



GREEN **INNOVATION** AND TECHNOLOGY MANAGEMENT

Penulis

Prof. Dr. Ir. Lalu Mulyadi, MT.

Ir. Fourry Handoko, ST., SS., MT., Ph.D., IPU., ASEAN Eng.

Prof. Dr. Ir. Julianus Hutabarat, MSIE.

rumpunduabelas 2026

**GREEN INNOVATION AND
TECHNOLOGY MANAGEMENT**

Copyright@Lalu Mulyadi,dkk

xii, 354 hlm., 15,5 cm x 23 cm

Hak cipta ada pada penulis

ISBN: 978-634-96845-8-3

Penulis: Prof. Dr. Ir. Lalu Mulyadi, MT.

Ir. Fourry Handoko, ST., SS., MT., Ph.D., IPU., ASEAN Eng.

Prof. Dr. Ir. Julianus Hutabarat, MSIE.

Perancang Sampul: A.Saiful. E

Tata Letak : A.Saiful. E

Cetakan I, Agustus 2026

Diterbitkan oleh:

Rumpun Dua Belas (R12 Grup)

Anggota Ikapi No. 364/JTI/2023

Jl. Terusan Surabaya No. 8 Klojen Kota Malang

Jawa Timur Indonesia

Email: rumpunduabelas@gmail.com

Website: <https://www.rumpunduabelas.com>

Layanan WhatsApp: 082177295690

Dicetak oleh:

Rasi Bintang Offset (R12 Grup)

Jatirejo 013/005 Ds. Sambirejo Kabupaten Trenggalek

Jawa Timur Indonesia

© All Rights Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak
sebagian atau seluruh isi buku dengan cara
dan bentuk apapun, tanpa izin tertulis dari

Rumpun Dua Belas (R12 Grup).



PENGANTAR PENULIS

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan karunia-Nya buku *Green Innovation and Technology Management* ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun sebagai salah satu kontribusi akademik dalam memperkaya literatur mengenai inovasi hijau, teknologi berkelanjutan, dan manajemen teknologi yang semakin relevan dalam menghadapi tantangan pembangunan abad ke-21.

Perubahan iklim, degradasi lingkungan, krisis energi, peningkatan limbah, hilangnya keanekaragaman hayati, serta berbagai persoalan ekologis lainnya telah menjadi isu global yang memengaruhi hampir seluruh aspek kehidupan manusia. Pada saat yang sama, perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi berlangsung sangat cepat, menghadirkan berbagai peluang sekaligus tantangan baru. Dalam situasi tersebut, diperlukan pendekatan pembangunan yang tidak hanya berorientasi pada pertumbuhan ekonomi, tetapi juga mampu menjaga keseimbangan lingkungan dan meningkatkan kesejahteraan sosial secara berkelanjutan.

Konsep *green innovation* atau inovasi hijau hadir sebagai salah satu solusi strategis untuk menjawab kebutuhan tersebut. Inovasi hijau tidak sekadar berbicara tentang teknologi ramah lingkungan, tetapi juga mencakup pembaruan dalam produk, proses, layanan, model bisnis, tata kelola organisasi, dan sistem sosial yang mampu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan sekaligus menciptakan nilai ekonomi dan sosial. Oleh

karena itu, inovasi hijau menjadi bagian penting dalam upaya mewujudkan pembangunan berkelanjutan di berbagai sektor.

Buku ini disusun dengan tujuan memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai hubungan antara inovasi hijau dan manajemen teknologi. Pembahasan dilakukan secara sistematis mulai dari konsep dasar, teori, model, strategi, hingga berbagai contoh penerapan pada sektor energi, industri, transportasi, bangunan, pertanian, serta usaha mikro, kecil, dan menengah. Selain itu, buku ini juga mengkaji perkembangan teknologi digital, ekonomi sirkular, manajemen rantai pasok hijau, pengukuran kinerja keberlanjutan, hingga arah masa depan inovasi hijau dalam konteks transformasi global.

Sebagai bidang yang bersifat multidisipliner, Green Innovation and Technology Management mengintegrasikan berbagai perspektif keilmuan seperti manajemen, teknologi, ekonomi lingkungan, kebijakan publik, rekayasa, kewirausahaan, dan studi keberlanjutan. Oleh karena itu, buku ini dirancang agar dapat digunakan oleh mahasiswa, dosen, peneliti, praktisi bisnis, pengambil kebijakan, konsultan, serta masyarakat umum yang memiliki perhatian terhadap isu keberlanjutan dan transformasi teknologi.

Dalam penyusunannya, buku ini mengacu pada berbagai sumber ilmiah, laporan organisasi internasional, hasil penelitian terkini, serta praktik-praktik terbaik yang telah diterapkan di berbagai negara. Penyajian materi dilakukan dengan pendekatan ilmiah populer agar konsep-konsep yang kompleks dapat dipahami secara lebih mudah tanpa mengurangi kedalaman substansi akademiknya.

Buku ini terdiri atas delapan belas bab yang membahas berbagai aspek penting dalam inovasi hijau dan manajemen teknologi. Pembahasan diawali dengan pengenalan konsep dasar green innovation, dilanjutkan dengan manajemen teknologi dalam perspektif keberlanjutan, teknologi hijau dan teknologi bersih,

proses adopsi dan difusi inovasi hijau, ekonomi sirkular, inovasi pada sektor energi dan industri, pemanfaatan teknologi digital, pengukuran dampak lingkungan, pengembangan ekosistem inovasi, kewirausahaan hijau, pendidikan keberlanjutan, hingga tantangan dan peluang masa depan. Struktur tersebut dirancang untuk memberikan pemahaman yang utuh, mulai dari landasan konseptual hingga implementasi praktis.

Penulis menyadari bahwa perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi berlangsung sangat dinamis. Oleh karena itu, isi buku ini tidak dimaksudkan sebagai kajian yang final, melainkan sebagai dasar pemahaman yang dapat terus dikembangkan melalui penelitian, diskusi, dan pengalaman praktis di lapangan. Kritik, masukan, dan saran konstruktif dari pembaca akan sangat berharga untuk penyempurnaan pada edisi-edisi berikutnya.

Akhirnya, penulis berharap buku ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, peningkatan kualitas pendidikan, penguatan kapasitas organisasi, serta percepatan transformasi menuju sistem ekonomi dan teknologi yang lebih hijau, inklusif, tangguh, dan berkelanjutan. Semoga buku ini dapat menjadi salah satu referensi yang membantu pembaca memahami pentingnya inovasi hijau sebagai fondasi pembangunan masa depan.

Penulis



DAFTAR ISI

PENGANTAR PENULIS	i
DAFTAR ISI	v

BAB 1

PENDAHULUAN	1
▪ Peran Penting <i>Green Innovation and Technology Management</i> ----	2
▪ Perubahan Paradigma Pembangunan Menuju Keberlanjutan	4
▪ Tantangan Lingkungan, Energi, dan Sumber Daya Global ----	6
▪ Peran Teknologi dalam Menjawab Isu Keberlanjutan	7
▪ <i>Green Innovation</i> sebagai Strategi Pembangunan Masa Depan	9
▪ Ruang Lingkup <i>Green Innovation and Technology Management</i>	11

BAB 2

KONSEP DASAR <i>GREEN INNOVATION</i>	15
▪ Pengertian <i>Green Innovation</i>	17
▪ Karakteristik Inovasi Hijau	19
▪ Tujuan dan Manfaat <i>Green Innovation</i>	23
▪ Dimensi dalam <i>Green Innovation</i>	25
▪ <i>Green Innovation</i> dalam Kehidupan Sehari-hari	27
▪ Contoh Penerapan <i>Green Innovation</i>	28

BAB 3

TECHNOLOGY MANAGEMENT DALAM PERSPEKTIF

KEBERLANJUTAN -----	31
▪ Pengertian <i>Technology Management</i> -----	33
▪ Peran Manajemen Teknologi dalam Organisasi Modern ----	35
▪ Hubungan Teknologi, Inovasi, dan Keunggulan Kompetitif-----	37
▪ Manajemen Teknologi Berbasis Efisiensi Sumber Daya -----	39
▪ Strategi Pengelolaan Teknologi Ramah Lingkungan-----	41
▪ Tantangan Manajemen Teknologi di Era Transformasi Hijau-----	42
▪ Integrasi <i>Technology Management</i> dengan <i>Sustainable Development</i> -----	44

BAB 4

GREEN TECHNOLOGY DAN CLEAN TECHNOLOGY-----

▪ Pengertian <i>Green Technology</i> -----	49
▪ Pengertian <i>Clean Technology</i> -----	51
▪ Perbedaan <i>Green Technology</i> dan <i>Clean Technology</i> -----	52
▪ Prinsip Dasar Teknologi Ramah Lingkungan-----	55
▪ Teknologi Hemat Energi dan Rendah Emisi -----	57
▪ Teknologi Pengelolaan Limbah dan Daur Ulang -----	59
▪ Teknologi Air Bersih dan Sanitasi Berkelanjutan -----	60
▪ <i>Green Technology</i> dalam Rumah Tangga, Industri, dan Perkotaan-----	63

BAB 5

TEORI INOVASI DAN DIFUSI TEKNOLOGI HIJAU -----

▪ Konsep Dasar Inovasi -----	69
▪ Jenis-Jenis Inovasi -----	71
▪ <i>Technology Push</i> dan Market Pull dalam Inovasi Hijau -----	73
▪ <i>Technology Life Cycle</i> -----	75
▪ <i>Diffusion of Innovation</i> dalam Masyarakat dan Organisasi ----	77

▪ Faktor Pendorong dan Penghambat Adopsi Teknologi Hijau-----	79
▪ Edukasi, Budaya, dan Kesadaran Lingkungan dalam Difusi Teknologi-----	80

BAB 6

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS, ESG, DAN GREEN

<i>INNOVATION</i>-----	83
▪ Konsep <i>Sustainable Development Goals</i> -----	84
▪ Hubungan <i>Green Innovation</i> dengan SDGs -----	87
▪ Pengertian <i>Environmental, Social, and Governance</i> -----	89
▪ ESG sebagai Kerangka Penilaian Keberlanjutan -----	91
▪ <i>Green Innovation</i> untuk Meningkatkan Kinerja ESG-----	93
▪ Peran Pemerintah, Swasta, dan Masyarakat dalam Pencapaian SDGs-----	94
▪ Strategi Integrasi SDGs dan ESG dalam Program Inovasi Hijau-----	96

BAB 7

EKONOMI SIRKULAR DAN MODEL BISNIS HIJAU -----99

▪ Pengertian Ekonomi Sirkular -----	101
▪ Perbedaan Ekonomi Linear dan Ekonomi Sirkular-----	103
▪ Prinsip <i>Reduce, Reuse, Recycle, Recover, dan Redesign</i> -----	105
▪ <i>Green Business Model</i> -----	107
▪ <i>Value Creation</i> dalam Bisnis Berkelanjutan -----	109
▪ Inovasi Produk dan Layanan Berbasis Ekonomi Sirkular ---	110
▪ Peluang Usaha Hijau bagi Pengusaha dan UMKM -----	112
▪ Studi Penerapan Ekonomi Sirkular dalam Industri dan Masyarakat-----	114

BAB 8

***GREEN INNOVATION DALAM SEKTOR ENERGI* ----- 117**

▪ Tantangan Energi Global dan Nasional -----	119
▪ Energi Terbarukan sebagai Solusi Berkelanjutan -----	121
▪ Teknologi Surya, Angin, Air, Biomassa, dan Panas Bumi----	123

▪ Efisiensi Energi dalam Rumah Tangga, Gedung, dan Industri -----	125
▪ <i>Smart Grid</i> dan Manajemen Energi Digital-----	127
▪ Inovasi Penyimpanan Energi-----	129
▪ Peran Masyarakat dan Dunia Usaha dalam Transisi Energi Hijau-----	132

BAB 9

GREEN INNOVATION DALAM INDUSTRI DAN

MANUFAKTUR ----- 135

▪ Konsep <i>Green Manufacturing</i> -----	137
▪ <i>Cleaner Production</i> dalam Proses Industri -----	139
▪ Efisiensi Bahan Baku dan Energi-----	141
▪ Pengurangan Limbah dan Emisi Industri-----	142
▪ <i>Green Supply Chain Management</i> -----	144
▪ Inovasi Material Ramah Lingkungan -----	146
▪ Industri 4.0 dan Transformasi Manufaktur Hijau -----	148
▪ Tantangan Industri dalam Menerapkan Teknologi Hijau----	150

BAB 10

GREEN INNOVATION DALAM BANGUNAN, KOTA, DAN

INFRASTRUKTUR----- 155

▪ Konsep <i>Green Building</i> -----	156
▪ Efisiensi Energi dan Air pada Bangunan-----	159
▪ Material Bangunan Ramah Lingkungan -----	160
▪ <i>Smart Building</i> dan Teknologi Digital -----	162
▪ <i>Green Infrastructure</i> dalam Perkotaan -----	164
▪ Transportasi Berkelanjutan dan Mobilitas Hijau-----	167
▪ Kota Hijau, Kota Cerdas, dan Kota Berkelanjutan-----	168
▪ Peran Arsitektur dan Perencanaan Kota dalam Inovasi Hijau-----	171

BAB 11

DIGITAL TECHNOLOGY UNTUK GREEN INNOVATION ----- 175

▪ Transformasi Digital dan Keberlanjutan -----	176
--	-----

▪ Internet of Things untuk Monitoring Lingkungan -----	178
▪ <i>Artificial Intelligence</i> dalam Efisiensi Energi dan Sumber Daya -----	180
▪ <i>Big Data</i> untuk Pengambilan Keputusan Berkelanjutan-----	183
▪ <i>Blockchain</i> untuk Transparansi Rantai Pasok Hijau-----	185
▪ <i>Digital Twin</i> untuk Simulasi Teknologi dan Infrastruktur ---	187
▪ Peluang dan Risiko Teknologi Digital dalam Inovasi Hijau-----	189

BAB 12

***LIFE CYCLE ASSESSMENT DAN CARBON FOOTPRINT* ----- 193**

▪ Pengertian <i>Life Cycle Assessment</i> -----	194
▪ Analisis Dampak Lingkungan Produk dan Teknologi -----	198
▪ Pengertian <i>Carbon Footprint</i> -----	200
▪ Pengukuran Emisi Karbon pada Produk, Proses, dan Organisasi-----	202
▪ Strategi Pengurangan Jejak Karbon-----	204
▪ Environmental Performance Indicator-----	207
▪ Pemanfaatan LCA dan <i>Carbon Footprint</i> dalam Keputusan Manajemen-----	209

BAB 13

***TECHNOLOGY READINESS LEVEL DAN PENILAIAN TEKNOLOGI HIJAU* ----- 213**

▪ Konsep Technology Readiness Level-----	214
▪ Tahapan Kesiapan Teknologi-----	215
▪ <i>Green Technology Assessment</i> -----	217
▪ <i>Sustainability Assessment</i> pada Teknologi-----	219
▪ Kriteria Teknis, Ekonomi, Sosial, dan Lingkungan-----	221
▪ Analisis Risiko dalam Pengembangan Teknologi Hijau-----	223
▪ Strategi Komersialisasi Teknologi Hijau -----	225
▪ Pengambilan Keputusan dalam Pemilihan Teknologi Berkelanjutan-----	227

BAB 14

GREEN INNOVATION ECOSYSTEM ----- 229

- Pengertian Ekosistem Inovasi Hijau-----230
- Peran Pemerintah dalam Kebijakan dan Regulasi -----231
- Peran Perguruan Tinggi dalam Riset dan Pendidikan-----233
- Peran Industri dalam Pengembangan dan Komersialisasi Teknologi -----235
- Peran Masyarakat dan Komunitas dalam Adopsi Inovasi Hijau -----237
- Kolaborasi Pentahelix dalam Inovasi Hijau -----239
- Inkubator Bisnis, *Startup* Hijau, dan Kewirausahaan Berkelanjutan-----241
- Strategi Penguatan Ekosistem Inovasi Hijau di Indonesia---243

BAB 15

STRATEGI IMPLEMENTASI GREEN INNOVATION AND TECHNOLOGY MANAGEMENT----- 247

- Perencanaan Strategis Inovasi Hijau -----248
- *Roadmap* Pengembangan Teknologi Hijau -----250
- Manajemen Perubahan dalam Organisasi -----252
- Pembiayaan dan Investasi Teknologi Hijau -----254
- Kebijakan, Regulasi, dan Insentif -----255
- Tata Kelola dan Kepemimpinan Berkelanjutan-----257
- Monitoring dan Evaluasi Program Inovasi Hijau -----259
- Hambatan Implementasi dan Strategi Penyelesaiannya -----260

BAB 16

GREEN ENTREPRENEURSHIP DAN PELUANG USAHA BERKELANJUTAN ----- 263

- Pengertian *Green Entrepreneurship* -----264
- Karakteristik Pengusaha Hijau -----265
- Peluang Bisnis Berbasis Lingkungan-----267
- Inovasi Produk Hijau untuk Pasar Modern -----269
- UMKM dan Ekonomi Hijau -----271

- Strategi Pemasaran Produk Ramah Lingkungan-----273
- Social Enterprise dan Bisnis Berbasis Dampak -----275
- Tantangan dan Prospek *Green Entrepreneurship* -----276

BAB 17

GREEN INNOVATION UNTUK MASYARAKAT UMUM DAN PENDIDIKAN ----- 279

- Pentingnya Literasi Inovasi Hijau bagi Masyarakat-----280
- Pendidikan Lingkungan di Sekolah dan Perguruan Tinggi -----282
- Peran Guru dan Dosen dalam Membangun Kesadaran Keberlanjutan -----284
- Perilaku Ramah Lingkungan dalam Kehidupan Sehari-hari -----286
- Komunitas Hijau dan Gerakan Sosial Lingkungan-----288
- Teknologi Sederhana Ramah Lingkungan untuk Masyarakat-----290
- Partisipasi Publik dalam Program Inovasi Hijau-----291
- Membangun Budaya Inovasi Hijau di Masyarakat-----293

BAB 18

ARAH MASA DEPAN *GREEN INNOVATION AND TECHNOLOGY MANAGEMENT*----- 297

- Tren Global Inovasi Hijau-----298
- Teknologi Masa Depan untuk Keberlanjutan -----299
- *Net Zero Emission* dan Dekarbonisasi-----301
- *Green Jobs* dan Kebutuhan Kompetensi Baru-----303
- Peran Generasi Muda dalam Transformasi Hijau -----305
- Tantangan Etika dalam Pengembangan Teknologi Hijau -----307
- Masa Depan Industri, Kota, dan Masyarakat Berkelanjutan-----309
- Tranformasi Lingkungan dengan Teknologi Sinergis -----311

DAFTAR PUSTAKA	315
GLOSARIUM	339
INDEKS	347
PROFIL PENULIS	355



BAB 1

PENDAHULUAN

Perubahan lingkungan global, percepatan perkembangan teknologi, pertumbuhan industri, urbanisasi, serta meningkatnya kebutuhan energi dan sumber daya telah menempatkan isu keberlanjutan sebagai agenda penting dalam pembangunan masa kini. Berbagai persoalan seperti perubahan iklim, pencemaran lingkungan, penurunan kualitas ekosistem, krisis energi, bertambahnya limbah, dan keterbatasan sumber daya alam menunjukkan bahwa pola pembangunan konvensional tidak lagi memadai untuk menjawab tantangan masa depan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan baru yang mampu mengintegrasikan kemajuan teknologi, inovasi, manajemen, dan tanggung jawab ekologis secara lebih seimbang.

Dalam konteks tersebut, *green innovation and technology management* menjadi salah satu bidang kajian yang semakin relevan. *Green innovation* menekankan pentingnya penciptaan produk, proses, layanan, sistem, dan model bisnis yang mampu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Sementara itu, *technology management* berperan mengelola proses pemilihan, pengembangan, penerapan, evaluasi, dan pengendalian teknologi agar dapat memberikan manfaat ekonomi, sosial, dan ekologis secara berkelanjutan. Keduanya saling melengkapi dalam membangun

sistem pembangunan yang tidak hanya produktif, tetapi juga efisien, rendah karbon, adaptif, dan bertanggung jawab terhadap lingkungan.

Kajian mengenai *green innovation and technology management* penting karena inovasi hijau tidak dapat berjalan secara optimal tanpa pengelolaan teknologi yang tepat. Teknologi ramah lingkungan membutuhkan dukungan strategi manajemen, kebijakan, sumber daya manusia, investasi, kelembagaan, budaya organisasi, dan kolaborasi antarpemangku kepentingan. Dengan demikian, pengembangan teknologi hijau tidak hanya menjadi persoalan teknis, tetapi juga berkaitan dengan cara organisasi, industri, pemerintah, perguruan tinggi, dan masyarakat mampu mengelola perubahan menuju keberlanjutan. Inovasi hijau bukan sekadar pilihan tambahan dalam pembangunan modern, melainkan kebutuhan strategis demi menjawab krisis lingkungan, memperkuat daya saing, meningkatkan efisiensi sumber daya, dan membangun masa depan yang lebih berkelanjutan.

PERAN PENTING GREEN INNOVATION AND TECHNOLOGY MANAGEMENT

Green innovation and technology management merupakan bidang kajian yang semakin penting dalam perkembangan ilmu manajemen, teknologi, ekonomi, dan pembangunan berkelanjutan. Konsep ini lahir dari kesadaran bahwa pertumbuhan ekonomi tidak dapat lagi dipisahkan dari tanggung jawab lingkungan, efisiensi sumber daya, dan keadilan sosial. Dalam konteks kontemporer, inovasi tidak hanya diukur dari kemampuan menghasilkan produk baru, tetapi juga dari sejauh mana inovasi tersebut mampu mengurangi dampak ekologis, menekan emisi, meningkatkan efisiensi energi, serta menciptakan nilai berkelanjutan bagi masyarakat dan dunia usaha (Schiederig, Tietze, & Herstatt, 2012).

Pentingnya *green innovation and technology management* juga berkaitan dengan perubahan cara pandang terhadap teknologi. Teknologi tidak lagi dipahami semata-mata sebagai alat peningkatan produktivitas, tetapi sebagai instrumen strategis untuk menjawab krisis lingkungan, perubahan iklim, keterbatasan energi, dan tekanan sumber daya alam. Oleh karena itu, pengelolaan teknologi hijau memerlukan pendekatan manajerial yang sistematis, mulai dari perencanaan, pengembangan, adopsi, difusi, evaluasi, hingga pengendalian dampaknya terhadap lingkungan dan masyarakat (Rennings, 2000).

Dalam dunia industri, *green innovation* menjadi kebutuhan strategis karena perusahaan menghadapi tekanan regulasi, tuntutan pasar, kesadaran konsumen, dan kebutuhan daya saing jangka panjang. Perusahaan yang mampu mengintegrasikan inovasi hijau ke dalam proses produksi, rantai pasok, model bisnis, dan strategi pemasaran cenderung memiliki peluang lebih besar untuk mencapai keunggulan kompetitif. Studi tentang *green innovation* menunjukkan bahwa inovasi hijau dapat berperan dalam meningkatkan kinerja lingkungan sekaligus memperkuat performa bisnis, terutama ketika didukung oleh orientasi pasar hijau dan praktik manajemen lingkungan yang baik (Tjahjadi et al., 2020).

Pada tingkat kebijakan publik, *green innovation and technology management* menjadi bagian penting dari strategi pembangunan hijau. OECD menegaskan bahwa *green growth* membutuhkan instrumen kebijakan, pengukuran, dan inovasi agar pertumbuhan ekonomi tetap berjalan tanpa merusak aset alam yang menjadi dasar kesejahteraan manusia. Dengan demikian, inovasi hijau bukan hanya urusan sektor swasta, melainkan juga agenda pemerintah, perguruan tinggi, lembaga penelitian, komunitas, dan masyarakat sipil (OECD, 2011).

Bagi negara berkembang, termasuk Indonesia, *green innovation* memiliki posisi strategis karena pembangunan masih membutuhkan pertumbuhan ekonomi, perluasan infrastruktur,

industrialisasi, dan peningkatan kesejahteraan masyarakat. Namun, pembangunan tersebut harus diarahkan agar tidak mengulangi pola pembangunan lama yang boros energi, intensif emisi, dan eksploitatif terhadap sumber daya alam. Oleh karena itu, manajemen teknologi hijau menjadi penting untuk memastikan bahwa modernisasi industri, pembangunan kota, pengembangan wilayah, dan peningkatan kualitas hidup masyarakat dilakukan secara lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

PERUBAHAN PARADIGMA PEMBANGUNAN MENUJU KEBERLANJUTAN

Paradigma pembangunan telah mengalami perubahan mendasar dari orientasi pertumbuhan ekonomi semata menuju pembangunan berkelanjutan. Pada masa lalu, keberhasilan pembangunan sering diukur melalui indikator ekonomi seperti pertumbuhan Produk Domestik Bruto, peningkatan investasi, perluasan industri, dan pembangunan infrastruktur fisik. Namun, pendekatan tersebut sering mengabaikan biaya ekologis dan sosial yang muncul, seperti pencemaran, degradasi lahan, ketimpangan sosial, dan hilangnya keanekaragaman hayati (Meadows et al., 1972).

Perubahan paradigma ini diperkuat oleh lahirnya konsep sustainable development yang menekankan keseimbangan antara kebutuhan generasi sekarang dan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhannya. Gagasan ini menjadi dasar penting dalam penyusunan kebijakan global, terutama setelah diperkenalkan secara luas melalui laporan Brundtland. Dalam perspektif ini, pembangunan tidak boleh hanya mengejar keuntungan jangka pendek, tetapi harus mempertimbangkan keberlanjutan ekologis, sosial, ekonomi, dan kelembagaan (World Commission on Environment and Development, 1987).

Agenda 2030 untuk Pembangunan Berkelanjutan adalah memperkuat transformasi paradigma tersebut dengan menempatkan manusia, planet, kesejahteraan, perdamaian, dan kemitraan sebagai fondasi pembangunan global. Agenda ini menegaskan bahwa pengentasan kemiskinan, perlindungan lingkungan, pertumbuhan ekonomi inklusif, dan keadilan sosial merupakan agenda yang saling terkait dan harus dilaksanakan melalui kemitraan multipihak (United Nations, 2015).

Perubahan paradigma pembangunan juga dapat dilihat dari berkembangnya konsep *green economy*, *circular economy*, *low-carbon development*, dan *regenerative development*. *Green economy* sendiri menekankan pentingnya pertumbuhan ekonomi yang rendah karbon, hemat sumber daya, dan inklusif secara sosial. Sedangkan *circular economy* menekankan pengurangan limbah melalui prinsip *reduce, reuse, recycle, recovery*, dan *redesign*. Sementara itu, *regenerative development* bergerak lebih jauh dengan mendorong pembangunan yang tidak hanya mengurangi kerusakan, tetapi juga memulihkan ekosistem dan memperkuat kapasitas sosial masyarakat (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Dalam konteks manajemen teknologi, perubahan paradigma pembangunan menuntut pergeseran dari pendekatan linear menuju pendekatan sistemik. Teknologi tidak lagi dikembangkan hanya untuk meningkatkan produksi, tetapi juga untuk memperbaiki efisiensi energi, memperpanjang usia pakai produk, mengurangi limbah, memperbaiki rantai pasok, dan meningkatkan kualitas lingkungan. Oleh karena itu, teknologi hijau harus dipandang sebagai bagian dari sistem inovasi yang melibatkan riset, kebijakan, investasi, pendidikan, budaya organisasi, dan perilaku konsumen.

Dengan demikian, pembangunan berkelanjutan bukan sekadar slogan normatif, melainkan kerangka kerja strategis untuk mengubah cara manusia memproduksi, mengonsumsi, mengelola sumber daya, dan merancang masa depan. *Green innovation and*

technology management menjadi salah satu pendekatan penting untuk menjembatani kebutuhan pembangunan ekonomi dengan perlindungan lingkungan. Melalui pendekatan ini, keberlanjutan dapat diterjemahkan ke dalam strategi, kebijakan, teknologi, produk, proses, dan model bisnis yang lebih operasional.

TANTANGAN LINGKUNGAN, ENERGI, DAN SUMBER DAYA GLOBAL

Tantangan lingkungan global menjadi salah satu alasan utama mengapa *green innovation* semakin penting. Perubahan iklim, peningkatan suhu bumi, cuaca ekstrem, kenaikan muka air laut, krisis air, pencemaran udara, dan kerusakan ekosistem menunjukkan bahwa sistem pembangunan global sedang menghadapi tekanan serius. IPCC menegaskan bahwa perubahan iklim telah menimbulkan dampak luas terhadap sistem alam dan manusia, sehingga mitigasi dan adaptasi menjadi kebutuhan mendesak dalam kebijakan pembangunan global (IPCC, 2023).

Selain perubahan iklim, dunia juga menghadapi tantangan energi. Kebutuhan energi terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk, urbanisasi, industrialisasi, digitalisasi, dan peningkatan konsumsi masyarakat. Namun, ketergantungan pada energi fosil masih menjadi sumber utama emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, transisi menuju energi bersih, efisiensi energi, elektrifikasi, penyimpanan energi, dan teknologi rendah karbon menjadi agenda penting dalam pembangunan berkelanjutan (International Energy Agency, 2024).

Tantangan sumber daya global juga semakin kompleks. UNEP melalui Global Resources Outlook 2024 menekankan bahwa penggunaan sumber daya alam berhubungan langsung dengan krisis planet, termasuk perubahan iklim, kehilangan biodiversitas, dan pencemaran. Hal ini menunjukkan bahwa keberlanjutan tidak cukup hanya dibahas pada sisi energi, tetapi juga harus mencakup

material, air, pangan, lahan, mineral, dan sistem produksi-konsumsi secara keseluruhan (UNEP, 2024).

Tekanan terhadap sumber daya diperparah oleh pola ekonomi linear yang berorientasi pada ambil, produksi, konsumsi, dan buang. Pola ini menghasilkan limbah dalam jumlah besar, mempercepat ekstraksi bahan baku, dan menimbulkan beban ekologis yang semakin sulit dikendalikan. Dalam perspektif *green innovation*, tantangan ini harus dijawab melalui desain produk yang lebih tahan lama, penggunaan material terbarukan, daur ulang, efisiensi produksi, serta inovasi model bisnis berbasis sirkularitas.

Di sisi lain, tantangan lingkungan dan sumber daya tidak dapat dilepaskan dari aspek sosial dan ekonomi. Masyarakat miskin dan kelompok rentan sering menjadi pihak yang paling terdampak oleh krisis lingkungan, meskipun kontribusi mereka terhadap emisi dan kerusakan ekologis relatif lebih kecil. Oleh karena itu, inovasi hijau harus mengandung dimensi keadilan, inklusivitas, dan keterjangkauan agar teknologi berkelanjutan tidak hanya dapat diakses oleh kelompok ekonomi kuat, tetapi juga oleh masyarakat luas.

Dengan demikian, tantangan lingkungan, energi, dan sumber daya global menuntut pendekatan baru yang lebih integratif. *Green innovation and technology management* berperan sebagai kerangka yang menghubungkan ilmu pengetahuan, teknologi, manajemen, kebijakan, ekonomi, dan perilaku sosial. Melalui kerangka tersebut, tantangan global dapat diterjemahkan menjadi peluang inovasi yang menghasilkan solusi praktis, adaptif, dan berorientasi masa depan.

PERAN TEKNOLOGI DALAM MENJAWAB ISU KEBERLANJUTAN

Teknologi memiliki peran penting dalam menjawab isu keberlanjutan karena teknologi mampu mengubah cara manusia

memproduksi, mengonsumsi, mengelola energi, dan memanfaatkan sumber daya. Dalam konteks *green innovation*, teknologi tidak hanya dipahami sebagai perangkat keras, tetapi juga mencakup sistem, proses, metode, pengetahuan, dan model organisasi yang memungkinkan terjadinya perbaikan kinerja lingkungan. Oleh karena itu, teknologi hijau harus dilihat sebagai kombinasi antara penemuan teknis dan kemampuan manajerial untuk menerapkannya secara efektif (Kemp & Pearson, 2007).

Peran teknologi dalam keberlanjutan dapat dilihat pada pengembangan energi terbarukan, kendaraan listrik, bangunan hijau, smart grid, teknologi pengolahan limbah, pertanian presisi, material ramah lingkungan, dan sistem manufaktur bersih. Teknologi tersebut berkontribusi terhadap pengurangan emisi, peningkatan efisiensi, dan pengurangan ketergantungan terhadap sumber daya tak terbarukan. Dalam laporan energi global, IEA menunjukkan bahwa perkembangan teknologi energi bersih menjadi bagian penting dari transformasi sistem energi dunia dan memiliki implikasi langsung terhadap keamanan energi, emisi, dan pembangunan ekonomi (International Energy Agency, 2024).

Namun, teknologi tidak selalu otomatis menghasilkan keberlanjutan. Teknologi dapat menimbulkan dampak negatif jika dikembangkan tanpa mempertimbangkan siklus hidup produk, konsumsi energi, limbah elektronik, ketimpangan akses, dan konsekuensi sosial. Oleh karena itu, setiap teknologi perlu dievaluasi melalui pendekatan *life cycle assessment*, *carbon footprint analysis*, *sustainability assessment*, dan *technology readiness assessment*. Evaluasi tersebut penting untuk memastikan bahwa solusi teknologi benar-benar memberikan manfaat lingkungan secara menyeluruh, bukan hanya memindahkan masalah dari satu tahap ke tahap lain (ISO, 2006).

Peran teknologi juga semakin kuat melalui digitalisasi. *Artificial intelligence*, *Internet of Things*, *big data analytics*, *blockchain*, *digital twin*, dan sistem informasi geografis dapat digunakan untuk

memantau penggunaan energi, mengoptimalkan rantai pasok, memprediksi risiko lingkungan, mengelola kota pintar, serta meningkatkan transparansi dalam pengelolaan sumber daya. Dalam konteks manajemen teknologi, digitalisasi membuka peluang bagi pengambilan keputusan berbasis data yang lebih akurat, cepat, dan adaptif terhadap perubahan lingkungan.

Meskipun demikian, digitalisasi juga membutuhkan tata kelola yang bertanggung jawab. Penggunaan pusat data, komputasi intensif, perangkat elektronik, dan infrastruktur digital dapat meningkatkan konsumsi energi serta menghasilkan limbah elektronik. Oleh karena itu, konsep *green digital technology* menjadi penting agar transformasi digital tidak bertentangan dengan tujuan keberlanjutan. Teknologi digital perlu dikelola melalui prinsip efisiensi energi, desain perangkat berumur panjang, penggunaan energi terbarukan, keamanan data, dan inklusi digital.

Dengan demikian, teknologi berperan sebagai *enabler*, *accelerator* sekaligus objek pengelolaan dalam pembangunan berkelanjutan. *Green innovation and technology management* membantu memastikan bahwa teknologi tidak hanya dikembangkan karena canggih secara teknis, tetapi juga relevan secara sosial, layak secara ekonomi, dan bertanggung jawab secara ekologis. Inilah alasan mengapa penguasaan teknologi harus diimbangi dengan kapasitas manajerial, kebijakan publik, etika, dan kesadaran keberlanjutan.

GREEN INNOVATION SEBAGAI STRATEGI PEMBANGUNAN MASA DEPAN

Green innovation dapat dipahami sebagai proses pengembangan produk, proses, layanan, sistem, atau model bisnis baru yang bertujuan mengurangi dampak lingkungan sekaligus menciptakan nilai ekonomi dan sosial. Inovasi hijau tidak hanya berorientasi pada efisiensi teknis, tetapi juga pada transformasi cara

berpikir, cara bekerja, dan cara mengelola sumber daya. Dengan demikian, *green innovation* menjadi strategi pembangunan masa depan karena mampu menghubungkan agenda ekonomi, lingkungan, dan sosial dalam satu kerangka perubahan (Rennings, 2000).

Sebagai strategi pembangunan, *green innovation* mendorong organisasi dan negara untuk keluar dari pola pembangunan konvensional yang bergantung pada eksploitasi sumber daya. Melalui inovasi hijau, pembangunan diarahkan pada penciptaan nilai yang lebih berkelanjutan, misalnya melalui produk rendah karbon, proses produksi bersih, energi terbarukan, ekonomi sirkular, serta sistem logistik yang lebih efisien. OECD menempatkan inovasi sebagai bagian penting dari *green growth* karena pertumbuhan hijau membutuhkan perubahan teknologi, investasi, kebijakan, dan indikator pengukuran yang lebih sesuai dengan tujuan keberlanjutan (OECD, 2011).

Dalam dunia usaha, *green innovation* dapat memperkuat daya saing melalui penghematan biaya, peningkatan reputasi, kepatuhan terhadap regulasi, perluasan pasar hijau, dan pengurangan risiko lingkungan. Perusahaan yang menerapkan inovasi hijau dapat membangun keunggulan kompetitif karena mampu merespons perubahan preferensi konsumen dan tuntutan pasar global. Literatur tentang *green innovation* menunjukkan adanya hubungan antara inovasi hijau, orientasi pasar hijau, dan kinerja bisnis, terutama ketika organisasi mampu mengelola pengetahuan dan sumber daya secara strategis (Tjahjadi et al., 2020).

Pada tingkat wilayah dan negara, *green innovation* dapat menjadi dasar pembangunan ekonomi baru. Sektor energi terbarukan, transportasi rendah emisi, bangunan hijau, pengelolaan limbah, teknologi air, pertanian berkelanjutan, dan industri material ramah lingkungan dapat membuka lapangan kerja baru serta mendorong transformasi ekonomi. Oleh karena itu,

inovasi hijau tidak boleh dipandang sebagai beban biaya, melainkan sebagai investasi jangka panjang untuk membangun ketahanan ekonomi, lingkungan, dan sosial.

Green innovation juga memiliki keterkaitan erat dengan pendidikan dan riset. Perguruan tinggi, sekolah, lembaga penelitian, dan pusat inovasi memiliki peran penting dalam menghasilkan pengetahuan, teknologi, metodologi, dan sumber daya manusia yang mampu menggerakkan transisi hijau. Dalam konteks ini, pendidikan tidak hanya bertugas mentransfer pengetahuan, tetapi juga membentuk literasi keberlanjutan, kemampuan berpikir sistemik, kreativitas teknologi, dan etika ekologis.

Dengan demikian, *green innovation* merupakan strategi pembangunan masa depan karena menawarkan jalan tengah antara kebutuhan pertumbuhan dan kewajiban menjaga lingkungan. Strategi ini menuntut kolaborasi antara pemerintah, industri, akademisi, komunitas, investor, dan masyarakat. Tanpa kolaborasi tersebut, inovasi hijau akan sulit berkembang dari gagasan menjadi praktik nyata yang berdampak luas.

RUANG LINGKUP *GREEN INNOVATION AND TECHNOLOGY MANAGEMENT*

Ruang lingkup *green innovation and technology management* mencakup kajian tentang bagaimana inovasi hijau dirancang, dikembangkan, diterapkan, dikelola, dievaluasi, dan disebarluaskan dalam berbagai sektor kehidupan. Bidang ini tidak hanya membahas teknologi hijau sebagai produk akhir, tetapi juga proses manajemen yang memungkinkan teknologi tersebut memberikan manfaat lingkungan, ekonomi, dan sosial. Oleh karena itu, ruang lingkungannya bersifat multidisipliner, mencakup manajemen inovasi, manajemen teknologi, ekonomi lingkungan, kebijakan publik, rekayasa, bisnis, dan studi keberlanjutan.

Salah satu ruang lingkup utama adalah *green product innovation*, yaitu inovasi yang menghasilkan produk dengan dampak lingkungan lebih rendah. Produk hijau dapat berupa produk hemat energi, menggunakan material terbarukan, mudah didaur ulang, memiliki umur pakai panjang, atau menghasilkan emisi lebih rendah sepanjang siklus hidupnya. Dalam pendekatan manajemen teknologi, produk hijau harus dirancang melalui pemahaman terhadap kebutuhan pengguna, regulasi lingkungan, kelayakan teknis, biaya produksi, dan dampak ekologis.

Ruang lingkup berikutnya adalah *green process innovation*, yaitu inovasi dalam proses produksi atau operasional yang bertujuan meningkatkan efisiensi dan mengurangi limbah. Contohnya meliputi *cleaner production*, efisiensi energi, pengurangan penggunaan air, optimasi material, pengelolaan emisi, dan substitusi bahan berbahaya. Inovasi proses hijau sering menjadi pintu masuk penting bagi industri karena dapat menghasilkan penghematan biaya sekaligus memperbaiki kinerja lingkungan (Porter & van der Linde, 1995).

Green business model juga menjadi bagian penting dari ruang lingkup bidang ini. Model bisnis hijau tidak hanya menjual produk, tetapi merancang cara baru dalam menciptakan, menyampaikan, dan menangkap nilai secara berkelanjutan. Contohnya mencakup *product-service system*, *sharing economy*, *circular business model*, *remanufacturing*, *take-back system*, dan *extended producer responsibility*. Pendekatan ini menunjukkan bahwa inovasi hijau tidak selalu bergantung pada teknologi baru, tetapi juga pada perubahan logika bisnis dan tata kelola organisasi.

Selain itu, *green innovation and technology management* mencakup pengelolaan teknologi berdasarkan tingkat kesiapan, risiko, investasi, adopsi, dan difusi. Konsep Technology Readiness Level dapat digunakan untuk menilai kematangan teknologi sebelum diterapkan secara luas. Sementara itu, analisis difusi inovasi membantu menjelaskan bagaimana teknologi hijau diterima

oleh pasar, organisasi, masyarakat, dan sistem kelembagaan. Dengan demikian, keberhasilan teknologi hijau sangat dipengaruhi oleh faktor teknis dan nonteknis (Rogers, 2003).

Ruang lingkup bidang ini juga mencakup evaluasi keberlanjutan melalui indikator lingkungan, ekonomi, sosial, dan tata kelola. *Life cycle assessment, carbon footprint, ESG, sustainability performance, circularity indicators, dan green supply chain metrics* menjadi instrumen penting untuk menilai efektivitas inovasi hijau. Dengan ruang lingkup yang luas tersebut, *green innovation and technology management* dapat digunakan sebagai dasar pengembangan kebijakan, strategi bisnis, penelitian akademik, pendidikan, dan praktik pembangunan berkelanjutan.



