI dalam tata kelola iklim memunculkan pertanyaan mengenai agensi dan akuntabilitas yang menyentuh inti etika teoretis. Siapa yang akan dianggap bertanggung jawab

atas bias atau kesalahan sistemik jika algoritma turut berperan dalam alokasi sumber daya atau pemeriksaan kepatuhan terhadap perjanjian iklim? Para akademisi perlu secara langsung menghadapi sifat "kotak hitam" (*black box*) AI, serta menyelaraskan prinsip transparansi demokratis dengan teori keadilan global yang melampaui batas negara-bangsa dan mengakomodasi kondisi tata kelola berbasis algoritma. Terakhir, bidang konvergensi AI—seperti penerapan ekonomi perilaku dan upaya mendorong industri menuju praktik ekonomi sirkular—akan menuntut pendekatan multidisiplin yang menjembatani ilmu teknis dan ilmu sosial.

Kesiapan Infrastruktur dan Ekosistem untuk Penerapan AI Berkelanjutan

Pemanfaatan AI juga didorong oleh infrastruktur yang kuat, kolaborasi lintas sektor, dan pembuatan kebijakan yang responsif. Seiring industri mengeksplorasi tren AI lebih jauh ke dalam lingkup perusahaan, kesiapan industri menjadi krusial; hal ini mencakup ekosistem yang siap-AI, mulai dari jaringan sensor IoT dan platform data yang dapat saling beroperasi (*interoperable*) hingga tenaga kerja yang terampil.

Sebagai contoh, rantai pasok yang menggunakan AI untuk pemantauan emisi akan membutuhkan format data standar serta protokol keamanan siber yang meminimalkan risiko manipulasi. Sementara itu, para pembuat kebijakan menghadapi tekanan untuk merevisi kerangka kerja regulasi—misalnya dengan memperluas mekanisme transparansi Perjanjian Paris agar mencakup laporan emisi yang diverifikasi oleh AI—sembari menyeimbangkan antara inovasi dan pengawasan. Salah satu ujian utamanya adalah meningkatkan skala proyek percontohan menjadi sistem berskala global.

Meskipun beberapa inisiatif—seperti *Climate TRACE* (alat pelacak emisi global berbasis AI)—layak diterapkan, penggunaan model serupa di wilayah dengan keterbatasan data akan memerlukan investasi terarah pada infrastruktur digital. Demikian pula, kebutuhan energi untuk infrastruktur AI (misalnya, pusat data) menuntut pengembangan kapasitas jaringan energi terbarukan secara paralel guna mencegah timbulnya jejak karbon yang justru kontraproduktif. Hal ini menegaskan pentingnya pembagian risiko dan sumber daya melalui kemitraan pemerintah-swasta, seperti *Digital Green Coalition* yang baru dibentuk oleh Uni Eropa.

Dampak Sosial dan Keadilan dalam Penerapan AI Berkelanjutan

Secara sosial, AI berisiko memperparah ketimpangan jika digunakan tanpa adanya langkah-langkah perlindungan yang terencana. AI memang dapat mendemokratisasi akses terhadap wawasan iklim (misalnya, petani kecil yang menggunakan alat prediktif untuk beradaptasi dengan kekeringan), namun teknologi ini juga memusatkan kekuasaan pada entitas yang mengendalikan data dan algoritma.

Kesenjangan digital antarnegara (dan antarkomunitas) juga dapat semakin mengeras, mengingat negara-negara di *Global South* memiliki peran yang relatif kecil dalam penyusunan kumpulan data untuk melatih sistem AI maupun dalam penyediaan sumber daya komputasi yang dibutuhkan untuk pengembangan dan pelatihan sistem tersebut—yang diukur berdasarkan kapasitas GPU, TPU, dan sebagainya. Skenario-skenario ini menciptakan apa yang

disebut sebagai "aristokrasi teknologi iklim," di mana manfaat dari solusi keberlanjutan justru lebih banyak dinikmati oleh perusahaan atau negara yang paling kaya.