BAB 2

KONSEP DASAR *GREEN INNOVATION*

Perkembangan pembangunan modern telah membawa banyak kemajuan dalam bidang ekonomi, teknologi, industri, infrastruktur, dan kualitas hidup masyarakat. Namun, kemajuan tersebut juga menimbulkan berbagai tekanan terhadap lingkungan, seperti peningkatan emisi gas rumah kaca, pencemaran udara dan air, eksploitasi sumber daya alam, degradasi ekosistem, serta bertambahnya volume limbah. Kondisi ini menunjukkan bahwa paradigma pembangunan tidak lagi dapat hanya berorientasi pada pertumbuhan ekonomi dan kemajuan teknologi, tetapi harus diarahkan pada keberlanjutan ekologis, efisiensi sumber daya, dan tanggung jawab sosial.

Dalam konteks tersebut, *green innovation* hadir sebagai pendekatan penting untuk menjawab tantangan pembangunan berkelanjutan. *Green innovation* tidak hanya dipahami sebagai penciptaan teknologi ramah lingkungan, tetapi juga mencakup pembaruan dalam produk, proses, layanan, sistem manajemen, model bisnis, dan tata kelola organisasi yang bertujuan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Dengan demikian, *green innovation* menjadi jembatan antara kebutuhan inovasi, daya saing, dan perlindungan lingkungan.

Konsep dasar *green innovation* penting dipahami karena inovasi hijau tidak berdiri sendiri sebagai aktivitas teknis semata, melainkan sebagai proses transformasi yang melibatkan perubahan cara berpikir, perilaku organisasi, strategi teknologi, kebijakan publik, serta pola produksi dan konsumsi masyarakat. Inovasi hijau menuntut adanya kemampuan untuk menciptakan nilai ekonomi sekaligus menjaga keseimbangan ekologis. Oleh karena itu, *green innovation* memiliki peran strategis dalam mendorong industri, pemerintah, perguruan tinggi, dan masyarakat untuk bergerak menuju sistem pembangunan yang lebih rendah karbon, efisien, inklusif, dan berkelanjutan.

Pembahasan mengenai konsep dasar *green innovation* juga menjadi fondasi untuk memahami berbagai tema lanjutan dalam *green innovation and technology management*. Melalui pemahaman awal ini, *green innovation* dapat dilihat sebagai bagian dari strategi besar dalam menghadapi perubahan iklim, keterbatasan sumber daya, tuntutan efisiensi energi, ekonomi sirkular, transformasi digital, *green manufacturing*, *green building*, serta pengembangan teknologi hijau. Dengan kata lain, *green innovation* bukan hanya respons terhadap masalah lingkungan, tetapi juga peluang untuk membangun sistem ekonomi dan teknologi yang lebih adaptif terhadap kebutuhan masa depan.

Bab ini membahas konsep dasar *green innovation* sebagai landasan awal untuk memahami makna, ruang lingkup, tujuan, karakteristik, dan peran inovasi hijau dalam pembangunan berkelanjutan. Pembahasan diawali dengan pengertian *green innovation* karena definisi yang jelas menjadi dasar penting sebelum menguraikan bentuk, dimensi, manfaat, tantangan, dan strategi penerapannya. Melalui pemahaman tersebut, *green innovation* dapat diposisikan sebagai pendekatan strategis yang menghubungkan inovasi teknologi, manajemen, keberlanjutan lingkungan, dan penciptaan nilai bagi masyarakat secara lebih luas.

PENGERTIAN *GREEN INNOVATION*

Green innovation atau inovasi hijau adalah proses penciptaan, pengembangan, penerapan, dan penyebarluasan gagasan, produk, proses, teknologi, sistem, atau model bisnis yang bertujuan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Inovasi ini tidak hanya berhubungan dengan penciptaan teknologi baru, tetapi juga mencakup perbaikan cara produksi, pola konsumsi, sistem distribusi, pengelolaan limbah, dan tata kelola organisasi agar lebih ramah lingkungan. Dalam kajian manajemen inovasi, *green innovation* dipandang sebagai bentuk inovasi yang secara sengaja diarahkan untuk menghasilkan manfaat ekologis sekaligus menciptakan nilai ekonomi dan sosial (Schiederig, Tietze, & Herstatt, 2012).

Secara konseptual, *green innovation* berbeda dari inovasi konvensional karena ukuran keberhasilannya tidak hanya ditentukan oleh kebaruan, efisiensi, keuntungan ekonomi, atau penerimaan pasar, tetapi juga oleh kontribusinya terhadap pengurangan emisi, efisiensi energi, konservasi sumber daya, pengurangan limbah, dan perlindungan ekosistem. Dengan demikian, *green innovation* memiliki orientasi ganda, yaitu meningkatkan daya saing sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan. Inovasi ini dapat muncul dalam bentuk *green product innovation*, *green process innovation*, *green marketing innovation*, *green organizational innovation*, maupun *green business model innovation*.

Green innovation juga dapat dipahami sebagai respons strategis terhadap krisis ekologis global. Perubahan iklim, kerusakan lingkungan, pencemaran, keterbatasan energi fosil, dan meningkatnya kebutuhan sumber daya telah mendorong organisasi untuk mencari cara baru dalam menghasilkan nilai tanpa memperbesar beban ekologis. Dalam konteks ini, inovasi hijau menjadi instrumen penting untuk mengubah pola pembangunan yang bersifat eksploitatif menuju pola pembangunan yang lebih

efisien, rendah karbon, dan berorientasi jangka panjang (Rennings, 2000).

Menurut OECD, *eco-innovation* dan inovasi yang mendukung pertumbuhan hijau berperan penting dalam mendorong industri menuju pola produksi yang lebih berkelanjutan. Inovasi tersebut dapat mencakup teknologi lingkungan, proses produksi bersih, desain produk ramah lingkungan, serta perubahan organisasi dan kelembagaan yang mampu mengurangi dampak lingkungan sepanjang siklus hidup produk. Dengan demikian, *green innovation* tidak dapat dipisahkan dari manajemen teknologi, kebijakan publik, investasi, dan perubahan perilaku masyarakat.

Dalam konteks perusahaan, *green innovation* sering dikaitkan dengan kemampuan organisasi untuk mengintegrasikan isu lingkungan ke dalam strategi bisnis. Perusahaan yang menerapkan *green innovation* tidak hanya berusaha mematuhi regulasi lingkungan, tetapi juga menjadikan keberlanjutan sebagai sumber keunggulan kompetitif. Hal ini dapat dilakukan melalui pengembangan produk ramah lingkungan, penggunaan bahan baku terbarukan, pengurangan konsumsi energi, efisiensi proses produksi, dan penerapan rantai pasok hijau.

Dengan demikian, pengertian *green innovation* mencakup dimensi teknis, manajerial, ekonomi, sosial, dan ekologis. *Green innovation* bukan sekadar inovasi yang “berwarna hijau” secara simbolik, tetapi merupakan pendekatan sistematis untuk menciptakan perubahan nyata dalam cara manusia memproduksi, menggunakan, mengelola, dan mendaur ulang sumber daya. Oleh sebab itu, *green innovation* menjadi fondasi penting dalam *green innovation and technology management* karena menghubungkan inovasi teknologi dengan tujuan pembangunan berkelanjutan.

KARAKTERISTIK INOVASI HIJAU

Karakteristik pertama dari inovasi hijau adalah adanya orientasi lingkungan yang jelas. Inovasi hijau harus dirancang untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, baik dalam bentuk pengurangan emisi gas rumah kaca, penghematan energi, pengurangan limbah, efisiensi air, pengurangan bahan berbahaya, maupun penggunaan material yang lebih ramah lingkungan. Dengan kata lain, dimensi lingkungan bukan unsur tambahan, melainkan inti dari inovasi hijau itu sendiri.

Karakteristik kedua adalah adanya pendekatan siklus hidup. *Green innovation* tidak hanya menilai produk atau teknologi pada saat digunakan, tetapi juga memperhatikan seluruh tahapan siklus hidup, mulai dari ekstraksi bahan baku, desain, produksi, distribusi, konsumsi, pemeliharaan, hingga pembuangan atau daur ulang. Pendekatan ini penting karena suatu produk dapat tampak ramah lingkungan pada tahap penggunaan, tetapi tetap memiliki beban ekologis tinggi pada tahap produksi atau pembuangan apabila tidak dirancang secara menyeluruh (ISO, 2006).

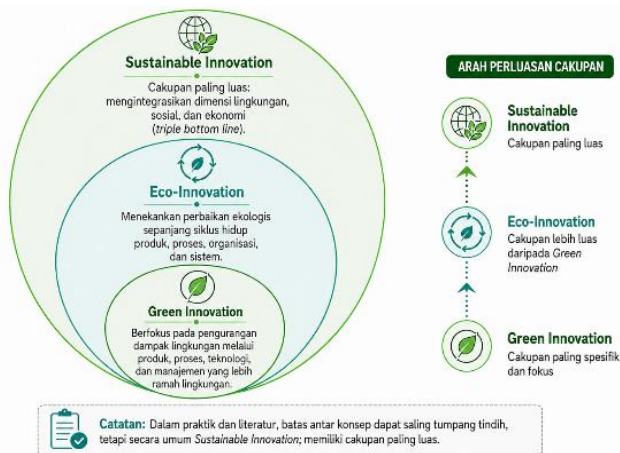
Karakteristik ketiga adalah efisiensi sumber daya. Inovasi hijau berupaya menghasilkan nilai yang lebih besar dengan penggunaan material, energi, air, dan lahan yang lebih sedikit. Efisiensi ini tidak hanya berdampak pada lingkungan, tetapi juga dapat menurunkan biaya produksi dan meningkatkan produktivitas organisasi. Dalam konteks industri, efisiensi sumber daya sering dikaitkan dengan *cleaner production*, *lean-green manufacturing*, *circular economy*, dan *green supply chain management*.

Karakteristik keempat adalah adanya nilai ekonomi dan daya saing. *Green innovation* tidak hanya bersifat idealistik, tetapi juga memiliki manfaat ekonomi. Perusahaan yang mampu menerapkan inovasi hijau dapat memperoleh keuntungan melalui efisiensi biaya, peningkatan citra merek, kepatuhan terhadap regulasi, akses ke pasar hijau, serta peningkatan loyalitas konsumen. Porter dan

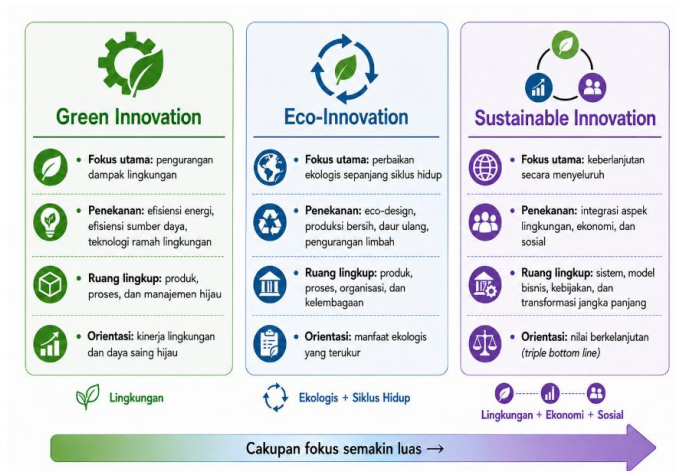
van der Linde (1995) menegaskan bahwa regulasi lingkungan yang dirancang dengan baik dapat mendorong inovasi dan meningkatkan daya saing perusahaan.

Karakteristik kelima adalah bersifat sistemik dan kolaboratif. *Green innovation* jarang berhasil apabila hanya dilakukan oleh satu aktor secara terpisah. Inovasi hijau membutuhkan kerja sama antara pemerintah, industri, perguruan tinggi, lembaga penelitian, investor, komunitas, dan konsumen. Kolaborasi ini diperlukan karena masalah lingkungan bersifat kompleks, lintas sektor, dan memerlukan integrasi antara teknologi, kebijakan, pasar, budaya, serta perilaku sosial.

Karakteristik keenam adalah adanya orientasi jangka panjang. Inovasi hijau tidak hanya diarahkan untuk memperoleh keuntungan sesaat, tetapi untuk membangun keberlanjutan organisasi, masyarakat, dan lingkungan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, inovasi hijau membutuhkan visi strategis, komitmen manajemen, investasi teknologi, pengembangan sumber daya manusia, serta sistem evaluasi yang mampu mengukur dampak lingkungan, ekonomi, dan sosial secara berkelanjutan.



Gambar 1 Perbedaan *green innovation*, *eco-innovation*, dan *sustainable innovation*.



Gambar 2 Perbedaan fokus *green innovation*, *eco-innovation*, dan *sustainable innovation*.



Gambar 3 *Eco-innovation* dalam perspektif siklus hidup produk.

Green innovation, *eco-innovation*, dan *sustainable innovation* merupakan istilah yang sering digunakan secara berdekatan, tetapi memiliki penekanan konseptual yang berbeda. *Green innovation* umumnya merujuk pada inovasi yang berfokus pada pengurangan dampak lingkungan melalui produk, proses, teknologi, atau sistem manajemen yang lebih ramah lingkungan. Istilah ini banyak

digunakan dalam konteks bisnis, manajemen teknologi, kinerja lingkungan perusahaan, dan strategi daya saing hijau (Schiederig et al., 2012).

Eco-innovation memiliki makna yang relatif dekat dengan *green innovation*, tetapi biasanya memiliki cakupan yang lebih eksplisit terhadap perbaikan ekologis sepanjang siklus hidup produk atau layanan. OECD menjelaskan bahwa *eco-innovation* dapat mencakup produk, proses, metode pemasaran, struktur organisasi, dan kelembagaan baru atau yang diperbaiki, sepanjang menghasilkan manfaat lingkungan. Dengan demikian, *eco-innovation* sering digunakan dalam konteks kebijakan industri, manufaktur berkelanjutan, efisiensi sumber daya, dan transformasi sistem produksi.

Sustainable innovation memiliki cakupan yang lebih luas karena tidak hanya memperhatikan dimensi lingkungan, tetapi juga dimensi ekonomi dan sosial. Inovasi berkelanjutan berusaha menciptakan nilai yang seimbang antara *profit*, *people*, dan *planet*. Dalam perspektif ini, sebuah inovasi tidak cukup hanya mengurangi limbah atau emisi, tetapi juga harus mendukung kesejahteraan sosial, keadilan, keselamatan, keterjangkauan, dan keberlanjutan ekonomi jangka panjang (Elkington, 1997).

Perbedaan ketiga konsep tersebut dapat dijelaskan melalui fokus utamanya. *Green innovation* lebih menekankan “hijau” sebagai orientasi lingkungan dan daya saing organisasi. *Eco-innovation* lebih menekankan hubungan inovasi dengan efisiensi ekologis, siklus hidup, dan sistem produksi-konsumsi. *Sustainable innovation* lebih luas karena mencakup keberlanjutan lingkungan, sosial, ekonomi, dan kelembagaan. Dengan demikian, *green innovation* dapat dipahami sebagai bagian dari *eco-innovation* dan *sustainable innovation*, tergantung pada konteks penggunaannya.

Dalam praktik, batas antara ketiga istilah tersebut sering tidak kaku. Sebuah inovasi kendaraan listrik, misalnya, dapat disebut *green innovation* karena mengurangi emisi operasional; dapat

disebut *eco-innovation* apabila dianalisis berdasarkan efisiensi energi dan siklus hidup baterai; serta dapat disebut *sustainable innovation* apabila juga memperhatikan aksesibilitas, keselamatan kerja, keadilan sosial, dan dampak ekonomi lokal. Oleh karena itu, pemilihan istilah harus disesuaikan dengan fokus kajian, tujuan penelitian, dan konteks penerapannya.

TUJUAN DAN MANFAAT GREEN INNOVATION

Tujuan utama *green innovation* adalah mengurangi dampak negatif aktivitas manusia terhadap lingkungan. Tujuan ini dapat dicapai melalui pengurangan emisi gas rumah kaca, efisiensi penggunaan energi, penghematan air, pengurangan limbah, pemanfaatan bahan baku terbarukan, dan penerapan sistem produksi yang lebih bersih. Dalam konteks perubahan iklim dan krisis sumber daya, tujuan ekologis ini menjadi semakin penting karena dunia membutuhkan pola produksi dan konsumsi yang tidak melampaui daya dukung lingkungan.



Gambar 4 Kendaraan listrik sebagai contoh *green innovation*, *eco-innovation*, dan *sustainable innovation*.

Tujuan kedua adalah meningkatkan efisiensi dan produktivitas. Banyak inovasi hijau berawal dari upaya mengurangi pemborosan material, energi, waktu, dan biaya. Misalnya, penggunaan teknologi hemat energi, sistem monitoring digital, desain proses produksi bersih, dan pengelolaan limbah internal dapat membantu organisasi menekan biaya operasional. Dengan demikian, *green innovation* tidak harus dipahami sebagai beban biaya, tetapi sebagai peluang efisiensi dan peningkatan nilai.

Tujuan ketiga adalah memperkuat daya saing organisasi. Konsumen, investor, dan regulator semakin memperhatikan aspek keberlanjutan. Perusahaan yang mampu menawarkan produk dan layanan ramah lingkungan memiliki peluang lebih besar untuk memasuki pasar hijau, meningkatkan reputasi, dan membangun loyalitas pelanggan. Penelitian di Indonesia juga menunjukkan bahwa *green innovation* berhubungan positif dengan *sustainability performance* dan dapat mendukung keunggulan kompetitif perusahaan.

Tujuan keempat adalah mendorong transformasi teknologi. *Green innovation* menjadi sarana untuk mempercepat pengembangan dan adopsi teknologi rendah karbon, energi terbarukan, material ramah lingkungan, sistem transportasi bersih, bangunan hijau, pertanian presisi, dan ekonomi sirkular. Transformasi teknologi ini penting karena banyak persoalan lingkungan tidak dapat diselesaikan hanya melalui perubahan perilaku, tetapi juga memerlukan inovasi teknis dan sistem manajemen yang lebih maju.

Tujuan kelima adalah mendukung kebijakan pembangunan berkelanjutan. *Green innovation* selaras dengan agenda global seperti *Sustainable Development Goals*, *green economy*, *circular economy*, dan *low-carbon development*. Melalui inovasi hijau, pemerintah dapat mendorong pembangunan yang lebih efisien, inklusif, dan rendah emisi. OECD menegaskan bahwa inovasi merupakan faktor penting untuk mengubah visi *green growth*

menjadi kenyataan melalui pengembangan teknologi lingkungan dan solusi cerdas.

Manfaat *green innovation* dapat dirasakan oleh banyak pihak. Bagi masyarakat, inovasi hijau meningkatkan kualitas lingkungan dan kesehatan hidup. Bagi perusahaan, inovasi hijau memperkuat efisiensi, reputasi, dan daya saing. Bagi pemerintah, inovasi hijau mendukung pencapaian target pembangunan berkelanjutan. Bagi akademisi, inovasi hijau membuka ruang riset lintas disiplin. Dengan demikian, *green innovation* memiliki manfaat strategis karena menghubungkan kepentingan lingkungan, ekonomi, teknologi, dan sosial.

DIMENSI DALAM GREEN INNOVATION

Dimensi lingkungan merupakan dimensi utama dalam *green innovation*. Dimensi ini berkaitan dengan kemampuan inovasi untuk mengurangi tekanan terhadap ekosistem, menekan emisi, mengurangi pencemaran, memperbaiki efisiensi energi, menghemat air, mengurangi limbah, serta menjaga keberlanjutan sumber daya alam. Inovasi hijau yang baik harus dapat menunjukkan kontribusi nyata terhadap peningkatan kualitas lingkungan, baik pada tingkat produk, proses, organisasi, maupun sistem industri.

Dimensi ekonomi berkaitan dengan kemampuan *green innovation* menciptakan nilai, meningkatkan efisiensi, memperkuat daya saing, dan membuka peluang pasar baru. Inovasi hijau dapat menghasilkan penghematan biaya melalui efisiensi energi dan material, tetapi juga dapat menciptakan produk baru yang memiliki nilai jual lebih tinggi. Dalam kerangka *natural-resource-based view*, kemampuan perusahaan mengelola sumber daya alam dan lingkungan dapat menjadi sumber keunggulan kompetitif jangka panjang (Hart, 1995).

Dimensi sosial berkaitan dengan dampak inovasi hijau terhadap masyarakat, pekerja, konsumen, dan komunitas. *Green innovation* seharusnya tidak hanya menguntungkan perusahaan, tetapi juga meningkatkan kualitas hidup masyarakat, keselamatan kerja, kesehatan lingkungan, akses terhadap teknologi bersih, dan keadilan sosial. Inovasi hijau yang mahal dan hanya dapat diakses kelompok tertentu belum tentu dapat disebut berkelanjutan secara sosial. Oleh karena itu, aspek inklusi dan keterjangkauan perlu diperhatikan.

Dimensi teknologi berkaitan dengan kemampuan teknis untuk menciptakan solusi yang lebih efisien, bersih, adaptif, dan layak diterapkan. Teknologi dalam *green innovation* dapat berupa teknologi energi terbarukan, sistem produksi bersih, sensor digital, kecerdasan buatan, *material biodegradable*, kendaraan listrik, teknologi pengolahan air, dan sistem daur ulang. Namun, keberhasilan teknologi tidak hanya ditentukan kecanggihannya, tetapi juga oleh kesiapan teknologi, biaya, penerimaan pengguna, regulasi, dan dukungan infrastruktur.

Keempat dimensi tersebut saling berhubungan. Inovasi yang baik secara lingkungan tetapi tidak layak secara ekonomi akan sulit diterapkan secara luas. Inovasi yang menguntungkan secara ekonomi tetapi menimbulkan ketimpangan sosial juga tidak dapat dianggap berkelanjutan. Demikian pula, teknologi yang canggih tetapi tidak sesuai dengan kebutuhan masyarakat akan mengalami hambatan adopsi. Oleh karena itu, *green innovation* harus dianalisis secara multidimensional.

Dalam praktik manajemen, dimensi lingkungan, ekonomi, sosial, dan teknologi perlu diterjemahkan ke dalam indikator evaluasi. Indikator lingkungan dapat berupa emisi, konsumsi energi, limbah, dan penggunaan air. Indikator ekonomi dapat berupa efisiensi biaya, pendapatan, produktivitas, dan pangsa pasar. Indikator sosial dapat berupa keselamatan, keterjangkauan, penerimaan masyarakat, dan dampak komunitas. Indikator

teknologi dapat berupa tingkat kesiapan teknologi, keandalan, skalabilitas, dan kemudahan adopsi.

GREEN INNOVATION DALAM KEHIDUPAN SEHARI-HARI

Green innovation tidak hanya terjadi di laboratorium, perusahaan besar, atau kawasan industri, tetapi juga hadir dalam kehidupan sehari-hari. Masyarakat dapat menjumpai inovasi hijau dalam bentuk lampu hemat energi, peralatan rumah tangga efisien, kendaraan listrik, panel surya atap, aplikasi pemantauan konsumsi listrik, kemasan ramah lingkungan, produk isi ulang, dan sistem pemilahan sampah. Hal ini menunjukkan bahwa *green innovation* dekat dengan praktik hidup sehari-hari.

Dalam rumah tangga, *green innovation* dapat diterapkan melalui penggunaan teknologi hemat energi dan air. Contohnya adalah lampu LED, kran hemat air, toilet rendah konsumsi air, peralatan elektronik berlabel efisiensi energi, kompor induksi, dan sistem pengatur suhu otomatis. Inovasi sederhana tersebut dapat mengurangi konsumsi sumber daya sekaligus menurunkan biaya rumah tangga. Dengan demikian, inovasi hijau tidak selalu harus kompleks atau mahal.

Dalam pola konsumsi, *green innovation* terlihat pada makin maraknya produk ramah lingkungan, kemasan *biodegradable*, tas guna ulang, botol isi ulang, produk lokal, dan layanan berbasis berbagi. Konsumen mulai didorong untuk tidak hanya mempertimbangkan harga dan kualitas, tetapi juga dampak lingkungan dari produk yang digunakan. Perubahan perilaku konsumsi ini menjadi bagian penting dari transisi menuju ekonomi sirkular dan konsumsi berkelanjutan.

Dalam mobilitas harian, *green innovation* dapat muncul melalui penggunaan transportasi publik, kendaraan listrik, sepeda, jalur pejalan kaki, *car sharing*, *ride sharing*, dan aplikasi mobilitas terpadu. Inovasi ini tidak hanya mengurangi emisi, tetapi juga

dapat memperbaiki kualitas udara, mengurangi kemacetan, dan meningkatkan kualitas hidup perkotaan. Oleh karena itu, inovasi hijau dalam mobilitas membutuhkan dukungan infrastruktur, kebijakan, dan perubahan kebiasaan masyarakat.

Dalam pengelolaan sampah, *green innovation* dapat diterapkan melalui pemilahan sampah dari rumah, komposting, bank sampah, daur ulang, pengurangan plastik sekali pakai, dan penggunaan aplikasi pengumpulan sampah. UNEP menekankan bahwa pendekatan *circularity* berkontribusi pada pola konsumsi dan produksi berkelanjutan melalui pemahaman terhadap penggunaan sumber daya dan pengurangan limbah.

Dengan demikian, *green innovation* dalam kehidupan sehari-hari berfungsi sebagai jembatan antara konsep keberlanjutan dan tindakan praktis masyarakat. Semakin banyak masyarakat memahami manfaat inovasi hijau, semakin besar peluang terbentuknya budaya hidup berkelanjutan. Oleh sebab itu, pendidikan, kampanye publik, kebijakan insentif, dan contoh praktik nyata sangat diperlukan agar *green innovation* tidak berhenti sebagai wacana, tetapi menjadi bagian dari gaya hidup sehari-hari.

CONTOH PENERAPAN GREEN INNOVATION

1. Sektor Energi

Pada sektor energi, *green innovation* terlihat melalui pengembangan energi terbarukan seperti tenaga surya, tenaga angin, biomassa, panas bumi, mikrohidro, dan teknologi penyimpanan energi. Inovasi ini penting untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil dan menekan emisi gas rumah kaca. Selain itu, *smart grid*, sistem manajemen energi, dan perangkat monitoring digital dapat meningkatkan efisiensi distribusi dan konsumsi energi.

2. Sektor Industri

Pada sektor industri, *green innovation* dapat diterapkan melalui *cleaner production*, efisiensi energi, penggunaan bahan baku alternatif, pengurangan limbah, daur ulang internal, dan desain produk ramah lingkungan. Industri juga dapat menerapkan *green supply chain management* untuk memastikan bahwa pemasok, proses produksi, distribusi, dan pengelolaan akhir produk berjalan sesuai prinsip keberlanjutan. OECD menekankan bahwa *sustainable manufacturing* dan *eco-innovation* dapat membantu industri memahami mekanisme inovasi dan meningkatkan kinerja lingkungan.

3. Sektor Transportasi

Pada sektor transportasi, *green innovation* diterapkan melalui kendaraan listrik, bahan bakar rendah emisi, transportasi publik berbasis energi bersih, sistem manajemen lalu lintas cerdas, jalur sepeda, dan konsep *transit-oriented development*. Inovasi ini sangat penting karena transportasi merupakan salah satu sektor yang berkontribusi terhadap konsumsi energi dan polusi udara perkotaan. Dengan teknologi dan kebijakan yang tepat, sektor transportasi dapat bergerak menuju sistem mobilitas rendah karbon.

4. Sektor Bangunan an Perkotaan

Pada sektor bangunan dan perkotaan, *green innovation* dapat diwujudkan melalui *green building*, desain pasif, material ramah lingkungan, pencahayaan alami, ventilasi silang, panel surya atap, sistem pemanenan air hujan, ruang terbuka hijau, dan infrastruktur biru-hijau. Dalam konteks kota, inovasi hijau juga dapat diterapkan melalui *smart city*, *urban farming*, pengelolaan air perkotaan, dan perencanaan kawasan yang mengurangi ketergantungan pada kendaraan pribadi.

5. Sektor Pertanian dan Pangan

Pada sektor pertanian dan pangan, *green innovation* dapat diterapkan melalui pertanian presisi, irigasi hemat air, pupuk organik, pengendalian hama terpadu, pengolahan limbah pertanian, energi biomassa, dan rantai pasok pangan lokal. Inovasi ini penting karena sektor pangan berkaitan erat dengan penggunaan lahan, air, energi, biodiversitas, dan ketahanan pangan. Dengan inovasi hijau, pertanian dapat menjadi lebih produktif sekaligus lebih ramah lingkungan.

6. Sektor Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM)

Pada sektor usaha mikro, kecil, dan menengah, *green innovation* dapat dilakukan melalui penggunaan bahan baku lokal, pengurangan limbah produksi, efisiensi energi, kemasan ramah lingkungan, *digital marketing*, dan pengembangan produk berbasis ekonomi sirkular. Studi tentang UMKM di Indonesia menunjukkan bahwa *green innovation* dapat mendukung kinerja lingkungan, keberlanjutan bisnis, dan keunggulan kompetitif, meskipun masih menghadapi tantangan berupa keterbatasan pembiayaan, pengetahuan, teknologi, dan akses pasar.



BAB 3

TECHNOLOGY MANAGEMENT **DALAM PERSPEKTIF KEBERLANJUTAN**

Perkembangan teknologi telah menjadi salah satu kekuatan utama yang membentuk arah pembangunan ekonomi, industri, pendidikan, kesehatan, transportasi, energi, kota, dan kehidupan sosial masyarakat. Teknologi tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu meningkatkan efisiensi dan produktivitas, tetapi juga instrumen strategis dalam menciptakan nilai, memperkuat daya saing, mempercepat inovasi, serta menjawab berbagai persoalan pembangunan. Namun, di tengah meningkatnya kompleksitas lingkungan global, teknologi tidak lagi dapat dikelola hanya berdasarkan pertimbangan teknis dan ekonomi semata, melainkan juga harus mempertimbangkan dampaknya terhadap lingkungan, masyarakat, dan keberlanjutan jangka panjang.

Dalam konteks *green innovation and technology management*, pengelolaan teknologi perlu ditempatkan dalam perspektif keberlanjutan. Artinya, setiap proses pemilihan, pengembangan, penerapan, evaluasi, dan pengendalian teknologi harus mempertimbangkan efisiensi sumber daya, pengurangan emisi, pencegahan pencemaran, keselamatan manusia, keadilan sosial, serta kontribusinya terhadap pembangunan berkelanjutan. Dengan demikian, *technology management* tidak hanya dipahami sebagai

kemampuan organisasi dalam mengelola teknologi untuk menghasilkan keuntungan dan keunggulan kompetitif, tetapi juga sebagai kapasitas strategis untuk memastikan bahwa teknologi memberikan manfaat ekonomi, ekologis, dan sosial secara seimbang.

Technology management dalam perspektif keberlanjutan menjadi semakin penting karena banyak persoalan lingkungan dan sosial saat ini berkaitan erat dengan cara teknologi dikembangkan dan digunakan. Teknologi dapat menjadi penyebab tekanan ekologis apabila digunakan secara eksploitatif, boros energi, menghasilkan limbah, atau memperkuat pola konsumsi yang tidak berkelanjutan. Sebaliknya, teknologi juga dapat menjadi solusi apabila dikelola untuk mendukung efisiensi energi, ekonomi sirkular, produksi bersih, transportasi rendah karbon, bangunan hijau, sistem informasi lingkungan, serta inovasi sosial yang meningkatkan kualitas hidup masyarakat.

Pembahasan mengenai *technology management* dalam perspektif keberlanjutan menuntut cara pandang yang integratif. Pengelolaan teknologi tidak cukup hanya mencakup aspek perencanaan teknologi, akuisisi teknologi, transfer teknologi, komersialisasi, dan perlindungan hak kekayaan intelektual, tetapi juga perlu memperhatikan siklus hidup teknologi, dampak lingkungan, kesiapan organisasi, kapasitas sumber daya manusia, regulasi, etika, risiko, serta penerimaan sosial. Oleh karena itu, *technology management* menjadi ruang strategis yang menghubungkan ilmu rekayasa, manajemen, kebijakan publik, ekonomi, dan keberlanjutan.

Bab ini membahas *technology management* dalam perspektif keberlanjutan sebagai dasar untuk memahami bagaimana teknologi seharusnya dikelola agar mampu mendukung transformasi hijau. Pembahasan diawali dengan pengertian *technology management*, karena pemahaman terhadap konsep dasar, ruang lingkup, fungsi, dan peran pengelolaan teknologi menjadi

fondasi penting sebelum membahas hubungan teknologi dengan keberlanjutan. Melalui pemahaman tersebut, *technology management* dapat diposisikan bukan hanya sebagai instrumen penguatan daya saing organisasi, tetapi juga sebagai pendekatan strategis untuk membangun inovasi yang lebih bertanggung jawab, adaptif, rendah dampak lingkungan, dan berorientasi pada masa depan.

PENGERTIAN TECHNOLOGY MANAGEMENT

Technology management atau manajemen teknologi adalah proses perencanaan, pengorganisasian, pengembangan, pemanfaatan, pengendalian, dan evaluasi teknologi agar dapat mendukung tujuan organisasi secara efektif. Dalam konteks organisasi modern, teknologi tidak hanya dipahami sebagai alat produksi, mesin, perangkat digital, atau sistem informasi, tetapi juga sebagai kumpulan pengetahuan, metode, proses, kompetensi, dan kapabilitas yang digunakan untuk menciptakan nilai. Oleh karena itu, *technology management* berkaitan erat dengan kemampuan organisasi dalam memilih teknologi yang tepat, mengintegrasikannya ke dalam proses kerja, serta memastikan bahwa teknologi tersebut memberikan manfaat strategis bagi organisasi.

Secara akademik, manajemen teknologi dapat dipahami sebagai bidang multidisipliner yang menghubungkan ilmu manajemen, rekayasa, ekonomi, inovasi, kebijakan, dan strategi bisnis. Bidang ini membahas bagaimana teknologi dikembangkan, diperoleh, diadaptasi, dikomersialisasikan, dan diperbarui sesuai perubahan lingkungan bisnis dan sosial. Dengan demikian, *technology management* tidak hanya membahas aspek teknis, tetapi juga aspek manajerial, organisasi, sumber daya manusia, pembiayaan, risiko, dan keberlanjutan (Khalil, 2000).

Dalam perspektif keberlanjutan, *technology management* memiliki makna yang lebih luas karena teknologi tidak hanya

dinilai berdasarkan produktivitas dan keuntungan ekonomi, tetapi juga berdasarkan dampaknya terhadap lingkungan dan masyarakat. Teknologi yang dikelola dengan baik harus mampu meningkatkan efisiensi sumber daya, menurunkan emisi, mengurangi limbah, memperpanjang umur pakai produk, dan mendukung sistem produksi yang lebih bersih. Oleh karena itu, manajemen teknologi berkelanjutan menuntut organisasi untuk mempertimbangkan dimensi lingkungan, ekonomi, sosial, dan tata kelola dalam setiap keputusan teknologi.

Manajemen teknologi juga berkaitan dengan kemampuan organisasi membaca perubahan eksternal. Perkembangan teknologi digital, energi terbarukan, kecerdasan buatan, material hijau, otomasi, *Internet of Things*, dan sistem manufaktur cerdas telah mengubah cara organisasi beroperasi. Perubahan tersebut menuntut organisasi memiliki kemampuan adaptif agar tidak hanya menjadi pengguna teknologi, tetapi juga mampu mengelola teknologi sebagai sumber inovasi dan transformasi. Dalam konteks ini, teknologi menjadi bagian dari strategi jangka panjang organisasi.

Pengertian *technology management* juga mencakup proses pengambilan keputusan mengenai kapan teknologi perlu dikembangkan sendiri, dibeli, diadopsi, dimodifikasi, atau dihentikan penggunaannya. Keputusan tersebut tidak dapat dilepaskan dari analisis biaya, manfaat, risiko, kesiapan teknologi, kesiapan sumber daya manusia, dan kesesuaian dengan tujuan organisasi. Dalam pendekatan keberlanjutan, keputusan teknologi juga harus mempertimbangkan siklus hidup, jejak karbon, konsumsi energi, dampak limbah, serta kontribusinya terhadap tujuan pembangunan berkelanjutan.

Dengan demikian, *technology management* merupakan fondasi penting konsep *green innovation and technology management* karena menjadi jembatan antara inovasi hijau dan implementasi praktis dalam organisasi. *Green innovation* membutuhkan manajemen

teknologi agar ide, riset, atau produk ramah lingkungan dapat diterapkan secara efektif. Tanpa manajemen teknologi yang baik, inovasi hijau berpotensi berhenti pada tataran konsep dan tidak berkembang menjadi solusi nyata bagi persoalan lingkungan, ekonomi, dan sosial.

PERAN MANAJEMEN TEKNOLOGI DALAM ORGANISASI MODERN

Manajemen teknologi memiliki peran strategis dalam organisasi modern karena teknologi telah menjadi faktor utama dalam menentukan produktivitas, kualitas, efisiensi, dan daya saing. Organisasi yang mampu mengelola teknologi secara tepat dapat meningkatkan kecepatan produksi, memperbaiki mutu layanan, memperluas jangkauan pasar, serta mempercepat proses pengambilan keputusan. Dalam era digital dan globalisasi, teknologi tidak lagi menjadi fungsi pendukung, melainkan bagian inti dari strategi organisasi.

Peran pertama manajemen teknologi adalah memastikan keselarasan antara teknologi dan tujuan organisasi. Banyak organisasi mengadopsi teknologi baru karena mengikuti tren, tetapi tidak selalu memiliki strategi yang jelas. Manajemen teknologi membantu organisasi menentukan teknologi apa yang benar-benar diperlukan, bagaimana teknologi tersebut mendukung proses bisnis, dan sejauh mana teknologi tersebut memberikan nilai tambah. Dengan demikian, teknologi tidak menjadi investasi yang membebani, tetapi menjadi instrumen penciptaan nilai.

Peran kedua adalah mendorong inovasi. Teknologi memberikan peluang bagi organisasi untuk menciptakan produk baru, proses baru, layanan baru, dan model bisnis baru. Dalam konteks keberlanjutan, inovasi tersebut dapat diarahkan pada pengembangan produk hemat energi, sistem produksi bersih, layanan digital rendah emisi, serta model bisnis berbasis ekonomi

sirkular. Oleh karena itu, manajemen teknologi berperan dalam menghubungkan riset, kreativitas, kebutuhan pasar, dan tuntutan lingkungan.

Peran ketiga adalah meningkatkan efisiensi operasional. Teknologi dapat membantu organisasi mengurangi pemborosan material, energi, waktu, dan tenaga kerja. Sistem otomasi, sensor, *big data*, *artificial intelligence*, dan *Internet of Things* dapat digunakan untuk memantau proses produksi, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, dan mengurangi kesalahan operasional. Dalam perspektif keberlanjutan, efisiensi tersebut tidak hanya berdampak pada biaya, tetapi juga pada penurunan beban lingkungan.

Peran keempat adalah memperkuat kemampuan adaptasi organisasi. Lingkungan bisnis modern ditandai oleh perubahan cepat, ketidakpastian pasar, regulasi lingkungan yang semakin ketat, serta perubahan preferensi konsumen. Organisasi yang memiliki manajemen teknologi yang kuat dapat lebih cepat menyesuaikan diri terhadap perubahan tersebut. Kemampuan adaptasi ini penting karena keberlanjutan tidak hanya menuntut stabilitas, tetapi juga kelincahan dalam merespons risiko dan peluang baru.

Peran kelima adalah membangun tata kelola teknologi yang bertanggung jawab. Teknologi dapat memberikan manfaat besar, tetapi juga dapat menimbulkan risiko seperti konsumsi energi tinggi, limbah elektronik, ketergantungan sistem digital, kesenjangan akses, dan ancaman keamanan data. Oleh karena itu, organisasi modern perlu mengelola teknologi secara etis, aman, inklusif, dan berkelanjutan. Dalam hal ini, *technology management* berperan sebagai kerangka tata kelola agar teknologi digunakan untuk memperkuat kinerja organisasi sekaligus menjaga kepentingan masyarakat dan lingkungan.

HUBUNGAN TEKNOLOGI, INOVASI, DAN KEUNGGULAN KOMPETITIF

Teknologi, inovasi, dan keunggulan kompetitif memiliki hubungan yang sangat erat dalam organisasi modern. Teknologi menyediakan alat, pengetahuan, dan kemampuan teknis, sedangkan inovasi mengubah teknologi tersebut menjadi produk, proses, layanan, atau model bisnis yang bernilai. Keunggulan kompetitif muncul ketika organisasi mampu menggunakan teknologi dan inovasi secara lebih efektif dibandingkan pesaingnya. Dengan demikian, teknologi menjadi sumber potensial keunggulan, tetapi hanya akan menghasilkan manfaat strategis apabila dikelola melalui proses inovasi yang tepat.



Gambar 5 Hubungan teknologi, inovasi, dan keunggulan kompetitif.

Dalam teori manajemen strategis, keunggulan kompetitif dapat bersumber dari kemampuan organisasi mengelola sumber daya yang bernilai, langka, sulit ditiru, dan sulit digantikan. Teknologi dapat menjadi sumber keunggulan apabila organisasi memiliki kemampuan khusus dalam mengembangkan, mengintegrasikan, dan memanfaatkannya. Namun, teknologi yang

mudah dibeli oleh semua organisasi tidak otomatis menjadi sumber keunggulan. Keunggulan muncul ketika teknologi dipadukan dengan pengetahuan, budaya organisasi, kepemimpinan, jejaring, dan kemampuan inovasi (Barney, 1991).

Dalam perspektif keberlanjutan, hubungan teknologi, inovasi, dan keunggulan kompetitif semakin kuat karena pasar dan regulasi mulai menuntut produk serta proses yang lebih ramah lingkungan. Perusahaan yang mampu mengembangkan teknologi hemat energi, proses produksi bersih, material hijau, dan model bisnis sirkular dapat memperoleh posisi kompetitif yang lebih baik. Porter dan van der Linde (1995) menjelaskan bahwa tekanan lingkungan dan regulasi yang tepat dapat mendorong inovasi serta meningkatkan efisiensi dan daya saing perusahaan.

Keunggulan kompetitif berbasis teknologi juga berkaitan dengan kemampuan organisasi melakukan pembelajaran. Kita tahu bahwa teknologi terus berubah sehingga organisasi perlu mengembangkan kemampuan untuk menyerap pengetahuan baru, mengadaptasi teknologi eksternal, dan mengembangkan inovasi internal. Literatur terbaru menunjukkan bahwa inovasi teknologi dapat berpengaruh positif terhadap keunggulan kompetitif berkelanjutan, terutama ketika didukung oleh manajemen pengetahuan yang baik.

Dalam konteks *green innovation*, teknologi dan inovasi dapat menghasilkan keunggulan kompetitif melalui beberapa jalur. *Pertama*, efisiensi sumber daya dapat menurunkan biaya produksi. *Kedua*, produk ramah lingkungan dapat menarik konsumen yang memiliki kesadaran ekologis. *Ketiga*, kepatuhan terhadap regulasi dapat mengurangi risiko hukum dan reputasi. *Keempat*, inovasi hijau dapat membuka pasar baru, seperti energi terbarukan, bangunan hijau, kendaraan listrik, pengelolaan limbah, dan produk berbasis daur ulang.

Dengan demikian, hubungan antara teknologi, inovasi, dan keunggulan kompetitif tidak dapat dipahami secara terpisah.

Teknologi menyediakan potensi, inovasi menciptakan nilai, dan manajemen strategis mengarahkan keduanya menuju keunggulan kompetitif. Dalam perspektif keberlanjutan, keunggulan kompetitif yang ideal bukan hanya menguntungkan organisasi secara ekonomi, tetapi juga memberikan manfaat ekologis dan sosial bagi masyarakat luas.

MANAJEMEN TEKNOLOGI BERBASIS EFISIENSI SUMBER DAYA

Manajemen teknologi berbasis efisiensi sumber daya adalah pendekatan pengelolaan teknologi yang bertujuan menghasilkan nilai sebesar mungkin dengan penggunaan sumber daya sekecil mungkin. Sumber daya yang dimaksud mencakup energi, air, bahan baku, lahan, waktu, tenaga kerja, dan modal. Dalam konteks keberlanjutan, efisiensi sumber daya menjadi penting karena peningkatan produksi dan konsumsi global telah menyebabkan tekanan besar terhadap lingkungan dan ketersediaan sumber daya alam.

Efisiensi sumber daya tidak hanya berarti penghematan, tetapi juga perubahan cara organisasi merancang, memproduksi, mendistribusikan, menggunakan, dan mengelola akhir siklus hidup produk. Teknologi dapat digunakan untuk mengurangi kehilangan material, meningkatkan akurasi produksi, mengoptimalkan penggunaan energi, dan memperbaiki sistem logistik. Dalam industri manufaktur, pendekatan ini berkaitan dengan *cleaner production*, *lean manufacturing*, *green manufacturing*, dan *circular economy*.

Dalam laporan *Global Resources Outlook 2024*, UNEP menekankan bahwa penggunaan sumber daya alam yang terus meningkat berkaitan erat dengan perubahan iklim, kehilangan biodiversitas, dan pencemaran. Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi sumber daya bukan lagi pilihan teknis, melainkan

kebutuhan strategis dalam pembangunan global. Manajemen teknologi berperan penting untuk mengubah pola penggunaan sumber daya dari model linear menuju model yang lebih sirkular dan regeneratif.

Teknologi digital memberikan kontribusi besar terhadap efisiensi sumber daya. *Sensor, Internet of Things, artificial intelligence, big data analytics*, dan *digital twin* dapat digunakan untuk memantau konsumsi energi, mendeteksi kebocoran, mengoptimalkan jadwal produksi, mengurangi *downtime*, serta memprediksi kebutuhan pemeliharaan. Dengan kemampuan tersebut, organisasi dapat mengurangi pemborosan dan meningkatkan produktivitas secara simultan. Namun, digitalisasi juga harus dikelola agar tidak menimbulkan konsumsi energi yang berlebihan.

Manajemen teknologi berbasis efisiensi sumber daya juga harus memperhatikan pendekatan *life cycle thinking*. Sebuah teknologi dapat terlihat efisien pada tahap operasional, tetapi mungkin memiliki dampak besar pada tahap produksi, transportasi, atau pembuangan. Oleh karena itu, organisasi perlu menggunakan instrumen seperti *life cycle assessment, material flow analysis, carbon footprint*, dan *energy audit* untuk menilai dampak teknologi secara menyeluruh. Pendekatan ini membantu organisasi menghindari keputusan teknologi yang hanya memindahkan beban lingkungan dari satu tahap ke tahap lain.

Dengan demikian, efisiensi sumber daya merupakan prinsip dasar dalam *technology management* berkelanjutan. Teknologi harus dipilih dan dikelola bukan hanya berdasarkan kapasitas produksi atau biaya investasi, tetapi juga berdasarkan kemampuannya mengurangi pemborosan, memperpanjang umur sumber daya, dan menciptakan nilai lingkungan. Dalam konteks *green innovation*, efisiensi sumber daya menjadi pintu masuk penting untuk menghubungkan kinerja teknologi dengan kinerja keberlanjutan.

STRATEGI PENGELOLAAN TEKNOLOGI RAMAH LINGKUNGAN

Strategi pengelolaan teknologi ramah lingkungan dimulai dari identifikasi kebutuhan dan masalah keberlanjutan yang ingin diselesaikan. Organisasi perlu memahami sumber emisi, konsumsi energi, limbah, penggunaan air, bahan berbahaya, dan risiko lingkungan yang muncul dari aktivitasnya. Berdasarkan pemahaman tersebut, organisasi dapat menentukan prioritas teknologi yang paling relevan, apakah berupa teknologi efisiensi energi, energi terbarukan, pengolahan limbah, substitusi material, atau sistem produksi bersih.

Strategi kedua adalah melakukan seleksi teknologi berdasarkan kriteria keberlanjutan. Pemilihan teknologi tidak cukup hanya mempertimbangkan harga, kapasitas, dan produktivitas, tetapi juga harus menilai jejak karbon, konsumsi sumber daya, potensi limbah, kemudahan daur ulang, keselamatan, dan kesesuaian dengan regulasi lingkungan. Pendekatan ini penting agar organisasi tidak terjebak pada teknologi yang terlihat murah dalam jangka pendek, tetapi mahal secara ekologis dan sosial dalam jangka panjang.

Strategi ketiga adalah menerapkan pendekatan bertahap melalui *Technology Readiness Level* dan analisis kelayakan. Tidak semua teknologi hijau siap diterapkan secara luas. Beberapa teknologi masih berada pada tahap riset, prototipe, demonstrasi, atau komersialisasi awal. Oleh karena itu, organisasi perlu menilai kematangan teknologi, kesiapan infrastruktur, kemampuan sumber daya manusia, risiko operasional, dan dukungan pembiayaan sebelum melakukan implementasi. Pendekatan bertahap membantu mengurangi risiko kegagalan teknologi.

Strategi keempat adalah membangun kapabilitas organisasi. Teknologi ramah lingkungan tidak akan berhasil apabila organisasi tidak memiliki sumber daya manusia yang mampu mengopera-

sikan, memelihara, mengevaluasi, dan mengembangkannya. Oleh karena itu, pelatihan, pembelajaran organisasi, transfer pengetahuan, kolaborasi riset, dan budaya inovasi menjadi bagian penting dari strategi pengelolaan teknologi hijau. Strategi teknologi harus selalu diikuti oleh strategi pengembangan manusia.

Strategi kelima adalah mengintegrasikan teknologi hijau ke dalam rantai nilai organisasi. Teknologi ramah lingkungan tidak cukup diterapkan pada satu titik produksi, tetapi perlu dihubungkan dengan pemasok, distribusi, konsumen, dan pengelolaan akhir produk. Konsep *green supply chain management* dan *circular economy* menjadi penting karena dampak lingkungan organisasi sering berada di luar batas pabrik atau kantor. Dengan pendekatan rantai nilai, organisasi dapat memperluas dampak positif teknologi hijau secara lebih sistemik.

Strategi keenam adalah melakukan monitoring, evaluasi, dan perbaikan berkelanjutan. Teknologi ramah lingkungan harus diukur kinerjanya melalui indikator yang jelas, seperti pengurangan emisi, penghematan energi, pengurangan limbah, efisiensi air, penghematan biaya, dan peningkatan kepuasan pemangku kepentingan. Evaluasi ini penting agar organisasi dapat mengetahui apakah teknologi yang diterapkan benar-benar memberikan manfaat keberlanjutan. Dengan demikian, pengelolaan teknologi hijau harus dipahami sebagai proses dinamis, bukan keputusan satu kali.

TANTANGAN MANAJEMEN TEKNOLOGI DI ERA TRANSFORMASI HIJAU

Tantangan pertama dalam manajemen teknologi era transformasi hijau adalah tingginya biaya awal investasi. Banyak teknologi ramah lingkungan, seperti energi terbarukan, sistem efisiensi energi, kendaraan listrik, teknologi pengolahan limbah, dan sistem digital cerdas membutuhkan modal awal yang tidak

kecil. Bagi organisasi kecil dan menengah, keterbatasan pembiayaan sering menjadi hambatan utama untuk mengadopsi teknologi hijau. Oleh karena itu, dukungan insentif, pembiayaan hijau, dan skema kemitraan menjadi sangat penting.

Tantangan kedua adalah ketidakpastian teknologi. Beberapa teknologi hijau masih berkembang dan belum memiliki standar yang mapan. Ketidakpastian ini mencakup umur pakai, biaya pemeliharaan, kompatibilitas dengan sistem lama, ketersediaan suku cadang, dan risiko kegagalan implementasi. Organisasi perlu memiliki kemampuan analisis teknologi agar dapat membedakan antara teknologi yang benar-benar matang dan teknologi yang masih bersifat eksperimental.

Tantangan ketiga adalah keterbatasan sumber daya manusia. Transformasi hijau membutuhkan tenaga kerja yang memahami teknologi, keberlanjutan, data, manajemen risiko, dan regulasi lingkungan. Banyak organisasi menghadapi kesenjangan kompetensi karena tenaga kerja belum terbiasa dengan teknologi hijau atau sistem digital baru. Oleh karena itu, transformasi teknologi harus disertai dengan reskilling, upskilling, pendidikan vokasi, dan penguatan kapasitas manajerial.

Tantangan keempat adalah resistensi organisasi. Perubahan teknologi sering menimbulkan kekhawatiran, terutama apabila teknologi baru dianggap mengganggu rutinitas kerja, menambah beban administrasi, atau mengancam posisi tertentu. Resistensi ini dapat menghambat keberhasilan transformasi hijau meskipun teknologi yang dipilih sudah tepat. Oleh sebab itu, manajemen perubahan, komunikasi internal, kepemimpinan, dan partisipasi pekerja menjadi faktor penting dalam manajemen teknologi.

Tantangan kelima adalah risiko *greenwashing*. Beberapa organisasi dapat menggunakan istilah hijau atau ramah lingkungan sebagai strategi pemasaran tanpa melakukan perubahan nyata dalam teknologi dan proses bisnisnya. Hal ini dapat merusak kepercayaan publik dan melemahkan agenda keberlanjutan. Oleh

karena itu, pengelolaan teknologi hijau harus disertai transparansi, pengukuran kinerja, pelaporan keberlanjutan, audit, dan standar yang dapat diverifikasi.

Tantangan keenam adalah integrasi kebijakan dan infrastruktur. Teknologi hijau membutuhkan dukungan ekosistem, seperti regulasi, jaringan energi, fasilitas daur ulang, standar produk, pasar karbon, transportasi publik, dan sistem pembiayaan. Tanpa ekosistem yang mendukung, teknologi hijau sulit berkembang secara luas. Dengan demikian, tantangan manajemen teknologi di era transformasi hijau tidak hanya berada pada tingkat organisasi, tetapi juga pada tingkat sistem ekonomi, kebijakan publik, dan kelembagaan.

INTEGRASI *TECHNOLOGY MANAGEMENT* DENGAN *SUSTAINABLE DEVELOPMENT*

Integrasi *technology management* dengan *sustainable development* berarti mengarahkan seluruh proses pengelolaan teknologi agar selaras dengan tujuan pembangunan berkelanjutan. Teknologi tidak lagi hanya dipandang sebagai alat pertumbuhan ekonomi, tetapi sebagai instrumen untuk meningkatkan kualitas hidup, melindungi lingkungan, memperkuat keadilan sosial, dan membangun ketahanan jangka panjang. Dalam konteks ini, setiap keputusan teknologi harus mempertimbangkan dampaknya terhadap manusia, planet, dan kesejahteraan.

Sustainable development menuntut keseimbangan antara dimensi ekonomi, sosial, dan lingkungan. *Technology management* berperan menerjemahkan keseimbangan tersebut ke dalam keputusan operasional dan strategis organisasi. Misalnya, dalam memilih teknologi produksi, organisasi harus mempertimbangkan produktivitas, biaya, keselamatan pekerja, emisi, limbah, efisiensi energi, dan dampak sosial. Dengan demikian, keberlanjutan

menjadi bagian dari proses manajemen teknologi, bukan sekadar tujuan tambahan.

Integrasi tersebut juga dapat dilakukan melalui pengembangan teknologi yang mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals*. Teknologi energi bersih berkaitan dengan SDG 7, teknologi industri berkelanjutan berkaitan dengan SDG 9, kota cerdas dan hijau berkaitan dengan SDG 11, konsumsi dan produksi bertanggung jawab berkaitan dengan SDG 12, serta teknologi mitigasi iklim berkaitan dengan SDG 13. Agenda 2030 menekankan bahwa pembangunan berkelanjutan membutuhkan transformasi sistemik melalui kemitraan lintas sektor.

Dalam organisasi, integrasi *technology management* dengan *sustainable development* dapat diwujudkan melalui strategi ESG, *green innovation roadmap*, *sustainability performance indicators*, dan tata kelola risiko lingkungan. Organisasi perlu menyusun peta jalan teknologi yang menjelaskan bagaimana teknologi digunakan untuk mencapai target efisiensi energi, pengurangan emisi, pengurangan limbah, peningkatan keselamatan, dan peningkatan nilai sosial. Peta jalan ini membantu organisasi menghindari keputusan teknologi yang bersifat parsial dan jangka pendek.

Integrasi juga membutuhkan kolaborasi antara pemerintah, industri, akademisi, komunitas, dan masyarakat. Pemerintah berperan menyediakan regulasi, standar, dan insentif. Industri berperan mengembangkan dan menerapkan teknologi. Akademisi berperan menghasilkan riset, metode, dan sumber daya manusia. Masyarakat berperan sebagai pengguna sekaligus pengawas sosial. Dalam kerangka ini, *technology management* menjadi bagian dari ekosistem inovasi berkelanjutan yang melibatkan banyak aktor.

Dengan demikian, integrasi *technology management* dengan *sustainable development* merupakan langkah penting untuk memastikan bahwa teknologi benar-benar mendukung masa depan yang lebih hijau, adil, dan produktif. Integrasi ini sebagai fondasi pemikiran utama, karena keberlanjutan tidak akan tercapai hanya

dengan teknologi canggih, tetapi membutuhkan manajemen yang tepat, etika yang kuat, kebijakan yang mendukung, dan komitmen kolektif dari seluruh pemangku kepentingan.



BAB 4

GREEN TECHNOLOGY DAN CLEAN TECHNOLOGY

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi telah memberikan kontribusi besar bagi kemajuan peradaban manusia. Teknologi memungkinkan peningkatan produktivitas, percepatan industrialisasi, kemudahan mobilitas, efisiensi komunikasi, serta peningkatan kualitas hidup masyarakat. Namun, pada saat yang sama, penggunaan teknologi yang tidak memperhatikan aspek lingkungan juga telah menimbulkan berbagai persoalan, seperti peningkatan emisi karbon, pencemaran udara dan air, kerusakan ekosistem, eksploitasi sumber daya alam, serta bertambahnya limbah industri dan konsumsi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kemajuan teknologi perlu diarahkan agar tidak hanya menghasilkan manfaat ekonomi dan sosial, tetapi juga mendukung keberlanjutan ekologis.

Dalam konteks *green innovation and technology management*, *green technology* dan *clean technology* menjadi dua konsep penting yang berperan dalam mendorong transformasi pembangunan menuju sistem yang lebih efisien, rendah emisi, hemat sumber daya, dan ramah lingkungan. *Green technology* menekankan pada pengembangan dan pemanfaatan teknologi yang mampu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, sedangkan *clean*

technology lebih menitikberatkan pada proses, produk, dan sistem yang dirancang untuk meminimalkan pencemaran, limbah, serta penggunaan energi dan bahan baku secara berlebihan. Keduanya memiliki tujuan yang saling berkaitan, yaitu menciptakan solusi teknologi yang mendukung keberlanjutan jangka panjang.

Penerapan *green technology* dan *clean technology* menjadi semakin relevan di tengah meningkatnya kesadaran global terhadap krisis iklim, keterbatasan sumber daya alam, pencemaran lingkungan, serta tuntutan efisiensi dalam sektor industri, energi, transportasi, pertanian, bangunan, kota, dan infrastruktur. Teknologi tidak lagi dapat diposisikan hanya sebagai alat untuk mempercepat pertumbuhan ekonomi, tetapi juga sebagai instrumen strategis untuk memperbaiki kualitas lingkungan, meningkatkan ketahanan sistem sosial-ekologis, dan mendorong perubahan menuju ekonomi rendah karbon. Oleh karena itu, pemahaman terhadap teknologi hijau dan teknologi bersih menjadi fondasi penting dalam pengembangan inovasi hijau.

Pembahasan mengenai *green technology* dan *clean technology* juga menuntut cara pandang yang menyeluruh. Teknologi hijau tidak hanya berkaitan dengan penggunaan energi terbarukan atau peralatan yang hemat energi, tetapi juga mencakup desain produk, proses produksi, efisiensi material, pengelolaan limbah, teknologi daur ulang, sistem transportasi rendah emisi, bangunan hemat energi, serta teknologi digital yang mendukung pemantauan dan pengambilan keputusan lingkungan. Dengan demikian, *green technology* dan *clean technology* perlu dipahami sebagai bagian dari sistem inovasi yang mengintegrasikan aspek teknis, manajerial, ekonomi, sosial, kebijakan, dan budaya keberlanjutan.

Bab ini membahas konsep *green technology* dan *clean technology* sebagai landasan penting dalam memahami arah perkembangan teknologi yang berorientasi pada keberlanjutan. Pembahasan diawali dengan pengertian *green technology*, karena pemahaman terhadap makna, ruang lingkup, karakteristik, dan tujuan teknologi

hijau menjadi dasar sebelum membahas penerapan dan perbedaannya dengan teknologi bersih. Melalui pemahaman tersebut, *green technology* dapat diposisikan bukan hanya sebagai inovasi teknis, tetapi sebagai strategi transformasi yang menghubungkan kemajuan teknologi dengan tanggung jawab ekologis, efisiensi sumber daya, dan pembangunan berkelanjutan.

PENGERTIAN GREEN TECHNOLOGY

Green technology atau teknologi hijau adalah teknologi yang dirancang, dikembangkan, dan diterapkan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan serta mendukung keberlanjutan sumber daya alam. Teknologi ini mencakup perangkat, proses, sistem, metode, dan praktik yang bertujuan meningkatkan efisiensi energi, mengurangi emisi, menekan limbah, menghemat air, serta memperbaiki kualitas lingkungan. Dalam konteks *green innovation and technology management*, *green technology* tidak hanya dipahami sebagai teknologi yang “ramah lingkungan”, tetapi juga sebagai instrumen strategis untuk mengubah pola produksi, konsumsi, dan pengelolaan sumber daya secara lebih berkelanjutan.

Secara konseptual, *green technology* memiliki hubungan erat dengan prinsip pembangunan berkelanjutan. Teknologi ini diarahkan untuk memenuhi kebutuhan manusia saat ini tanpa mengurangi kemampuan generasi mendatang dalam memenuhi kebutuhannya. Oleh sebab itu, *green technology* tidak hanya berorientasi pada efisiensi teknis, tetapi juga pada tanggung jawab ekologis, kelayakan ekonomi, dan kebermanfaatan sosial. Teknologi hijau menjadi penting karena berbagai aktivitas manusia, terutama industri, transportasi, bangunan, pertanian, dan konsumsi rumah tangga, telah memberikan tekanan besar terhadap ekosistem global.

Green technology dapat diterapkan dalam berbagai bidang, seperti energi terbarukan, bangunan hijau, kendaraan listrik, pertanian berkelanjutan, pengolahan limbah, pengelolaan air, manufaktur bersih, dan sistem kota cerdas. Dalam sektor energi, misalnya, teknologi hijau mencakup panel surya, turbin angin, mikrohidro, bioenergi, panas bumi, dan sistem penyimpanan energi. Dalam sektor bangunan, teknologi hijau mencakup desain pasif, ventilasi alami, material rendah karbon, sistem pencahayaan hemat energi, serta pemanenan air hujan.

Green technology juga memiliki dimensi manajerial. Artinya, teknologi hijau tidak hanya bergantung pada keberadaan alat atau mesin, tetapi juga pada kemampuan organisasi dan masyarakat dalam memilih, menggunakan, memelihara, mengevaluasi, dan mengembangkan teknologi tersebut. Teknologi yang secara teknis ramah lingkungan dapat gagal memberikan manfaat apabila tidak dikelola dengan baik. Karena itu, manajemen teknologi menjadi bagian penting dalam memastikan bahwa *green technology* benar-benar menghasilkan dampak keberlanjutan.

Dalam perspektif global, *green technology* semakin penting karena dunia menghadapi tantangan perubahan iklim, krisis energi, pencemaran, dan penggunaan sumber daya yang terus meningkat. International Energy Agency menjelaskan bahwa teknologi energi bersih menjadi bagian penting dalam transformasi sistem energi, perdagangan, manufaktur, dan kebijakan iklim global. Hal ini menunjukkan bahwa *green technology* tidak lagi menjadi isu pinggiran, tetapi telah menjadi agenda utama pembangunan ekonomi dan industri masa depan.

Dengan demikian, *green technology* dapat dipahami sebagai teknologi yang mengintegrasikan tujuan ekologis, efisiensi ekonomi, dan manfaat sosial. Teknologi ini menjadi sarana penting untuk mempercepat transisi menuju ekonomi rendah karbon, masyarakat hemat sumber daya, dan sistem pembangunan yang lebih berkelanjutan. Di sini *green technology* diposisikan sebagai

salah satu pilar utama dari *green innovation* karena inovasi hijau membutuhkan basis teknologi yang mampu menjawab masalah lingkungan secara nyata.

PENGERTIAN *CLEAN TECHNOLOGY*

Clean technology atau teknologi bersih adalah teknologi yang dirancang untuk mengurangi pencemaran, limbah, emisi, dan penggunaan sumber daya melalui proses produksi atau layanan yang lebih efisien dan lebih bersih. Istilah ini sering digunakan dalam konteks industri, energi, manufaktur, pengelolaan limbah, dan investasi teknologi. *Clean technology* berfokus pada upaya menghasilkan output yang sama atau lebih baik dengan dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan teknologi konvensional.

Clean technology memiliki akar pemikiran pada konsep *cleaner production*, yaitu pendekatan pencegahan pencemaran sejak dari sumbernya. Berbeda dengan pendekatan lama yang hanya mengolah limbah setelah dihasilkan, *clean technology* berusaha mencegah terbentuknya limbah dan emisi sejak proses awal. Oleh karena itu, teknologi bersih lebih menekankan efisiensi proses, substitusi bahan berbahaya, optimasi energi, perbaikan proses produksi, dan pengurangan kehilangan material.

Dalam sektor energi, *clean technology* mencakup teknologi pembangkit energi rendah emisi, efisiensi energi, penyimpanan energi, jaringan listrik pintar, hidrogen rendah emisi, kendaraan listrik, dan teknologi penangkapan karbon. Dalam sektor industri, *clean technology* dapat berupa mesin hemat energi, sistem daur ulang internal, teknologi pemulihan panas, penggunaan bahan baku alternatif, serta sistem produksi yang menghasilkan limbah minimum. IEA mengelompokkan teknologi energi bersih dalam kerangka yang luas, termasuk kendaraan listrik, baterai, panel

surya, turbin angin, *heat pump*, elektroliser, bahan bakar bersih, serta material rendah emisi.

Clean technology juga berkaitan erat dengan efisiensi ekonomi. Teknologi bersih dapat membantu organisasi mengurangi biaya bahan baku, biaya energi, biaya pengolahan limbah, dan risiko kepatuhan regulasi. Dengan demikian, *clean technology* tidak hanya memberikan manfaat lingkungan, tetapi juga manfaat bisnis. Banyak perusahaan mulai melihat teknologi bersih sebagai investasi strategis untuk meningkatkan efisiensi, reputasi, dan daya saing.

Dalam konteks keberlanjutan, *clean technology* tidak hanya dilihat dari kemampuan mengurangi pencemaran pada satu tahap proses, tetapi juga dari kontribusinya terhadap siklus hidup produk. Teknologi yang terlihat bersih pada tahap penggunaan masih perlu dievaluasi pada tahap produksi, distribusi, pemeliharaan, dan akhir masa pakai. Oleh karena itu, penilaian *clean technology* perlu melibatkan pendekatan *life cycle assessment* agar manfaat lingkungannya dapat dinilai secara lebih menyeluruh.

Dengan demikian, *clean technology* adalah teknologi yang menekankan pengurangan pencemaran dan peningkatan efisiensi proses. Jika *green technology* memiliki cakupan luas terhadap keberlanjutan lingkungan, maka *clean technology* lebih sering menekankan aspek kebersihan proses, penurunan emisi, dan pencegahan limbah. Namun, keduanya saling melengkapi dalam membangun sistem produksi dan konsumsi yang lebih rendah dampak ekologisnya.

PERBEDAAN GREEN TECHNOLOGY DAN CLEAN TECHNOLOGY

Green technology dan *clean technology* sering digunakan secara bergantian, tetapi keduanya memiliki penekanan yang berbeda. *Green technology* memiliki cakupan yang lebih luas karena berkaitan

dengan seluruh teknologi yang mendukung keberlanjutan lingkungan, termasuk energi terbarukan, konservasi sumber daya, bangunan hijau, transportasi rendah emisi, pengelolaan air, pertanian berkelanjutan, serta ekonomi sirkular. Sementara itu, *clean technology* lebih menekankan teknologi yang mengurangi polusi, emisi, limbah, dan inefisiensi proses.

Perbedaan utama keduanya terletak pada fokus konseptual. *Green technology* lebih menekankan orientasi keberlanjutan dan perlindungan lingkungan secara menyeluruh. *Clean technology* lebih menekankan proses yang lebih bersih, efisien, dan rendah pencemaran. Misalnya, panel surya dapat disebut *green technology* karena memanfaatkan energi terbarukan, sekaligus dapat disebut *clean technology* karena menghasilkan listrik dengan emisi operasional yang rendah. Namun, teknologi pengendalian emisi pada cerobong industri lebih sering disebut *clean technology* karena fokusnya adalah mengurangi pencemaran dari proses industri.



Gambar 6 Perbedaan *green technology* dan *clean technology*.

Dari sisi ruang lingkup, *green technology* mencakup aspek desain, penggunaan, perilaku, sistem, dan tata kelola. Teknologi

hijau dapat berupa desain kota berbasis transportasi publik, bangunan hemat energi, sistem pertanian organik, atau penggunaan material ramah lingkungan. *Clean technology* umumnya lebih dekat dengan perbaikan proses teknis, seperti pengurangan konsumsi energi, pengolahan limbah, filtrasi udara, daur ulang air, atau substitusi bahan kimia berbahaya.

Dari sisi tujuan, *green technology* bertujuan mendukung keberlanjutan jangka panjang, sedangkan *clean technology* bertujuan membuat proses menjadi lebih bersih dan efisien. *Green technology* sering dikaitkan dengan transformasi sistemik, sedangkan *clean technology* sering menjadi solusi teknis terhadap masalah pencemaran atau inefisiensi tertentu. Namun, dalam praktiknya, keduanya saling berkaitan dan sering menjadi bagian dari strategi *green innovation*.

Dari sisi penerapan organisasi, *green technology* biasanya memerlukan perubahan strategi, budaya organisasi, model bisnis, dan perilaku pengguna. *Clean technology* dapat diterapkan melalui perbaikan teknologi produksi, pemasangan alat pengendali pencemaran, penggunaan mesin hemat energi, atau peningkatan efisiensi operasional. Oleh karena itu, *green technology* sering membutuhkan pendekatan lintas sektor, sedangkan *clean technology* dapat dimulai dari proses teknis yang lebih spesifik.

Dengan demikian, perbedaan *green technology* dan *clean technology* sebaiknya tidak dipahami sebagai pemisahan yang kaku. *Green technology* dan *clean technology* merupakan dua konsep yang saling melengkapi. *Green technology* memberikan kerangka keberlanjutan yang lebih luas, sedangkan *clean technology* menyediakan solusi teknis untuk mengurangi dampak lingkungan secara langsung. Dalam manajemen teknologi, keduanya perlu diintegrasikan agar organisasi mampu mencapai efisiensi, kepatuhan lingkungan, inovasi, dan keberlanjutan jangka panjang.

PRINSIP DASAR TEKNOLOGI RAMAH LINGKUNGAN

1. Cegah Pencemaran

Prinsip pertama teknologi ramah lingkungan adalah pencegahan pencemaran sejak dari sumbernya. Prinsip ini menekankan bahwa masalah lingkungan sebaiknya dicegah sebelum terjadi, bukan hanya ditangani setelah menimbulkan dampak. Dalam konteks industri, pendekatan ini dapat dilakukan melalui pemilihan bahan baku yang lebih aman, proses produksi yang lebih bersih, penggunaan energi yang lebih efisien, serta pengurangan limbah sejak tahap desain.

2. Efisiensi Sumber Daya

Prinsip kedua adalah efisiensi sumber daya. Teknologi ramah lingkungan harus mampu menghasilkan manfaat maksimum dengan penggunaan sumber daya minimum. Efisiensi ini mencakup penghematan energi, air, bahan baku, lahan, dan waktu. Prinsip ini sangat penting karena penggunaan sumber daya global terus meningkat dan berkontribusi terhadap perubahan iklim, kehilangan biodiversitas, serta pencemaran. UNEP menekankan bahwa pengelolaan sumber daya dan limbah harus diarahkan menuju ekonomi sirkular dan masyarakat nol limbah agar beban ekologis dapat dikurangi.

3. Pemanfaatan Energi Rendah Karbon

Prinsip ketiga adalah penggunaan energi rendah karbon. Teknologi ramah lingkungan perlu diarahkan untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil dan memperluas pemanfaatan energi terbarukan. Energi surya, angin, hidro, panas bumi, biomassa berkelanjutan, serta teknologi penyimpanan energi menjadi bagian penting dari prinsip ini. Namun, penerapan energi rendah karbon harus disertai dengan penilaian dampak lingkungan, sosial, dan ekonomi secara menyeluruh.

4. Pendekatan Siklus Hidup

Prinsip keempat adalah pendekatan siklus hidup. Teknologi ramah lingkungan tidak cukup dinilai dari manfaatnya saat digunakan, tetapi harus dianalisis sejak bahan baku diperoleh, proses produksi dilakukan, produk digunakan, hingga produk berakhir sebagai limbah atau bahan daur ulang. Pendekatan ini dikenal sebagai *life cycle thinking*. Melalui prinsip ini, pengelola teknologi dapat menghindari solusi yang tampak ramah lingkungan pada satu tahap, tetapi menimbulkan dampak besar pada tahap lain.

5. Keselamatan dan Kesehatan Manusia

Prinsip kelima adalah keselamatan dan kesehatan manusia. Teknologi ramah lingkungan harus mengurangi risiko terhadap kesehatan pekerja, pengguna, dan masyarakat sekitar. Teknologi yang menggunakan bahan beracun, menghasilkan polusi berbahaya, atau menimbulkan risiko sosial tidak dapat disebut ramah lingkungan secara utuh. Oleh karena itu, teknologi hijau harus mengintegrasikan prinsip keselamatan kerja, kesehatan lingkungan, dan keadilan sosial.

6. Mudah Diaplikasikan

Prinsip keenam adalah kemampuan untuk digunakan, dipelihara, dan direplikasi. Teknologi yang terlalu rumit, mahal, atau sulit dipelihara dapat mengalami kegagalan dalam penerapan. Teknologi ramah lingkungan harus disesuaikan dengan kondisi sosial, ekonomi, budaya, dan kelembagaan tempat teknologi tersebut digunakan. Dalam konteks negara berkembang, teknologi yang tepat guna, mudah dirawat, dan berbasis potensi lokal sering lebih efektif dibandingkan teknologi mahal yang tidak sesuai dengan kapasitas pengguna.

7. Inovasi Berkelanjutan

Prinsip ketujuh adalah inovasi berkelanjutan. Teknologi ramah lingkungan harus terus dikembangkan karena tantangan lingkungan dan kebutuhan masyarakat juga terus berubah.

Inovasi diperlukan untuk meningkatkan efisiensi, menurunkan biaya, memperbaiki kualitas, dan memperluas akses masyarakat terhadap teknologi hijau. Oleh sebab itu, teknologi ramah lingkungan tidak boleh dipandang sebagai produk akhir, tetapi sebagai proses pembelajaran dan perbaikan berkelanjutan.

TEKNOLOGI HEMAT ENERGI DAN RENDAH EMISI

Teknologi hemat energi dan rendah emisi merupakan salah satu pilar utama *green technology* dan *clean technology*. Teknologi ini bertujuan mengurangi konsumsi energi, meningkatkan efisiensi penggunaan energi, serta menurunkan emisi gas rumah kaca dan polutan udara. Dalam konteks perubahan iklim, teknologi hemat energi menjadi sangat penting karena sektor energi merupakan salah satu penyumbang utama emisi global.

Contoh teknologi hemat energi dalam kehidupan sehari-hari adalah lampu LED, peralatan elektronik berlabel efisiensi energi, kompor induksi, pendingin ruangan hemat energi, sensor otomatis, dan sistem manajemen energi rumah tangga. Teknologi tersebut dapat mengurangi konsumsi listrik tanpa mengurangi kenyamanan pengguna. Pada skala rumah tangga, penerapan teknologi hemat energi juga dapat menurunkan biaya listrik dan meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap konsumsi energi yang bertanggung jawab.

Dalam sektor industri, teknologi hemat energi mencakup motor listrik efisien, boiler hemat energi, sistem pemulihan panas, otomasi proses, audit energi, sensor digital, dan sistem manajemen energi berbasis data. Industri dapat menggunakan teknologi ini untuk mengurangi intensitas energi per unit produk. Manajemen energi yang baik juga membantu perusahaan memenuhi standar lingkungan dan meningkatkan daya saing melalui penghematan biaya operasional.

Teknologi rendah emisi juga berkembang dalam sektor transportasi. Kendaraan listrik, transportasi publik berbasis energi bersih, bahan bakar rendah karbon, sistem manajemen lalu lintas cerdas, dan infrastruktur pengisian kendaraan listrik merupakan contoh teknologi yang mendukung mobilitas rendah emisi. Namun, manfaat kendaraan listrik perlu dilihat secara menyeluruh, termasuk sumber listrik yang digunakan, produksi baterai, umur pakai, dan sistem daur ulang baterai.

Dalam sektor bangunan, teknologi hemat energi dapat diterapkan melalui desain pasif, insulasi termal, pencahayaan alami, ventilasi silang, kaca rendah emisi, sistem pendinginan efisien, panel surya atap, dan *building energy management system*. Bangunan merupakan sektor penting karena kebutuhan pendinginan, pencahayaan, dan peralatan listrik terus meningkat di wilayah perkotaan. Oleh karena itu, teknologi bangunan hemat energi memiliki kontribusi besar terhadap pengurangan emisi.

IEA menegaskan bahwa teknologi energi bersih, termasuk energi terbarukan, kendaraan listrik, baterai, *heat pump*, elektroliser, serta material rendah emisi, menjadi bagian penting dari transformasi energi dan industri global. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi hemat energi dan rendah emisi tidak hanya relevan bagi sektor lingkungan, tetapi juga bagi perdagangan, manufaktur, investasi, dan strategi pembangunan nasional.

Dengan demikian, teknologi hemat energi dan rendah emisi perlu dipahami sebagai strategi teknis sekaligus strategi manajerial. Teknologi tersebut membutuhkan kebijakan, insentif, infrastruktur, sumber daya manusia, pembiayaan, dan perubahan perilaku. Tanpa dukungan manajemen teknologi yang baik, teknologi hemat energi tidak akan memberikan dampak optimal bagi keberlanjutan.

TEKNOLOGI PENGELOLAAN LIMBAH DAN DAUR ULANG

Teknologi pengelolaan limbah dan daur ulang merupakan bagian penting dari *green technology* karena limbah menjadi salah satu persoalan lingkungan paling serius di dunia modern. Peningkatan konsumsi, urbanisasi, industrialisasi, dan gaya hidup praktis telah meningkatkan volume limbah rumah tangga, industri, elektronik, plastik, konstruksi, dan makanan. Tanpa teknologi dan sistem pengelolaan yang baik, limbah dapat mencemari tanah, air, udara, serta menimbulkan risiko kesehatan masyarakat.

Teknologi pengelolaan limbah mencakup berbagai tahapan mulai dari pengurangan limbah di sumber, pemilahan, pengumpulan, pengangkutan, pengolahan, daur ulang, pemulihan energi, hingga pembuangan akhir yang aman. Dalam pendekatan modern, prioritas utama bukan lagi membuang limbah ke tempat pembuangan akhir, tetapi mencegah, mengurangi, menggunakan kembali, dan mendaur ulang limbah. Prinsip ini sejalan dengan hierarki pengelolaan limbah dan ekonomi sirkular.

Daur ulang merupakan teknologi dan sistem yang bertujuan mengembalikan material bekas ke dalam siklus produksi. Material seperti kertas, logam, kaca, plastik, tekstil, dan komponen elektronik dapat diproses kembali menjadi bahan baku baru. Namun, daur ulang tidak selalu sederhana karena membutuhkan pemilahan yang baik, teknologi pengolahan, pasar material daur ulang, regulasi, dan partisipasi masyarakat. Oleh karena itu, daur ulang harus dilihat sebagai bagian dari sistem, bukan hanya aktivitas teknis.

Teknologi pengolahan limbah organik juga memiliki peran penting. Limbah makanan, limbah pertanian, dan limbah taman dapat diolah melalui komposting, biodigester, atau produksi biogas. Teknologi ini tidak hanya mengurangi volume limbah, tetapi juga menghasilkan kompos atau energi yang bermanfaat. Dalam konteks kota, pengelolaan limbah organik dapat membantu

mengurangi beban tempat pembuangan akhir dan menurunkan emisi metana dari limbah yang membusuk.

UNEP dalam *Global Waste Management Outlook 2024* memperkirakan timbunan sampah kota global meningkat dari 2,1 miliar ton pada 2023 menjadi 3,8 miliar ton pada 2050 apabila tidak ada perubahan signifikan. Laporan tersebut juga menunjukkan bahwa biaya langsung dan biaya tersembunyi akibat pengelolaan limbah yang buruk dapat meningkat besar, sehingga pencegahan limbah, pengelolaan aman, dan ekonomi sirkular menjadi agenda mendesak.

Teknologi pengelolaan limbah industri mencakup pengolahan air limbah, filtrasi udara, pemulihan bahan kimia, penggunaan kembali air proses, pengurangan lumpur, dan teknologi *waste-to-energy*. Namun, teknologi *waste-to-energy* perlu dikelola secara hati-hati agar tidak menjadi alasan untuk mempertahankan produksi limbah yang tinggi. Prinsip utama tetap harus mengutamakan pengurangan, penggunaan kembali, dan daur ulang sebelum pemulihan energi.

Dengan demikian, teknologi pengelolaan limbah dan daur ulang merupakan elemen penting dalam transisi menuju ekonomi sirkular. Teknologi ini membutuhkan integrasi antara desain produk, perilaku konsumen, sistem logistik, industri daur ulang, regulasi, dan pasar. Tanpa integrasi tersebut, teknologi pengelolaan limbah akan sulit menyelesaikan persoalan limbah secara menyeluruh.

TEKNOLOGI AIR BERSIH DAN SANITASI BERKELANJUTAN

Teknologi air bersih dan sanitasi berkelanjutan merupakan bagian penting dari *green technology* karena air adalah kebutuhan dasar manusia dan fondasi kesehatan publik. Ketersediaan air bersih tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis, tetapi juga

dengan keadilan sosial, kesehatan lingkungan, tata kelola sumber daya, dan ketahanan wilayah. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, teknologi air bersih dan sanitasi berperan langsung dalam mendukung pencapaian SDG 6 tentang air bersih dan sanitasi layak.

Teknologi air bersih mencakup sistem penyaringan, desinfeksi, pengolahan air permukaan, pengolahan air tanah, desalinasi, pemanenan air hujan, dan distribusi air yang aman. Teknologi ini harus disesuaikan dengan kondisi lokal, seperti kualitas sumber air, kemampuan ekonomi masyarakat, kapasitas kelembagaan, dan pola permukiman. Di banyak wilayah, teknologi sederhana seperti filtrasi pasir lambat, klorinasi, dan penampungan air hujan dapat memberikan manfaat besar apabila dikelola dengan baik.

Sanitasi berkelanjutan mencakup teknologi pengolahan air limbah domestik, toilet sehat, *septic tank* kedap, instalasi pengolahan air limbah komunal, *constructed wetland*, dan sistem pemanfaatan kembali air olahan. Sanitasi yang buruk dapat menyebabkan pencemaran air tanah dan air permukaan, menyebarkan penyakit, serta menurunkan kualitas lingkungan permukiman. Oleh karena itu, teknologi sanitasi harus dipahami sebagai bagian dari sistem kesehatan lingkungan.

WHO/UNICEF melalui Joint Monitoring Programme melaporkan bahwa pada 2022 sekitar 2,2 miliar orang di dunia belum memiliki layanan air minum yang dikelola secara aman. Data ini menunjukkan bahwa teknologi air bersih dan sanitasi masih menjadi tantangan besar, terutama pada wilayah miskin, terpencil, dan rentan.

Teknologi air bersih dan sanitasi juga harus memperhatikan efisiensi dan keberlanjutan. Sistem distribusi air yang bocor, penggunaan air berlebihan, dan pembuangan air limbah tanpa pengolahan dapat memperparah krisis air. Oleh karena itu, teknologi seperti meter air pintar, sensor kebocoran, daur ulang air

abu-abu, irigasi hemat air, dan penggunaan kembali air limbah terolah menjadi semakin penting. Teknologi ini membantu mengurangi tekanan terhadap sumber air dan meningkatkan ketahanan air perkotaan.