Pertanyaan etis seputar pergeseran tenaga kerja turut memperumit dampak sosial AI. Otomatisasi di sektor logistik atau manufaktur dapat mempercepat pengurangan emisi sekaligus menghilangkan lapangan kerja di wilayah-wilayah yang rentan. Di sisi lain, program peningkatan keterampilan (*reskilling*) berbasis AI yang didorong oleh semangat optimisme teknologi—seperti inisiatif "*AI for Sustainable Development*" di India—menunjukkan contoh bagaimana dekarbonisasi dapat berjalan selaras dengan pertumbuhan yang berkeadilan. Penerimaan sosial terhadap AI juga sangat bergantung pada kepercayaan budaya; masyarakat akan menolak inisiatif penanganan perubahan iklim berbasis AI jika inisiatif tersebut terkesan teknokratis atau eksploitatif. Oleh karena itu, penerapan proses desain partisipatif yang mengedepankan pengetahuan lokal menjadi suatu keharusan mutlak.

Implikasi Lingkungan dan Keberlanjutan dalam Penerapan AI

AI memiliki implikasi yang paradoks terhadap keberlanjutan. Meskipun AI mengoptimalkan penggunaan energi, mengurangi limbah, dan mempercepat transisi ke energi terbarukan, dampak lingkungan serta jejak karbon yang dihasilkan—misalnya dari proses pelatihan model berskala besar—perlu dicermati secara serius. Agar AI dapat menjadi kekuatan yang memberikan dampak positif bersih (*net-positive*), sektor ini perlu menerapkan prinsip-prinsip *green AI*, seperti penggunaan algoritma hemat energi (contohnya model "4M" dari Google), pusat data yang ditenagai energi terbarukan, serta audit karbon sepanjang siklus hidup. Di sinilah peran penting *ML CO_2 Impact Calculator*; alat semacam ini sangat dibutuhkan untuk menyelaraskan pengembangan AI dengan batasan daya dukung planet bumi.

Pada akhirnya, ruang lingkup bagi AI akan bergantung pada kemampuannya untuk menjaga keadilan antargenerasi. Oleh karena itu, model iklim yang memprediksi kenaikan permukaan laut pada tahun 2100 harus menjadi acuan bagi kebijakan infrastruktur yang kita buat saat ini; sistem AI perlu memprioritaskan ketahanan jangka panjang dibandingkan keuntungan jangka pendek. Namun, hal ini bergantung pada struktur tata kelola yang menuntut pandangan jauh ke depan terkait penerapan AI—seperti usulan *AI Act* dari Uni Eropa yang mewajibkan adanya penilaian dampak keberlanjutan.

AI sebagai Pendorong Transformasi Sistemik Menuju Keberlanjutan

Implikasi-implikasi ini secara keseluruhan menegaskan bahwa AI merupakan komponen penting dalam transformasi yang lebih sistemik, dan sama sekali bukan sekadar katalis yang bekerja secara terisolasi. Secara teoretis, hal ini menuntut inovasi tata kelola yang diwujudkan melalui kelincahan infrastruktur dan regulasi, desain yang berpusat pada keadilan sosial, keberlanjutan, serta komitmen terhadap prinsip-prinsip teknologi ramah lingkungan. Langkah ke depan bergantung pada:

(a) Menjembatani kolaborasi antara AI dan iklim (serta aspek etikanya).
(b) Kesepakatan global mengenai pembagian akses terhadap sumber daya AI dan upaya mengatasi kesenjangan digital.
(c) Tata kelola adaptif yang mampu mengimbangi perkembangan kemampuan sekaligus risiko yang ditimbulkan oleh AI.

Pada akhirnya, penggunaan AI dalam upaya keberlanjutan ibarat pedang bermata dua: AI menyediakan mekanisme tak tertandingi untuk menjaga kelestarian planet ini, namun di sisi lain, risikonya menuntut pengawasan yang cermat. Apakah teknologi ini akan memperkuat ketahanan atau justru melemahkannya sangat bergantung pada kemampuan kita—manusia—untuk memanfaatkannya bukan sebagai penguasa, melainkan sebagai mitra kerja dalam upaya krusial tersebut.

15.5 MASA DEPAN TATA KELOLA AI DAN AKSI IKLIM

Krisis iklim menuntut adanya pergeseran paradigma—sebuah pemikiran ulang secara radikal mengenai hak, tanggung jawab, dan sistem yang kita terapkan dalam mengatur cara umat manusia memproduksi dan mengonsumsi. Sebagaimana telah diuraikan dalam bab ini, kecerdasan buatan (AI) bukan sekadar alat, melainkan kekuatan transformatif yang mampu mengubah wajah industri, rantai pasok, dan kerja sama iklim global. Melalui berbagai model teoretis, penerapan praktis, dinamika sosial, dan tujuan keberlanjutan, muncul sebuah narasi yang utuh: AI berpotensi menjadi anugerah luar biasa dalam mewujudkan transisi menuju ekonomi rendah karbon; namun, peluang besar ini bisa berakhir sia-sia jika tidak diterapkan dengan niat yang jelas, etika, dan semangat demokrasi. Taruhannya sangatlah besar—tidak ada yang lebih krusial daripada hal ini.

Potensi AI untuk menjembatani kesenjangan antara ambisi iklim dan tindakan nyata kini menjadi jauh lebih mendesak dan dibutuhkan, mengingat peluang untuk menjaga kenaikan suhu global tetap di bawah 1,5°C kian menipis dengan cepat. Kemampuan memproses kompleksitas dalam skala besar telah menjadi nilai utama AI sejak awal. Solusi iklim konvensional—yang selama ini terkendala oleh data dan pelaporan yang terfragmentasi serta model statis dalam penerapannya—tidak memadai untuk mengatasi masalah dekarbonisasi yang bersifat non-linear dan saling bergantung. AI mendobrak status quo tersebut dengan memungkinkan pemantauan emisi secara hampir seketika (*near-real-time*) melalui jaringan satelit dan sensor IoT, meletakkan dasar bagi model prediksi iklim yang lebih baik berkat teknologi pembelajaran mesin (*machine learning*), serta menghadirkan transparansi dalam tata kelola global melalui sistem hibrida blockchain-AI. Bagi sektor industri dan rantai pasok—yang menyumbang lebih dari 60 persen total emisi global—hal ini membuka peluang penerapan optimalisasi berbasis AI agar pertumbuhan ekonomi dapat berjalan selaras dengan batasan daya dukung planet bumi. Selamat datang di era keberlanjutan berbasis AI yang didukung oleh proses dan data; era yang menggantikan perkiraan spekulatif dengan metrik target menuju kondisi karbon-negatif—seperti penggunaan jaringan listrik pintar (*smart grid*) untuk mengelola beban energi terbarukan dan/atau meminimalkan aset yang tidak lagi bernilai ekonomis (*stranded assets*), serta rantai pasok sirkular yang mampu menghilangkan limbah material. Sebagaimana ditunjukkan dalam bab ini (melalui studi kasus dan analisis teoretis), dampak AI jauh melampaui sekadar efisiensi teknis.

AI merombak total arsitektur diplomasi iklim internasional. Data AI yang terstandarisasi dan dapat diverifikasi juga membantu memulihkan kepercayaan yang sempat runtuh dalam berbagai kesepakatan multilateral. Aplikasi pemrosesan bahasa alami (NLP) dapat

menjelaskan kerumitan di balik kebuntuan negosiasi, sementara alat analisis prediktif membantu merancang pembagian sumber daya yang adil dalam pendanaan iklim. Inovasi semacam itu merupakan kunci bagi kesepakatan antara negara-negara kaya dan wilayah yang rentan—bahwa hasil industrialisasi bukanlah sebuah kutukan dan bahwa aksi iklim tidak akan semakin memperparah ketidakadilan historis yang sudah mengakar.

Namun, potensi manfaat AI juga dibarengi dengan risiko yang lebih besar. Ironisnya, terdapat dampak lingkungan dari teknologi ini, mulai dari pusat data yang mengonsumsi energi dalam jumlah besar hingga model AI yang memerlukan proses pelatihan dengan jejak karbon tinggi. Yang terpenting, penerapan kerangka kerja "AI hijau"—yang menggunakan algoritma hemat energi dan infrastruktur bertenaga energi terbarukan—akan memastikan bahwa solusi yang dihadirkan tidak justru lebih buruk daripada masalah yang ingin diatasi. Terdapat pula pertimbangan etis terkait pengembangan AI yang saat ini masih didominasi oleh dunia Global Utara yang mengutamakan teknologi, sehingga berisiko mengancam serta mengeksploitasi ketimpangan kekuasaan yang ada. Kumpulan data yang bias dapat menghasilkan solusi yang hanya cocok bagi negara-negara kaya namun mengabaikan kebutuhan masyarakat rentan yang terdampak perubahan iklim—mulai dari penduduk pulau Pasifik yang harus mengungsi akibat kenaikan permukaan laut hingga petani di Afrika sub-Sahara yang berjuang menghadapi desertifikasi.