Dalam konteks perubahan iklim, teknologi air bersih dan sanitasi perlu dirancang secara adaptif. Perubahan pola hujan, banjir, kekeringan, dan intrusi air laut dapat mengganggu ketersediaan dan kualitas air. Oleh karena itu, sistem air bersih dan sanitasi harus memiliki ketahanan terhadap risiko iklim. Pendekatan berbasis alam seperti perlindungan daerah tangkapan air, rehabilitasi sungai, ruang terbuka hijau, dan *constructed wetland* dapat dipadukan dengan teknologi rekayasa.

Dengan demikian, teknologi air bersih dan sanitasi berkelanjutan tidak hanya berfungsi menyediakan layanan dasar, tetapi juga menjaga kesehatan masyarakat, melindungi ekosistem, dan memperkuat ketahanan wilayah. Teknologi ini perlu dikembangkan melalui integrasi antara rekayasa, perencanaan wilayah, pendidikan masyarakat, pembiayaan, dan tata kelola kelembagaan.

GREEN TECHNOLOGY DALAM RUMAH TANGGA, INDUSTRI, DAN PERKOTAAN



Gambar 7 Green technology dalam rumah tangga, industri, dan perkotaan.

Green technology dalam rumah tangga dapat diterapkan melalui berbagai teknologi sederhana yang mendukung efisiensi energi, penghematan air, pengurangan limbah, dan pola konsumsi berkelanjutan. Contohnya adalah lampu LED, peralatan listrik hemat energi, panel surya atap, kompor efisien, pemanenan air hujan, komposter rumah tangga, kran hemat air, dan penggunaan produk isi ulang. Meskipun skalanya kecil, penerapan teknologi hijau di rumah tangga memiliki dampak besar apabila dilakukan secara luas oleh masyarakat.

Dalam rumah tangga, keberhasilan *green technology* sangat dipengaruhi oleh perilaku pengguna. Teknologi hemat energi tidak akan optimal apabila pengguna tetap boros listrik. Sistem pemilahan sampah tidak akan berhasil apabila penghuni rumah tidak memiliki kebiasaan memilah limbah. Oleh karena itu, penerapan teknologi hijau di rumah tangga harus disertai edukasi,

kesadaran lingkungan, insentif, dan kemudahan akses terhadap fasilitas pendukung.

Dalam sektor industri, *green technology* diterapkan melalui efisiensi energi, produksi bersih, penggunaan bahan baku ramah lingkungan, pengelolaan limbah, daur ulang air, otomasi proses, dan sistem manajemen lingkungan. Industri memiliki peran penting karena aktivitas produksi sering menggunakan energi, air, bahan kimia, dan material dalam jumlah besar. Penerapan teknologi hijau di industri dapat mengurangi biaya operasional, memperbaiki kinerja lingkungan, meningkatkan kepatuhan regulasi, dan memperkuat daya saing.

Green technology dalam industri juga berkaitan dengan transformasi rantai pasok. Perusahaan tidak hanya perlu memperbaiki proses internal, tetapi juga memastikan bahwa pemasok, distribusi, penggunaan produk, dan pengelolaan akhir produk mengikuti prinsip keberlanjutan. Konsep *green supply chain management*, *extended producer responsibility*, dan *circular business model* menjadi penting untuk memperluas dampak teknologi hijau dari tingkat pabrik menuju sistem ekonomi yang lebih luas.

Dalam konteks perkotaan, *green technology* diterapkan melalui bangunan hijau, transportasi publik rendah emisi, pengelolaan air hujan, ruang terbuka hijau, sistem drainase berkelanjutan, *smart grid*, lampu jalan hemat energi, pengelolaan sampah terpadu, dan infrastruktur biru-hijau. Kota menjadi lokasi penting penerapan teknologi hijau karena konsentrasi penduduk, bangunan, transportasi, konsumsi energi, dan produksi limbah sangat tinggi di wilayah perkotaan.

Green technology dalam perkotaan juga dapat diintegrasikan dengan konsep *smart city*. Sensor, data spasial, sistem informasi geografis, *Internet of Things*, dan *artificial intelligence* dapat membantu pemerintah kota memantau kualitas udara, konsumsi energi, volume sampah, lalu lintas, banjir, dan penggunaan air. Namun, *smart city* hanya dapat disebut hijau apabila teknologi

digital tersebut benar-benar digunakan untuk mengurangi beban ekologis dan meningkatkan kualitas hidup masyarakat, bukan hanya untuk modernisasi simbolik.

Penerapan *green technology* pada rumah tangga, industri, dan perkotaan menunjukkan bahwa teknologi hijau memiliki skala yang sangat luas. Pada skala mikro, teknologi hijau mengubah kebiasaan rumah tangga. Pada skala meso, teknologi hijau memperbaiki proses industri dan rantai nilai. Pada skala makro, teknologi hijau membantu kota dan wilayah membangun sistem yang lebih rendah emisi, hemat sumber daya, dan adaptif terhadap perubahan iklim.

Dengan demikian, *green technology* harus dipahami sebagai bagian dari transformasi sosial-teknologis. Teknologi hijau tidak hanya membutuhkan alat dan infrastruktur, tetapi juga perubahan perilaku, kebijakan, manajemen, pembiayaan, dan kolaborasi multipihak. Inilah sebabnya *green technology* menjadi bagian penting dalam *green innovation and technology management*, karena keberhasilan teknologi hijau sangat bergantung pada kemampuan manusia dan organisasi dalam mengelolanya secara berkelanjutan.



BAB 5

TEORI INOVASI DAN DIFUSI TEKNOLOGI HIJAU

Perkembangan teknologi hijau tidak dapat dilepaskan dari dinamika inovasi dan proses penyebarannya di dalam masyarakat, industri, organisasi, maupun sistem kebijakan. Suatu teknologi ramah lingkungan tidak cukup hanya ditemukan atau dikembangkan secara teknis, tetapi juga harus mampu diterima, diadopsi, dimanfaatkan, dan dikembangkan secara berkelanjutan oleh berbagai aktor. Oleh karena itu, pemahaman mengenai teori inovasi dan difusi teknologi menjadi penting untuk menjelaskan bagaimana gagasan, produk, proses, atau sistem baru dapat berubah dari sekadar temuan menjadi praktik nyata yang memberikan dampak ekologis, ekonomi, dan sosial.

Dalam konteks *green innovation and technology management*, inovasi hijau merupakan proses penciptaan nilai baru yang diarahkan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, meningkatkan efisiensi sumber daya, menekan emisi, mengurangi limbah, serta mendukung keberlanjutan jangka panjang. Inovasi hijau tidak hanya berkaitan dengan teknologi fisik, seperti energi terbarukan, kendaraan listrik, material ramah lingkungan, atau sistem pengolahan limbah, tetapi juga mencakup inovasi proses, inovasi manajemen, inovasi organisasi, inovasi

layanan, dan inovasi model bisnis. Dengan demikian, teknologi hijau harus dipahami sebagai bagian dari sistem inovasi yang kompleks dan melibatkan interaksi antara pengetahuan, pasar, regulasi, budaya organisasi, dan kebutuhan masyarakat.

Difusi teknologi hijau menjadi aspek penting karena keberhasilan inovasi tidak hanya ditentukan oleh kualitas teknologinya, tetapi juga oleh kemampuan teknologi tersebut untuk menyebar dan diadopsi secara luas. Banyak teknologi hijau yang secara teknis telah tersedia, namun belum sepenuhnya digunakan karena adanya hambatan biaya, keterbatasan infrastruktur, rendahnya literasi teknologi, resistensi organisasi, ketidakpastian regulasi, atau kurangnya insentif pasar. Oleh sebab itu, teori difusi teknologi membantu menjelaskan faktor-faktor yang memengaruhi kecepatan, pola, dan tingkat penerimaan inovasi hijau dalam berbagai konteks.

Pembahasan mengenai teori inovasi dan difusi teknologi hijau juga penting untuk memahami hubungan antara penemuan, pengembangan, komersialisasi, adopsi, dan transformasi sistem. Inovasi hijau tidak berlangsung secara linier, melainkan melalui proses interaktif yang melibatkan perguruan tinggi, lembaga riset, industri, pemerintah, masyarakat, investor, dan pengguna akhir. Dalam proses tersebut, keberhasilan teknologi hijau sangat dipengaruhi oleh kemampuan aktor-aktor tersebut dalam membangun kolaborasi, menciptakan ekosistem inovasi, mengelola risiko, serta menyesuaikan teknologi dengan kebutuhan lokal dan tantangan global.

Bab ini membahas teori inovasi dan difusi teknologi hijau sebagai dasar untuk memahami bagaimana inovasi lahir, berkembang, diterima, dan memberikan dampak dalam pembangunan berkelanjutan. Pembahasan diawali dengan konsep dasar inovasi karena pemahaman terhadap makna, karakteristik, jenis, dan proses inovasi menjadi fondasi penting sebelum membahas secara lebih khusus mengenai difusi teknologi hijau.

Melalui landasan tersebut, *green innovation* dapat dipahami bukan hanya sebagai hasil teknologi, tetapi sebagai proses perubahan sistemik yang menuntut kreativitas, kolaborasi, pembelajaran organisasi, dukungan kebijakan, dan orientasi keberlanjutan.

KONSEP DASAR INOVASI



Gambar 9 Konsep dasar inovasi.

Inovasi merupakan proses penciptaan, pengembangan, penerapan, dan penyebarluasan gagasan baru yang menghasilkan nilai bagi individu, organisasi, masyarakat, maupun lingkungan. Dalam konteks manajemen, inovasi tidak hanya berarti penemuan baru, tetapi juga mencakup kemampuan mengubah pengetahuan, teknologi, kreativitas, dan kebutuhan pasar menjadi produk, proses, layanan, sistem, atau model bisnis yang bermanfaat. OECD dan Eurostat dalam *Oslo Manual 2018* menjelaskan bahwa inovasi bisnis dapat berupa produk baru atau proses bisnis baru yang berbeda secara signifikan dari produk atau proses sebelumnya dan telah diperkenalkan ke pasar atau digunakan oleh organisasi.

Secara konseptual, inovasi berbeda dari invensi. Invenisi adalah penemuan atau penciptaan ide, metode, atau teknologi baru, sedangkan inovasi adalah penerapan invensi tersebut sehingga menghasilkan nilai nyata. Suatu teknologi baru belum dapat disebut inovasi apabila belum digunakan, diterapkan, atau memberikan manfaat bagi pengguna. Oleh karena itu, inovasi selalu mengandung unsur kebaruan, kegunaan, penerapan, dan penciptaan nilai.

Dalam konteks *green innovation*, inovasi diarahkan untuk menghasilkan manfaat lingkungan, ekonomi, sosial, dan teknologi secara bersamaan. Inovasi hijau tidak cukup hanya menghadirkan kebaruan teknis, tetapi harus mampu mengurangi emisi, menghemat energi, menekan limbah, meningkatkan efisiensi sumber daya, atau memperbaiki kualitas lingkungan. Dengan demikian, inovasi hijau memiliki dimensi normatif yang lebih kuat dibandingkan inovasi konvensional karena terkait langsung dengan tanggung jawab ekologis dan keberlanjutan pembangunan.

Konsep dasar inovasi juga berkaitan dengan perubahan. Inovasi muncul karena adanya masalah, kebutuhan, peluang, tekanan lingkungan, perkembangan ilmu pengetahuan, atau perubahan perilaku masyarakat. Dalam bidang teknologi hijau, inovasi sering didorong oleh krisis iklim, regulasi lingkungan, kelangkaan energi, tuntutan konsumen, dan kebutuhan efisiensi industri. Oleh karena itu, inovasi hijau dapat dipahami sebagai respons kreatif dan strategis terhadap tantangan keberlanjutan.

Inovasi dapat terjadi secara radikal maupun inkremental. Inovasi radikal menghasilkan perubahan besar, misalnya transisi dari kendaraan berbahan bakar fosil menuju kendaraan listrik. Inovasi inkremental berupa perbaikan bertahap, misalnya peningkatan efisiensi panel surya, pengurangan konsumsi energi mesin industri, atau penyempurnaan desain kemasan ramah lingkungan. Keduanya penting karena transformasi hijau

mebutuhkan perubahan besar sekaligus perbaikan berkelanjutan dalam praktik sehari-hari.

Dengan demikian, konsep dasar inovasi di sini harus dipahami sebagai proses sistemik yang melibatkan ide, teknologi, organisasi, pasar, kebijakan, budaya, dan masyarakat. Inovasi hijau tidak berdiri sendiri sebagai produk teknologi, tetapi merupakan hasil interaksi antara pengetahuan ilmiah, kebutuhan sosial, tekanan lingkungan, strategi bisnis, dan dukungan kelembagaan. Oleh karena itu, keberhasilan inovasi hijau sangat bergantung pada kemampuan mengelola proses inovasi secara terencana, adaptif, dan berkelanjutan.

JENIS-JENIS INOVASI

Inovasi produk adalah inovasi yang menghasilkan barang atau jasa baru atau yang mengalami perbaikan signifikan. Dalam konteks teknologi hijau, inovasi produk dapat berupa kendaraan listrik, panel surya, lampu hemat energi, material bangunan rendah karbon, kemasan biodegradable, alat penghemat air, atau produk rumah tangga hemat energi. *Oslo Manual 2018* menjelaskan bahwa inovasi produk mencakup barang atau jasa baru atau yang ditingkatkan secara signifikan dan telah diperkenalkan ke pasar.

Inovasi proses adalah inovasi yang berkaitan dengan cara baru atau perbaikan signifikan dalam menghasilkan, mendistribusikan, atau menyampaikan produk dan layanan. Dalam konteks industri hijau, inovasi proses dapat berupa produksi bersih, efisiensi energi, penggunaan air daur ulang, otomatisasi hemat energi, sistem pemulihan panas, atau teknologi pengurangan emisi. Inovasi proses sering kali tidak terlihat langsung oleh konsumen, tetapi memiliki dampak besar terhadap efisiensi sumber daya dan kinerja lingkungan organisasi.

Inovasi organisasi adalah inovasi yang berhubungan dengan perubahan struktur, tata kelola, budaya kerja, sistem manajemen,

atau pola koordinasi dalam organisasi. Dalam konteks *green innovation*, inovasi organisasi dapat berupa penerapan sistem manajemen lingkungan, pembentukan unit keberlanjutan, integrasi ESG dalam pengambilan keputusan, pelatihan karyawan tentang efisiensi energi, atau penggunaan indikator kinerja lingkungan dalam evaluasi organisasi. Inovasi organisasi penting karena teknologi hijau tidak akan berjalan efektif tanpa dukungan struktur dan budaya organisasi yang sesuai.

Inovasi model bisnis adalah inovasi yang mengubah cara organisasi menciptakan, menyampaikan, dan menangkap nilai. Dalam ekonomi hijau, inovasi model bisnis dapat berupa sistem sewa produk, layanan berbasis penggunaan, *product-service system*, *sharing economy*, *take-back system*, *remanufacturing*, dan bisnis berbasis ekonomi sirkular. Inovasi model bisnis penting karena keberlanjutan sering kali tidak cukup dicapai melalui produk ramah lingkungan, tetapi memerlukan perubahan cara perusahaan memperoleh keuntungan dan membangun hubungan dengan pelanggan.

Keempat jenis inovasi tersebut saling berkaitan. Produk hijau membutuhkan proses produksi yang bersih, organisasi yang mendukung, dan model bisnis yang memungkinkan produk tersebut diterima pasar. Misalnya, kendaraan listrik tidak hanya membutuhkan desain produk baru, tetapi juga proses produksi baterai, sistem pengisian daya, kebijakan insentif, jaringan layanan, dan model bisnis energi yang mendukung. Dengan demikian, inovasi hijau harus dilihat sebagai sistem, bukan hanya sebagai perubahan teknis tunggal.

Dalam praktik manajemen teknologi, klasifikasi inovasi produk, proses, organisasi, dan model bisnis membantu organisasi menentukan strategi inovasi yang tepat. Organisasi dapat memulai dari perbaikan proses untuk menekan limbah, kemudian mengembangkan produk hijau, memperkuat budaya organisasi, dan akhirnya mengubah model bisnis menuju ekonomi sirkular.

Dengan pendekatan tersebut, *green innovation* dapat berkembang secara bertahap dan lebih mudah diterapkan dalam berbagai jenis organisasi.

TECHNOLOGY PUSH DAN MARKET PULL DALAM INOVASI HIJAU

Technology push adalah pendekatan inovasi yang berawal dari perkembangan ilmu pengetahuan, riset, laboratorium, atau kemampuan teknologi baru. Dalam pendekatan ini, teknologi mendorong lahirnya produk, proses, atau layanan baru yang sebelumnya belum diminta secara eksplisit oleh pasar. Dalam inovasi hijau, *technology push* dapat terlihat pada pengembangan baterai generasi baru, hidrogen hijau, material *biodegradable*, teknologi penangkapan karbon, *artificial intelligence* untuk efisiensi energi, dan teknologi penyimpanan energi.

Market pull adalah pendekatan inovasi yang berawal dari kebutuhan, permintaan, tekanan pasar, atau masalah yang dirasakan oleh konsumen dan masyarakat. Dalam konteks teknologi hijau, *market pull* muncul ketika konsumen membutuhkan produk hemat energi, pemerintah menuntut standar emisi yang lebih ketat, industri membutuhkan proses produksi efisien, atau masyarakat menginginkan lingkungan yang lebih sehat. Dengan kata lain, pasar dan kebutuhan sosial menarik organisasi untuk menghasilkan inovasi.

Technology push dan *market pull* tidak sebaiknya dipahami sebagai dua pendekatan yang saling bertentangan. Inovasi hijau yang berhasil umumnya membutuhkan kombinasi keduanya. Teknologi baru membutuhkan pasar agar dapat diterapkan secara luas, sedangkan kebutuhan pasar membutuhkan dukungan teknologi agar dapat dipenuhi secara efektif. Literatur kebijakan inovasi menunjukkan bahwa instrumen *technology-push* dan

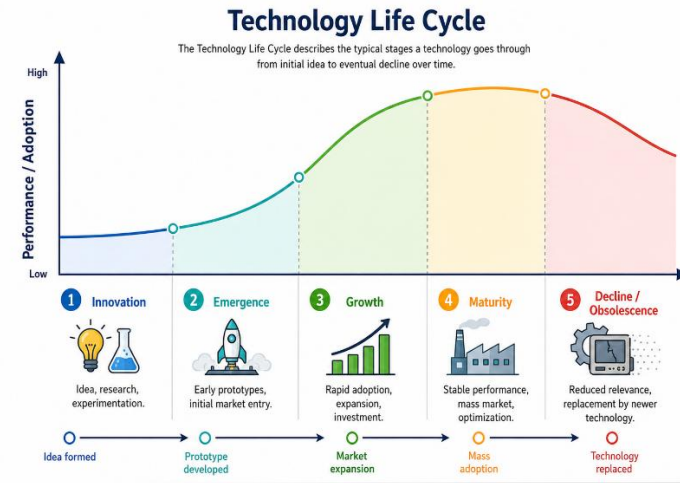
demand-pull sama-sama penting dalam mendorong transisi sosio-teknis, termasuk pada teknologi energi terbarukan.

Dalam *green innovation*, *technology push* sering kali membutuhkan dukungan riset, pendanaan, laboratorium, universitas, pusat inovasi, dan kebijakan pemerintah. Banyak teknologi hijau membutuhkan waktu panjang sebelum siap digunakan secara komersial. Oleh karena itu, investasi riset dan pengembangan sangat penting untuk menurunkan biaya teknologi, meningkatkan efisiensi, dan mempercepat kesiapan teknologi. Tanpa dukungan *technology push*, pasar mungkin hanya memperoleh solusi jangka pendek yang kurang transformatif.

Sebaliknya, *market pull* sangat penting agar teknologi hijau tidak berhenti sebagai penemuan laboratorium. Permintaan pasar dapat mempercepat komersialisasi teknologi, meningkatkan skala produksi, menurunkan harga, dan mendorong kompetisi inovasi. Kebijakan seperti standar energi, pajak karbon, subsidi kendaraan listrik, pengadaan publik hijau, dan label ramah lingkungan dapat menciptakan permintaan terhadap teknologi hijau. Dengan demikian, *market pull* tidak hanya berasal dari konsumen, tetapi juga dari regulasi dan kebijakan publik.

Dalam manajemen teknologi hijau, organisasi perlu membaca keseimbangan antara *technology push* dan *market pull*. Jika terlalu berorientasi pada *technology push*, organisasi dapat menghasilkan teknologi canggih tetapi tidak sesuai kebutuhan pengguna. Jika terlalu berorientasi pada *market pull*, organisasi mungkin hanya melakukan inovasi kecil dan kurang mampu menciptakan transformasi. Oleh sebab itu, inovasi hijau membutuhkan kemampuan mengintegrasikan riset teknologi, kebutuhan pasar, regulasi, pembiayaan, dan perubahan perilaku masyarakat.

TECHNOLOGY LIFE CYCLE



Gambar 10 *Technology life cycle.*

Technology life cycle atau siklus hidup teknologi adalah konsep yang menjelaskan tahapan perkembangan suatu teknologi sejak tahap awal penemuan, pengembangan, pertumbuhan, kematangan, hingga penurunan atau penggantian oleh teknologi baru. Konsep ini penting dalam manajemen teknologi karena membantu organisasi memahami kapan suatu teknologi perlu dikembangkan, diadopsi, ditingkatkan, dipertahankan, atau diganti. Dalam konteks teknologi hijau, pemahaman siklus hidup teknologi membantu mempercepat transisi dari teknologi lama yang boros sumber daya menuju teknologi baru yang lebih efisien dan rendah emisi.

Tahap pertama adalah tahap penelitian dan penemuan. Pada tahap ini, teknologi masih berada dalam bentuk konsep, eksperimen laboratorium, prototipe awal, atau hasil riset akademik. Teknologi hijau seperti baterai generasi baru, material rendah karbon, hidrogen hijau, atau teknologi penangkapan karbon sering melewati tahap riset yang panjang. Pada fase ini, tingkat risiko

tinggi karena belum ada kepastian teknis, biaya, pasar, maupun regulasi.

Tahap kedua adalah tahap pengembangan dan demonstrasi. Teknologi mulai diuji dalam skala terbatas untuk melihat kelayakan teknis, ekonomi, dan operasional. Dalam teknologi hijau, tahap ini penting karena manfaat lingkungan harus dibuktikan melalui pengukuran kinerja, efisiensi energi, penurunan emisi, daya tahan, keamanan, dan dampak siklus hidup. Banyak teknologi gagal bukan karena idenya buruk, tetapi karena belum siap diterapkan dalam kondisi nyata.

Tahap ketiga adalah tahap komersialisasi dan pertumbuhan. Pada tahap ini, teknologi mulai diperkenalkan ke pasar dan digunakan oleh kelompok pengguna awal. Harga teknologi biasanya masih relatif tinggi, tetapi mulai menurun seiring peningkatan skala produksi dan pengalaman industri. Contoh yang dapat dilihat adalah perkembangan panel surya, kendaraan listrik, dan baterai yang mengalami peningkatan efisiensi serta penurunan biaya setelah permintaan pasar meningkat dan produksi diperluas.

Tahap keempat adalah tahap kematangan. Teknologi telah digunakan secara luas, standar teknis mulai terbentuk, harga menjadi lebih kompetitif, dan risiko implementasi semakin rendah. Pada tahap ini, persaingan tidak hanya terjadi pada aspek teknologi inti, tetapi juga pada kualitas layanan, efisiensi rantai pasok, desain produk, sistem pendukung, dan model bisnis. Teknologi hijau yang mencapai tahap kematangan memiliki peluang lebih besar untuk menggantikan teknologi lama secara luas.

Tahap kelima adalah tahap penurunan atau substitusi. Teknologi yang sebelumnya dianggap maju dapat menjadi usang ketika muncul teknologi baru yang lebih efisien, lebih murah, lebih aman, atau lebih ramah lingkungan. Dalam perspektif keberlanjutan, organisasi harus berani meninggalkan teknologi yang tidak lagi sesuai dengan standar lingkungan dan kebutuhan masa depan. Oleh karena itu, *technology life cycle* membantu

organisasi menghindari ketergantungan pada teknologi lama yang berisiko secara ekonomi maupun ekologis.

DIFFUSION OF INNOVATION DALAM MASYARAKAT DAN ORGANISASI

Diffusion of innovation adalah proses penyebaran suatu inovasi melalui saluran komunikasi tertentu dalam suatu sistem sosial selama periode waktu tertentu. Teori ini sangat penting untuk memahami mengapa sebagian orang atau organisasi cepat mengadopsi teknologi hijau, sementara yang lain lambat atau bahkan menolak. Rogers menjelaskan bahwa tingkat adopsi inovasi dipengaruhi oleh atribut inovasi, seperti keunggulan relatif, kesesuaian, kompleksitas, kemungkinan diuji coba, dan kemudahan diamati.

Dalam masyarakat, difusi inovasi hijau dipengaruhi oleh pengetahuan, nilai budaya, pendapatan, akses informasi, pengalaman pengguna, norma sosial, dan kepercayaan terhadap teknologi. Misalnya, masyarakat akan lebih mudah mengadopsi lampu LED, komposter rumah tangga, kendaraan listrik, atau panel surya apabila manfaatnya jelas, biayanya terjangkau, penggunaannya mudah, dan hasilnya dapat diamati. Sebaliknya, teknologi yang dianggap mahal, rumit, atau tidak sesuai kebiasaan lokal akan lebih sulit diterima.

Dalam organisasi, difusi inovasi dipengaruhi oleh kepemimpinan, strategi, struktur organisasi, budaya kerja, sumber daya manusia, kapasitas keuangan, dan tekanan eksternal. Organisasi yang memiliki kepemimpinan visioner dan budaya inovatif cenderung lebih mudah mengadopsi teknologi hijau. Sebaliknya, organisasi yang birokratis, tertutup terhadap perubahan, atau hanya berorientasi jangka pendek sering mengalami hambatan dalam mengadopsi inovasi berkelanjutan.

Rogers membagi pengguna inovasi ke dalam beberapa kelompok, yaitu *innovator*, *early adopter*, *early majority*, *late majority*, dan *laggard*. Dalam konteks teknologi hijau, *innovator* adalah individu atau organisasi yang berani mencoba teknologi baru meskipun risikonya tinggi. *Early adopter* berperan penting karena dapat menjadi contoh bagi kelompok lain. *Early majority* dan *late majority* biasanya menunggu bukti keberhasilan dan penurunan harga. Sementara itu, *laggard* cenderung bertahan pada teknologi lama karena faktor kebiasaan, biaya, atau ketidakpercayaan terhadap perubahan.

Saluran komunikasi memainkan peran penting dalam difusi teknologi hijau. Informasi tentang manfaat teknologi dapat disampaikan melalui media massa, media sosial, pendidikan formal, pelatihan, komunitas, penyuluhan, demonstrasi teknologi, pameran, dan pengalaman pengguna. Dalam banyak kasus, komunikasi interpersonal lebih efektif dibandingkan promosi formal karena masyarakat lebih percaya pada pengalaman orang yang mereka kenal. Oleh karena itu, keberhasilan difusi teknologi hijau membutuhkan strategi komunikasi yang sesuai dengan karakter sosial masyarakat.

Dengan demikian, *diffusion of innovation* membantu menjelaskan bahwa keberhasilan teknologi hijau tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan teknis, tetapi juga oleh penerimaan sosial dan organisasi. Teknologi hijau harus memiliki manfaat yang jelas, sesuai dengan kebutuhan pengguna, mudah digunakan, dapat diuji, dan terlihat hasilnya. Tanpa memperhatikan faktor difusi, teknologi hijau yang baik secara teknis dapat gagal diterapkan secara luas.

FAKTOR PENDORONG DAN PENGHAMBAT ADOPSI TEKNOLOGI HIJAU

Faktor pendorong pertama adopsi teknologi hijau adalah meningkatnya kesadaran lingkungan. Masyarakat, organisasi, dan pemerintah semakin memahami bahwa perubahan iklim, pencemaran, dan kelangkaan sumber daya membutuhkan solusi nyata. Kesadaran ini mendorong permintaan terhadap produk hemat energi, transportasi rendah emisi, bangunan hijau, energi terbarukan, dan sistem pengelolaan limbah yang lebih baik. Semakin tinggi kesadaran lingkungan, semakin besar kemungkinan teknologi hijau diterima.

Faktor pendorong kedua adalah regulasi dan kebijakan publik. Standar emisi, pajak karbon, insentif energi terbarukan, pengadaan barang hijau, sertifikasi lingkungan, dan larangan bahan berbahaya dapat mempercepat adopsi teknologi hijau. Kebijakan publik penting karena pasar tidak selalu mampu menghitung biaya ekologis secara adil. Dengan regulasi yang tepat, biaya lingkungan dapat dimasukkan ke dalam keputusan ekonomi sehingga teknologi hijau menjadi lebih kompetitif.

Faktor pendorong ketiga adalah manfaat ekonomi. Teknologi hijau lebih mudah diadopsi apabila dapat menurunkan biaya energi, menghemat bahan baku, memperbaiki efisiensi operasional, meningkatkan reputasi, atau membuka pasar baru. Bagi dunia usaha, manfaat ekonomi sering menjadi argumen utama dalam pengambilan keputusan. Oleh karena itu, narasi *green innovation* perlu menunjukkan bahwa teknologi hijau bukan hanya kewajiban moral, tetapi juga peluang strategis.

Faktor penghambat utama adalah biaya awal yang tinggi. Banyak teknologi hijau membutuhkan investasi awal yang cukup besar, meskipun dalam jangka panjang dapat menghasilkan penghematan. Contohnya adalah panel surya, kendaraan listrik, mesin hemat energi, sistem pengolahan limbah, dan teknologi

produksi bersih. Hambatan biaya ini sangat terasa bagi rumah tangga berpendapatan rendah, UMKM, dan organisasi yang memiliki keterbatasan akses pembiayaan.

Faktor penghambat berikutnya adalah keterbatasan informasi dan kompetensi. Banyak pengguna belum memahami cara kerja, manfaat, biaya, risiko, dan perawatan teknologi hijau. Ketidaktahuan ini dapat menimbulkan keraguan dan resistensi. Dalam organisasi, adopsi teknologi hijau sering terhambat oleh kurangnya tenaga ahli, lemahnya manajemen perubahan, dan tidak adanya indikator kinerja lingkungan yang jelas. Oleh karena itu, pelatihan dan pendampingan menjadi bagian penting dalam difusi teknologi.

Faktor penghambat lainnya adalah infrastruktur dan ekosistem yang belum memadai. Kendaraan listrik membutuhkan stasiun pengisian, sistem daur ulang membutuhkan fasilitas pemilahan dan pasar material, energi terbarukan membutuhkan jaringan listrik yang adaptif, dan teknologi air bersih membutuhkan tata kelola lokal yang kuat. Dengan demikian, adopsi teknologi hijau tidak dapat hanya dibebankan kepada individu atau perusahaan, tetapi membutuhkan dukungan sistemik dari kebijakan, pasar, infrastruktur, dan kelembagaan.

EDUKASI, BUDAYA, DAN KESADARAN LINGKUNGAN DALAM DIFUSI TEKNOLOGI

Edukasi memiliki peran penting dalam difusi teknologi hijau karena membantu masyarakat dan organisasi memahami mengapa teknologi hijau diperlukan, bagaimana teknologi tersebut bekerja, dan manfaat apa yang dapat dihasilkan. Tanpa edukasi, teknologi hijau sering dipersepsikan sebagai mahal, rumit, atau hanya relevan bagi kelompok tertentu. Pendidikan formal, pelatihan kerja, penyuluhan masyarakat, kampanye publik, dan literasi digital

dapat membantu mengurangi ketidakpastian dalam proses adopsi teknologi.

Dalam pendidikan tinggi, *green innovation* dan *technology management* perlu diintegrasikan ke dalam kurikulum lintas disiplin. Mahasiswa teknik, manajemen, arsitektur, perencanaan wilayah dan kota, ekonomi, pendidikan, dan kebijakan publik perlu memahami hubungan antara teknologi, keberlanjutan, dan masyarakat. Perguruan tinggi tidak hanya berperan menghasilkan pengetahuan, tetapi juga menjadi pusat demonstrasi teknologi hijau melalui kampus berkelanjutan, laboratorium inovasi, riset terapan, dan kerja sama dengan industri serta pemerintah.

Budaya juga memengaruhi difusi teknologi hijau. Teknologi yang sesuai dengan nilai, kebiasaan, dan kondisi lokal cenderung lebih mudah diterima. Rogers menempatkan *compatibility* atau kesesuaian sebagai salah satu atribut penting yang memengaruhi tingkat adopsi inovasi. Inovasi yang sesuai dengan nilai, pengalaman, dan kebutuhan pengguna biasanya lebih cepat diterima dibandingkan inovasi yang bertentangan dengan kebiasaan sosial.

Kesadaran lingkungan berperan sebagai motivasi internal dalam adopsi teknologi hijau. Individu atau organisasi yang memiliki kesadaran ekologis tinggi cenderung lebih bersedia mengubah perilaku, membayar lebih untuk produk hijau, atau mencoba teknologi baru. Namun, kesadaran saja tidak cukup apabila tidak didukung oleh akses, harga terjangkau, informasi yang jelas, dan infrastruktur pendukung. Oleh karena itu, kesadaran lingkungan harus dihubungkan dengan kemudahan tindakan.

Edukasi dan budaya juga penting untuk mencegah *greenwashing*. Masyarakat yang memiliki literasi lingkungan lebih baik dapat membedakan antara klaim hijau yang benar dan klaim yang hanya bersifat pemasaran. Dalam dunia usaha, edukasi keberlanjutan membantu karyawan memahami bahwa teknologi

hijau tidak hanya berkaitan dengan citra perusahaan, tetapi juga dengan efisiensi, kepatuhan, inovasi, dan tanggung jawab sosial. Dengan demikian, literasi hijau memperkuat kualitas pengambilan keputusan.

Dengan demikian, difusi teknologi hijau membutuhkan pendekatan sosial, bukan hanya pendekatan teknis. Edukasi membangun pengetahuan, budaya menentukan kesesuaian, dan kesadaran lingkungan membentuk motivasi. Ketiganya perlu dikelola bersama agar teknologi hijau dapat diterima, digunakan, dan dikembangkan secara berkelanjutan. Dalam perspektif *green innovation and technology management*, keberhasilan teknologi hijau tidak hanya bergantung pada kualitas teknologi, tetapi juga pada kesiapan manusia, organisasi, dan masyarakat untuk berubah.



BAB 6

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS, ESG, DAN GREEN INNOVATION

Pembangunan berkelanjutan telah menjadi agenda penting dalam tata kelola global, nasional, maupun organisasi. Perubahan iklim, degradasi lingkungan, ketimpangan sosial, kemiskinan, krisis energi, keterbatasan sumber daya alam, dan tekanan terhadap kualitas hidup manusia menunjukkan model pembangunan tidak dapat lagi hanya bertumpu pada pertumbuhan ekonomi semata. Pembangunan masa depan harus mampu menyeimbangkan kepentingan ekonomi, perlindungan lingkungan, dan keadilan sosial agar kemajuan yang dicapai hari ini tidak mengurangi kemampuan generasi mendatang dalam memenuhi kebutuhannya.

Dalam konteks *green innovation and technology management*, *Sustainable Development Goals* (SDGs), *Environmental, Social, and Governance* (ESG), dan *green innovation* merupakan tiga konsep yang saling berhubungan. SDGs memberikan arah dan tujuan pembangunan berkelanjutan secara luas, ESG menyediakan kerangka penilaian kinerja keberlanjutan organisasi, sedangkan *green innovation* menjadi instrumen strategis untuk menciptakan solusi teknologi, produk, proses, layanan, dan model bisnis yang lebih ramah lingkungan. Dengan demikian, *green innovation* dapat dipahami sebagai jembatan operasional untuk menerjemahkan

agenda SDGs dan prinsip ESG ke dalam praktik nyata di sektor industri, energi, kota, infrastruktur, pendidikan, pemerintahan, dan masyarakat.

Keterkaitan antara SDGs, ESG, dan *green innovation* menjadi semakin penting karena keberlanjutan kini tidak hanya dipandang sebagai isu moral atau kepedulian lingkungan, tetapi juga sebagai faktor strategis dalam daya saing, reputasi, investasi, tata kelola, dan keberlangsungan organisasi. Perusahaan, lembaga publik, perguruan tinggi, dan pemerintah dituntut untuk menunjukkan kontribusi nyata terhadap pengurangan emisi, efisiensi sumber daya, perlindungan ekosistem, pemberdayaan masyarakat, transparansi, serta tata kelola yang bertanggung jawab. Dalam situasi ini, *green innovation* berperan sebagai mekanisme transformasi untuk menghasilkan perubahan yang terukur, adaptif, dan berorientasi jangka panjang.

Namun, penerapan SDGs, ESG, dan *green innovation* memerlukan pemahaman yang sistematis. SDGs tidak cukup hanya dipahami sebagai daftar tujuan global, ESG tidak cukup hanya menjadi instrumen pelaporan, dan *green innovation* tidak cukup hanya diwujudkan melalui penggunaan teknologi ramah lingkungan. Ketiganya perlu ditempatkan dalam satu kerangka manajemen yang terintegrasi, sehingga kebijakan, strategi, teknologi, investasi, budaya organisasi, dan perilaku masyarakat dapat diarahkan menuju pencapaian keberlanjutan secara lebih nyata.

KONSEP SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

Sustainable Development Goals atau SDGs adalah agenda pembangunan global yang disepakati oleh negara-negara anggota Perserikatan Bangsa-Bangsa pada tahun 2015 melalui dokumen *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. SDGs berisi 17 tujuan dan 169 target yang dirancang sebagai

kerangka bersama untuk mengatasi kemiskinan, ketimpangan, kerusakan lingkungan, perubahan iklim, persoalan kesehatan, pendidikan, energi, air bersih, pekerjaan layak, kota berkelanjutan, konsumsi bertanggung jawab, serta kemitraan global. Agenda ini menegaskan bahwa pembangunan harus diarahkan bagi manusia, planet, kesejahteraan, perdamaian, dan kemitraan.

Konsep SDGs lahir dari kesadaran bahwa pembangunan tidak dapat lagi dipahami hanya sebagai peningkatan pertumbuhan ekonomi. Pembangunan yang hanya mengejar peningkatan produksi, industrialisasi, dan konsumsi dapat menimbulkan kerusakan ekologis, ketimpangan sosial, dan krisis kemanusiaan apabila tidak dikelola secara berkelanjutan. Oleh karena itu, SDGs mengintegrasikan dimensi ekonomi, sosial, dan lingkungan ke dalam satu kerangka pembangunan yang saling terkait. Dalam perspektif ini, pengentasan kemiskinan, perlindungan lingkungan, pertumbuhan ekonomi, kesetaraan gender, pendidikan, kesehatan, dan perdamaian tidak dapat dipisahkan satu sama lain.

Salah satu prinsip utama SDGs adalah *leave no one behind*, yaitu tidak boleh ada kelompok masyarakat yang tertinggal dalam proses pembangunan. Prinsip ini menegaskan bahwa pembangunan berkelanjutan harus memperhatikan kelompok miskin, rentan, terpinggirkan, penyandang disabilitas, perempuan, anak-anak, masyarakat adat, dan kelompok lain yang sering mengalami keterbatasan akses terhadap layanan dasar. Dengan demikian, SDGs tidak hanya agenda lingkungan, tetapi juga agenda keadilan sosial dan pemerataan pembangunan.

SDGs juga menekankan pentingnya kemitraan global. Tidak ada satu negara, organisasi, atau sektor yang dapat mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan secara sendiri-sendiri. Pemerintah membutuhkan dukungan dunia usaha, perguruan tinggi, lembaga keuangan, organisasi masyarakat sipil, media, komunitas lokal, dan masyarakat umum. Oleh karena itu, SDG 17

secara khusus menekankan kemitraan sebagai instrumen penting untuk memperkuat pembiayaan, teknologi, perdagangan, data, kapasitas kelembagaan, dan kerja sama lintas negara.

Dalam konteks manajemen teknologi dan inovasi hijau, SDGs memberikan arah normatif dan strategis. Teknologi dan inovasi tidak hanya diarahkan untuk meningkatkan efisiensi dan keuntungan ekonomi, tetapi juga harus berkontribusi terhadap pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan. Misalnya, teknologi energi terbarukan berkaitan dengan SDG 7, teknologi pengelolaan limbah berkaitan dengan SDG 12, teknologi air bersih berkaitan dengan SDG 6, teknologi kota cerdas berkaitan dengan SDG 11, dan teknologi rendah karbon berkaitan dengan SDG 13.

Dengan demikian, SDGs dapat dipahami sebagai kerangka pembangunan global yang memberikan pedoman bagi negara, organisasi, dunia usaha, akademisi, dan masyarakat dalam merancang masa depan yang lebih adil, hijau, dan berkelanjutan. Dalam konteks ini SDGs menjadi dasar konseptual untuk menjelaskan mengapa inovasi hijau dan manajemen teknologi perlu diarahkan pada kepentingan yang lebih luas daripada sekadar pertumbuhan ekonomi.

HUBUNGAN *GREEN INNOVATION* DENGAN SDGS



Gambar 6.2. Hubungan *Green Innovation* dengan SDGs

Gambar 11 Hubungan *green innovation* dengan SDGs.

Green innovation memiliki hubungan langsung dengan SDGs karena inovasi hijau menyediakan solusi teknologi, manajerial, dan sosial untuk menjawab berbagai tantangan pembangunan berkelanjutan. *Green innovation* dapat berupa produk ramah lingkungan, proses produksi bersih, model bisnis sirkular, teknologi hemat energi, transportasi rendah emisi, pengelolaan air, pengolahan limbah, dan sistem tata kelola lingkungan. Semua bentuk inovasi tersebut dapat berkontribusi terhadap pencapaian berbagai tujuan SDGs, terutama yang berkaitan dengan energi, industri, kota, konsumsi, iklim, air, dan ekosistem.

Hubungan *green innovation* dengan SDG 7 terlihat pada pengembangan energi bersih dan terjangkau. Teknologi panel surya, turbin angin, mikrohidro, panas bumi, bioenergi berkelanjutan, baterai, *smart grid*, dan sistem manajemen energi merupakan contoh inovasi hijau yang mendukung transisi energi.