Selain itu, tren korporatisasi dalam pengembangan perangkat AI turut meminggirkan peran otoritas publik, sehingga melemahkan akuntabilitas demokratis dalam ekosistem tata kelola iklim. Dari sisi sosial, penerapan AI menghadirkan dilema antara otomatisasi dan pemerataan (ekuitas). Meskipun logistik hijau dapat menciptakan efisiensi dan mengurangi emisi, hal ini juga berpotensi memicu lebih banyak pemutusan hubungan kerja (PHK) di sektor manufaktur atau transportasi. Di sisi lain, proyek peningkatan keterampilan (*reskilling*) berbasis AI—yang membantu pekerja beralih ke pekerjaan ramah lingkungan melalui platform digital—menjadi contoh bagaimana teknologi dapat menyelaraskan upaya dekarbonisasi dengan inklusi sosial. Bagaimana kita dapat memastikan bahwa AI berperan sebagai jembatan, bukan penghalang, dalam proses transisi ini? Namun, sebagaimana diilustrasikan dalam artikel ini melalui studi kasus dan analisis teoretis, dampak AI melampaui sekadar efisiensi teknis. Dampaknya akan merombak arsitektur diplomasi iklim internasional.

AI membangun kembali kepercayaan yang sempat runtuh dalam kesepakatan multilateral dengan cara menyajikan informasi yang terstandarisasi dan dapat diverifikasi. Aplikasi dalam pemrosesan bahasa alami mengurai kompleksitas kebuntuan dalam negosiasi, sementara analitik prediktif membantu menilai bagaimana pendanaan iklim dapat didistribusikan secara adil. Inovasi-inovasi ini merupakan bagian tak terpisahkan dari janji negara-negara kaya kepada wilayah-wilayah yang rentan terhadap perubahan iklim: bahwa hasil industrialisasi tidak akan menjadi salah satu dampak buruknya, dan bahwa aksi iklim tidak akan semakin memperparah ketidakadilan historis yang mendalam.

Namun, potensi AI juga membawa risiko kerusakan yang signifikan. Dampak lingkungan dari teknologi itu sendiri—mulai dari pusat data yang mengonsumsi energi hingga model yang dilatih dengan metode penyumbang emisi karbon—menghadirkan ironi tersendiri. Secara

khusus, kerangka kerja "*Green AI*" (AI ramah lingkungan) yang memprioritaskan algoritma dan infrastruktur hemat energi serta didukung oleh energi terbarukan akan memastikan bahwa solusi yang dihadirkan tidak justru memperparah masalah yang ada. Dari sisi etika, jika pengembangan AI masih didominasi oleh negara-negara maju (*Global North*), terdapat potensi ketimpangan kekuasaan, risiko, serta peluang yang tidak merata. Kumpulan data yang bias semacam itu dapat menghasilkan solusi yang berorientasi pada negara-negara kaya, sembari mengabaikan kebutuhan masyarakat rentan yang terdampak perubahan iklim—seperti penduduk pulau di Pasifik yang harus mengungsi akibat kenaikan permukaan laut atau komunitas petani di Afrika sub-Sahara yang menghadapi desertifikasi. Kedua, korporatisasi dalam pembuatan perangkat AI cenderung meminggirkan otoritas publik, sehingga mengikis akuntabilitas demokratis dalam ekosistem tata kelola iklim. Dari sisi sosial, penerapan kecerdasan buatan menghadirkan dilema antara otomatisasi dan kesetaraan. Meskipun kemajuan dalam logistik ramah lingkungan dapat mendorong efisiensi dan menurunkan emisi, hal ini juga berisiko memperparah tren pemutusan hubungan kerja (PHK) di industri manufaktur atau transportasi.