Inovasi ini penting karena akses terhadap energi bersih tidak hanya berkaitan dengan lingkungan, tetapi juga dengan pendidikan, kesehatan, produktivitas ekonomi, dan kualitas hidup masyarakat.

Green innovation juga berkaitan erat dengan SDG 9 tentang industri, inovasi, dan infrastruktur. Inovasi hijau mendorong industri untuk bergerak dari proses produksi yang boros energi dan menghasilkan limbah menuju proses yang lebih efisien, bersih, dan rendah emisi. Dalam konteks ini, *green innovation* tidak hanya mendorong modernisasi industri, tetapi juga memperkuat daya saing melalui efisiensi sumber daya, peningkatan kualitas produk, dan kepatuhan terhadap standar lingkungan.

Pada SDG 11 tentang kota dan permukiman berkelanjutan, *green innovation* dapat diterapkan melalui bangunan hijau, transportasi publik rendah emisi, ruang terbuka hijau, pengelolaan air hujan, sistem drainase berkelanjutan, pengurangan sampah kota, dan teknologi kota cerdas. Kota merupakan pusat konsumsi energi, produksi limbah, aktivitas ekonomi, dan mobilitas penduduk. Oleh sebab itu, inovasi hijau sangat penting untuk membentuk kota yang lebih sehat, inklusif, tangguh, dan rendah karbon.

Green innovation juga berhubungan langsung dengan SDG 12 tentang konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab. Inovasi dalam desain produk, pemilihan material, efisiensi proses, daur ulang, penggunaan kembali, *remanufacturing*, dan ekonomi sirkular dapat mengurangi tekanan terhadap sumber daya alam. Melalui pendekatan ini, produk tidak lagi dirancang hanya untuk digunakan dan dibuang, tetapi untuk memiliki umur pakai lebih panjang, mudah diperbaiki, dan dapat kembali menjadi input produksi.

Selain itu, *green innovation* mendukung SDG 13 tentang penanganan perubahan iklim. Inovasi hijau dapat menurunkan emisi gas rumah kaca melalui efisiensi energi, energi terbarukan, transportasi bersih, pertanian rendah emisi, teknologi karbon, dan

perubahan sistem produksi. Dengan demikian, *green innovation* bukan hanya pilihan bisnis, tetapi juga instrumen strategis untuk mitigasi dan adaptasi perubahan iklim.

Dalam perspektif akademik, hubungan *green innovation* dengan SDGs menunjukkan bahwa inovasi harus dipahami secara multidimensional. Inovasi yang baik bukan hanya menciptakan kebaruan, tetapi juga memberi kontribusi terhadap penyelesaian masalah sosial dan ekologis. Oleh karena itu, *green innovation* dapat menjadi jembatan antara tujuan global SDGs dan praktik nyata dalam organisasi, industri, kota, komunitas, dan rumah tangga.

PENGERTIAN ENVIRONMENTAL, SOCIAL, AND GOVERNANCE

Environmental, Social, and Governance atau ESG adalah kerangka yang digunakan untuk menilai bagaimana suatu organisasi mengelola dampak lingkungan, tanggung jawab sosial, dan tata kelola perusahaan. Aspek *environmental* berkaitan dengan emisi, energi, air, limbah, biodiversitas, perubahan iklim, efisiensi sumber daya, dan pengelolaan lingkungan. Aspek *social* berkaitan dengan hak pekerja, kesehatan dan keselamatan kerja, kesetaraan, hubungan masyarakat, hak asasi manusia, konsumen, dan dampak sosial. Aspek *governance* berkaitan dengan etika, transparansi, struktur dewan, kepatuhan, antikorupsi, manajemen risiko, dan akuntabilitas organisasi.

ESG berkembang sebagai respons terhadap kebutuhan investor, regulator, konsumen, dan masyarakat untuk menilai kinerja organisasi secara lebih luas daripada indikator keuangan semata. Perusahaan tidak lagi cukup dinilai berdasarkan laba, aset, atau pertumbuhan penjualan, tetapi juga berdasarkan cara perusahaan memperoleh laba tersebut. Dengan demikian, ESG menjadi kerangka untuk melihat apakah kegiatan organisasi

menciptakan nilai jangka panjang atau justru menimbulkan risiko lingkungan dan sosial.

Secara historis, ESG memiliki hubungan dengan gerakan tanggung jawab sosial perusahaan, pembangunan berkelanjutan, investasi bertanggung jawab, dan tata kelola perusahaan. ESG memperkuat gagasan bahwa keberlanjutan harus diterjemahkan ke dalam indikator yang dapat diukur, dilaporkan, dan dievaluasi. UN Global Compact menekankan bahwa keberlanjutan korporasi dimulai dari sistem nilai perusahaan dan pendekatan berbasis prinsip dalam bidang hak asasi manusia, tenaga kerja, lingkungan, dan antikorupsi.

Aspek lingkungan dalam ESG sangat dekat dengan *green innovation*. Perusahaan yang ingin meningkatkan kinerja lingkungan perlu mengembangkan teknologi, proses, dan produk yang lebih efisien serta rendah emisi. Aspek sosial menuntut agar inovasi tidak hanya bermanfaat bagi lingkungan, tetapi juga mendukung keselamatan pekerja, kesejahteraan masyarakat, dan akses yang adil terhadap manfaat teknologi. Aspek tata kelola memastikan bahwa inovasi hijau dijalankan secara transparan, akuntabel, dan tidak menjadi sekadar klaim pemasaran.

ESG juga semakin penting karena standar pelaporan keberlanjutan berkembang secara global. IFRS Sustainability Standards melalui IFRS S1 dan IFRS S2 memberikan kerangka pelaporan informasi keberlanjutan dan iklim yang berguna bagi pengguna laporan keuangan dalam mengambil keputusan. IFRS S1 mengatur pengungkapan risiko dan peluang keberlanjutan yang material secara finansial, sedangkan IFRS S2 berfokus pada pengungkapan terkait iklim.

Dengan demikian, ESG dapat dipahami sebagai kerangka penilaian dan tata kelola keberlanjutan organisasi. ESG bukan hanya alat pelaporan, tetapi juga instrumen strategis untuk mengarahkan keputusan investasi, inovasi, operasi, dan manajemen risiko. Dalam konteks *green innovation and technology*

management, ESG menjadi penting karena inovasi hijau perlu dibuktikan melalui indikator kinerja yang terukur, kredibel, dan dapat dipertanggungjawabkan.

ESG SEBAGAI KERANGKA PENILAIAN KEBERLANJUTAN

ESG berfungsi sebagai kerangka penilaian keberlanjutan karena membantu organisasi mengidentifikasi, mengukur, mengelola, dan melaporkan dampak lingkungan, sosial, dan tata kelola. Kerangka ini memungkinkan pemangku kepentingan menilai apakah suatu organisasi memiliki strategi keberlanjutan yang jelas atau hanya menjalankan aktivitas bisnis tanpa mempertimbangkan risiko jangka panjang. Dengan demikian, ESG mengubah keberlanjutan dari narasi normatif menjadi praktik manajemen yang lebih terukur.

Pada dimensi lingkungan, penilaian ESG dapat mencakup indikator emisi gas rumah kaca, intensitas energi, penggunaan energi terbarukan, konsumsi air, limbah, daur ulang, penggunaan material, pencemaran, dan dampak terhadap biodiversitas. Indikator ini penting karena kinerja lingkungan tidak dapat dinilai hanya berdasarkan klaim umum seperti “ramah lingkungan” atau “hijau”. Organisasi perlu menunjukkan data yang jelas mengenai perubahan kinerja lingkungannya dari waktu ke waktu.

Pada dimensi sosial, ESG menilai bagaimana organisasi memperlakukan pekerja, konsumen, pemasok, dan masyarakat sekitar. Indikator sosial dapat mencakup keselamatan kerja, kesetaraan gender, pelatihan pekerja, perlindungan hak asasi manusia, keterlibatan masyarakat, dampak terhadap komunitas lokal, serta kualitas produk dan layanan. Dalam konteks inovasi hijau, dimensi sosial menjadi penting agar teknologi hijau tidak hanya efisien secara ekologis, tetapi juga inklusif dan bermanfaat bagi masyarakat.

Pada dimensi tata kelola, ESG menilai bagaimana organisasi mengambil keputusan, mengelola risiko, menjaga etika, mencegah korupsi, dan menjamin transparansi. Tata kelola yang baik memastikan bahwa strategi keberlanjutan tidak hanya menjadi slogan, tetapi masuk ke dalam struktur organisasi, sistem pengawasan, kompensasi, audit, dan pelaporan. Tanpa tata kelola yang kuat, program *green innovation* dapat kehilangan arah, tidak terukur, atau bahkan berubah menjadi *greenwashing*.

ESG juga berfungsi sebagai bahasa bersama antara organisasi dan pemangku kepentingan eksternal. Investor menggunakan ESG untuk menilai risiko dan peluang jangka panjang. Pemerintah menggunakan ESG untuk mendorong kepatuhan dan tanggung jawab korporasi. Konsumen menggunakan ESG untuk menilai reputasi merek. Akademisi menggunakan ESG sebagai objek kajian dalam hubungan antara keberlanjutan, inovasi, dan kinerja organisasi. Oleh karena itu, ESG menjadi jembatan antara strategi internal organisasi dan akuntabilitas eksternal.

Dalam perkembangan mutakhir, pelaporan ESG semakin diarahkan pada standar yang lebih konsisten, dapat dibandingkan, dan relevan bagi pengambilan keputusan. Kehadiran IFRS S1 dan IFRS S2 menunjukkan bahwa informasi keberlanjutan dan iklim semakin diperlakukan sebagai bagian penting dari informasi korporasi. Hal ini menandakan bahwa keberlanjutan bukan lagi isu tambahan, tetapi bagian dari manajemen risiko, strategi bisnis, dan tata kelola organisasi modern.

Dengan demikian, ESG sebagai kerangka penilaian keberlanjutan sangat relevan bagi pengelolaan *green innovation*. Inovasi hijau perlu dihubungkan dengan indikator ESG agar kontribusinya dapat diukur secara jelas. Jika *green innovation* menghasilkan pengurangan emisi, efisiensi energi, peningkatan keselamatan kerja, atau transparansi rantai pasok, maka kontribusi tersebut harus masuk ke dalam sistem penilaian ESG organisasi.

GREEN INNOVATION UNTUK MENINGKATKAN KINERJA ESG

Green innovation dapat meningkatkan kinerja ESG terutama melalui perbaikan dimensi lingkungan. Inovasi produk ramah lingkungan, proses produksi bersih, energi terbarukan, teknologi hemat energi, pengurangan limbah, dan penggunaan material rendah karbon dapat menurunkan dampak ekologis organisasi. Dengan demikian, *green innovation* berfungsi sebagai instrumen operasional untuk mencapai target lingkungan dalam ESG, seperti penurunan emisi, efisiensi energi, pengurangan limbah, dan peningkatan penggunaan sumber daya terbarukan.

Pada dimensi sosial, *green innovation* dapat meningkatkan kualitas hidup, keselamatan kerja, kesehatan masyarakat, dan akses terhadap teknologi yang lebih bersih. Misalnya, teknologi air bersih, sanitasi berkelanjutan, kompor rendah emisi, transportasi publik hijau, dan bangunan sehat dapat memberikan manfaat langsung bagi masyarakat. Inovasi hijau yang dirancang secara inklusif juga dapat membuka peluang kerja baru, memperkuat UMKM hijau, dan mendukung ekonomi lokal.

Pada dimensi tata kelola, *green innovation* mendorong organisasi untuk membangun sistem pengambilan keputusan yang lebih transparan dan berbasis data. Organisasi perlu menetapkan target, indikator, peta jalan, anggaran, sistem monitoring, audit, dan pelaporan agar inovasi hijau dapat dipertanggungjawabkan. Dengan demikian, *green innovation* tidak hanya menghasilkan teknologi baru, tetapi juga memperkuat tata kelola keberlanjutan.

Penelitian mutakhir menunjukkan bahwa *green innovation* memiliki hubungan positif dengan kinerja ESG perusahaan. Studi tentang *green innovation* dan ESG menemukan bahwa inovasi hijau, baik yang bersifat radikal maupun bertahap, dapat mendorong peningkatan kinerja ESG perusahaan. Temuan tersebut memperkuat argumen bahwa ESG bukan hanya hasil dari

kebijakan pelaporan, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kemampuan perusahaan melakukan inovasi hijau secara nyata.

Di kawasan ASEAN, penelitian tentang praktik ESG, *green innovation*, dan kinerja keuangan juga menunjukkan bahwa ESG dan *green innovation* menjadi isu penting bagi perusahaan publik. Studi tersebut meneliti perusahaan di Indonesia, Malaysia, Filipina, Singapura, Thailand, dan Vietnam, sehingga relevan dengan konteks regional Asia Tenggara. Hal ini menunjukkan bahwa *green innovation* semakin dipahami sebagai bagian dari strategi bisnis, bukan hanya program lingkungan tambahan.

Green innovation juga dapat membantu organisasi menghindari risiko reputasi dan regulasi. Organisasi yang tidak mengelola dampak lingkungan berisiko menghadapi tuntutan hukum, penolakan masyarakat, kehilangan kepercayaan konsumen, dan kesulitan memperoleh pembiayaan. Sebaliknya, organisasi yang mampu menunjukkan inovasi hijau secara terukur dapat memperkuat kredibilitas ESG dan memperoleh kepercayaan dari investor, regulator, pelanggan, dan masyarakat.

Dengan demikian, *green innovation* merupakan penggerak penting bagi peningkatan kinerja ESG. ESG menyediakan kerangka penilaian, sedangkan *green innovation* menyediakan tindakan konkret untuk memperbaiki kinerja. Hubungan keduanya bersifat saling menguatkan: ESG memberi arah dan indikator, sementara *green innovation* memberi solusi dan mekanisme implementasi.

PERAN PEMERINTAH, SWASTA, DAN MASYARAKAT DALAM PENCAPAIAN SDGS

Pemerintah memiliki peran utama dalam pencapaian SDGs karena memiliki kewenangan dalam merumuskan kebijakan, regulasi, anggaran, standar, insentif, dan sistem pengawasan. Pemerintah dapat mendorong *green innovation* melalui kebijakan energi terbarukan, pengurangan emisi, pengelolaan limbah,

perlindungan air, pembangunan transportasi publik, sertifikasi bangunan hijau, pengadaan publik berkelanjutan, dan pembiayaan hijau. Tanpa kebijakan publik yang kuat, inovasi hijau sering berjalan lambat karena pasar tidak selalu mampu menghitung biaya lingkungan secara adil.

Pemerintah juga berperan menyediakan data dan sistem pemantauan SDGs. Pencapaian SDGs membutuhkan indikator yang jelas agar kemajuan dapat diukur secara objektif. Data mengenai kemiskinan, kesehatan, pendidikan, air, energi, emisi, limbah, ketimpangan, dan ekosistem sangat penting untuk menentukan prioritas kebijakan. Dalam konteks ini, teknologi digital dan sistem informasi dapat membantu pemerintah meningkatkan kualitas perencanaan, monitoring, dan evaluasi pembangunan berkelanjutan.

Sektor swasta memiliki peran penting karena dunia usaha mengelola sebagian besar aktivitas produksi, distribusi, konsumsi, investasi, dan inovasi teknologi. Perusahaan dapat berkontribusi terhadap SDGs melalui efisiensi energi, pengurangan limbah, rantai pasok hijau, produk ramah lingkungan, perlindungan pekerja, tanggung jawab sosial, dan tata kelola yang baik. UN Global Compact menekankan bahwa bisnis bertanggung jawab menjalankan prinsip dalam bidang hak asasi manusia, tenaga kerja, lingkungan, dan antikorupsi sebagai dasar keberlanjutan korporasi.

Perguruan tinggi dan lembaga riset juga memiliki peran strategis dalam pencapaian SDGs. Akademisi dapat menghasilkan pengetahuan, teknologi, model kebijakan, indikator evaluasi, dan sumber daya manusia yang mendukung transisi hijau. Melalui riset terapan, pengabdian masyarakat, inkubator bisnis, dan kerja sama industri, perguruan tinggi dapat menjadi pusat pengembangan *green innovation* yang relevan dengan kebutuhan masyarakat dan wilayah.

Masyarakat berperan sebagai pengguna, pengawas, dan penggerak perubahan. Pilihan konsumsi masyarakat dapat

mendorong permintaan terhadap produk hijau, transportasi bersih, energi terbarukan, dan layanan yang bertanggung jawab. Selain itu, masyarakat dapat berpartisipasi dalam pengelolaan sampah, konservasi air, urban farming, komunitas energi, gerakan lingkungan, dan pengawasan kebijakan publik. Dengan demikian, pencapaian SDGs tidak hanya bergantung pada pemerintah dan perusahaan, tetapi juga pada perubahan perilaku masyarakat.

Kemitraan antara pemerintah, swasta, akademisi, masyarakat, dan media menjadi kunci pencapaian SDGs. Agenda 2030 menekankan bahwa semua negara dan semua pemangku kepentingan perlu bertindak dalam kemitraan kolaboratif. Oleh karena itu, pencapaian SDGs membutuhkan pendekatan *multi-stakeholder governance*, yaitu tata kelola yang menghubungkan kebijakan, investasi, riset, teknologi, komunitas, dan partisipasi publik.

Dengan demikian, pencapaian SDGs merupakan tanggung jawab bersama. Pemerintah menyediakan arah dan regulasi, dunia usaha menciptakan inovasi dan investasi, akademisi menghasilkan pengetahuan, masyarakat membentuk perilaku, dan media memperkuat literasi publik. *Green innovation* menjadi ruang kolaborasi yang menghubungkan seluruh aktor tersebut dalam tindakan konkret menuju pembangunan berkelanjutan.

STRATEGI INTEGRASI SDGS DAN ESG DALAM PROGRAM INOVASI HIJAU

Strategi pertama integrasi SDGs dan ESG dalam program inovasi hijau adalah melakukan pemetaan tujuan dan indikator. Organisasi perlu mengidentifikasi SDGs mana yang paling relevan dengan aktivitas, produk, sektor, dan dampaknya. Misalnya, perusahaan energi dapat memprioritaskan SDG 7 dan SDG 13, perusahaan manufaktur dapat memprioritaskan SDG 9 dan SDG 12, sedangkan pengembang kota dapat memprioritaskan SDG 11,

SDG 6, dan SDG 13. Pemetaan ini membantu organisasi menghindari klaim kontribusi SDGs yang terlalu umum dan tidak terukur.

Strategi kedua adalah menghubungkan SDGs dengan indikator ESG. SDGs memberikan arah pembangunan global, sedangkan ESG memberikan kerangka penilaian organisasi. Misalnya, target pengurangan emisi dalam ESG dapat dihubungkan dengan SDG 13; program efisiensi energi dapat dihubungkan dengan SDG 7; pengelolaan limbah dan daur ulang dapat dihubungkan dengan SDG 12; keselamatan kerja dapat dihubungkan dengan SDG 8; dan tata kelola antikorupsi dapat dihubungkan dengan SDG 16. Dengan cara ini, SDGs dan ESG tidak berjalan terpisah.

Strategi ketiga adalah menyusun peta jalan *green innovation*. Peta jalan ini berisi tujuan, program, target waktu, indikator, sumber daya, pembiayaan, teknologi, aktor pelaksana, dan sistem evaluasi. Peta jalan membantu organisasi mengubah visi keberlanjutan menjadi rencana aksi yang operasional. Tanpa peta jalan, inovasi hijau sering bersifat sporadis, tidak terkoordinasi, dan sulit diukur dampaknya.

Strategi keempat adalah menerapkan prinsip materialitas. Organisasi perlu menentukan isu keberlanjutan yang paling signifikan bagi bisnis dan pemangku kepentingannya. Tidak semua isu ESG memiliki tingkat kepentingan yang sama bagi setiap organisasi. IFRS S1 menekankan pentingnya pengungkapan informasi mengenai risiko dan peluang keberlanjutan yang berguna bagi pengguna laporan keuangan dalam mengambil keputusan. Prinsip ini membantu organisasi memprioritaskan inovasi hijau yang paling relevan dan berdampak.

Strategi kelima adalah membangun sistem data, monitoring, dan pelaporan. Program *green innovation* perlu dilengkapi dengan data sebelum dan sesudah implementasi, seperti konsumsi energi, emisi, limbah, air, biaya operasional, keselamatan kerja, dan

manfaat sosial. Data tersebut penting untuk membuktikan kontribusi inovasi hijau terhadap ESG dan SDGs. Tanpa data, program keberlanjutan mudah berubah menjadi klaim normatif yang sulit diverifikasi.

Strategi keenam adalah memperkuat kolaborasi multipihak. Integrasi SDGs dan ESG membutuhkan kerja sama antara manajemen puncak, unit operasional, bagian keuangan, bagian lingkungan, sumber daya manusia, pemasok, konsumen, pemerintah, akademisi, dan komunitas. *Green innovation* tidak dapat dijalankan hanya oleh satu divisi, karena isu keberlanjutan melintasi seluruh rantai nilai organisasi. Oleh sebab itu, struktur koordinasi dan kepemimpinan menjadi sangat penting.

Strategi ketujuh adalah mengembangkan budaya organisasi yang mendukung keberlanjutan. ESG dan SDGs tidak akan terintegrasi secara kuat apabila keberlanjutan hanya diperlakukan sebagai kewajiban pelaporan. Organisasi perlu membangun budaya inovatif, etis, transparan, hemat sumber daya, dan bertanggung jawab terhadap lingkungan. Budaya ini dapat diperkuat melalui pelatihan, insentif, komunikasi internal, indikator kinerja, dan keteladanan pimpinan.

Dengan demikian, integrasi SDGs dan ESG dalam program inovasi hijau membutuhkan pendekatan strategis, terukur, dan kolaboratif. SDGs memberikan arah tujuan pembangunan, ESG memberikan kerangka penilaian organisasi, dan *green innovation* menyediakan solusi teknis serta manajerial. Ketiganya perlu disatukan agar organisasi mampu berkontribusi terhadap pembangunan berkelanjutan sekaligus memperkuat daya saing jangka panjang.



BAB 7

EKONOMI SIRKULAR DAN MODEL BISNIS HIJAU

Perkembangan ekonomi modern selama ini banyak bertumpu pada pola produksi dan konsumsi linear, yaitu mengambil sumber daya alam, mengolahnya menjadi produk, menggunakan produk tersebut, lalu membuangnya sebagai limbah. Pola ini telah mendorong pertumbuhan ekonomi dan industrialisasi, tetapi pada saat yang sama juga menimbulkan berbagai persoalan lingkungan, seperti eksploitasi sumber daya alam, peningkatan volume sampah, pencemaran, emisi karbon, serta tekanan terhadap daya dukung ekosistem. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem ekonomi tidak lagi dapat dipertahankan hanya dengan pendekatan “ambil-buat-buang”, melainkan perlu diarahkan menuju sistem yang lebih efisien, regeneratif, dan berkelanjutan.

Dalam konteks *green innovation and technology management*, ekonomi sirkular menjadi salah satu pendekatan penting untuk memperkuat inovasi hijau dan membangun model bisnis yang lebih ramah lingkungan. Ekonomi sirkular tidak hanya menekankan pengurangan limbah, tetapi juga mendorong perubahan mendasar dalam cara produk dirancang, diproduksi, digunakan, dirawat, diperbaiki, digunakan kembali, didaur ulang, dan dikembalikan ke dalam siklus ekonomi. Dengan demikian, nilai suatu produk,

material, dan sumber daya dapat dipertahankan selama mungkin, sehingga ketergantungan terhadap bahan baku baru dapat dikurangi.

Ekonomi sirkular juga berkaitan erat dengan pengembangan model bisnis hijau, yaitu model bisnis yang tidak hanya mengejar keuntungan ekonomi, tetapi juga memperhatikan dampak ekologis dan sosial dari seluruh aktivitas usahanya. Melalui model bisnis hijau, perusahaan didorong untuk menciptakan nilai melalui efisiensi sumber daya, inovasi produk berkelanjutan, layanan berbasis penggunaan, pengelolaan rantai pasok hijau, pengurangan emisi, serta pemanfaatan kembali material yang sebelumnya dianggap sebagai limbah. Dengan cara ini, keberlanjutan tidak diposisikan sebagai beban tambahan, tetapi sebagai sumber keunggulan kompetitif dan peluang inovasi.

Pembahasan mengenai ekonomi sirkular dan model bisnis hijau menjadi semakin relevan di tengah meningkatnya tekanan global terhadap perubahan iklim, kelangkaan sumber daya, pencemaran lingkungan, dan tuntutan konsumen terhadap produk yang lebih bertanggung jawab. Pemerintah, industri, perguruan tinggi, masyarakat, dan pelaku usaha perlu memahami bahwa transisi menuju ekonomi hijau membutuhkan perubahan sistemik, baik dalam aspek teknologi, manajemen, kebijakan, perilaku konsumen, maupun desain bisnis. Oleh karena itu, ekonomi sirkular menjadi landasan penting untuk membangun pola pembangunan yang tidak hanya produktif, tetapi juga restoratif dan berkeadilan ekologis.

Bab ini membahas bagaimana ekonomi sirkular dan model bisnis hijau dapat menjadi fondasi bagi pengembangan *green innovation*. Pembahasan diawali dengan pengertian ekonomi sirkular sebagai dasar untuk memahami pergeseran paradigma dari ekonomi linear menuju ekonomi yang lebih tertutup, efisien, dan berkelanjutan. Melalui pemahaman tersebut, ekonomi sirkular tidak hanya dipahami sebagai strategi pengelolaan limbah, tetapi

sebagai kerangka transformasi ekonomi yang mampu menghubungkan inovasi teknologi, efisiensi sumber daya, keberlanjutan lingkungan, dan penciptaan nilai bisnis jangka panjang.

PENGERTIAN EKONOMI SIRKULAR

Ekonomi sirkular adalah pendekatan ekonomi yang berupaya mempertahankan nilai produk, material, dan sumber daya selama mungkin di dalam sistem ekonomi, sekaligus mengurangi timbunan limbah dan tekanan terhadap lingkungan. Berbeda dari pola ekonomi konvensional yang cenderung mengambil bahan baku, memproduksi, menggunakan, lalu membuang, ekonomi sirkular berusaha merancang sistem agar material dapat digunakan kembali, diperbaiki, didaur ulang, dipulihkan, atau dikembalikan ke alam secara aman. Dalam kerangka ini, limbah tidak lagi dipandang sebagai akhir dari siklus produksi, melainkan sebagai sumber daya potensial bagi siklus berikutnya.

Secara konseptual, ekonomi sirkular dapat dipahami sebagai sistem ekonomi yang dirancang untuk menghilangkan limbah dan polusi, mempertahankan produk dan material pada nilai tertingginya, serta meregenerasi sistem alam. Ellen MacArthur Foundation menjelaskan bahwa ekonomi sirkular didasarkan pada tiga prinsip utama, yaitu menghilangkan limbah dan polusi sejak tahap desain, mensirkulasikan produk dan material, serta meregenerasi alam. Prinsip ini menunjukkan bahwa ekonomi sirkular bukan sekadar kegiatan daur ulang, tetapi perubahan mendasar dalam cara manusia mendesain, memproduksi, mengonsumsi, dan mengelola sumber daya.

Ekonomi sirkular lahir sebagai kritik terhadap ekonomi linear yang dianggap tidak lagi sesuai dengan kondisi ekologis global. Peningkatan jumlah penduduk, urbanisasi, industrialisasi, dan konsumsi telah menyebabkan peningkatan ekstraksi sumber daya

alam, timbunan limbah, emisi, dan kerusakan ekosistem. Oleh karena itu, ekonomi sirkular menawarkan pendekatan baru yang berusaha memisahkan pertumbuhan ekonomi dari peningkatan konsumsi sumber daya primer. Dalam perspektif keberlanjutan, ekonomi sirkular menjadi salah satu strategi penting untuk mendukung efisiensi sumber daya dan pembangunan rendah karbon.

Ekonomi sirkular tidak hanya berkaitan dengan teknologi, tetapi juga mencakup desain produk, perilaku konsumen, model bisnis, kebijakan publik, sistem logistik, infrastruktur daur ulang, dan tata kelola kelembagaan. Produk yang dirancang secara sirkular harus mudah diperbaiki, digunakan kembali, dibongkar, dipilah, dan didaur ulang. Sementara itu, konsumen perlu didorong untuk mengubah pola konsumsi dari kepemilikan berlebihan menuju penggunaan yang lebih efisien, berbagi, memperbaiki, dan menggunakan produk lebih lama.

Dalam konteks manajemen teknologi, ekonomi sirkular membutuhkan inovasi pada berbagai tingkatan. Pada tingkat produk, inovasi dilakukan melalui material ramah lingkungan, desain modular, dan umur pakai panjang. Pada tingkat proses, inovasi dilakukan melalui efisiensi energi, produksi bersih, dan penggunaan kembali limbah sebagai input. Pada tingkat sistem, inovasi dilakukan melalui rantai pasok tertutup, *take-back system*, *remanufacturing*, dan platform berbagi. Dengan demikian, ekonomi sirkular sangat berkaitan dengan *green innovation* dan *technology management*.

Dengan demikian, ekonomi sirkular dapat dipahami sebagai paradigma pembangunan ekonomi yang menempatkan efisiensi sumber daya, pengurangan limbah, pemulihan nilai material, dan regenerasi ekosistem sebagai fondasi utama. Ekonomi sirkular bukan hanya strategi lingkungan, tetapi juga strategi ekonomi karena dapat membuka peluang usaha baru, menciptakan

lapangan kerja hijau, meningkatkan efisiensi industri, dan memperkuat daya saing jangka panjang.

PERBEDAAN EKONOMI LINEAR DAN EKONOMI Sirkular

Ekonomi linear merupakan model ekonomi yang mengikuti pola “ambil-buat-gunakan-buang” atau *take-make-use-dispose*. Dalam model ini, bahan baku diambil dari alam, diolah menjadi produk, digunakan oleh konsumen, kemudian dibuang sebagai limbah setelah masa pakainya berakhir. Model ekonomi linear berkembang seiring industrialisasi modern karena mampu menghasilkan barang dalam jumlah besar dan mendorong pertumbuhan ekonomi. Namun, model ini menimbulkan persoalan serius karena sangat bergantung pada ekstraksi sumber daya alam dan menghasilkan limbah dalam jumlah besar.

Ekonomi sirkular memiliki logika yang berbeda. Dalam ekonomi sirkular, produk dan material dirancang agar tetap berada dalam sistem ekonomi selama mungkin. Produk tidak langsung menjadi limbah setelah digunakan, tetapi diperbaiki, digunakan kembali, dibagikan, disewakan, didaur ulang, atau diproses ulang menjadi bahan baku baru. Dengan demikian, ekonomi sirkular berusaha menutup siklus material dan mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya primer.

Perbedaan mendasar antara ekonomi linear dan ekonomi sirkular terletak pada cara keduanya memandang limbah. Dalam ekonomi linear, limbah merupakan konsekuensi akhir dari proses produksi dan konsumsi. Dalam ekonomi sirkular, limbah dianggap sebagai kegagalan desain. Artinya, sejak awal produk harus dirancang agar tidak menghasilkan limbah yang tidak dapat dimanfaatkan kembali. Pendekatan ini menempatkan desain sebagai titik awal perubahan, bukan sekadar pengelolaan limbah di bagian akhir.

Perbedaan berikutnya terletak pada orientasi nilai. Ekonomi linear cenderung berorientasi pada penjualan volume produk sebanyak mungkin. Semakin banyak produk dijual dan diganti, semakin besar keuntungan yang diperoleh. Sebaliknya, ekonomi sirkular berorientasi pada pemeliharaan nilai produk dan material selama mungkin. Model bisnis seperti penyewaan, perbaikan, berbagi, *product-service system*, dan *remanufacturing* menunjukkan bahwa keuntungan dapat diperoleh bukan hanya dari menjual produk baru, tetapi juga dari memperpanjang nilai produk yang sudah ada.

Ekonomi linear juga sering menimbulkan biaya eksternal yang tidak sepenuhnya ditanggung oleh produsen atau konsumen, seperti pencemaran, kerusakan ekosistem, emisi, dan beban tempat pembuangan akhir. UNEP menegaskan bahwa skenario ekonomi sirkular dan masyarakat nol limbah dapat memberikan keuntungan ekonomi bersih secara global dibandingkan model pengelolaan limbah konvensional. Hal ini menunjukkan bahwa ekonomi sirkular tidak hanya mengurangi dampak lingkungan, tetapi juga dapat menghindari biaya sosial dan ekologis yang besar.

Dengan demikian, perbedaan ekonomi linear dan ekonomi sirkular bukan hanya perbedaan teknis dalam pengelolaan limbah, tetapi perbedaan paradigma pembangunan. Ekonomi linear berangkat dari asumsi bahwa sumber daya dapat terus dieksploitasi dan limbah dapat terus ditampung. Ekonomi sirkular berangkat dari kesadaran bahwa bumi memiliki batas ekologis, sehingga sistem ekonomi harus dirancang agar lebih efisien, regeneratif, dan bertanggung jawab.

PRINSIP *REDUCE, REUSE, RECYCLE, RECOVER, DAN REDESIGN*

1. *Reduce*

Prinsip *reduce* berarti mengurangi penggunaan sumber daya, energi, material, dan produk yang tidak diperlukan sejak awal. Dalam ekonomi sirkular, pengurangan merupakan langkah paling penting karena limbah terbaik adalah limbah yang tidak pernah dihasilkan. Prinsip ini dapat diterapkan melalui desain produk yang lebih efisien, pengurangan kemasan berlebihan, penggunaan material seperlunya, efisiensi energi, serta perubahan pola konsumsi masyarakat. *Reduce* juga berkaitan dengan upaya menurunkan intensitas material dalam proses produksi.

2. *Reuse*

Prinsip *reuse* berarti menggunakan kembali produk, komponen, atau material tanpa melalui proses pengolahan yang kompleks. Penggunaan kembali dapat dilakukan melalui pemakaian ulang botol, tas, perabot, pakaian, komponen elektronik, material bangunan, atau kemasan. Dalam perspektif ekonomi sirkular, *reuse* lebih baik daripada *recycle* karena *reuse* mempertahankan nilai produk lebih tinggi dan membutuhkan energi lebih sedikit. Oleh karena itu, produk perlu dirancang agar tahan lama, mudah diperbaiki, dan tetap layak digunakan dalam jangka panjang.

3. *Recycle*

Prinsip *recycle* berarti mengolah kembali material bekas menjadi bahan baku baru. Daur ulang dapat dilakukan terhadap kertas, plastik, logam, kaca, tekstil, dan berbagai material lain. Namun, *recycle* sebaiknya tidak dipahami sebagai solusi Tunggal karena proses daur ulang tetap membutuhkan energi, infrastruktur, pemilahan, dan pasar material daur ulang. Dalam hierarki ekonomi sirkular, *recycle* penting, tetapi berada setelah *reduce*

dan reuse karena nilai material sering menurun setelah melalui proses daur ulang.

4. *Recover*

Prinsip *recover* berarti memulihkan nilai dari limbah yang tidak dapat digunakan kembali atau didaur ulang secara langsung. Pemulihan dapat berupa pemulihan energi, pemulihan panas, pemulihan bahan kimia, atau pemanfaatan limbah organik menjadi kompos dan biogas. Dalam pengelolaan limbah modern, *recover* digunakan sebagai pilihan setelah upaya pengurangan, penggunaan kembali, dan daur ulang dilakukan. Namun, *recover* harus diterapkan secara hati-hati agar tidak menjadi pembenaran untuk terus menghasilkan limbah.

5. *Redesign*

Prinsip *redesign* merupakan prinsip yang sangat penting dalam ekonomi sirkular karena perubahan harus dimulai dari tahap perancangan. Produk yang sulit dibongkar, sulit diperbaiki, mengandung bahan berbahaya, atau menggunakan material campuran yang sulit dipisahkan akan menyulitkan penerapan ekonomi sirkular. *Redesign* mendorong produsen merancang produk yang modular, tahan lama, mudah diperbaiki, mudah dipilah, menggunakan material aman, dan memiliki jalur pemulihan setelah masa pakainya berakhir.

Kelima prinsip tersebut saling berkaitan dan membentuk strategi pengelolaan sumber daya yang lebih berkelanjutan. *Reduce* menekan penggunaan sumber daya sejak awal, *reuse* memperpanjang usia produk, *recycle* mengembalikan material ke proses produksi, *recover* memulihkan nilai dari residu, dan *redesign* memastikan bahwa produk sejak awal dirancang untuk mendukung siklus sirkular. Dalam konteks *green innovation*, prinsip-prinsip ini menjadi dasar pengembangan produk, teknologi, proses, dan model bisnis yang lebih ramah lingkungan.



Gambar 7.4. Green Business Model

Gambar 13 *Green bussiness model.*

Green business model atau model bisnis hijau adalah cara organisasi menciptakan, menyampaikan, dan menangkap nilai ekonomi dengan tetap memperhatikan keberlanjutan lingkungan dan sosial. Model bisnis hijau tidak hanya berusaha menjual produk ramah lingkungan, tetapi juga mengubah logika bisnis agar lebih efisien dalam penggunaan sumber daya, rendah emisi, minim limbah, serta bertanggung jawab terhadap masyarakat. Dengan demikian, model bisnis hijau merupakan penghubung antara *green innovation*, strategi bisnis, dan pembangunan berkelanjutan.

Model bisnis hijau dapat berbentuk penjualan produk ramah lingkungan, layanan hemat energi, penyewaan produk, perbaikan produk, penggunaan material daur ulang, sistem pengembalian produk, atau platform berbagi. Dalam ekonomi sirkular, model bisnis hijau berusaha mengurangi ketergantungan pada penjualan produk baru secara terus-menerus. Organisasi dapat memperoleh

pendapatan dari layanan, pemeliharaan, pembaruan, perbaikan, atau pemanfaatan bersama aset yang sudah ada.

OECD mengidentifikasi beberapa model bisnis sirkular yang relevan dengan transformasi menuju ekonomi yang lebih efisien sumber daya, yaitu *circular supply*, *resource recovery*, *product life extension*, *sharing*, dan *product-service system*. Kelima model tersebut mengubah aliran produk dan material dalam ekonomi sehingga berpotensi mengurangi tekanan lingkungan dari sistem produksi dan konsumsi konvensional.

Model *circular supply* menggunakan input yang dapat diperbarui, dapat didaur ulang, atau berbasis material ramah lingkungan. Model *resource recovery* berfokus pada pemulihan material dan energi dari limbah. Model *product life extension* memperpanjang umur produk melalui perbaikan, pembaruan, dan *remanufacturing*. Model *sharing* meningkatkan intensitas penggunaan aset melalui penggunaan bersama. Sementara itu, *product-service system* mengubah orientasi bisnis dari menjual produk menjadi menyediakan fungsi atau layanan.

Model bisnis hijau juga membutuhkan perubahan pada sistem manajemen organisasi. Perusahaan perlu mengintegrasikan keberlanjutan ke dalam desain produk, pengadaan bahan baku, produksi, pemasaran, layanan purna jual, dan hubungan dengan konsumen. Tanpa perubahan sistem manajemen, model bisnis hijau dapat berhenti sebagai strategi komunikasi atau pemasaran semata. Oleh sebab itu, model bisnis hijau harus didukung oleh tata kelola, indikator kinerja, pembiayaan, teknologi, dan budaya organisasi.

Dengan demikian, *green business model* menjadi instrumen penting untuk menjadikan keberlanjutan sebagai sumber nilai ekonomi. Model ini menunjukkan bahwa kegiatan bisnis tidak harus bertentangan dengan perlindungan lingkungan. Sebaliknya, bisnis dapat menjadi aktor penting dalam transisi hijau apabila mampu mengembangkan model bisnis yang mengurangi limbah,

memperpanjang umur produk, mengefisienkan sumber daya, dan memberikan manfaat sosial yang lebih luas.

VALUE CREATION DALAM BISNIS BERKELANJUTAN

Value creation atau penciptaan nilai dalam bisnis berkelanjutan adalah proses menghasilkan manfaat ekonomi, sosial, dan lingkungan secara bersamaan. Dalam bisnis konvensional, nilai sering diukur terutama dari keuntungan finansial. Namun, dalam bisnis berkelanjutan, nilai tidak hanya dilihat dari laba perusahaan, tetapi juga dari kontribusi terhadap efisiensi sumber daya, kesejahteraan pekerja, kesehatan masyarakat, pengurangan emisi, dan pelestarian lingkungan. Dengan demikian, penciptaan nilai menjadi lebih luas dan multidimensional.

Dalam ekonomi sirkular, penciptaan nilai dilakukan dengan mempertahankan nilai produk dan material selama mungkin. Produk yang diperbaiki, digunakan kembali, disewakan, diperbarui, atau didaur ulang memiliki peluang menciptakan nilai baru setelah masa pakai awalnya selesai. Hal ini berbeda dari ekonomi linear yang sering kehilangan nilai ketika produk dibuang. Dengan pendekatan sirkular, perusahaan dapat memperoleh pendapatan dari layanan purna jual, perbaikan, pemeliharaan, penjualan komponen, atau pengolahan kembali material.

Penciptaan nilai juga dapat terjadi melalui efisiensi. Perusahaan yang berhasil mengurangi konsumsi energi, air, bahan baku, dan limbah dapat menurunkan biaya operasional. Efisiensi ini sekaligus memperbaiki kinerja lingkungan. Porter dan van der Linde (1995) menjelaskan bahwa inovasi yang dipicu oleh tekanan lingkungan dapat meningkatkan efisiensi dan daya saing perusahaan. Dalam konteks ini, keberlanjutan bukan beban, tetapi sumber inovasi dan produktivitas.

Selain nilai ekonomi, bisnis berkelanjutan juga menciptakan nilai sosial. Perusahaan dapat meningkatkan kesejahteraan masyarakat melalui penciptaan lapangan kerja hijau, pemberdayaan UMKM, rantai pasok lokal, produk yang lebih sehat, dan akses terhadap layanan ramah lingkungan. Nilai sosial ini penting karena keberlanjutan tidak hanya berkaitan dengan alam, tetapi juga dengan manusia. Bisnis yang mengabaikan dimensi sosial berisiko menciptakan ketimpangan dan resistensi masyarakat.