Di sisi lain, inisiatif peningkatan keterampilan (*reskilling*) berbasis AI—seperti memfasilitasi transisi pekerja menuju pekerjaan ramah lingkungan melalui *platform digital*—menunjukkan berbagai cara teknologi dapat menyelaraskan upaya dekarbonisasi dengan inklusi sosial. Industri AI perlu mematuhi komitmen *net-zero* dengan mewajibkan audit karbon algoritma, mendorong penggunaan pusat data ramah lingkungan, serta mendanai penelitian komputasi hemat energi. Universitas dan perusahaan dapat berkolaborasi untuk menciptakan sertifikasi "*Green AI*", serupa dengan peringkat LEED untuk bangunan. Krisis iklim tak diragukan lagi merupakan ujian terbesar bagi kecerdikan dan solidaritas umat manusia. AI tidak dapat menggantikan kemauan politik, dan komputer tidak dapat memunculkan keberanian etis. Nilai AI terletak pada kemampuannya untuk memperkuat peran manusia: memungkinkan pembuat kebijakan merumuskan strategi yang lebih baik, menyediakan fakta-fakta yang tak terbantahkan bagi para aktivis, serta membantu industri menyelaraskan pencarian keuntungan dengan kelestarian planet. Namun, perwujudan hal ini bergantung pada peninjauan ulang yang kritis terhadap konsep kemajuan. PDB tidak lagi menjadi tolok ukur kemajuan; ketangguhan, kesetaraan, dan regenerasi ekologis kini membentuk paradigma baru. AI hadir sebagai cermin sekaligus kompas di saat berbagai negara bertemu dalam KTT COP dan para pemimpin bisnis berkomitmen mencapai target *net-zero*.

Teknologi ini mencerminkan kemampuan serta kecenderungan umat manusia. Di sisi lain, kompas tersebut hanya mengarah pada masa depan di mana teknologi kembali menjalankan fungsinya sebagai sarana pemerataan yang hebat: sebuah kekuatan yang menyuarakan aspirasi kaum marginal, mendistribusikan ulang sumber daya, serta memulihkan keseimbangan dalam jalinan kehidupan yang rapuh. Pada akhirnya, perpaduan antara kecerdasan buatan (AI) dan aksi iklim bukanlah sekadar keniscayaan teknologi semata, melainkan bergantung pada kesepakatan mengenai tata kelola dan penggunaannya. Jika dikelola dengan kebijaksanaan dan kerendahan hati serta dimanfaatkan secara bijak dan berkeadilan, AI dapat menjadi suluh harapan—bagaikan cahaya penuntun bagi umat manusia

saat mengarungi badai. Peluang itu ada di depan mata, namun persoalan mendasar yang abadi tetap menuntut jawaban.

DAFTAR PUSTAKA

Afendi, A. (2025). *Pengantar Manajemen Dan Bisnis: Strategi, Inovasi, Dan Tantangan Di Era Digital*. Cv Eureka Media Aksara.

Aji, G. S., & Mala, I. K. (2024). Meningkatkan Kualitas Sdm Untuk Mencapai Keunggulan Kompetitif Perusahaan Di Era Digital: Tren, Inovasi, Dan Tantangan. *Jurnal Manajemen Dan Ekonomi Kreatif*, *2*(3), 01-17.

Amelica, Y. Z., Suci, R. A., Anggita, N. D., Aswidah, Z. R., & Prameswari, A. I. (2025). Strategi Manajemen Inovasi Dalam Meningkatkan Daya Saing Organisasi Di Era Digital. *At-Taklim: Jurnal Pendidikan Multidisiplin*, *2*(7), 411-424.

Arabiah, A., Darmi, D., Amidin, A., Warisno, A., & Tajuddin, N. (2026). Manajemen Perubahan Di Era Digital: Tantangan Dan Peluang Bagi Adaptasi Organisasi. *Jurnal Penkomi: Kajian Pendidikan Dan Ekonomi*, *9*(2), 70-77.

Aripkah, N., & Asufie, K. N. (2023, December). Peran Pemuda Di Era Digitalisasi Dalam Menghadapi Perubahan Iklim Dengan Teknologi Dan Inovasi. In *Prosiding Sensosio (Seminar Nasional Prodi Sosiologi)* (Vol. 4, No. 1, Pp. 366-386).

Asdar, M., Abdullah, M. W., & Parmitasari, R. D. A. (2023). Pengendalian Strategi Bisnis Di Era Digital: Inovasi Ekonomi Islam Di Indonesia. *Jovishe: Journal Of Visionary Sharia Economy*, *2*(1), 1-13.