Nilai lingkungan tercipta ketika aktivitas bisnis mampu mengurangi tekanan terhadap ekosistem. Penggunaan energi terbarukan, material daur ulang, desain rendah limbah, pengelolaan air, dan pengurangan emisi merupakan bentuk penciptaan nilai lingkungan. Dalam konteks ESG, nilai lingkungan dapat diterjemahkan ke dalam indikator seperti penurunan emisi, pengurangan limbah, efisiensi energi, dan peningkatan tingkat daur ulang. Dengan indikator tersebut, kontribusi bisnis berkelanjutan dapat dinilai secara lebih objektif.

Dengan demikian, *value creation* dalam bisnis berkelanjutan menuntut perubahan cara perusahaan memahami nilai. Nilai tidak lagi hanya berada pada produk yang dijual, tetapi juga pada layanan, efisiensi, hubungan dengan pelanggan, pemulihan material, reputasi, kepercayaan publik, dan kontribusi terhadap keberlanjutan. Penciptaan nilai menjadi konsep penting karena *green innovation* hanya akan berhasil apabila mampu memberikan manfaat nyata bagi bisnis, masyarakat, dan lingkungan.

INOVASI PRODUK DAN LAYANAN BERBASIS EKONOMI Sirkular

Inovasi produk berbasis ekonomi sirkular dimulai dari desain. Produk harus dirancang agar tahan lama, mudah diperbaiki, mudah dibongkar, dapat digunakan kembali, dan dapat

didaur ulang. Desain sirkular juga mendorong penggunaan material yang aman, terbarukan, atau berasal dari daur ulang. Dengan demikian, inovasi produk tidak hanya berfokus pada fungsi dan estetika, tetapi juga pada nasib produk setelah digunakan oleh konsumen.

Salah satu bentuk inovasi produk sirkular adalah produk modular. Produk modular memungkinkan komponen tertentu diganti tanpa harus membuang seluruh produk. Contohnya dapat ditemukan pada furnitur, perangkat elektronik, mesin industri, kendaraan, dan produk bangunan. Modularitas memperpanjang umur pakai produk karena kerusakan pada satu bagian tidak menyebabkan seluruh produk menjadi limbah. Pendekatan ini juga mempermudah proses perbaikan, pembaruan, dan daur ulang.

Inovasi layanan berbasis ekonomi sirkular dapat berbentuk penyewaan, langganan, berbagi, perbaikan, dan *product-service system*. Dalam model ini, konsumen tidak selalu harus memiliki produk, tetapi cukup memperoleh manfaat atau fungsi dari produk tersebut. Misalnya, perusahaan dapat menyediakan layanan pencahayaan, bukan menjual lampu; menyediakan layanan mobilitas, bukan hanya menjual kendaraan; atau menyediakan layanan pencucian, bukan hanya menjual mesin. Model ini mendorong produsen untuk membuat produk yang awet karena biaya kerusakan dan pemeliharaan menjadi bagian dari tanggung jawab penyedia layanan.

Inovasi produk dan layanan sirkular juga dapat diterapkan pada kemasan. Kemasan isi ulang, kemasan guna ulang, sistem deposit, dan kemasan berbasis *biodegradable material* merupakan contoh inovasi yang bertujuan mengurangi limbah. Namun, inovasi kemasan harus dianalisis secara hati-hati melalui pendekatan siklus hidup. Kemasan yang tampak ramah lingkungan belum tentu lebih baik apabila proses produksinya sangat boros energi atau tidak tersedia sistem pengolahan setelah digunakan.

Pada sektor pangan, inovasi sirkular dapat dilakukan melalui pengurangan kehilangan pangan, pengolahan limbah organik, pemanfaatan produk samping, kompos, biogas, dan pengemasan yang memperpanjang umur simpan. Dalam konteks Indonesia, isu kehilangan dan pemborosan pangan memiliki relevansi besar bagi ekonomi sirkular dan pembangunan rendah karbon. Kajian Bappenas tentang *food loss and waste* menempatkan pengurangan kehilangan dan pemborosan pangan sebagai bagian dari implementasi ekonomi sirkular serta pembangunan rendah karbon.

Inovasi layanan juga membutuhkan dukungan digital. Platform digital dapat mempertemukan pemilik dan pengguna aset, mengelola sistem pengembalian produk, memantau siklus hidup barang, menghubungkan bank sampah dengan industri daur ulang, atau membantu konsumen menemukan layanan perbaikan. Dengan demikian, digitalisasi dapat mempercepat ekonomi sirkular apabila diarahkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan aset dan memperpanjang nilai produk.

Dengan demikian, inovasi produk dan layanan berbasis ekonomi sirkular membutuhkan perubahan dari desain hingga model bisnis. Produk tidak lagi dirancang hanya untuk dijual, digunakan, dan dibuang, tetapi untuk dipertahankan nilainya selama mungkin. Layanan tidak lagi hanya menjadi pelengkap produk, tetapi dapat menjadi inti model bisnis yang lebih hemat sumber daya dan ramah lingkungan.

PELUANG USAHA HIJAU BAGI PENGUSAHA DAN UMKM

Ekonomi sirkular membuka peluang besar bagi pengusaha dan UMKM karena banyak aktivitas hijau dapat dikembangkan pada skala kecil dan menengah. Peluang tersebut mencakup usaha daur ulang, kompos, produk isi ulang, perbaikan barang, kerajinan dari material bekas, pengolahan limbah organik, energi terbarukan skala kecil, pertanian organik, kemasan ramah lingkungan, dan

produk berbasis bahan lokal. UMKM memiliki keunggulan karena dekat dengan masyarakat, fleksibel, dan mampu merespons kebutuhan lokal secara cepat.

Peluang usaha hijau dapat muncul dari persoalan limbah. Sampah plastik, kertas, tekstil, organik, logam, dan elektronik dapat menjadi sumber bahan baku bagi usaha baru apabila dikelola dengan benar. Bank sampah, usaha daur ulang plastik, kerajinan limbah tekstil, produksi kompos, dan pengolahan minyak jelantah merupakan contoh usaha yang mengubah masalah lingkungan menjadi peluang ekonomi. Namun, usaha seperti ini membutuhkan kualitas pemilahan, standar produk, akses pasar, dan dukungan teknologi.

UMKM juga dapat mengembangkan model bisnis berbasis penggunaan kembali dan perbaikan. Usaha reparasi elektronik, sepatu, tas, furnitur, pakaian, dan peralatan rumah tangga memiliki kontribusi penting dalam memperpanjang umur produk. Dalam ekonomi linear, produk rusak sering langsung dibuang dan diganti baru. Dalam ekonomi sirkular, jasa perbaikan menjadi bagian penting dari penciptaan nilai karena mengurangi limbah dan kebutuhan bahan baku baru.

Peluang lain berada pada sektor pangan dan pertanian. UMKM dapat mengembangkan produk pangan lokal, pertanian organik, pengolahan limbah pangan, kompos, pakan ternak dari sisa pangan, biogas, serta produk olahan berbasis bahan yang sebelumnya terbuang. Inovasi ini tidak hanya mengurangi limbah, tetapi juga mendukung ekonomi lokal, ketahanan pangan, dan nilai tambah bagi petani serta pelaku usaha kecil.

Pemerintah, perguruan tinggi, dan lembaga keuangan memiliki peran penting dalam memperkuat peluang usaha hijau bagi UMKM. Dukungan dapat berupa pelatihan, akses pembiayaan, inkubasi bisnis, sertifikasi produk, teknologi tepat guna, pendampingan desain kemasan, pemasaran digital, dan kemitraan dengan industri besar. Tanpa dukungan ekosistem,

banyak UMKM hijau sulit berkembang karena keterbatasan modal, teknologi, kapasitas manajemen, dan akses pasar.

Dalam konteks Indonesia, ekonomi sirkular juga dipandang berpotensi memberikan manfaat lingkungan yang besar. UNDP dan Bappenas menyatakan bahwa implementasi ekonomi sirkular di Indonesia berpotensi mengurangi emisi CO₂ dan penggunaan air secara signifikan pada 2030. Potensi ini menunjukkan bahwa peluang usaha hijau tidak hanya penting bagi pendapatan UMKM, tetapi juga bagi agenda pembangunan rendah karbon nasional.

Dengan demikian, peluang usaha hijau bagi pengusaha dan UMKM sangat luas, tetapi membutuhkan inovasi, jejaring, dan dukungan kelembagaan. UMKM dapat menjadi aktor penting dalam ekonomi sirkular karena mampu menghubungkan persoalan lingkungan dengan solusi ekonomi lokal. Apabila dikelola dengan baik, usaha hijau dapat menciptakan lapangan kerja, mengurangi limbah, meningkatkan nilai tambah lokal, dan memperkuat budaya konsumsi berkelanjutan.

STUDI PENERAPAN EKONOMI Sirkular dalam Industri dan Masyarakat

Penerapan ekonomi sirkular dalam industri dapat dilihat pada penggunaan kembali material, pengurangan limbah produksi, efisiensi energi, *remanufacturing*, daur ulang internal, dan desain produk yang dapat dipulihkan. Industri manufaktur, tekstil, makanan-minuman, konstruksi, elektronik, otomotif, dan plastik memiliki potensi besar untuk menerapkan prinsip sirkular. Melalui pendekatan ini, industri dapat mengurangi biaya bahan baku, menekan limbah, meningkatkan efisiensi, dan memperbaiki reputasi lingkungan.

Pada industri manufaktur, ekonomi sirkular dapat diterapkan melalui *closed-loop production*. Limbah dari satu proses dimanfaatkan kembali sebagai input bagi proses lain. Misalnya, sisa

material logam dapat dilebur kembali, air proses dapat diolah dan digunakan ulang, panas buang dapat dipulihkan, dan cacat produksi dapat dikembalikan ke proses manufaktur. Pendekatan ini menunjukkan bahwa limbah industri tidak harus menjadi beban, tetapi dapat menjadi sumber nilai apabila teknologi dan manajemen prosesnya tepat.

Pada industri tekstil dan fesyen, ekonomi sirkular dapat diterapkan melalui desain pakaian tahan lama, penggunaan serat daur ulang, penjualan pakaian bekas, penyewaan pakaian, perbaikan, dan daur ulang tekstil. Industri fesyen sering dikritik karena menghasilkan limbah besar dan mendorong konsumsi cepat. Oleh karena itu, pendekatan sirkular dapat membantu mengubah industri fesyen dari pola konsumsi cepat menuju penggunaan produk yang lebih lama dan bertanggung jawab.

Pada sektor konstruksi, ekonomi sirkular dapat diterapkan melalui penggunaan material daur ulang, desain bangunan adaptif, pembongkaran selektif, pemanfaatan kembali komponen bangunan, dan pengurangan limbah konstruksi. Bangunan seharusnya tidak hanya dirancang untuk fungsi awal, tetapi juga untuk fleksibilitas penggunaan, perawatan, renovasi, dan pembongkaran di masa depan. Dalam perspektif arsitektur dan perencanaan kota, ekonomi sirkular sangat relevan karena bangunan dan infrastruktur menggunakan material dalam jumlah sangat besar.

Dalam masyarakat, ekonomi sirkular dapat diterapkan melalui bank sampah, komposting rumah tangga, pasar barang bekas, kegiatan memperbaiki barang, sistem isi ulang, gerakan pengurangan plastik sekali pakai, dan komunitas berbagi barang. Praktik-praktik ini menunjukkan bahwa ekonomi sirkular tidak hanya menjadi agenda industri besar, tetapi juga dapat dilakukan pada tingkat rumah tangga dan komunitas. Keterlibatan masyarakat penting karena pemilahan, penggunaan kembali, dan

perubahan pola konsumsi sangat bergantung pada perilaku sehari-hari.

Pada tingkat kota dan wilayah, ekonomi sirkular dapat diterapkan melalui pengelolaan sampah terpadu, kawasan industri hijau, simbiosis industri, pasar material daur ulang, pengelolaan air limbah, dan kebijakan pengadaan hijau. OECD menegaskan bahwa kota membutuhkan energi dalam jumlah besar, menghasilkan emisi dan limbah yang signifikan, sehingga ekonomi sirkular dapat menjadi respons kebijakan untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi, pekerjaan, dan kualitas lingkungan.

Penerapan ekonomi sirkular juga membutuhkan data dan indikator. Pemerintah dan organisasi perlu mengetahui volume limbah, komposisi material, tingkat daur ulang, potensi pemulihan, biaya pengelolaan, dan pasar material. Tanpa data yang baik, ekonomi sirkular sulit dirancang secara efektif. Oleh karena itu, sistem informasi, digitalisasi, dan pelaporan menjadi bagian penting dari pengelolaan ekonomi sirkular.

Dengan demikian, studi penerapan ekonomi sirkular menunjukkan bahwa perubahan dapat dilakukan pada berbagai skala, mulai dari rumah tangga, komunitas, UMKM, industri, kota, hingga kebijakan nasional. Keberhasilannya ditentukan oleh desain produk, teknologi, perilaku konsumen, model bisnis, regulasi, infrastruktur, dan kolaborasi multipihak. Ekonomi sirkular pada akhirnya bukan hanya tentang mengelola limbah, tetapi tentang merancang ulang sistem ekonomi agar lebih efisien, adil, dan berkelanjutan.



BAB 8

GREEN INNOVATION **DALAM SEKTOR ENERGI**

Energi merupakan fondasi utama bagi pembangunan ekonomi, aktivitas industri, mobilitas, pelayanan publik, dan kehidupan masyarakat modern. Hampir seluruh sektor kehidupan membutuhkan energi sebagai penggerak utama, mulai dari rumah tangga, transportasi, manufaktur, pertanian, pendidikan, kesehatan, hingga sistem perkotaan. Namun, ketergantungan yang tinggi terhadap energi fosil telah menimbulkan berbagai persoalan lingkungan, seperti peningkatan emisi gas rumah kaca, pencemaran udara, degradasi ekosistem, serta percepatan perubahan iklim. Kondisi ini menunjukkan bahwa sektor energi perlu mengalami transformasi mendasar agar mampu mendukung pembangunan yang lebih berkelanjutan.

Dalam konteks *green innovation and technology management*, *green innovation* dalam sektor energi menjadi pendekatan strategis untuk menciptakan sistem energi yang lebih bersih, efisien, rendah karbon, dan berkeadilan. Inovasi hijau tidak hanya berfokus pada pengembangan teknologi energi terbarukan, tetapi juga mencakup efisiensi energi, manajemen permintaan energi, penyimpanan energi, jaringan listrik cerdas, elektrifikasi transportasi, penggunaan bahan bakar rendah emisi, serta perubahan tata kelola

energi. Dengan demikian, *green innovation* dalam sektor energi merupakan upaya menyeluruh untuk mengintegrasikan dimensi teknologi, ekonomi, lingkungan, sosial, dan kebijakan publik.

Transformasi energi menjadi semakin penting karena dunia menghadapi dua tantangan besar secara bersamaan, yaitu meningkatnya kebutuhan energi dan tuntutan untuk menurunkan emisi karbon. Di satu sisi, pertumbuhan penduduk, urbanisasi, industrialisasi, dan digitalisasi mendorong peningkatan konsumsi energi. Di sisi lain, krisis iklim menuntut setiap negara, industri, dan masyarakat untuk mengurangi ketergantungan pada energi fosil serta mempercepat transisi menuju energi bersih. Dalam situasi tersebut, inovasi hijau berperan sebagai jembatan antara kebutuhan pembangunan dan kewajiban menjaga keberlanjutan lingkungan.

Pada tingkat nasional, sektor energi juga menghadapi tantangan yang kompleks, seperti ketahanan energi, keterjangkauan harga energi, pemerataan akses energi, efisiensi konsumsi, kesiapan infrastruktur, serta kemampuan mengembangkan teknologi energi bersih sesuai potensi lokal. Oleh karena itu, *green innovation* perlu ditempatkan sebagai instrumen penting dalam memperkuat kemandirian energi, meningkatkan daya saing ekonomi, mengurangi dampak lingkungan, dan mendukung pencapaian target pembangunan berkelanjutan. Pendekatan ini menuntut sinergi antara pemerintah, industri, perguruan tinggi, lembaga riset, masyarakat, dan pelaku usaha.

Bab ini membahas bagaimana *green innovation* dapat diterapkan dalam sektor energi sebagai bagian dari strategi menuju masa depan rendah karbon. Pembahasan diawali dengan kajian mengenai tantangan energi global dan nasional, karena pemahaman terhadap persoalan energi menjadi dasar penting sebelum membahas solusi teknologi, kebijakan, dan manajemen inovasi. Melalui pemahaman tersebut, sektor energi tidak hanya dipandang sebagai penyedia kebutuhan teknis, tetapi juga sebagai

ruang strategis untuk membangun sistem pembangunan yang lebih bersih, tangguh, inklusif, dan berkelanjutan.

TANTANGAN ENERGI GLOBAL DAN NASIONAL

Tantangan energi global pada abad ke-21 tidak hanya berkaitan dengan ketersediaan pasokan energi, tetapi juga dengan keberlanjutan lingkungan, keadilan akses, keamanan energi, dan perubahan iklim. Selama lebih dari satu abad, sistem energi dunia sangat bergantung pada bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Ketergantungan tersebut telah mendorong pertumbuhan ekonomi dan industrialisasi, tetapi juga menimbulkan emisi gas rumah kaca, pencemaran udara, degradasi lingkungan, serta kerentanan geopolitik akibat fluktuasi harga energi dan distribusi sumber daya yang tidak merata.

Tantangan utama sektor energi global adalah bagaimana memenuhi permintaan energi yang terus meningkat tanpa memperbesar krisis iklim. Pertumbuhan penduduk, urbanisasi, industrialisasi, digitalisasi, kendaraan listrik, dan pusat data meningkatkan kebutuhan listrik dan energi final. Pada saat yang sama, dunia dituntut menurunkan emisi secara drastis agar target pengendalian kenaikan suhu global dapat dicapai. IEA menempatkan isu permintaan, pasokan, keamanan energi, emisi, dan pembangunan ekonomi sebagai aspek utama dalam analisis energi global mutakhirnya (International Energy Agency, 2025).

Tantangan berikutnya adalah ketimpangan akses energi. Sebagian wilayah dunia masih menghadapi keterbatasan akses terhadap listrik bersih, bahan bakar memasak yang aman, dan layanan energi modern. Ketimpangan ini berdampak pada pendidikan, kesehatan, produktivitas ekonomi, dan kualitas hidup masyarakat. Oleh karena itu, transisi energi tidak hanya harus berorientasi pada dekarbonisasi, tetapi juga pada keadilan energi. Energi bersih harus terjangkau, tersedia, andal, dan dapat diakses

oleh masyarakat luas, termasuk kelompok berpendapatan rendah dan wilayah terpencil.

Dalam konteks nasional Indonesia, tantangan energi memiliki karakter yang kompleks. Indonesia masih memiliki ketergantungan cukup besar terhadap energi fosil, terutama batu bara dalam pembangkitan listrik dan bahan bakar minyak dalam transportasi. Di sisi lain, Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang sangat besar, seperti energi surya, panas bumi, air, bioenergi, angin, dan energi laut. Tantangannya adalah bagaimana mempercepat pemanfaatan potensi tersebut melalui kebijakan, investasi, infrastruktur, teknologi, dan tata kelola yang konsisten.

Indonesia juga menghadapi tantangan dalam mencapai target bauran energi baru terbarukan dan target *net zero emission*. Laporan kinerja Ditjen EBTKE 2025 menegaskan bahwa program seperti mandatori biodiesel B40 didorong untuk meningkatkan capaian energi baru terbarukan dalam bauran energi nasional, dengan sasaran menuju *net zero emission* pada 2060 atau lebih cepat. Namun, pencapaian target tersebut tetap membutuhkan percepatan energi terbarukan, efisiensi energi, elektrifikasi transportasi, penguatan jaringan listrik, serta reformasi kebijakan energi (Kementerian ESDM, 2025).

Dengan demikian, tantangan energi global dan nasional menuntut pendekatan inovatif yang tidak hanya teknis, tetapi juga manajerial, sosial, ekonomi, dan kelembagaan. *Green innovation* dalam sektor energi menjadi sangat penting karena mampu menghadirkan solusi berupa energi terbarukan, efisiensi energi, sistem digital, penyimpanan energi, dan model bisnis baru. Tanpa inovasi hijau, transisi energi akan berjalan lambat dan sulit menjawab kebutuhan pembangunan berkelanjutan.

ENERGI TERBARUKAN SEBAGAI SOLUSI BERKELANJUTAN

Energi terbarukan adalah energi yang berasal dari sumber alam yang dapat diperbarui secara alami dalam skala waktu manusia, seperti matahari, angin, air, biomassa, panas bumi, dan energi laut. Energi ini menjadi solusi penting dalam pembangunan berkelanjutan karena dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, menurunkan emisi gas rumah kaca, memperkuat keamanan energi, serta membuka peluang ekonomi baru. Dalam konteks *green innovation*, energi terbarukan merupakan salah satu bentuk inovasi paling strategis karena langsung menyentuh inti persoalan perubahan iklim dan ketahanan energi.

Energi terbarukan memiliki keunggulan ekologis karena emisi operasionalnya relatif rendah dibandingkan pembangkit berbasis bahan bakar fosil. Pembangkit listrik tenaga surya dan angin, misalnya, tidak menghasilkan emisi langsung saat menghasilkan listrik. Namun, keberlanjutan energi terbarukan tetap perlu dinilai melalui pendekatan siklus hidup karena proses produksi panel surya, turbin angin, baterai, dan infrastruktur pendukung tetap membutuhkan material, energi, dan sistem pengelolaan akhir masa pakai.

Secara global, energi terbarukan menunjukkan pertumbuhan yang sangat pesat. IRENA melaporkan bahwa pada akhir 2025 energi terbarukan telah mencapai 49% dari kapasitas listrik terpasang global dan menyumbang 85,6% dari penambahan kapasitas listrik tahunan, terutama didorong oleh pertumbuhan tenaga surya dan angin (International Renewable Energy Agency, 2026). Data ini menunjukkan bahwa energi terbarukan tidak lagi menjadi teknologi alternatif yang marginal, tetapi telah menjadi arus utama dalam pembangunan sistem energi dunia.

Energi terbarukan juga memiliki manfaat ekonomi. Penurunan biaya teknologi surya, angin, dan baterai telah membuat

energi terbarukan semakin kompetitif dibandingkan pembangkit fosil di banyak negara. Selain itu, energi terbarukan dapat menciptakan lapangan kerja hijau, memperkuat industri lokal, mengurangi impor bahan bakar, dan meningkatkan ketahanan ekonomi. Dalam jangka panjang, energi terbarukan dapat menjadi fondasi ekonomi rendah karbon yang lebih stabil dan tidak terlalu rentan terhadap fluktuasi harga bahan bakar fosil.

Bagi Indonesia, energi terbarukan memiliki relevansi strategis karena wilayah Indonesia kaya akan potensi sumber daya energi bersih. Potensi panas bumi sangat besar karena Indonesia berada pada cincin api Pasifik. Potensi surya tersebar luas di hampir seluruh wilayah kepulauan. Potensi bioenergi dapat dikembangkan dari limbah pertanian, perkebunan, kehutanan, dan limbah organik. Potensi air dan mikrohidro juga relevan untuk wilayah pegunungan dan pedesaan. Dengan demikian, energi terbarukan dapat mendukung pembangunan nasional sekaligus pemerataan akses energi.

Namun, energi terbarukan juga menghadapi tantangan. Tenaga surya dan angin bersifat intermiten karena bergantung pada cuaca dan waktu. Pembangkit air dipengaruhi oleh musim dan kondisi hidrologi. Biomassa harus dikelola agar tidak bersaing dengan pangan atau menyebabkan deforestasi. Panas bumi membutuhkan investasi awal besar dan eksplorasi berisiko. Oleh karena itu, energi terbarukan perlu didukung oleh manajemen teknologi, kebijakan, pembiayaan, penyimpanan energi, jaringan listrik cerdas, dan partisipasi masyarakat.

Dengan demikian, energi terbarukan merupakan solusi berkelanjutan yang sangat penting, tetapi bukan solusi tunggal yang otomatis menyelesaikan seluruh persoalan energi. Keberhasilannya sangat bergantung pada integrasi teknologi, tata kelola, pasar, infrastruktur, dan perubahan perilaku. *Green innovation* berperan menjadikan energi terbarukan lebih efisien,

murah, andal, mudah diakses, dan sesuai dengan kebutuhan masyarakat serta dunia usaha.

TEKNOLOGI SURYA, ANGIN, AIR, BIOMASSA, DAN PANAS BUMI

Teknologi surya merupakan salah satu teknologi energi terbarukan yang berkembang paling cepat di dunia. Teknologi ini memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan listrik melalui *panel fotovoltaik* atau panas melalui sistem surya termal. Keunggulan utama energi surya adalah sumbernya melimpah, modular, dapat dipasang pada skala rumah tangga hingga pembangkit besar, serta relatif cepat dibangun. Inovasi pada panel surya, inverter, sistem pemantauan, dan baterai telah meningkatkan efisiensi dan menurunkan biaya teknologi ini secara signifikan.

Dalam konteks Indonesia, energi surya memiliki potensi besar karena intensitas penyinaran matahari tersedia hampir sepanjang tahun. Panel surya atap pada rumah, gedung, sekolah, kantor, industri, dan fasilitas publik dapat menjadi bagian penting dari demokratisasi energi. Namun, pengembangannya masih membutuhkan dukungan kebijakan tarif, perizinan, skema pembiayaan, standar teknis, dan integrasi dengan jaringan listrik. Energi surya juga semakin relevan untuk wilayah terpencil yang sulit dijangkau jaringan listrik utama.

Teknologi angin memanfaatkan energi kinetik angin untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik. Energi angin dapat dikembangkan di wilayah pesisir, dataran tinggi, pulau-pulau tertentu, dan wilayah dengan kecepatan angin memadai. Keunggulan energi angin adalah emisi operasionalnya rendah dan dapat dikembangkan dalam skala menengah hingga besar. Namun, pengembangan energi angin membutuhkan kajian sumber daya angin yang akurat, analisis dampak lingkungan, akses lahan, koneksi jaringan, dan penerimaan sosial masyarakat.

Teknologi air atau hidro memanfaatkan energi aliran air untuk menghasilkan listrik. Bentuknya dapat berupa pembangkit listrik tenaga air skala besar, mini hidro, mikrohidro, dan pico hidro. Teknologi hidro memiliki keunggulan karena dapat menyediakan listrik relatif stabil dibandingkan surya dan angin. Mikrohidro sangat relevan untuk desa-desa di wilayah pegunungan yang memiliki aliran sungai. Namun, proyek hidro skala besar harus dikelola dengan hati-hati karena dapat berdampak pada ekosistem sungai, sedimentasi, relokasi masyarakat, dan perubahan tata air.

Biomassa adalah energi yang berasal dari bahan organik seperti limbah pertanian, limbah perkebunan, limbah kehutanan, limbah makanan, kotoran ternak, dan residu industri organik. Teknologi biomassa dapat berupa pembakaran langsung, gasifikasi, biodigester, biogas, biofuel, dan pelet biomassa. Keunggulan biomassa adalah dapat mengubah limbah organik menjadi energi sekaligus mengurangi beban lingkungan. Namun, biomassa harus dikembangkan secara berkelanjutan agar tidak mendorong perubahan penggunaan lahan, deforestasi, atau persaingan dengan kebutuhan pangan.

Panas bumi atau *geothermal* merupakan teknologi energi terbarukan yang sangat relevan bagi Indonesia. Energi panas bumi memanfaatkan panas dari dalam bumi untuk menghasilkan listrik atau panas langsung. Keunggulan *geothermal* adalah mampu menghasilkan listrik secara stabil sebagai beban dasar karena tidak bergantung pada cuaca harian. Indonesia memiliki potensi *geothermal* besar, tetapi pengembangannya menghadapi tantangan berupa risiko eksplorasi, biaya awal tinggi, lokasi sumber daya yang sering berada di kawasan sensitif, serta kebutuhan kepastian regulasi dan investasi.

Setiap teknologi energi terbarukan memiliki karakteristik, keunggulan, dan keterbatasan masing-masing. Oleh karena itu, strategi energi hijau tidak dapat hanya mengandalkan satu jenis

teknologi. Sistem energi masa depan membutuhkan bauran teknologi yang sesuai dengan kondisi geografis, sosial, ekonomi, dan kebutuhan energi setempat. Dalam perspektif technology management, pemilihan teknologi harus mempertimbangkan kesiapan teknologi, biaya, dampak lingkungan, kapasitas kelembagaan, dan penerimaan masyarakat.

Dengan demikian, teknologi surya, angin, air, biomassa, dan panas bumi merupakan pilar utama dalam *green innovation* sektor energi. Inovasi tidak hanya diperlukan pada teknologi pembangkit, tetapi juga pada sistem pembiayaan, integrasi jaringan, penyimpanan energi, model bisnis, operasi pemeliharaan, dan tata kelola. Keberhasilan transisi energi sangat bergantung pada kemampuan mengintegrasikan berbagai teknologi tersebut secara sistemik.

EFISIENSI ENERGI DALAM RUMAH TANGGA, GEDUNG, DAN INDUSTRI

Efisiensi energi adalah upaya menggunakan energi secara lebih hemat dan produktif tanpa mengurangi kualitas layanan atau kenyamanan yang dibutuhkan. Efisiensi energi sering disebut sebagai “sumber energi pertama” karena penghematan energi dapat mengurangi kebutuhan pembangunan pembangkit baru, menurunkan biaya energi, dan mengurangi emisi. Dalam konteks *green innovation*, efisiensi energi menjadi strategi yang sangat penting karena dapat diterapkan secara luas pada rumah tangga, gedung, transportasi, dan industri.

Pada rumah tangga, efisiensi energi dapat dilakukan melalui penggunaan lampu LED, peralatan elektronik hemat energi, pendingin ruangan berteknologi inverter, ventilasi alami, pencahayaan alami, kompor efisien, serta perilaku hemat listrik. Rumah tangga juga dapat menggunakan sistem pemantauan konsumsi listrik untuk mengetahui pola penggunaan energi.

Inovasi sederhana seperti saklar otomatis, sensor gerak, dan perangkat pintar dapat membantu mengurangi konsumsi energi yang tidak perlu.

Pada gedung, efisiensi energi berkaitan erat dengan desain arsitektur, sistem mekanikal-elektrikal, material bangunan, orientasi bangunan, ventilasi, pencahayaan, dan sistem pendinginan. Gedung yang dirancang dengan prinsip hemat energi dapat mengurangi beban pendinginan melalui penggunaan ventilasi silang, insulasi termal, shading, kaca rendah emisi, dan pencahayaan alami. Sistem manajemen energi gedung dapat memantau konsumsi listrik, mengatur penggunaan pendingin ruangan, dan mengoptimalkan operasional peralatan.

Pada bangunan komersial dan perkantoran, konsumsi energi sering didominasi oleh sistem pendinginan udara, pencahayaan, lift, pompa, dan peralatan elektronik. Oleh karena itu, audit energi menjadi langkah penting untuk mengetahui titik pemborosan dan merumuskan strategi penghematan. Audit energi dapat menghasilkan rekomendasi teknis seperti penggantian chiller, optimalisasi suhu ruangan, perbaikan sistem distribusi udara, penggunaan sensor pencahayaan, serta manajemen jadwal operasional peralatan.

Dalam sektor industri, efisiensi energi memiliki dampak ekonomi dan lingkungan yang sangat besar. Industri menggunakan energi untuk proses pemanasan, pendinginan, pengeringan, penggerak motor, kompresor, *boiler*, dan mesin produksi. Inovasi efisiensi energi dapat berupa motor efisien, *variable speed drive*, pemulihan panas buang, optimasi proses, otomatisasi, sensor digital, dan sistem manajemen energi berbasis ISO 50001. Efisiensi energi di industri dapat menurunkan biaya produksi sekaligus memperbaiki kinerja lingkungan.

Efisiensi energi juga berkaitan dengan perilaku organisasi. Teknologi hemat energi tidak akan optimal apabila pengguna tidak disiplin, sistem operasi tidak terawat, atau tidak ada indikator

kinerja energi. Oleh karena itu, efisiensi energi membutuhkan manajemen energi, pelatihan sumber daya manusia, budaya hemat energi, monitoring, dan evaluasi berkala. Organisasi perlu menetapkan target penghematan energi dan menghubungkannya dengan sistem pengambilan keputusan.

Secara global, peningkatan efisiensi energi merupakan salah satu jalur utama menuju dekarbonisasi. Namun, kemajuan efisiensi energi masih perlu dipercepat agar sejalan dengan target iklim dan pembangunan berkelanjutan. IEA menekankan bahwa efisiensi energi merupakan bagian penting dari transisi energi bersih karena dapat menekan permintaan energi, meningkatkan keamanan energi, dan mengurangi emisi (International Energy Agency, 2025).

Dengan demikian, efisiensi energi dalam rumah tangga, gedung, dan industri merupakan bentuk *green innovation* yang sangat praktis dan berdampak luas. Efisiensi energi tidak selalu membutuhkan teknologi mahal; banyak penghematan dapat dilakukan melalui desain yang baik, perilaku pengguna, perawatan peralatan, dan manajemen operasional. Namun, untuk dampak yang lebih besar, efisiensi energi perlu diintegrasikan dengan teknologi digital, standar bangunan hijau, kebijakan insentif, dan sistem manajemen energi.

SMART GRID DAN MANAJEMEN ENERGI DIGITAL

Smart grid atau jaringan listrik cerdas adalah sistem jaringan listrik yang memanfaatkan teknologi digital, sensor, komunikasi data, otomasi, dan analitik untuk mengelola aliran listrik secara lebih efisien, andal, dan responsif. Berbeda dari jaringan listrik konvensional yang cenderung satu arah dari pembangkit ke konsumen, *smart grid* memungkinkan aliran energi dan informasi dua arah. Sistem ini sangat penting dalam transisi energi karena semakin banyak sumber energi terbarukan, kendaraan listrik, baterai, dan konsumen yang juga menjadi produsen energi.

Smart grid membantu mengatasi tantangan intermitensi energi terbarukan. Energi surya dan angin tidak selalu menghasilkan listrik secara stabil karena bergantung pada cuaca dan waktu. Dengan *smart grid*, sistem kelistrikan dapat memantau produksi dan konsumsi secara *real-time*, menyesuaikan beban, mengatur penyimpanan energi, dan mengoptimalkan distribusi listrik. Dengan demikian, *smart grid* menjadi fondasi penting bagi sistem energi rendah karbon yang lebih fleksibel dan adaptif.

Manajemen energi digital adalah penggunaan perangkat digital untuk mengukur, memantau, menganalisis, dan mengendalikan konsumsi energi. Dalam rumah tangga, manajemen energi digital dapat berupa *smart meter*, aplikasi pemantauan listrik, perangkat pintar, dan sistem otomasi rumah. Dalam gedung, sistem ini dapat berupa *Building Energy Management System*. Dalam industri, sistem ini dapat berupa *Industrial Energy Management System* yang terhubung dengan sensor, data produksi, dan sistem otomasi.

Smart meter merupakan salah satu komponen penting *smart grid*. Dengan *smart meter*, konsumen dan penyedia listrik dapat mengetahui konsumsi listrik secara lebih rinci. Data tersebut dapat digunakan untuk mengatur pola konsumsi, menerapkan tarif berbasis waktu, mengurangi beban puncak, dan meningkatkan efisiensi sistem. Dalam jangka panjang, *smart meter* juga memungkinkan konsumen menjadi prosumer, yaitu pengguna yang sekaligus menghasilkan listrik dari panel surya atap atau sumber energi lainnya.

Digitalisasi energi juga mendukung demand response, yaitu mekanisme pengaturan permintaan listrik sesuai kondisi sistem. Misalnya, ketika permintaan listrik tinggi, sistem dapat memberi sinyal harga atau insentif agar konsumen mengurangi penggunaan listrik pada jam puncak. Mekanisme ini dapat mengurangi kebutuhan pembangkit cadangan berbasis fosil dan meningkatkan

stabilitas jaringan. *Demand response* menjadi semakin penting ketika penetrasi energi terbarukan meningkat.

Dalam konteks kota cerdas, smart grid dapat diintegrasikan dengan transportasi listrik, lampu jalan hemat energi, sistem pengisian kendaraan listrik, gedung hijau, dan energi terbarukan terdistribusi. Integrasi ini memungkinkan kota mengelola energi secara lebih efisien dan rendah emisi. Namun, penerapan smart grid membutuhkan investasi, standar teknologi, keamanan siber, perlindungan data, dan kesiapan kelembagaan.

Di Indonesia, pengembangan *smart grid* relevan untuk mendukung integrasi energi terbarukan di sistem kelistrikan kepulauan. Sistem kelistrikan Indonesia memiliki karakter geografis yang kompleks karena tersebar di banyak pulau. Oleh karena itu, *smart grid*, *microgrid*, dan sistem energi terdistribusi dapat menjadi solusi untuk memperkuat akses energi, meningkatkan keandalan listrik, dan mempercepat pemanfaatan energi terbarukan di wilayah terpencil.

Dengan demikian, *smart grid* dan manajemen energi digital merupakan bentuk *green innovation* yang menghubungkan teknologi energi, teknologi informasi, dan manajemen sistem. Inovasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi teknis, tetapi juga mengubah peran konsumen, memperkuat integrasi energi terbarukan, dan membuka model bisnis baru dalam sektor energi. Keberhasilan smart grid membutuhkan kolaborasi antara pemerintah, perusahaan listrik, industri teknologi, akademisi, dan masyarakat.

INOVASI PENYIMPANAN ENERGI

Penyimpanan energi merupakan teknologi kunci dalam transisi energi hijau karena energi terbarukan seperti surya dan angin bersifat tidak selalu tersedia. Ketika matahari tidak bersinar atau angin tidak bertiup, sistem energi membutuhkan cadangan

agar pasokan listrik tetap stabil. Penyimpanan energi memungkinkan listrik yang dihasilkan pada saat surplus disimpan dan digunakan saat permintaan meningkat atau produksi menurun. Dengan demikian, penyimpanan energi meningkatkan fleksibilitas, keandalan, dan efisiensi sistem energi.

Baterai merupakan bentuk penyimpanan energi yang paling banyak berkembang dalam beberapa tahun terakhir. Baterai lithium-ion digunakan pada kendaraan listrik, sistem penyimpanan rumah tangga, pembangkit energi terbarukan, dan jaringan listrik. Penurunan biaya baterai dan peningkatan kepadatan energi telah mendorong perkembangan kendaraan listrik dan integrasi energi terbarukan. Namun, baterai juga menghadapi tantangan terkait bahan baku kritis, daur ulang, keselamatan, umur pakai, dan dampak lingkungan dari proses produksinya.

Selain baterai lithium-ion, inovasi penyimpanan energi juga mencakup baterai natrium-ion, baterai aliran, baterai *solid-state*, superkapasitor, hidrogen hijau, penyimpanan termal, udara tekan, *flywheel*, dan *pumped hydro storage*. Setiap teknologi memiliki karakteristik berbeda. Baterai cocok untuk respons cepat dan penyimpanan jangka pendek hingga menengah. *Pumped hydro* cocok untuk kapasitas besar. Hidrogen hijau berpotensi untuk penyimpanan jangka panjang dan sektor industri berat, meskipun masih menghadapi tantangan biaya dan efisiensi.

Pumped hydro storage merupakan teknologi penyimpanan energi skala besar yang relatif matang. Sistem ini menyimpan energi dengan memompa air ke reservoir atas saat listrik berlebih, kemudian mengalirkannya kembali melalui turbin saat listrik dibutuhkan. Teknologi ini efektif untuk menjaga stabilitas jaringan, tetapi membutuhkan kondisi geografis tertentu, investasi besar, dan kajian lingkungan yang cermat.

Hidrogen hijau menjadi salah satu inovasi yang banyak dibahas dalam transisi energi. Hidrogen hijau diproduksi melalui

elektrolisis air menggunakan listrik dari energi terbarukan. Hidrogen dapat digunakan sebagai bahan bakar, bahan baku industri, media penyimpanan energi, atau solusi untuk sektor yang sulit dielektrifikasi seperti baja, pupuk, pelayaran, dan transportasi berat. Namun, hidrogen hijau masih membutuhkan penurunan biaya elektroliser, infrastruktur distribusi, standar keselamatan, dan permintaan pasar yang stabil.

Penyimpanan energi juga penting pada skala rumah tangga dan komunitas. Panel surya atap yang dilengkapi baterai dapat meningkatkan kemandirian energi rumah tangga dan mengurangi ketergantungan pada jaringan saat beban puncak. Pada wilayah terpencil, kombinasi energi surya, baterai, dan microgrid dapat menjadi solusi akses listrik yang lebih bersih dibandingkan genset diesel. Namun, keberlanjutan sistem ini membutuhkan perawatan, pembiayaan, pelatihan lokal, dan sistem penggantian baterai yang aman.

Dalam perspektif ekonomi sirkular, inovasi penyimpanan energi harus memperhatikan rantai pasok dan akhir masa pakai. Baterai kendaraan listrik dan sistem penyimpanan stasioner perlu dirancang agar dapat digunakan kembali, diperbaiki, atau didaur ulang. Material seperti lithium, nikel, kobalt, mangan, dan tembaga memiliki nilai ekonomi tinggi dan harus dikelola secara bertanggung jawab. Oleh karena itu, manajemen teknologi penyimpanan energi harus mencakup desain, penggunaan, pemantauan, pemulihan, dan daur ulang.

Dengan demikian, inovasi penyimpanan energi merupakan komponen strategis dalam *green innovation* sektor energi. Tanpa penyimpanan energi, integrasi energi terbarukan dalam skala besar akan menghadapi hambatan teknis. Dengan penyimpanan energi yang andal, murah, aman, dan berkelanjutan, sistem energi hijau dapat menjadi lebih stabil, fleksibel, dan inklusif.

PERAN MASYARAKAT DAN DUNIA USAHA DALAM TRANSISI ENERGI HIJAU

Transisi energi hijau tidak hanya menjadi tanggung jawab pemerintah dan perusahaan energi, tetapi juga membutuhkan peran aktif masyarakat dan dunia usaha. Masyarakat berperan sebagai pengguna energi, pembentuk permintaan pasar, pengawas kebijakan, dan pelaku perubahan perilaku. Pilihan masyarakat dalam menggunakan listrik secara hemat, memilih transportasi rendah emisi, memasang panel surya atap, memilah limbah organik untuk bioenergi, dan mendukung produk hijau dapat mempercepat perubahan sistem energi.