Asikin, M. Z., & Fadilah, M. O. (2024). Masa Depan Kewirausahaan Dan Inovasi: Tantangan Dan Dinamika Dalam Era Digital. *Jurnal Syntax Admiration*, *5*(1), 303-310.

Asrul, A., Putra, A., & Rajab, M. (2024). Transpormasi Bisnis Di Era Digital: Peluang, Tantangan, Dan Strategi Inovasi. *Jurnal Minfo Polgan*, *13*(2), 2294-2298.

Damanik, F. H. S., Sirait, H., Minarsi, A., Abae, I., Hendratni, T. W., & Purba, J. H. V. (2025). *Transformasi Ekonomi: Inovasi Dan Pertumbuhan Ekonomi Global Di Abad Ke-21*. Star Digital Publishing.

Darsana, I. M., & Se, M. (2023). Perubahan Iklim Dan Dampaknya Terhadap Bisnis Pariwisata. *Pengantar Bisnis Pariwisata: Perhotelan, Food And Beverage Service, Dan Pengembangan Destinasi Wisata*, *179*.

Firdaus, F. Z., & Anisa, N. (2025). Mixed Methode: Transformasi Digital, Kepemimpinan Agile, Dan Praktik Green Innovation Dalam Meningkatkan Kinerja Dan Keberlanjutan

Perusahaan Di Indonesia Pada Era Digitalisasi Global. *Jurnal Ekonomi, Akutansi Dan Organisasi*, *2*(3), 214-229.

Hartatik, H., Rukmana, A. Y., Efitra, E., Mukhlis, I. R., Aksenta, A., Ratnaningrum, L. P. R. A., & Efdison, Z. (2023). *Tren Technopreneurship: Strategi & Inovasi Pengembangan Bisnis Kekinian Dengan Teknologi Digital*. Pt. Sonpedia Publishing Indonesia.

Hidayat, W. H., & Kholik, N. (2024). Implikasi Hukum Atas Perubahan Bisnis Umkm: Strategi Adaptasi Era Digital Dan E-Commerce Di Indonesia. *Jurnal Analisis Hukum*, *7*(1), 70-84.

Hindarwati, E. N., Munawar, A., Judijanto, L., Lukito, D., Budiman, D., Sya'rani, R., ... & Agustin, D. (2024). *Inovasi Bisnis: Membangun Keunggulan Bersaing Di Era Digital*. Pt. Green Pustaka Indonesia.

Isna, M., & Rahman, D. (2026). Tinjauan Literatur: Tantangan Dan Strategi Pengembangan Agribisnis Inklusif Dalam Menghadapi Perubahan Iklim Dan Transisi Ekonomi Hijau. *Jurnal Media Akademik (Jma)*, *4*(8).

Judijanto, L., Denashurya, P. N. I., & Syarweny, N. (2025). *Manajemen Bisnis: Strategi, Inovasi, Dan Kepemimpinan*. Pt. Sonpedia Publishing Indonesia.

Julianti, S. N., & Mala, I. K. (2025). Strategi Inovatif Dalam Mendorong Kemajuan Bisnis Di Era Digital. *Multilingual: Journal Of Universal Studies*, *5*(1), 186-201.

Juniansyah, M. A., Rosyidah, D. M., Pahrijal, R., & Ardhiyansyah, A. (2026). *Ketahanan Bisnis Di Era Digital: Bagaimana Adaptasi Dan Inovasi Menyelamatkan Umkm*. Pt Arunika Aksa Karya.

Mardikaningsih, R., & Darmawan, D. (2023). Strategi Inovasi Bisnis Sebagai Upaya Peningkatan Keunggulan Kompetitif Dan Pertumbuhan Bisnis Umkm Industri Kreatif Di Era Digital. *Global Leadership Organizational Research In Management*, *1*(4), 371-386.

Maria, V., Rizky, S. D., & Akram, A. M. (2024). Mengamati Perkembangan Teknologi Dan Bisnis Digital Dalam Transisi Menuju Era Industri 5.0. *Wawasan: Jurnal Ilmu Manajemen, Ekonomi Dan Kewirausahaan*, *2*(3), 175-187.

Masriah, I., Hotimah, E., & Sugiyanti, A. (2024). Tantangan Dan Solusi Bisnis Umkm Di Era Digital. *Jppi: Jurnal Pengabdian Pelita Insani*, *1*(01), 12-20.

Meak, T. S., Losa, T. E., & Astika, S. (2025). Pemanfaatan Teknologi Informasi Dan Komunikasi (Tik) Dalam Strategi Pemerintah Kabupaten Sikka Untuk Mengatasi Perubahan Iklim Dan Mendorong Pembangunan Berkelanjutan Di Bidang Pertanian Melalui Kolaborasi Sektor Swasta Dan Investor. *Increate-Inovasi Dan Kreasi Teknologi*, *11*(1).

Noor Rizkiyah, S. P., Mahfudlotul'ula, M. P., Prihantini, C. I., Prasada, I. Y., Suhartini, I., Baladina, M. D. N., & Sp, M. Masa Depan Ekonomi Pertanian: Menyikapi Perubahan Iklim Dan Era Digital.

Nurhidayah, I. (2024). *Analisis Kesiapan Koperasi Alfa Mar'atus Sholihah Kota Cirebon Dalam Meningkatka Daya Saing Diera Digital Melalui Inovasi Produk Dan Layanan Perspektif Hukum Ekonomi Syariah* (Doctoral Dissertation, S1-Hukum Ekonomi Syariah Uin Ssc).

Oktavianto, R. (2021). Inovasi Pembelajaran Produk Kreatif Dan Kewirausahaan Berbasis Etika Bisnis Digital Dan Lingkungan Untuk Membentuk Wirausaha Anti Cyberfraud Dan Pro Lingkungan. *Learning And Curriculum Inovation Paper*, *1*, 0-10.

Priliana, L., Evriliani, M., & Astuti, D. (2024). Strategi Bisnis Berkelanjutan Dalam Era Digital: Tantangan Dan Peluang. *Journal Of Business Economics And Management| E-Issn: 3063-8968*, *1*(2), 157-160.

Priputranto, M. A., Santosa, W., Darasih, R., & Widowati, D. (2025). Pengaruh Kemampuan Digital Terhadap Kinerja Inovasi Hijau: Peran Mediasi Kolaborasi Rantai Pasok Hijau Dan Moderasi Kesadaran Lingkungan Manajemen Puncak. *Paradoks: Jurnal Ilmu Ekonomi*, *8*(3), 1313-1327.

Putra, K. K. S., Rozaki, Z., Wulandari, R., & Sari, L. M. (2025, January). Peluang Dan Tantangan Startup Sociopreneurship Dalam Mengembangkan Solusi Teknologi Ramah Lingkungan Di Era Digital. In *Seminar Nasional Agribisnis* (Vol. 2, No. 1, Pp. 42-49).

Putri, D. N., & Adinugraha, H. H. (2025). Inovasi Produk Dan Layanan Halal Sebagai Strategi Menangani Isu Keberlanjutan Dan Perubahan Iklim Global. *Jurnal Bersama Ilmu Ekonomi (Ekonom)*, *1*(4), 266-274.

Rachman, D. F., Amri, S., & Innuddin, M. (2024). Pelatihan Technopreneurship Di Era Digital: Strategi Pemberdayaan Wirausaha Lokal Menuju Transformasi Digital Berkelanjutan. *Jurnal Ilmiah Pengabdian Dan Inovasi*, *3*(2), 199-210.

Rifiyanti, H. (2026). Transformasi Bisnis Digital Dalam Mendukung Keberlanjutan Lingkungan. *Jurnal Tecnoscienza*, *10*(2), 341-353.

Rokhimah, A., & Nurdiana, R. (2024). Transformasi Bisnis Menuju Ekonomi 5.0: Strategi Adaptasi Dan Inovasi. *Jurnal Kajian Dan Penalaran Ilmu Manajemen*, *2*(2), 101-109.

Rosmayati, S., Maulana, A., & Gunadi, T. (2024). Peluang Dan Tantangan Ekonomi Bisnis Dan Kesehatan Di Era Society 5.0. *Jurnal Ilmiah Manajemen*, *15*(1).

Samintang, S. (2024). *Revitalisasi Profesionalisme: Pengembangan Kerangka Keterampilan Akuntan Berbasis Digital Dan Kesadaran Iklim* (Doctoral Dissertation, Universitas Hasanuddin).