Peran masyarakat dimulai dari literasi energi. Masyarakat perlu memahami bahwa energi tidak hanya persoalan tarif listrik atau bahan bakar, tetapi juga berkaitan dengan perubahan iklim, kualitas udara, kesehatan, ekonomi rumah tangga, dan masa depan generasi mendatang. Literasi energi dapat mendorong perilaku hemat energi, penerimaan terhadap energi terbarukan, serta partisipasi dalam program transisi energi. Tanpa literasi yang baik, teknologi energi hijau dapat dianggap mahal, rumit, atau tidak relevan.

Masyarakat juga dapat menjadi prosumer melalui energi terbarukan terdistribusi. Dengan panel surya atap, rumah tangga, sekolah, tempat ibadah, kantor, dan UMKM dapat menghasilkan listrik sendiri. Konsep prosumer mengubah masyarakat dari konsumen pasif menjadi pelaku aktif dalam sistem energi. Namun, model ini memerlukan regulasi yang mendukung, skema pembiayaan, standar keselamatan, kemudahan perizinan, dan integrasi dengan jaringan listrik.

Dunia usaha memiliki peran besar karena sektor bisnis menggunakan energi dalam jumlah signifikan untuk produksi, distribusi, bangunan, transportasi, dan layanan. Perusahaan dapat mempercepat transisi energi melalui efisiensi energi, penggunaan

energi terbarukan, elektrifikasi armada kendaraan, pengadaan hijau, investasi pembangkit energi bersih, dan penerapan sistem manajemen energi. Dunia usaha juga dapat mendorong inovasi teknologi melalui riset, pengembangan produk, dan kemitraan dengan perguruan tinggi.

Perusahaan besar dapat membangun rantai pasok rendah karbon dengan mendorong pemasok menggunakan energi bersih dan praktik efisiensi energi. Sementara itu, UMKM dapat berperan melalui penggunaan peralatan hemat energi, produksi berbasis bahan lokal, pengelolaan limbah organik menjadi energi, serta layanan teknologi hijau sederhana. Dalam konteks ini, transisi energi tidak hanya menciptakan beban adaptasi, tetapi juga peluang usaha baru dalam energi terbarukan, audit energi, instalasi panel surya, perawatan peralatan, dan jasa efisiensi energi.

Peran sektor keuangan juga penting dalam mendukung dunia usaha melakukan transisi energi. Investasi energi terbarukan, efisiensi energi, kendaraan listrik, dan penyimpanan energi membutuhkan pembiayaan jangka panjang. Oleh karena itu, *green financing*, obligasi hijau, kredit hijau, blended finance, dan skema pembiayaan inovatif perlu diperkuat. Tanpa pembiayaan yang terjangkau, banyak rumah tangga, UMKM, dan perusahaan sulit mengadopsi teknologi energi hijau.

Kolaborasi antara masyarakat, dunia usaha, pemerintah, akademisi, dan lembaga keuangan menjadi kunci keberhasilan transisi energi hijau. IEA dalam peta jalan sektor energi Indonesia menuju *net zero emission* menekankan bahwa tidak ada satu jalur tunggal menuju *net zero*, tetapi terdapat prioritas penting seperti energi terbarukan, efisiensi energi, elektrifikasi, dan kebijakan yang konsisten untuk mencapai target 2060 atau lebih cepat. Dengan demikian, transisi energi membutuhkan pendekatan sistemik, bukan tindakan sektoral yang terpisah.

Dengan demikian, masyarakat dan dunia usaha memiliki posisi strategis dalam mempercepat *green innovation* sektor energi. Pemerintah dapat menyediakan regulasi dan insentif, tetapi keberhasilan transisi energi sangat ditentukan oleh adopsi teknologi, perubahan perilaku, investasi, dan partisipasi sosial. Transisi energi hijau akan berhasil apabila energi bersih tidak hanya menjadi proyek negara, tetapi menjadi gerakan bersama yang menghubungkan rumah tangga, komunitas, industri, UMKM, dan lembaga publik.



BAB 9

GREEN INNOVATION DALAM INDUSTRI DAN MANUFAKTUR

Perkembangan industri dan manufaktur telah menjadi salah satu pendorong utama pertumbuhan ekonomi, penciptaan lapangan kerja, serta kemajuan teknologi. Namun, di sisi lain, aktivitas industri juga sering dikaitkan dengan tingginya konsumsi energi, penggunaan bahan baku secara intensif, emisi gas rumah kaca, pencemaran lingkungan, limbah produksi, serta eksploitasi sumber daya alam. Kondisi ini menunjukkan bahwa sektor industri dan manufaktur tidak lagi dapat dikelola hanya dengan orientasi pada produktivitas, efisiensi biaya, dan peningkatan output semata, tetapi juga harus diarahkan pada tanggung jawab ekologis dan keberlanjutan jangka panjang.

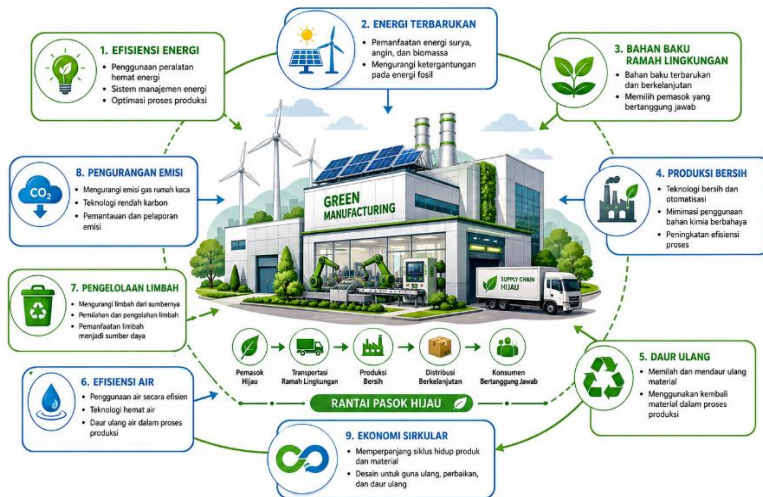
Dalam konteks tersebut, *green innovation* menjadi pendekatan penting untuk mentransformasi sistem industri dan manufaktur menuju proses produksi yang lebih bersih, efisien, rendah karbon, dan ramah lingkungan. *Green innovation* tidak hanya berkaitan dengan penggunaan teknologi baru, tetapi juga mencakup perubahan cara berpikir, strategi manajemen, desain produk, pemilihan material, sistem produksi, pengelolaan energi, pengurangan limbah, serta pengembangan model bisnis yang mendukung prinsip keberlanjutan. Dengan demikian, inovasi hijau

dalam industri dan manufaktur merupakan upaya menyelaraskan tujuan ekonomi dengan perlindungan lingkungan dan tanggung jawab sosial.

Penerapan *green innovation* dalam sektor industri menjadi semakin relevan seiring meningkatnya tuntutan global terhadap efisiensi sumber daya, standar lingkungan, ekonomi sirkular, dekarbonisasi, dan keberlanjutan rantai pasok. Industri tidak hanya dituntut menghasilkan produk yang kompetitif, tetapi juga harus mampu menunjukkan bahwa proses produksinya dilakukan secara bertanggung jawab, transparan, dan minim dampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, transformasi industri menuju sistem manufaktur hijau menjadi bagian penting dari strategi menghadapi perubahan iklim, keterbatasan sumber daya, serta perubahan preferensi pasar yang semakin peduli terhadap isu keberlanjutan.

Bab ini membahas bagaimana *green innovation* dapat diterapkan dalam industri dan manufaktur secara sistematis. Pembahasan diawali dengan konsep *green manufacturing* sebagai dasar untuk memahami bagaimana proses produksi dapat dirancang, dijalankan, dan dikendalikan agar lebih efisien, hemat energi, minim limbah, serta berorientasi pada pengurangan dampak lingkungan. Melalui pemahaman ini, industri dan manufaktur tidak hanya dipandang sebagai pusat produksi barang, tetapi juga sebagai ruang strategis untuk menciptakan nilai ekonomi, ekologis, dan sosial secara berkelanjutan.

KONSEP GREEN MANUFACTURING



Gambar 14 Konsep green manufacturing.

Green manufacturing atau manufaktur hijau adalah pendekatan produksi yang bertujuan menghasilkan barang dengan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan sepanjang siklus hidup produk. Konsep ini tidak hanya membahas proses produksi di dalam pabrik, tetapi juga mencakup pemilihan bahan baku, desain produk, penggunaan energi, pengelolaan limbah, distribusi, penggunaan produk oleh konsumen, hingga pengelolaan akhir masa pakai produk. Dengan demikian, *green manufacturing* merupakan pendekatan sistemik yang menghubungkan efisiensi produksi, tanggung jawab lingkungan, dan daya saing industri.

Manufaktur hijau lahir dari kesadaran bahwa sektor industri merupakan salah satu sektor yang menggunakan energi, air, bahan baku, dan bahan kimia dalam jumlah besar. Aktivitas industri juga dapat menghasilkan limbah padat, air limbah, emisi udara, kebisingan, dan risiko kesehatan kerja. Oleh karena itu, *green*

manufacturing diarahkan untuk mengubah pola produksi konvensional menjadi proses yang lebih hemat sumber daya, rendah emisi, aman bagi pekerja, dan bertanggung jawab terhadap lingkungan.

Secara konseptual, *green manufacturing* memiliki keterkaitan dengan *sustainable manufacturing*. *Sustainable manufacturing* menekankan produksi barang melalui proses yang meminimalkan dampak lingkungan negatif, menghemat energi dan sumber daya alam, aman bagi pekerja, masyarakat, dan konsumen, serta tetap layak secara ekonomi. Kajian tentang *sustainable manufacturing* di Asia menunjukkan bahwa praktik manufaktur hijau telah menjadi perhatian penting dalam literatur dan praktik industri karena berkaitan dengan keberlanjutan produksi dan peningkatan kinerja organisasi.

Green manufacturing tidak dapat dipisahkan dari prinsip efisiensi sumber daya. Pabrik yang menerapkan manufaktur hijau berupaya mengurangi pemborosan bahan baku, energi, air, waktu produksi, dan ruang penyimpanan. Upaya ini dapat dilakukan melalui perbaikan desain proses, penggunaan mesin efisien, pengendalian kualitas, pemeliharaan preventif, daur ulang internal, serta pengurangan produk cacat. Dengan cara tersebut, manufaktur hijau dapat memberikan manfaat lingkungan sekaligus manfaat ekonomi.

Dalam praktik industri, *green manufacturing* juga berkaitan dengan penerapan sistem manajemen lingkungan, audit energi, produksi bersih, *lean manufacturing*, *green supply chain management*, dan ekonomi sirkular. Integrasi antara *lean* dan *green manufacturing* menjadi penting karena keduanya sama-sama berupaya menghilangkan pemborosan. *Lean manufacturing* berfokus pada pengurangan pemborosan operasional, sedangkan *green manufacturing* memperluas makna pemborosan hingga mencakup limbah, emisi, konsumsi energi, dan dampak ekologis.

Dengan demikian, *green manufacturing* merupakan strategi transformasi industri yang mengarahkan pabrik dan sistem produksi menuju efisiensi, inovasi, dan keberlanjutan. *Green manufacturing* menjadi bagian penting karena menunjukkan bagaimana inovasi hijau dapat diterapkan secara nyata pada sektor produksi. Melalui manufaktur hijau, industri tidak hanya menghasilkan barang, tetapi juga membangun sistem produksi yang lebih bertanggung jawab terhadap lingkungan dan masyarakat.

CLEANER PRODUCTION DALAM PROSES INDUSTRI

Cleaner production atau produksi bersih adalah pendekatan preventif dalam pengelolaan lingkungan industri yang bertujuan mengurangi limbah, emisi, dan risiko lingkungan sejak dari sumbernya. Pendekatan ini berbeda dari pendekatan konvensional yang hanya mengolah limbah setelah limbah terbentuk. Produksi bersih menekankan bahwa pencemaran sebaiknya dicegah melalui perbaikan proses, substitusi bahan, efisiensi energi, pengurangan bahan berbahaya, dan pengelolaan sumber daya yang lebih bijak.

UNIDO dan UNEP mengembangkan konsep *Resource Efficient and Cleaner Production* atau RECP sebagai pendekatan yang bertujuan meningkatkan efisiensi penggunaan material, air, dan energi; mengurangi limbah, air limbah, dan emisi; serta menurunkan risiko terhadap manusia dan lingkungan. Dengan demikian, *cleaner production* bukan sekadar teknologi pengolahan limbah, tetapi strategi manajemen produktivitas dan lingkungan yang dapat diterapkan pada berbagai sektor industri dan ukuran perusahaan.

Dalam proses industri, *cleaner production* dapat diterapkan melalui beberapa langkah. *Pertama*, industri perlu melakukan identifikasi sumber pemborosan, seperti kehilangan bahan baku, konsumsi energi berlebih, produk cacat, tumpahan bahan kimia,

kebocoran air, dan emisi dari mesin. *Kedua*, industri perlu menganalisis penyebab pemborosan tersebut. *Ketiga*, industri merumuskan alternatif perbaikan, baik melalui perubahan prosedur kerja, perbaikan teknologi, pelatihan pekerja, maupun investasi peralatan baru.

Cleaner production juga dapat diterapkan melalui substitusi bahan baku. Industri dapat mengganti bahan yang berbahaya, sulit didaur ulang, atau menghasilkan limbah tinggi dengan bahan yang lebih aman dan ramah lingkungan. Dalam industri kimia, misalnya, prinsip *green chemistry* dapat digunakan untuk mengurangi penggunaan pelarut berbahaya, meningkatkan efisiensi reaksi, dan menghasilkan produk samping yang lebih sedikit. Dalam industri makanan, *cleaner production* dapat dilakukan melalui pengurangan kehilangan bahan, pemanfaatan limbah organik, dan efisiensi penggunaan air.

Penerapan *cleaner production* membutuhkan perubahan budaya organisasi. Industri harus melihat limbah sebagai indikator inefisiensi, bukan sekadar konsekuensi produksi. Apabila limbah dipahami sebagai tanda bahwa bahan baku, energi, atau air tidak digunakan secara optimal, maka pengurangan limbah dapat dipandang sebagai peluang peningkatan produktivitas. Pendekatan ini penting karena banyak tindakan produksi bersih justru menghasilkan penghematan biaya, bukan sekadar menambah biaya lingkungan.

Dengan demikian, *cleaner production* merupakan fondasi penting *green manufacturing*. Produksi bersih menggeser orientasi industri dari pengendalian pencemaran di akhir proses menuju pencegahan pencemaran sejak awal. Dalam perspektif *Green Innovation and Technology Management*, *cleaner production* memperlihatkan bahwa inovasi hijau dalam industri tidak harus selalu berupa teknologi canggih, tetapi dapat dimulai dari perbaikan proses, efisiensi operasional, dan perubahan cara berpikir terhadap limbah dan sumber daya.

EFISIENSI BAHAN BAKU DAN ENERGI

Efisiensi bahan baku dan energi merupakan inti dari *green innovation* dalam industri dan manufaktur. Bahan baku dan energi adalah dua komponen utama dalam proses produksi yang sangat menentukan biaya, produktivitas, dan dampak lingkungan. Semakin boros penggunaan bahan dan energi, semakin besar pula limbah, emisi, dan biaya produksi yang ditanggung industri. Oleh karena itu, efisiensi bahan baku dan energi menjadi strategi penting untuk meningkatkan kinerja lingkungan sekaligus daya saing perusahaan.

Efisiensi bahan baku dapat dilakukan melalui perbaikan desain produk, optimasi ukuran material, pengurangan produk cacat, penggunaan kembali sisa material, dan peningkatan akurasi proses produksi. Dalam manufaktur, kehilangan material sering terjadi akibat pemotongan, kesalahan produksi, tumpahan, penyimpanan yang buruk, atau perencanaan produksi yang tidak efisien. Dengan teknologi pemantauan, pengendalian kualitas, dan perencanaan produksi yang baik, kehilangan material dapat dikurangi secara signifikan.

Efisiensi energi dalam industri mencakup penggunaan mesin hemat energi, motor listrik efisien, sistem pemulihan panas, perbaikan boiler, optimasi kompresor, isolasi termal, penggunaan variable speed drive, serta sistem manajemen energi. Industri yang menggunakan energi dalam jumlah besar perlu melakukan audit energi untuk mengetahui titik-titik pemborosan. Audit energi membantu perusahaan menentukan prioritas investasi teknologi hemat energi dan menghitung potensi penghematan biaya.

Efisiensi bahan baku dan energi juga berkaitan erat dengan konsep *Resource Efficient and Cleaner Production*. RECP menekankan penerapan strategi lingkungan preventif secara berkelanjutan pada proses, produk, dan layanan untuk meningkatkan produktivitas serta mengurangi pencemaran dan risiko terhadap manusia serta

lingkungan. Pendekatan ini menunjukkan bahwa efisiensi sumber daya bukan hanya isu teknis, tetapi juga strategi manajemen yang dapat memperkuat daya saing industri.

Dalam konteks industri modern, digitalisasi dapat memperkuat efisiensi bahan baku dan energi. *Sensor, Internet of Things, artificial intelligence, big data analytics*, dan *digital twin* dapat digunakan untuk memantau konsumsi energi, mendeteksi kebocoran, mengoptimalkan jadwal produksi, dan memprediksi kebutuhan pemeliharaan mesin. Dengan data *real-time*, perusahaan dapat mengambil keputusan lebih cepat dan mengurangi pemborosan yang sebelumnya sulit terdeteksi.

Efisiensi bahan baku dan energi juga memiliki hubungan dengan ekonomi sirkular. Apabila bahan baku digunakan lebih efisien, jumlah limbah yang dihasilkan akan menurun. Apabila sisa material dapat dimanfaatkan kembali dalam proses produksi, kebutuhan bahan baku primer juga berkurang. Dengan demikian, efisiensi menjadi pintu masuk menuju sistem produksi yang lebih sirkular, rendah emisi, dan hemat sumber daya.

Dengan demikian, efisiensi bahan baku dan energi bukan hanya tindakan teknis untuk menekan biaya, tetapi strategi keberlanjutan industri. Industri yang efisien akan lebih mampu menghadapi kenaikan harga energi, keterbatasan bahan baku, tekanan regulasi, dan tuntutan pasar hijau. Dalam kerangka *green innovation*, efisiensi merupakan bentuk inovasi yang sangat praktis karena dapat langsung diterapkan pada proses produksi sehari-hari.

PENGURANGAN LIMBAH DAN EMISI INDUSTRI

Pengurangan limbah dan emisi industri merupakan salah satu tujuan utama *green manufacturing*. Limbah industri dapat berbentuk limbah padat, air limbah, limbah bahan berbahaya dan beracun, limbah organik, limbah logam, limbah plastik, serta residu

proses produksi. Emisi industri dapat berupa karbon dioksida, metana, sulfur oksida, nitrogen oksida, partikulat, uap bahan kimia, dan emisi lainnya yang berdampak terhadap kualitas udara dan perubahan iklim. Oleh karena itu, pengurangan limbah dan emisi menjadi bagian penting dari strategi keberlanjutan industri.

Pengurangan limbah sebaiknya dimulai dari tahap desain dan perencanaan produksi. Produk yang dirancang dengan material berlebihan, sulit diperbaiki, sulit dibongkar, atau sulit didaur ulang akan menghasilkan beban limbah yang lebih besar. Sebaliknya, produk yang dirancang modular, tahan lama, dan mudah dipulihkan akan mendukung ekonomi sirkular. Dalam konteks ini, pengurangan limbah bukan hanya urusan bagian produksi atau lingkungan, tetapi juga bagian dari keputusan desain produk dan strategi bisnis.

Pada tahap proses produksi, pengurangan limbah dapat dilakukan melalui produksi bersih, pengendalian kualitas, pemeliharaan mesin, penggunaan kembali material, dan pengelolaan bahan kimia. Produk cacat perlu ditekan karena setiap produk cacat berarti bahan baku, energi, waktu kerja, dan biaya produksi terbuang. Dengan sistem kualitas yang baik, limbah akibat kesalahan produksi dapat dikurangi sekaligus meningkatkan produktivitas.

Pengurangan emisi industri dapat dilakukan melalui efisiensi energi, penggunaan energi terbarukan, elektrifikasi proses, perbaikan teknologi pembakaran, pengendalian emisi udara, substitusi bahan bakar, dan pemulihan panas. Pada industri dengan emisi tinggi, seperti semen, baja, kimia, tekstil, dan makanan-minuman, strategi pengurangan emisi perlu dirancang berdasarkan karakteristik proses produksi. Tidak semua sektor memiliki solusi yang sama, sehingga diperlukan audit emisi dan peta jalan dekarbonisasi industri.

UNEP dalam *Global Waste Management Outlook 2024* menunjukkan bahwa pengelolaan limbah yang buruk memiliki

biaya langsung dan tersembunyi yang besar bagi ekonomi, kesehatan, dan lingkungan. Laporan tersebut menekankan pentingnya pencegahan limbah, pengelolaan aman, dan transisi menuju ekonomi sirkular untuk mengurangi beban lingkungan global. Bagi industri, pesan ini menegaskan bahwa limbah bukan hanya masalah lingkungan, tetapi juga risiko ekonomi dan reputasi.

Pengurangan limbah dan emisi juga memerlukan sistem monitoring yang baik. Industri perlu mengukur volume limbah, karakteristik limbah, intensitas emisi, konsumsi energi, konsumsi air, dan tingkat daur ulang. Data ini penting untuk menentukan target, mengevaluasi kinerja, memenuhi regulasi, dan menyusun laporan keberlanjutan. Tanpa data yang baik, pengurangan limbah dan emisi sulit dibuktikan secara objektif.

Dengan demikian, pengurangan limbah dan emisi industri merupakan strategi yang menghubungkan kepatuhan lingkungan, efisiensi produksi, inovasi teknologi, dan tanggung jawab sosial. Industri yang mampu menurunkan limbah dan emisi akan memiliki posisi lebih kuat dalam menghadapi regulasi lingkungan, tuntutan konsumen, standar ESG, dan kompetisi pasar global. Dalam perspektif *green innovation*, pengurangan limbah dan emisi merupakan indikator nyata keberhasilan transformasi manufaktur hijau.

GREEN SUPPLY CHAIN MANAGEMENT

Green Supply Chain Management atau GSCM adalah pendekatan pengelolaan rantai pasok yang mengintegrasikan pertimbangan lingkungan ke dalam aktivitas pengadaan, produksi, distribusi, penggunaan produk, dan pengelolaan akhir masa pakai. Jika manajemen rantai pasok konvensional berfokus pada biaya, kualitas, waktu, dan keandalan pasokan, maka GSCM menambahkan dimensi lingkungan sebagai bagian dari pengambilan keputusan. Dengan demikian, GSCM memperluas

tanggung jawab lingkungan perusahaan dari area internal pabrik menuju seluruh jaringan pemasok dan pelanggan.

GSCM mencakup beberapa praktik utama, seperti *green purchasing*, *eco-design*, *green manufacturing*, *green logistics*, *reverse logistics*, kerja sama lingkungan dengan pemasok, dan pengelolaan produk setelah digunakan. *Green purchasing* berarti memilih pemasok yang memenuhi standar lingkungan atau menggunakan bahan baku ramah lingkungan. *Eco-design* berarti merancang produk agar hemat material, mudah diperbaiki, dan mudah didaur ulang. *Reverse logistics* berarti mengelola arus balik produk, kemasan, atau komponen dari konsumen menuju produsen untuk digunakan kembali atau dipulihkan.

Pentingnya GSCM meningkat karena banyak dampak lingkungan perusahaan tidak hanya terjadi di dalam pabrik utama, tetapi juga pada pemasok bahan baku, transportasi, distribusi, penggunaan produk, dan akhir masa pakai produk. Dalam industri global, perusahaan besar sering bergantung pada jaringan pemasok lintas negara. Oleh sebab itu, strategi keberlanjutan perusahaan tidak akan efektif apabila hanya memperbaiki operasi internal tanpa memperhatikan rantai pasok.

Penelitian mutakhir menunjukkan bahwa praktik GSCM dapat berpengaruh terhadap kinerja lingkungan perusahaan manufaktur. Studi pada perusahaan manufaktur menunjukkan bahwa *green supply chain management* berperan dalam meningkatkan *environmental performance* melalui praktik seperti *green purchasing*, *green manufacturing*, dan kerja sama lingkungan dengan pemasok. Kajian sistematis tentang *sustainable supply chain management* juga menunjukkan bahwa praktik rantai pasok berkelanjutan memiliki hubungan penting dengan kinerja lingkungan dan operasional.

Dalam konteks industri Indonesia, GSCM sangat relevan karena banyak sektor manufaktur terhubung dengan pasar ekspor yang memiliki standar lingkungan semakin ketat. Industri tekstil,

makanan-minuman, furnitur, otomotif, elektronik, dan kemasan perlu memperhatikan asal bahan baku, penggunaan energi, emisi, limbah, serta kepatuhan pemasok terhadap standar lingkungan. Perusahaan yang tidak mampu menunjukkan rantai pasok yang bertanggung jawab dapat menghadapi hambatan pasar, penurunan reputasi, dan tekanan dari pembeli global.

GSCM juga berhubungan dengan ekonomi sirkular. Rantai pasok hijau tidak hanya mengalirkan bahan baku dari pemasok ke produsen dan konsumen, tetapi juga memungkinkan aliran balik material dari konsumen ke sistem produksi. Kemasan guna ulang, sistem pengembalian produk, daur ulang komponen, dan *remanufacturing* membutuhkan koordinasi rantai pasok yang kuat. Tanpa *reverse logistics*, ekonomi sirkular sulit diterapkan secara efektif.

Dengan demikian, *Green Supply Chain Management* merupakan strategi penting dalam *green innovation* industri dan manufaktur. GSCM menunjukkan bahwa keberlanjutan tidak cukup dikelola pada tingkat pabrik, tetapi harus diperluas ke seluruh rantai nilai. Melalui GSCM, perusahaan dapat mengurangi risiko lingkungan, meningkatkan efisiensi, memperkuat hubungan dengan pemasok, dan membangun keunggulan kompetitif di pasar yang semakin menuntut tanggung jawab keberlanjutan.

INOVASI MATERIAL RAMAH LINGKUNGAN

Inovasi material ramah lingkungan merupakan salah satu elemen penting dalam *green manufacturing* karena material menentukan dampak lingkungan produk sejak tahap produksi hingga akhir masa pakai. Material yang boros energi, sulit didaur ulang, beracun, atau berasal dari sumber yang tidak berkelanjutan dapat meningkatkan beban ekologis produk. Sebaliknya, material ramah lingkungan dapat mengurangi emisi, memperpanjang umur produk, mendukung daur ulang, dan mengurangi risiko kesehatan.

Material ramah lingkungan dapat berupa material berbasis hayati, material daur ulang, material *biodegradable*, material rendah karbon, material komposit alam, dan material yang dirancang agar mudah dipulihkan. Dalam industri kemasan, misalnya, inovasi material dapat berupa bioplastik, kertas daur ulang, kemasan isi ulang, atau material yang mudah dipisahkan. Dalam industri konstruksi, inovasi material dapat berupa beton rendah karbon, bambu rekayasa, kayu bersertifikat, material daur ulang, dan produk bangunan yang dapat digunakan kembali.

Inovasi material tidak hanya berkaitan dengan penggantian bahan, tetapi juga dengan desain dan performa. Material ramah lingkungan harus tetap memenuhi persyaratan kekuatan, keamanan, daya tahan, estetika, biaya, dan kenyamanan pengguna. Apabila material hijau tidak memenuhi standar teknis, maka penerimaannya di pasar akan rendah. Oleh karena itu, pengembangan material ramah lingkungan membutuhkan riset, pengujian, standardisasi, dan kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah.

Dalam perspektif siklus hidup, pemilihan material harus dianalisis sejak proses ekstraksi bahan baku, produksi, distribusi, penggunaan, hingga pengelolaan akhir. Material *biodegradable*, misalnya, tidak selalu otomatis lebih baik jika memerlukan energi produksi tinggi atau tidak tersedia fasilitas komposting yang sesuai. Material daur ulang juga perlu memenuhi standar kualitas agar aman dan layak digunakan. Oleh karena itu, *life cycle assessment* menjadi instrumen penting dalam menilai inovasi material.

Inovasi material ramah lingkungan juga memiliki peluang besar dalam konteks sumber daya lokal. Indonesia memiliki banyak potensi material berbasis alam, seperti bambu, serat kelapa, serat pisang, serat rami, serat kenaf, limbah pertanian, dan limbah perkebunan. Material tersebut dapat dikembangkan menjadi komposit, panel, kemasan, produk furnitur, material bangunan,

atau produk kreatif. Apabila dikelola dengan baik, inovasi material lokal dapat mendukung ekonomi hijau, pemberdayaan masyarakat, dan pengurangan ketergantungan pada material impor.

Namun, inovasi material juga menghadapi tantangan. Beberapa material ramah lingkungan masih memiliki biaya lebih tinggi, pasokan terbatas, kualitas belum konsisten, atau belum didukung standar teknis. Selain itu, konsumen dan industri sering masih terbiasa dengan material konvensional yang lebih murah dan mudah diperoleh. Oleh karena itu, pengembangan material ramah lingkungan membutuhkan insentif, riset terapan, sertifikasi, edukasi pasar, dan penguatan rantai pasok.

Dengan demikian, inovasi material ramah lingkungan merupakan strategi penting untuk mengurangi dampak lingkungan industri dan manufaktur. Material menentukan karakter ekologis produk sejak awal, sehingga keputusan material merupakan bagian dari *green innovation*. Dalam kerangka *green innovation and technology management*, inovasi material harus dikelola secara sistematis agar menghasilkan produk yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga berkualitas, kompetitif, dan diterima pasar.

INDUSTRI 4.0 DAN TRANSFORMASI MANUFAKTUR HIJAU

Industri 4.0 adalah transformasi industri yang ditandai oleh integrasi teknologi digital, otomasi, *Internet of Things*, *artificial intelligence*, *big data*, *cloud computing*, robotika, *augmented reality*, *blockchain*, dan *digital twin* ke dalam sistem produksi. Dalam konteks *green manufacturing*, Industri 4.0 dapat menjadi *enabler* penting karena teknologi digital memungkinkan pemantauan, analisis, dan optimasi proses produksi secara lebih akurat. Dengan demikian, Industri 4.0 dapat memperkuat efisiensi sumber daya, pengurangan limbah, dan pengendalian emisi.

Internet of Things memungkinkan mesin, sensor, peralatan, dan sistem produksi saling terhubung untuk menghasilkan data *real-time*. Data tersebut dapat digunakan untuk memantau konsumsi energi, suhu mesin, penggunaan bahan baku, kualitas produk, dan kondisi lingkungan kerja. Dengan pemantauan *real-time*, perusahaan dapat mendeteksi pemborosan lebih cepat dan melakukan tindakan korektif sebelum terjadi kerugian besar. Hal ini sangat relevan bagi manufaktur hijau karena banyak pemborosan terjadi akibat proses yang tidak terpantau.

Artificial intelligence dan *big data analytics* dapat membantu industri mengoptimalkan jadwal produksi, memprediksi kerusakan mesin, mengurangi cacat produk, dan mengatur konsumsi energi. *Predictive maintenance*, misalnya, dapat mencegah kerusakan mesin yang menyebabkan produksi terhenti, bahan terbuang, atau energi terpakai secara tidak efisien. Dengan demikian, teknologi digital tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga mengurangi dampak lingkungan proses produksi.

Digital twin atau kembaran digital memungkinkan perusahaan membuat simulasi proses produksi, aliran material, konsumsi energi, dan skenario perbaikan sebelum diterapkan di dunia nyata. Teknologi ini membantu perusahaan mengevaluasi berbagai pilihan teknologi atau proses tanpa harus melakukan percobaan fisik yang mahal dan berisiko. Dalam *green manufacturing*, *digital twin* dapat digunakan untuk merancang proses yang lebih hemat energi, mengurangi limbah, dan meningkatkan efisiensi operasional.

Kajian terbaru menunjukkan bahwa teknologi Industri 4.0 dapat berkontribusi terhadap *sustainable supply chain management* dan *green supply chain*, meskipun masih terdapat tantangan seperti keterbatasan *eco-efficiency*, keamanan data, privasi, dan kompatibilitas sistem. Hal ini menunjukkan bahwa digitalisasi tidak otomatis menghasilkan keberlanjutan. Teknologi digital harus

diarahkan secara sengaja untuk mencapai target lingkungan, bukan hanya untuk meningkatkan kecepatan produksi.

Industri 4.0 juga dapat mendukung transparansi rantai pasok. Blockchain dan sistem pelacakan digital dapat digunakan untuk memastikan asal bahan baku, memverifikasi sertifikasi lingkungan, memantau emisi rantai pasok, dan meningkatkan akuntabilitas pemasok. Dalam pasar global, transparansi ini semakin penting karena pembeli dan investor menuntut bukti keberlanjutan yang dapat diverifikasi. Dengan demikian, teknologi digital dapat memperkuat tata kelola lingkungan industri.

Namun, transformasi manufaktur hijau berbasis Industri 4.0 membutuhkan kesiapan sumber daya manusia, investasi, infrastruktur digital, keamanan siber, dan budaya organisasi. Banyak industri, terutama UMKM, menghadapi keterbatasan modal dan kompetensi digital. Oleh karena itu, transformasi digital hijau perlu dilakukan secara bertahap, mulai dari teknologi sederhana seperti sensor energi, sistem monitoring produksi, hingga integrasi digital yang lebih kompleks.

Dengan demikian, Industri 4.0 dapat menjadi penggerak transformasi manufaktur hijau apabila diterapkan dengan tujuan keberlanjutan yang jelas. Digitalisasi harus dihubungkan dengan efisiensi energi, pengurangan limbah, peningkatan kualitas, pemeliharaan prediktif, transparansi rantai pasok, dan pengurangan emisi. Dalam kerangka *green innovation*, Industri 4.0 bukan sekadar modernisasi teknologi, tetapi alat strategis untuk membangun industri yang lebih cerdas, bersih, dan berkelanjutan.

TANTANGAN INDUSTRI DALAM MENERAPKAN TEKNOLOGI HIJAU

1. Biaya yang tinggi

Tantangan pertama industri dalam menerapkan teknologi hijau adalah biaya investasi awal. Banyak teknologi ramah lingkungan

membutuhkan modal yang tidak kecil, seperti mesin hemat energi, instalasi pengolahan limbah, sistem pemulihan panas, panel surya, sensor digital, dan teknologi daur ulang. Bagi perusahaan besar, investasi tersebut mungkin dapat direncanakan melalui strategi jangka panjang. Namun, bagi UMKM, keterbatasan pembiayaan sering menjadi hambatan utama dalam adopsi teknologi hijau.

2. Ketidakpastian Manfaat Ekonomi

Tantangan kedua adalah ketidakpastian manfaat ekonomi. Beberapa perusahaan masih memandang teknologi hijau sebagai biaya tambahan, bukan sebagai investasi produktif. Hal ini terjadi karena manfaat teknologi hijau kadang baru terlihat dalam jangka menengah atau panjang, seperti penghematan energi, penurunan limbah, pengurangan risiko regulasi, dan peningkatan reputasi. Oleh karena itu, diperlukan analisis biaya-manfaat yang komprehensif agar perusahaan dapat memahami nilai ekonomi dari teknologi hijau.

3. Kompetensi Sumber Daya Manusia

Tantangan ketiga adalah keterbatasan kompetensi sumber daya manusia. Teknologi hijau membutuhkan tenaga kerja yang memahami proses produksi, efisiensi energi, pengelolaan limbah, sistem digital, audit lingkungan, dan pelaporan keberlanjutan. Tanpa kompetensi tersebut, teknologi yang sudah dibeli dapat tidak digunakan secara optimal. Kajian tentang *green human resource development* menunjukkan bahwa pengembangan sumber daya manusia hijau menjadi bagian penting dalam memfasilitasi transisi perusahaan manufaktur menuju keberlanjutan.

4. Resisten terhadap Perubahan

Tantangan keempat adalah resistensi organisasi terhadap perubahan. Penerapan teknologi hijau sering mengubah prosedur kerja, standar produksi, hubungan dengan pemasok, dan kebiasaan karyawan. Perubahan tersebut dapat

menimbulkan kekhawatiran, terutama jika pekerja merasa teknologi baru akan menambah beban kerja atau mengancam posisi mereka. Oleh karena itu, manajemen perubahan, komunikasi internal, pelatihan, dan partisipasi pekerja menjadi penting dalam implementasi teknologi hijau.

5. Keterbatasan Rantai Pasok

Tantangan kelima adalah keterbatasan rantai pasok. Industri yang ingin menggunakan material ramah lingkungan atau pemasok hijau sering menghadapi masalah ketersediaan, harga, kualitas, dan konsistensi pasokan. Dalam beberapa sektor, material hijau masih belum tersedia dalam skala besar atau belum memiliki standar yang mapan. Oleh karena itu, penerapan *green manufacturing* perlu didukung oleh pengembangan ekosistem pemasok, sertifikasi, dan kerja sama jangka panjang dalam rantai nilai.

6. Pengelolaan Data dan Aplikasi Sistem

Tantangan keenam adalah lemahnya data dan sistem pengukuran. Banyak industri belum memiliki data yang akurat mengenai konsumsi energi, konsumsi air, limbah, emisi, dan dampak lingkungan produk. Tanpa data tersebut, perusahaan sulit menentukan prioritas, mengukur keberhasilan, dan menyusun laporan keberlanjutan. Padahal, tuntutan ESG dan pasar global semakin menekankan pentingnya transparansi dan bukti kinerja lingkungan.

7. Risiko *Greenwashing*

Tantangan ketujuh adalah risiko *greenwashing*. Beberapa perusahaan dapat mengklaim telah menerapkan teknologi hijau tanpa bukti yang memadai. *Greenwashing* dapat merusak kepercayaan konsumen, investor, dan masyarakat. Oleh karena itu, penerapan teknologi hijau harus disertai indikator terukur, audit, sertifikasi, dan pelaporan yang transparan. Teknologi hijau harus menghasilkan perubahan nyata, bukan sekadar citra pemasaran.

Dengan demikian, tantangan industri dalam menerapkan teknologi hijau bersifat multidimensional. Hambatannya tidak hanya terletak pada teknologi, tetapi juga pada pembiayaan, sumber daya manusia, budaya organisasi, rantai pasok, regulasi, data, dan tata kelola. Oleh sebab itu, *green innovation* dalam industri memerlukan pendekatan manajemen teknologi yang sistematis, bertahap, kolaboratif, dan berbasis bukti.



BAB 10

GREEN INNOVATION DALAM BANGUNAN, KOTA, DAN INFRASTRUKTUR

Perkembangan pembangunan modern menghadirkan tantangan besar bagi lingkungan, terutama melalui meningkatnya konsumsi energi, penggunaan material, perubahan tata guna lahan, produksi limbah konstruksi, serta emisi karbon dari sektor bangunan, kota, dan infrastruktur. Dalam konteks tersebut, *green innovation* menjadi pendekatan strategis yang diperlukan untuk mengarahkan proses pembangunan agar tidak hanya berorientasi pada pertumbuhan fisik dan ekonomi, tetapi juga memperhatikan keberlanjutan ekologis, efisiensi sumber daya, kenyamanan manusia, serta kualitas lingkungan hidup.

Green innovation dalam bangunan, kota, dan infrastruktur merupakan upaya mengintegrasikan prinsip inovasi teknologi, manajemen lingkungan, desain berkelanjutan, dan tata kelola pembangunan yang bertanggung jawab. Pada skala bangunan, inovasi hijau diwujudkan melalui desain hemat energi, pemilihan material ramah lingkungan, efisiensi air, pengelolaan limbah, kualitas udara dalam ruang, serta pemanfaatan energi terbarukan. Pada skala kota, *green innovation* mendorong terbentuknya sistem perkotaan yang lebih rendah karbon, adaptif terhadap perubahan iklim, memiliki ruang terbuka hijau yang memadai, serta

mendukung mobilitas berkelanjutan. Sementara itu, pada skala infrastruktur, inovasi hijau berperan dalam menciptakan sistem pelayanan dasar yang efisien, resilien, inklusif, dan minim dampak lingkungan.

Pembahasan mengenai *green innovation* dalam bidang ini menjadi penting karena bangunan, kota, dan infrastruktur merupakan ruang utama tempat berlangsungnya aktivitas manusia. Kualitas rancangan dan pengelolaannya menentukan tingkat konsumsi energi, pola pergerakan, kenyamanan termal, kesehatan masyarakat, produktivitas ekonomi, serta daya tahan lingkungan terhadap tekanan pembangunan. Oleh karena itu, penerapan inovasi hijau tidak dapat dipahami hanya sebagai penggunaan teknologi ramah lingkungan, melainkan sebagai perubahan paradigma dalam merencanakan, merancang, membangun, mengoperasikan, dan mengevaluasi lingkungan binaan secara berkelanjutan.

Bab ini membahas bagaimana prinsip *green innovation* dapat diterapkan secara sistematis pada bangunan, kota, dan infrastruktur. Pembahasan diawali dengan konsep *green building* sebagai fondasi penting dalam mewujudkan lingkungan binaan yang hemat energi, efisien sumber daya, sehat, dan berkelanjutan. Selanjutnya, kajian dapat diperluas pada dimensi kota hijau, infrastruktur rendah karbon, teknologi konstruksi berkelanjutan, serta strategi manajemen pembangunan yang mampu menjawab tantangan perubahan iklim dan kebutuhan generasi mendatang. Dengan demikian, *green innovation* menjadi instrumen penting untuk membangun masa depan lingkungan binaan yang lebih tangguh, produktif, dan berkeadilan ekologis.

KONSEP GREEN BUILDING

Green building atau bangunan hijau adalah konsep perancangan, pembangunan, pengoperasian, pemeliharaan, dan

pembongkaran bangunan yang memperhatikan efisiensi sumber daya, pengurangan dampak lingkungan, kesehatan pengguna, serta keberlanjutan jangka panjang. Bangunan hijau tidak hanya berarti bangunan yang memiliki banyak tanaman atau tampilan alami, tetapi bangunan yang dirancang secara sistematis untuk mengurangi konsumsi energi, menghemat air, menggunakan material bertanggung jawab, meningkatkan kualitas udara dalam ruang, dan menekan limbah konstruksi.