Sarman, R., Affandi, A., & Djulius, H. (2024). Peran Iklim Usaha Untuk Mendorong Inovasi Digital Dan Peningkatan Kinerja Pengusaha Nahdliyin: The Role Of Business Climate In Encouraging Digital Innovation And Improving The Performance Of Nahdliyin Entrepreneurs. *Jurnal Ilmiah Karawang*, *2*(02), 15-28.

Setiawan, Z., Nurdiansyah, N., Kushariyadi, K., & Sari, M. D. (2024). *Strategi Pemasaran: Konsep Dan Inovasi Pemasaran Di Era Digital*. Pt. Sonpedia Publishing Indonesia.

Sharapova, K. J., & Ferinia, R. (2026). Literature Review On Models Of Business Environment Dynamics In The Digital Context. *Synergy: Journal Of Business, Finance And Management*, *2*(1), 34-42.

Sitasi, C. (2024). Perubahan Kebiasaan Belanja Masyarakat Indonesia Di Era Digital: Peluang Dan Tantangan Ekonomi Fatun.

Sutopo, S. (2025). Transformasi Model Bisnis Melalui Penerapan Teknologi Informasi Untuk Mendorong Inovasi Dan Nilai Bisnis: Studi Literatur. *Journal Of Information Systems Management And Digital Business*, *3*(1), 70-84.

Triatmojo, S. B., & Astuti, D. (2025). Strategi Bisnis Yang Berkelanjutan Melalui Inovasi Dalam Model Operasional Di Era Digitalisasi. *Journal Of Business Economics And Management| E-Issn: 3063-8968*, *1*(3), 305-310.

Ulya, M. (2024). Revitalisasi Strategi Inovasi Ekonomi Bisnis Di Era Digital Berkelanjutan Untuk Gen Z. *Reinforce: Journal Of Sharia Management*, *3*(2), 150-160.

Wahyudi, A., Citra, M., & Salsabillah, S. (2025). Risiko Iklim Dan Ekonomi Digital: Tantangan Bagi Startup Dan Umkm. *Jurnal Ruang Ekonomika (Ruang Ilmiah: Ekonomi Dan Bisnis)*, *1*(1), 197-207.

Widigdo, A. M. N., Polim, A., Djou, S. H. N., Adielyani, D., Mandagi, D. W., & Mahadi, N. R. P. (2026). *Inovasi Digital Dan Keberlanjutan Bisnis*. Cv Get Press Indonesia.

Winarno, R. A., & Lestari, Y. M. (2025, December). Strategies For Digital Technology–Based Modern Agricultural Transformation: A Literature Review On The Role Of The Millennial Generation In Driving Sustainable Agricultural Innovation In The Digital Era: Strategi Transformasi Pertanian Modern Berbasis Teknologi Digital: Studi Literatur Tentang Peran Generasi Milenial Dalam Mendorong Inovasi Pertanian Berkelanjutan Di Era Digital. In *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Pembangunan Pertanian Bogor* (Vol. 3, No. 3, Pp. 474-490).

PERUBAHAN IKLIM INOVASI BISNIS *di Era Digital*

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, ilmu sosiologi dan ilmu hukum. 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), Ilmu Perpajakan.

Penulis adalah pendiri dari Universitas Sains dan Teknologi Komputer (Universitas STEKOM) dan juga seorang dosen yang memiliki Jabatan Fungsional Akademik Lektor Kepala (Associate Professor) yang telah menghasilkan puluhan Buku Ajar ber ISBN, HAKI dari beberapa karya cipta dan Hak Paten pada produk IPTEK. Sejak tahun 2023 penulis tercatat sebagai Dosen luar biasa di Fakultas Ekonomi & Bisnis (FEB) Universitas Diponegoro Semarang. Penulis juga terlibat dalam berbagai organisasi profesi dan industri yang terkait dengan dunia usaha dan industri, khususnya dalam pengembangan sumber daya manusia yang unggul untuk memenuhi kebutuhan dunia kerja secara nyata.

YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

PENERBIT :
YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK
Jl. Majapahit No. 605 Semarang
Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144
Email : penerbit_ypat@stekom.ac.id

ISBN 978-634-7695-59-8 (PDF)
9 786347 695598