Gambar 15 Konsep *green building*.

Konsep *green building* lahir dari kesadaran bahwa sektor bangunan memiliki kontribusi besar terhadap konsumsi energi, penggunaan material, emisi karbon, dan produksi limbah. IEA mencatat bahwa bangunan menyumbang sekitar 30% dari permintaan energi global sehingga efisiensi bangunan menjadi salah satu agenda penting dalam transisi energi dan mitigasi perubahan iklim. Data tersebut menunjukkan bahwa inovasi hijau pada bangunan bukan isu estetika semata, melainkan bagian strategis dari agenda energi, iklim, kesehatan, dan ekonomi perkotaan.

Dalam perspektif World Green Building Council, transformasi bangunan hijau berkaitan dengan penciptaan lingkungan binaan yang berkelanjutan, rendah karbon, tangguh, sehat, dan inklusif. Artinya, bangunan hijau tidak hanya dipahami dari sisi teknologi bangunan, tetapi juga dari kebijakan, pembiayaan, budaya, dan tata kelola yang memungkinkan terjadinya perubahan pasar properti dan konstruksi menuju keberlanjutan.

Green building juga menempatkan pengguna bangunan sebagai pusat perhatian. Bangunan yang hemat energi tetapi tidak nyaman, tidak sehat, atau tidak aman belum dapat disebut berhasil secara berkelanjutan. Oleh sebab itu, konsep *green building* mencakup kualitas udara dalam ruang, kenyamanan termal, pencahayaan alami, akustik, aksesibilitas, keselamatan, dan kesehatan penghuni. Pendekatan ini menunjukkan bahwa bangunan hijau mengintegrasikan aspek ekologis dan humanistik.

Di Indonesia, konsep bangunan hijau antara lain dikembangkan melalui perangkat penilaian GREENSHIP oleh Green Building Council Indonesia. GREENSHIP New Building ditujukan untuk bangunan baru dan memperhatikan proses desain serta konstruksi agar proyek dapat menghasilkan bangunan hijau secara komprehensif melalui pendekatan inovatif sejak tahap perencanaan sampai operasional. GBC Indonesia juga memiliki beberapa jenis sertifikasi, seperti New Building, Existing Building, Interior Space, Homes, Neighborhood, dan Net Zero.

Dengan demikian, *green building* merupakan bentuk nyata *green innovation* dalam bidang arsitektur dan konstruksi. Inovasi pada bangunan tidak hanya dilakukan melalui penggunaan teknologi canggih, tetapi juga melalui desain pasif, orientasi bangunan, pemilihan material, pengelolaan air, efisiensi energi, dan perilaku pengguna. Bangunan hijau menjadi titik temu antara ilmu arsitektur, teknik sipil, perencanaan kota, manajemen teknologi, dan pembangunan berkelanjutan.

EFISIENSI ENERGI DAN AIR PADA BANGUNAN

Efisiensi energi pada bangunan adalah upaya mengurangi konsumsi energi tanpa menurunkan kenyamanan, fungsi, dan produktivitas pengguna bangunan. Efisiensi ini dapat dilakukan melalui strategi desain pasif, teknologi aktif, sistem manajemen energi, dan perubahan perilaku pengguna. Dalam iklim tropis seperti Indonesia, efisiensi energi sangat berkaitan dengan pengendalian panas, penggunaan ventilasi alami, perlindungan terhadap radiasi matahari, dan pengurangan beban pendinginan udara.

Strategi desain pasif merupakan fondasi penting dalam efisiensi energi bangunan. Strategi ini mencakup orientasi bangunan yang tepat, penggunaan bukaan silang, pelindung matahari, pencahayaan alami, ventilasi alami, insulasi termal, dan pemanfaatan vegetasi. Desain pasif berupaya mengoptimalkan kondisi iklim setempat agar kebutuhan energi mekanis dapat ditekan. Dalam konteks arsitektur tropis, prinsip ini sangat relevan karena kenyamanan termal dapat dicapai melalui rancangan yang responsif terhadap panas, kelembapan, dan arah angin.

Teknologi aktif juga berperan dalam efisiensi energi bangunan. Teknologi tersebut meliputi lampu LED, pendingin ruangan hemat energi, sensor gerak, sistem otomasi bangunan, lift hemat energi, panel surya atap, dan *building energy management system*. Teknologi aktif membantu bangunan memantau dan mengendalikan konsumsi energi secara lebih presisi. Namun, teknologi aktif akan lebih efektif apabila dikombinasikan dengan desain pasif yang baik.

Efisiensi air pada bangunan mencakup pengurangan konsumsi air bersih, penggunaan alat saniter hemat air, pemanenan air hujan, daur ulang air abu-abu, pengolahan air limbah domestik, dan penggunaan lanskap hemat air. Dalam banyak kota, tekanan terhadap sumber air semakin meningkat akibat pertumbuhan

penduduk, perubahan iklim, dan urbanisasi. Oleh karena itu, bangunan hijau perlu dirancang agar tidak hanya hemat energi, tetapi juga bijak dalam menggunakan air.

Efisiensi energi dan air juga membutuhkan sistem pengukuran yang jelas. Pengelola bangunan perlu memantau intensitas penggunaan energi, konsumsi air per pengguna, tingkat kebocoran, efisiensi peralatan, dan perilaku penggunaan. GBC Indonesia dalam pelatihan *green building* menekankan pentingnya pengukuran penggunaan energi, air, udara, produk hijau, dan pengelolaan limbah sebagai bagian dari analisis peluang dan kendala menuju bangunan hijau.

Dengan demikian, efisiensi energi dan air pada bangunan merupakan bentuk *green innovation* yang sangat operasional. Efisiensi ini dapat diterapkan pada rumah tinggal, sekolah, kampus, rumah sakit, perkantoran, hotel, pusat perbelanjaan, dan gedung pemerintahan. Melalui efisiensi energi dan air, bangunan dapat mengurangi biaya operasional, menurunkan emisi, meningkatkan kenyamanan, serta mendukung keberlanjutan kota.

MATERIAL BANGUNAN RAMAH LINGKUNGAN

Material bangunan ramah lingkungan adalah material yang dipilih, diproduksi, digunakan, dan dikelola dengan mempertimbangkan dampak lingkungan sepanjang siklus hidupnya. Material tersebut tidak hanya dinilai berdasarkan kekuatan, harga, dan estetika, tetapi juga berdasarkan jejak karbon, kandungan daur ulang, asal bahan, energi produksi, potensi pencemaran, umur pakai, kemampuan diperbaiki, dan kemungkinan digunakan kembali setelah bangunan berubah fungsi atau dibongkar.

Dalam industri konstruksi, material memiliki kontribusi besar terhadap emisi karbon tertanam atau *embodied carbon*. Beton, baja, aluminium, kaca, keramik, dan material industri lainnya

membutuhkan energi dalam proses produksinya. Oleh karena itu, strategi material ramah lingkungan perlu mencakup pengurangan volume material, pemilihan material lokal, penggunaan material daur ulang, pemanfaatan material rendah karbon, serta desain bangunan yang memungkinkan pemeliharaan dan pembongkaran selektif.

Material lokal dapat menjadi bagian penting dari inovasi hijau apabila digunakan secara bertanggung jawab. Bambu, kayu bersertifikat, batu lokal, tanah stabilisasi, bata tanah, serat alam, dan material berbasis limbah pertanian dapat menjadi alternatif dalam konteks tertentu. Namun, material lokal tidak otomatis ramah lingkungan apabila diperoleh melalui praktik ekstraktif yang merusak ekosistem. Oleh sebab itu, pemilihan material harus mempertimbangkan legalitas, keberlanjutan sumber, kualitas teknis, dan dampak sosial.

Material daur ulang dan material hasil pemanfaatan limbah juga memiliki peran penting. Limbah konstruksi, plastik daur ulang, *fly ash*, *slag*, kaca bekas, logam bekas, dan kayu bongkaran dapat dimanfaatkan kembali dalam produk bangunan. Pendekatan ini mendukung ekonomi sirkular karena mengurangi kebutuhan bahan baku primer dan menekan volume limbah konstruksi. Namun, material daur ulang harus memenuhi standar keamanan, kekuatan, kesehatan, dan ketahanan agar layak digunakan dalam bangunan.

Pemilihan material bangunan ramah lingkungan juga perlu memperhatikan kesehatan pengguna. Beberapa material dapat mengandung senyawa organik volatil, formaldehida, bahan beracun, atau partikel yang menurunkan kualitas udara dalam ruang. Oleh karena itu, material *finishing*, cat, perekat, pelapis lantai, dan furnitur perlu dipilih dengan mempertimbangkan emisi kimia dan dampaknya terhadap kesehatan penghuni.

Dalam perspektif *green innovation*, inovasi material bangunan perlu dikembangkan melalui riset, standarisasi,

pengujian laboratorium, sertifikasi, dan kolaborasi antara arsitek, insinyur, industri material, pemerintah, dan perguruan tinggi. Material ramah lingkungan harus mampu menjawab tiga tuntutan sekaligus, yaitu layak secara teknis, kompetitif secara ekonomi, dan bertanggung jawab secara ekologis.

Dengan demikian, material bangunan ramah lingkungan merupakan elemen penting dalam *green building* dan infrastruktur hijau. Keputusan material yang tepat dapat menurunkan emisi, mengurangi limbah, meningkatkan kesehatan pengguna, dan memperkuat identitas lokal. Dalam konteks arsitektur Indonesia, inovasi material juga dapat menjadi sarana menghubungkan teknologi hijau dengan kearifan lokal dan potensi sumber daya wilayah.

SMART BUILDING DAN TEKNOLOGI DIGITAL



Gambar 16 Smart building dan teknologi digital.

Smart building adalah bangunan yang memanfaatkan teknologi digital, sensor, otomasi, sistem informasi, dan analitik data untuk meningkatkan efisiensi, kenyamanan, keamanan, dan kinerja lingkungan. Bangunan cerdas tidak hanya menggunakan

perangkat digital, tetapi mengintegrasikan berbagai sistem seperti pencahayaan, pendinginan, ventilasi, keamanan, energi, air, *lift*, dan pemantauan kualitas udara dalam satu sistem manajemen yang dapat dikendalikan secara adaptif.

Teknologi digital dalam smart building memungkinkan pengelola bangunan mengetahui kondisi operasional secara *real-time*. Sensor dapat mengukur suhu, kelembapan, cahaya, okupansi, kualitas udara, konsumsi listrik, konsumsi air, dan kinerja peralatan. Data tersebut membantu pengelola mengambil keputusan berbasis bukti, misalnya menyesuaikan pendinginan ruangan berdasarkan jumlah penghuni, mematikan lampu saat ruang kosong, atau mendeteksi kebocoran air sejak dini.

Building energy management system merupakan salah satu teknologi utama dalam *smart building*. Sistem ini digunakan untuk memantau, mengendalikan, dan mengoptimalkan konsumsi energi bangunan. Dalam gedung besar seperti kampus, rumah sakit, hotel, perkantoran, dan pusat perbelanjaan, sistem manajemen energi dapat menghasilkan penghematan signifikan karena konsumsi energi sering tersebar pada banyak peralatan dan ruang. Dengan sistem digital, pemborosan energi yang tidak terlihat dapat diketahui dan dikoreksi.

Smart building juga dapat meningkatkan kenyamanan dan kesehatan pengguna. Sistem ventilasi cerdas dapat mengatur kualitas udara dalam ruang berdasarkan tingkat karbon dioksida atau jumlah penghuni. Sistem pencahayaan adaptif dapat menyesuaikan intensitas cahaya dengan kebutuhan visual dan cahaya alami. Dalam konteks pasca-pandemi, perhatian terhadap kualitas udara dalam ruang semakin penting karena bangunan sehat berhubungan langsung dengan produktivitas, keselamatan, dan kesejahteraan pengguna.

Namun, smart building tidak otomatis menjadi *green building*. Bangunan dapat memiliki teknologi digital canggih tetapi tetap boros energi apabila desain dasarnya tidak efisien atau

sistemnya tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, *smart building* perlu diintegrasikan dengan prinsip *green building*. Teknologi digital harus digunakan untuk mendukung efisiensi energi, efisiensi air, pengurangan emisi, pengelolaan limbah, dan peningkatan kualitas lingkungan dalam ruang.

Smart building juga menimbulkan tantangan baru, seperti biaya investasi, kebutuhan sumber daya manusia, keamanan siber, perlindungan data pengguna, dan ketergantungan terhadap sistem digital. Pengelola bangunan harus memiliki kapasitas untuk mengoperasikan dan memelihara sistem digital. Tanpa kapasitas tersebut, teknologi *smart building* dapat menjadi tidak efektif atau bahkan membebani operasional.

Dengan demikian, *smart building* merupakan bentuk *green innovation* yang menghubungkan arsitektur, teknologi informasi, manajemen energi, dan perilaku pengguna. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, *smart building* perlu diarahkan bukan hanya untuk modernisasi bangunan, tetapi untuk menciptakan bangunan yang hemat sumber daya, sehat, aman, dan responsif terhadap kebutuhan manusia serta lingkungan.

GREEN INFRASTRUCTURE DALAM PERKOTAAN

Green infrastructure atau infrastruktur hijau adalah jaringan ruang, sistem, dan elemen alami maupun semi-alami yang dirancang untuk memberikan fungsi ekologis, sosial, dan ekonomi bagi kota. Infrastruktur hijau dapat berupa taman kota, hutan kota, koridor hijau, ruang terbuka hijau, sungai, sempadan sungai, *wetland*, taman atap, dinding hijau, *bioswale*, *rain garden*, *urban farming*, dan sistem drainase berkelanjutan. Infrastruktur ini berfungsi sebagai pelengkap sekaligus alternatif terhadap infrastruktur abu-abu konvensional.



Gambar 17 *Green infrastructure* dalam perkotaan.

Konsep *green infrastructure* sangat penting karena kota menghadapi berbagai tekanan seperti banjir, polusi udara, pulau panas perkotaan, penurunan biodiversitas, krisis air, dan berkurangnya ruang publik. Infrastruktur hijau membantu kota menyerap air hujan, menurunkan suhu, meningkatkan kualitas udara, menyediakan habitat, memperbaiki estetika kota, serta meningkatkan kesehatan fisik dan mental warga. Dengan demikian, infrastruktur hijau tidak hanya berfungsi ekologis, tetapi juga sosial dan kultural.

Dalam konteks perubahan iklim, infrastruktur hijau menjadi bagian penting dari strategi adaptasi kota. UN-Habitat menegaskan bahwa kota berada di garis depan krisis iklim, mulai dari banjir, gelombang panas, badai, hingga kekeringan. Laporan *World Cities Report 2024* menempatkan kota dan aksi iklim sebagai agenda yang saling terkait karena perencanaan bangunan, permukiman, air, dan transportasi sangat menentukan ketahanan iklim perkotaan.

Green infrastructure juga dapat berperan dalam manajemen air perkotaan. Permukaan kota yang didominasi beton dan aspal menyebabkan air hujan sulit meresap sehingga meningkatkan

limpasan permukaan dan risiko banjir. *Bioswale*, *rain garden*, taman resapan, kolam retensi, *wetland* buatan, dan permukaan berpori dapat membantu memperlambat aliran air, meningkatkan infiltrasi, dan memperbaiki kualitas air. Pendekatan ini menggeser paradigma drainase dari sekadar membuang air secepat mungkin menuju mengelola air sebagai sumber daya.

Dari perspektif perencanaan kota, *green infrastructure* harus dirancang sebagai jaringan, bukan elemen terpisah. Taman kota yang berdiri sendiri memiliki manfaat, tetapi manfaat ekologis dan sosialnya akan lebih besar apabila terhubung dengan koridor hijau, jalur pejalan kaki, sungai, ruang publik, kawasan permukiman, dan sistem transportasi. Konektivitas ekologis dan sosial menjadi prinsip penting agar infrastruktur hijau dapat membentuk struktur kota yang lebih sehat dan inklusif.

Green infrastructure juga memiliki nilai ekonomi. Kehadiran ruang hijau dapat meningkatkan kualitas lingkungan, mengurangi biaya pengendalian banjir, menurunkan kebutuhan pendinginan bangunan, meningkatkan daya tarik kawasan, dan mendukung ekonomi lokal. Namun, pengembangan infrastruktur hijau harus memperhatikan keadilan spasial agar tidak hanya terkonsentrasi di kawasan elit. Masyarakat berpendapatan rendah juga berhak memperoleh akses terhadap ruang hijau dan lingkungan kota yang sehat.

Dengan demikian, *green infrastructure* merupakan bentuk *green innovation* pada skala kota. Inovasi ini menggabungkan pendekatan ekologis, desain lanskap, perencanaan wilayah, teknologi air, dan partisipasi masyarakat. Dalam konteks kota tropis Indonesia, *green infrastructure* sangat relevan untuk menghadapi banjir, panas perkotaan, degradasi sungai, dan keterbatasan ruang terbuka hijau.

TRANSPORTASI BERKELANJUTAN DAN MOBILITAS HIJAU

Transportasi berkelanjutan adalah sistem transportasi yang mampu memenuhi kebutuhan mobilitas masyarakat dengan dampak lingkungan, sosial, dan ekonomi yang lebih rendah. Konsep ini tidak hanya membahas kendaraan ramah lingkungan, tetapi juga tata ruang, aksesibilitas, keselamatan, keterjangkauan, efisiensi energi, dan keadilan mobilitas. Mobilitas hijau menempatkan manusia sebagai pusat, bukan kendaraan pribadi sebagai orientasi utama.

Salah satu prinsip utama transportasi berkelanjutan adalah mengurangi ketergantungan terhadap kendaraan pribadi bermotor. Ketergantungan tinggi pada kendaraan pribadi menyebabkan kemacetan, polusi udara, emisi karbon, konsumsi energi tinggi, kecelakaan, dan pemborosan ruang kota. Oleh karena itu, kota perlu mendorong transportasi publik, berjalan kaki, bersepeda, dan integrasi tata guna lahan dengan sistem transit.

Transportasi publik merupakan tulang punggung mobilitas hijau. *Bus rapid transit*, kereta perkotaan, angkutan pengumpan, dan sistem transportasi massal lainnya dapat mengangkut banyak orang dengan konsumsi energi dan ruang yang lebih efisien dibandingkan kendaraan pribadi. Namun, transportasi publik harus andal, aman, nyaman, terjangkau, mudah diakses, dan terintegrasi agar masyarakat bersedia menggunakannya.

Mobilitas aktif seperti berjalan kaki dan bersepeda juga penting dalam transportasi berkelanjutan. Trotoar yang aman, jalur sepeda, penyeberangan yang nyaman, pohon peneduh, dan desain jalan yang ramah manusia dapat mengurangi perjalanan pendek dengan kendaraan bermotor. Selain mengurangi emisi, mobilitas aktif meningkatkan kesehatan masyarakat dan memperkuat interaksi sosial di ruang kota.

Teknologi kendaraan rendah emisi, seperti kendaraan listrik, bus listrik, dan sepeda listrik, merupakan bagian dari mobilitas hijau. Namun, kendaraan listrik bukan satu-satunya solusi. Jika kendaraan listrik hanya menggantikan kendaraan pribadi berbahan bakar fosil tanpa mengurangi kemacetan dan konsumsi ruang, maka persoalan perkotaan belum terselesaikan secara menyeluruh. Oleh karena itu, elektrifikasi kendaraan harus dipadukan dengan transportasi publik, manajemen permintaan perjalanan, dan perencanaan tata ruang.

Konsep *transit-oriented development* juga relevan dalam transportasi berkelanjutan. TOD mengarahkan pembangunan kawasan dengan kepadatan, fungsi campuran, akses pejalan kaki, dan konektivitas tinggi di sekitar simpul transportasi publik. Dengan TOD, jarak perjalanan dapat dipersingkat dan ketergantungan pada kendaraan pribadi berkurang. Pendekatan ini menunjukkan bahwa transportasi hijau tidak dapat dipisahkan dari perencanaan kota.

Dengan demikian, transportasi berkelanjutan dan mobilitas hijau merupakan bentuk *green innovation* pada sistem perkotaan. Inovasi ini tidak hanya berbentuk teknologi kendaraan, tetapi juga desain jalan, manajemen lalu lintas, tata guna lahan, transportasi publik, dan perubahan perilaku masyarakat. Peran arsitek, perencana kota, insinyur transportasi, pemerintah, dan komunitas sangat penting untuk membangun sistem mobilitas yang rendah emisi, inklusif, dan manusiawi.

KOTA HIJAU, KOTA CERDAS, DAN KOTA BERKELANJUTAN

Kota hijau adalah kota yang dirancang dan dikelola dengan memperhatikan keseimbangan antara pembangunan fisik, kualitas lingkungan, efisiensi sumber daya, ruang terbuka hijau, dan kesehatan masyarakat. Kota hijau menekankan pentingnya

pengurangan emisi, efisiensi energi, konservasi air, pengelolaan limbah, transportasi berkelanjutan, perlindungan ekosistem, dan peningkatan kualitas hidup warga. Konsep ini sangat relevan bagi kota-kota yang menghadapi polusi, kemacetan, banjir, panas perkotaan, dan tekanan lahan.



Gambar 18 Kota hijau, kota cerdas, dan kota berkelanjutan.

Kota cerdas atau *smart city* adalah kota yang memanfaatkan teknologi informasi, sensor, data, dan sistem digital untuk meningkatkan kualitas pelayanan, efisiensi kota, keamanan, partisipasi warga, dan pengambilan keputusan. Teknologi *smart city* dapat digunakan untuk memantau lalu lintas, kualitas udara, penggunaan energi, banjir, sampah, keamanan, dan pelayanan publik. Namun, kota cerdas tidak boleh hanya dipahami sebagai kota digital, melainkan sebagai kota yang menggunakan teknologi untuk menyelesaikan masalah nyata masyarakat.

Kota berkelanjutan memiliki cakupan yang lebih luas karena mengintegrasikan aspek lingkungan, sosial, ekonomi, budaya, dan tata kelola. Kota berkelanjutan tidak hanya hijau secara ekologis dan cerdas secara teknologi, tetapi juga inklusif, adil, aman, produktif, tangguh, dan beridentitas. Dalam kerangka SDGs,

kota berkelanjutan berkaitan erat dengan SDG 11, yaitu menjadikan kota dan permukiman manusia inklusif, aman, tangguh, dan berkelanjutan.

Ketiga konsep tersebut saling berkaitan. Kota hijau memberikan orientasi ekologis, kota cerdas menyediakan dukungan teknologi digital, dan kota berkelanjutan memberikan kerangka sosial-ekonomi yang lebih luas. Kota yang hanya hijau tetapi tidak inklusif dapat menghasilkan ketimpangan akses terhadap ruang berkualitas. Kota yang hanya cerdas tetapi tidak hijau dapat menjadi kota penuh teknologi tetapi tetap boros energi. Kota yang berkelanjutan harus mampu mengintegrasikan keduanya dalam tata kelola yang adil.

UN-Habitat menegaskan bahwa perjuangan menghadapi perubahan iklim dan upaya mencapai urbanisasi yang lebih berkelanjutan serta berkeadilan merupakan dua sisi dari koin yang sama. Pernyataan ini penting karena kota tidak hanya menjadi sumber emisi dan risiko, tetapi juga menjadi ruang utama untuk menerapkan solusi iklim melalui bangunan, transportasi, infrastruktur, air, energi, dan tata ruang.

Dalam konteks Indonesia, konsep kota hijau, kota cerdas, dan kota berkelanjutan perlu disesuaikan dengan karakter lokal. Kota-kota Indonesia memiliki tantangan berupa pertumbuhan penduduk, permukiman informal, banjir, polusi udara, keterbatasan ruang terbuka hijau, ketimpangan pelayanan, dan tekanan terhadap kawasan heritage. Oleh karena itu, inovasi kota tidak cukup hanya mengadopsi teknologi digital, tetapi perlu mengintegrasikan identitas lokal, budaya, ekologi, partisipasi masyarakat, dan keadilan ruang.

Dengan demikian, kota hijau, kota cerdas, dan kota berkelanjutan merupakan tiga pendekatan yang perlu disatukan dalam *green innovation* perkotaan. Integrasi ketiganya dapat menghasilkan kota yang tidak hanya modern, tetapi juga sehat,

rendah karbon, adaptif terhadap iklim, hemat sumber daya, inklusif, dan memiliki kualitas ruang yang manusiawi.

PERAN ARSITEKTUR DAN PERENCANAAN KOTA DALAM INOVASI HIJAU

Arsitektur memiliki peran penting dalam inovasi hijau karena bangunan merupakan unit dasar pembentuk kota dan kehidupan sehari-hari manusia. Melalui arsitektur, prinsip efisiensi energi, kenyamanan termal, pencahayaan alami, ventilasi, pemilihan material, pengelolaan air, dan kesehatan ruang dapat diterjemahkan menjadi bentuk fisik yang nyata. Arsitektur tidak hanya menciptakan ruang, tetapi juga menentukan pola konsumsi energi, perilaku penghuni, dan hubungan manusia dengan lingkungan.

Perencanaan kota memiliki peran yang lebih luas karena mengatur struktur ruang, tata guna lahan, jaringan transportasi, ruang terbuka hijau, infrastruktur, kepadatan, kawasan permukiman, dan distribusi aktivitas. Keputusan perencanaan kota menentukan apakah masyarakat akan bergantung pada kendaraan pribadi, memiliki akses ke transportasi publik, memperoleh ruang hijau, terlindung dari banjir, dan dapat hidup dalam lingkungan yang sehat. Oleh karena itu, perencanaan kota merupakan instrumen penting untuk menurunkan emisi dan meningkatkan ketahanan iklim.

Arsitektur dan perencanaan kota juga berperan dalam mengintegrasikan teknologi hijau dengan konteks lokal. Teknologi yang sama tidak selalu cocok untuk semua tempat. Panel surya, sistem air hujan, ventilasi alami, material lokal, transportasi publik, dan infrastruktur hijau perlu disesuaikan dengan iklim, budaya, ekonomi, topografi, dan pola hidup masyarakat setempat. Di sinilah peran arsitek dan perencana menjadi penting sebagai penerjemah antara teknologi, manusia, dan tempat.

Dalam bidang bangunan, arsitek berperan sejak tahap awal desain. Keputusan awal seperti orientasi, massa bangunan, tata ruang, fasad, bukaan, dan material sering menentukan kinerja energi bangunan dalam jangka panjang. Kesalahan desain awal sulit diperbaiki hanya dengan teknologi mekanikal. Oleh karena itu, *green innovation* dalam arsitektur harus dimulai dari konsep desain, bukan hanya ditambahkan setelah bangunan selesai dirancang.

Dalam bidang perkotaan, perencana kota berperan membangun struktur ruang yang mendukung mobilitas hijau, efisiensi infrastruktur, perlindungan ekologis, dan keadilan spasial. Perencanaan berbasis transit, kota kompak, *mixed-use development*, jaringan pejalan kaki, ruang publik, dan perlindungan kawasan ekologis merupakan strategi penting untuk mengurangi beban lingkungan kota. Dengan demikian, inovasi hijau pada kota tidak hanya bergantung pada teknologi, tetapi juga pada keputusan tata ruang.

Arsitektur dan perencanaan kota juga memiliki tanggung jawab sosial. Bangunan hijau dan kota hijau tidak boleh hanya dinikmati kelompok tertentu. Prinsip keberlanjutan harus mencakup akses masyarakat berpenghasilan rendah terhadap hunian layak, transportasi terjangkau, air bersih, sanitasi, ruang publik, dan lingkungan yang sehat. Dengan demikian, inovasi hijau harus dipahami sebagai agenda ekologis sekaligus agenda keadilan sosial.

Dalam konteks pendidikan dan profesi, arsitek serta perencana kota perlu menguasai literasi keberlanjutan, teknologi hijau, analisis siklus hidup, manajemen energi, infrastruktur hijau, partisipasi masyarakat, dan kebijakan pembangunan. Kurikulum arsitektur dan perencanaan kota perlu mengintegrasikan isu perubahan iklim, ekonomi sirkular, *green building*, *smart city*, dan ketahanan kota. Hal ini penting agar lulusan tidak hanya mampu

merancang bentuk, tetapi juga mampu menjawab tantangan keberlanjutan.

Dengan demikian, arsitektur dan perencanaan kota merupakan aktor kunci dalam *green innovation* pada bangunan, kota, dan infrastruktur. Keduanya berperan menghubungkan teknologi dengan ruang, kebijakan dengan desain, dan keberlanjutan dengan kehidupan sehari-hari masyarakat. Peran arsitektur dan perencanaan kota menjadi penting karena menunjukkan bahwa inovasi hijau bukan hanya urusan industri dan energi, tetapi juga urusan ruang hidup manusia.



BAB 11

DIGITAL TECHNOLOGY UNTUK GREEN INNOVATION

Perkembangan teknologi digital telah membawa perubahan mendasar dalam cara manusia, organisasi, industri, dan pemerintah merancang strategi pembangunan berkelanjutan. *Digital technology* tidak lagi hanya dipahami sebagai instrumen pendukung efisiensi kerja, tetapi telah berkembang menjadi fondasi penting dalam proses inovasi hijau, pengelolaan sumber daya, pengambilan keputusan berbasis data, serta transformasi sistem produksi dan konsumsi yang lebih ramah lingkungan. Dalam konteks *green innovation and technology management*, teknologi digital berperan sebagai penghubung antara kebutuhan efisiensi ekonomi, tanggung jawab ekologis, dan tuntutan keberlanjutan sosial.

Digitalisasi memungkinkan berbagai aktivitas pembangunan dan industri dipantau, dianalisis, dan dikendalikan secara lebih presisi. Melalui teknologi seperti *Internet of Things*, *artificial intelligence*, *big data analytics*, *blockchain*, dan *digital twin*, organisasi dapat mengidentifikasi pemborosan energi, mengurangi emisi karbon, meningkatkan transparansi rantai pasok, serta merancang model bisnis yang lebih adaptif terhadap prinsip ekonomi hijau. Dengan demikian, teknologi digital menjadi katalis

penting dalam mempercepat lahirnya inovasi hijau yang tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga strategis dan manajerial.

Namun demikian, pemanfaatan teknologi digital untuk *green innovation* tidak dapat dipandang secara sederhana. Di satu sisi, teknologi digital membuka peluang besar bagi efisiensi energi, optimalisasi sumber daya, pengurangan limbah, dan peningkatan kinerja lingkungan. Di sisi lain, digitalisasi juga menghadirkan tantangan baru, seperti konsumsi energi pusat data, limbah elektronik, ketimpangan akses teknologi, keamanan data, serta kebutuhan kompetensi baru dalam organisasi. Oleh karena itu, pengelolaan teknologi digital harus diarahkan secara bijaksana agar benar-benar mendukung tujuan keberlanjutan, bukan justru menciptakan beban ekologis baru.

Bab ini membahas bagaimana teknologi digital dapat diintegrasikan ke dalam kerangka *green innovation* secara sistematis. Pembahasan diawali dengan hubungan antara transformasi digital dan keberlanjutan, kemudian dilanjutkan dengan peran berbagai teknologi digital dalam mendukung monitoring lingkungan, efisiensi energi, pengambilan keputusan berkelanjutan, transparansi rantai pasok hijau, simulasi teknologi dan infrastruktur, serta analisis peluang dan risiko digitalisasi. Dengan pemahaman tersebut, *digital technology* dapat ditempatkan sebagai instrumen strategis dalam membangun inovasi hijau yang lebih adaptif, terukur, transparan, dan berorientasi pada masa depan.

TRANSFORMASI DIGITAL DAN KEBERLANJUTAN

Transformasi digital adalah proses perubahan organisasi, industri, pemerintahan, dan masyarakat melalui pemanfaatan teknologi digital untuk meningkatkan efisiensi, kecepatan, akurasi, konektivitas, dan kemampuan pengambilan keputusan. Dalam konteks keberlanjutan, transformasi digital tidak hanya dimaknai sebagai modernisasi sistem kerja, tetapi juga sebagai sarana untuk

mengurangi pemborosan sumber daya, menekan emisi, memperbaiki tata kelola lingkungan, dan memperkuat transparansi. Oleh karena itu, transformasi digital dapat menjadi penggerak penting bagi *green innovation* apabila diarahkan secara sengaja untuk mendukung tujuan ekologis, sosial, dan ekonomi.

Hubungan antara transformasi digital dan keberlanjutan muncul karena teknologi digital mampu menyediakan data, konektivitas, dan otomasi yang sebelumnya sulit dilakukan secara manual. Sensor dapat memantau kualitas udara, konsumsi energi, debit air, suhu mesin, atau volume limbah secara *real-time*. Kecerdasan buatan dapat menganalisis pola penggunaan energi dan memberikan rekomendasi efisiensi. Big data dapat membantu pemerintah dan organisasi memahami kecenderungan lingkungan dalam skala besar. Dengan demikian, teknologi digital membantu mengubah pengelolaan lingkungan dari pendekatan reaktif menjadi prediktif dan preventif.

Dalam sektor energi, digitalisasi telah terbukti memiliki peran penting dalam meningkatkan keamanan, produktivitas, aksesibilitas, dan keberlanjutan sistem energi. IEA menekankan bahwa digitalisasi dapat membantu sistem energi menjadi lebih efisien dan responsif, tetapi sekaligus menimbulkan risiko baru seperti keamanan siber, privasi, dan gangguan terhadap pasar serta tenaga kerja. Dengan demikian, digitalisasi harus dikelola secara hati-hati agar manfaat keberlanjutannya lebih besar daripada risikonya.

Dalam konteks *green innovation*, transformasi digital berperan sebagai enabler. Artinya, teknologi digital tidak selalu menjadi tujuan akhir, tetapi menjadi sarana untuk mempercepat inovasi hijau dalam energi, manufaktur, bangunan, transportasi, pertanian, rantai pasok, dan tata kelola kota. Misalnya, *smart grid* memungkinkan integrasi energi terbarukan; *smart building* memungkinkan efisiensi energi gedung; *precision agriculture* memungkinkan penghematan air dan pupuk; sedangkan *platform*

digital ekonomi sirkular memungkinkan barang bekas, material daur ulang, dan jasa perbaikan memperoleh pasar yang lebih luas.

Namun, transformasi digital juga memiliki jejak lingkungan. Pusat data, perangkat digital, jaringan telekomunikasi, proses komputasi, dan produksi perangkat elektronik membutuhkan energi, air, mineral kritis, dan menghasilkan limbah elektronik. IEA memperkirakan konsumsi listrik pusat data global dapat meningkat menjadi sekitar 945 TWh pada 2030, atau hampir dua kali lipat dibandingkan beberapa tahun sebelumnya, terutama karena pertumbuhan kecerdasan buatan dan layanan digital. Oleh karena itu, *digital technology* untuk *green innovation* harus disertai prinsip *green digitalization*.

Dengan demikian, transformasi digital dan keberlanjutan memiliki hubungan ganda. Di satu sisi, teknologi digital dapat mempercepat efisiensi, transparansi, dan inovasi hijau. Di sisi lain, teknologi digital juga dapat meningkatkan konsumsi energi, limbah elektronik, dan ketimpangan akses apabila tidak dikelola secara bertanggung jawab. Transformasi digital dipahami sebagai instrumen strategis yang harus diarahkan pada efisiensi sumber daya, keadilan sosial, dan perlindungan lingkungan.

INTERNET OF THINGS UNTUK MONITORING LINGKUNGAN

Internet of Things atau IoT adalah jaringan perangkat fisik yang dilengkapi sensor, perangkat lunak, dan konektivitas sehingga mampu mengumpulkan, mengirimkan, dan bertukar data melalui internet. Dalam konteks monitoring lingkungan, IoT memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara *real-time*, otomatis, dan berkelanjutan. Teknologi ini dapat digunakan untuk mengukur kualitas udara, kualitas air, kelembapan tanah, suhu, kebisingan, emisi, konsumsi energi, penggunaan air, dan kondisi infrastruktur.

IoT menjadi penting dalam *green innovation* karena banyak persoalan lingkungan membutuhkan data yang cepat dan akurat. Tanpa data, organisasi dan pemerintah sulit mengetahui sumber pencemaran, pola pemborosan energi, tingkat kebocoran air, atau perubahan kualitas lingkungan. Dengan sensor IoT, data dapat dikumpulkan secara terus-menerus sehingga keputusan lingkungan tidak hanya bergantung pada inspeksi manual yang terbatas. Hal ini membuat pengelolaan lingkungan menjadi lebih presisi dan responsif.

Dalam perkotaan, IoT dapat digunakan untuk memantau kualitas udara, ketinggian air sungai, genangan banjir, intensitas hujan, kondisi drainase, dan kepadatan lalu lintas. Data tersebut dapat membantu pemerintah kota merumuskan sistem peringatan dini, mengatur lalu lintas, mengidentifikasi kawasan rawan banjir, dan mengevaluasi efektivitas infrastruktur hijau. Dalam konteks kota cerdas dan kota berkelanjutan, IoT menjadi jembatan antara kondisi fisik kota dan sistem pengambilan keputusan digital.

Dalam sektor bangunan, IoT digunakan untuk memantau konsumsi energi, suhu ruangan, okupansi, kualitas udara dalam ruang, pencahayaan, dan penggunaan air. Sensor dapat mengatur lampu, pendingin ruangan, ventilasi, dan sistem keamanan secara otomatis berdasarkan kebutuhan aktual. Dengan demikian, bangunan dapat mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan kenyamanan pengguna. IoT juga dapat mendeteksi kebocoran air atau kerusakan peralatan sehingga pemeliharaan menjadi lebih cepat dan efisien.

Dalam industri, IoT mendukung *green manufacturing* melalui pemantauan mesin, bahan baku, energi, limbah, dan emisi. Sensor pada mesin dapat memberikan data mengenai suhu, getaran, konsumsi energi, dan tingkat produksi. Data tersebut dapat digunakan untuk *predictive maintenance*, mengurangi *downtime*, menekan produk cacat, dan mengoptimalkan

penggunaan energi. Dengan demikian, IoT dapat mengubah proses industri menjadi lebih efisien dan rendah limbah.

Dalam pertanian, IoT mendukung *precision agriculture*. Sensor kelembapan tanah, cuaca, suhu, dan nutrisi tanaman dapat membantu petani menggunakan air, pupuk, dan pestisida secara lebih tepat. Teknologi ini berpotensi mengurangi pemborosan sumber daya dan dampak lingkungan pertanian. Dalam konteks Indonesia, IoT pertanian dapat dikembangkan untuk irigasi hemat air, pemantauan cuaca mikro, dan pengelolaan tanaman berbasis data.

Namun, penerapan IoT juga menghadapi tantangan. Sensor membutuhkan biaya, jaringan internet, energi, pemeliharaan, keamanan data, dan kemampuan analisis. Di wilayah terpencil, keterbatasan jaringan dapat menghambat penerapan IoT. Selain itu, perangkat IoT yang tidak dikelola dengan baik dapat menambah limbah elektronik. Oleh karena itu, IoT untuk monitoring lingkungan perlu dirancang hemat energi, tahan lama, mudah dirawat, dan sesuai dengan kebutuhan lokal.

Dengan demikian, IoT merupakan teknologi penting untuk mendukung monitoring lingkungan dalam *green innovation*. IoT memberikan kemampuan melihat, mengukur, dan mengendalikan kondisi lingkungan secara lebih akurat. Namun, manfaat IoT akan optimal apabila dikaitkan dengan sistem pengambilan keputusan, kebijakan, kapasitas sumber daya manusia, dan tata kelola data yang baik.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM EFISIENSI ENERGI DAN SUMBER DAYA

Artificial Intelligence atau kecerdasan buatan adalah teknologi yang memungkinkan sistem komputer melakukan tugas yang biasanya membutuhkan kecerdasan manusia, seperti mengenali pola, membuat prediksi, mengklasifikasi data, mengoptimalkan

proses, dan memberikan rekomendasi keputusan. Dalam konteks *green innovation*, AI dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi energi, mengurangi penggunaan sumber daya, memperbaiki proses produksi, mengoptimalkan transportasi, dan memprediksi risiko lingkungan.

AI memiliki kemampuan penting dalam menganalisis data yang sangat besar dan kompleks. Dalam sektor energi, AI dapat memprediksi permintaan listrik, mengoptimalkan operasi pembangkit, mengatur distribusi energi, dan membantu integrasi energi terbarukan yang bersifat intermiten. AI juga dapat digunakan pada *smart grid* untuk menyeimbangkan pasokan dan permintaan secara *real-time*. IEA mencatat bahwa AI memiliki potensi besar dalam sistem energi, tetapi pertumbuhan AI juga meningkatkan kebutuhan listrik pusat data sehingga harus dikelola secara bijaksana.

Dalam bangunan, AI dapat digunakan untuk mengatur sistem pendinginan, ventilasi, pencahayaan, dan penggunaan energi berdasarkan pola okupansi dan kondisi lingkungan. Sistem berbasis AI dapat belajar dari perilaku pengguna dan kondisi iklim untuk mengoptimalkan kenyamanan sekaligus menurunkan konsumsi energi. Dalam gedung besar, AI dapat membantu mengidentifikasi pemborosan yang tidak mudah diketahui melalui pemeriksaan manual.

Dalam industri dan manufaktur, AI dapat mendukung efisiensi sumber daya melalui optimasi proses produksi, pengendalian kualitas, *predictive maintenance*, dan pengurangan produk cacat. Produk cacat berarti bahan baku, energi, waktu, dan biaya terbuang. Dengan AI, perusahaan dapat mendeteksi penyimpangan proses lebih awal, mengurangi kerusakan mesin, dan meningkatkan konsistensi kualitas. Hal ini berkontribusi terhadap *cleaner production* dan *green manufacturing*.

Dalam transportasi, AI dapat digunakan untuk mengoptimalkan rute, mengurangi kemacetan, mengatur sistem

transportasi publik, memprediksi permintaan perjalanan, dan meningkatkan efisiensi logistik. Sistem logistik berbasis AI dapat mengurangi perjalanan kosong, menekan konsumsi bahan bakar, dan memperbaiki pemanfaatan armada. Dalam konteks kota, AI juga dapat membantu manajemen lalu lintas adaptif sehingga emisi dari kendaraan yang berhenti lama dapat dikurangi.

Dalam pengelolaan sumber daya alam, AI dapat digunakan untuk memantau tutupan lahan, mendeteksi deforestasi, memprediksi kekeringan, mengidentifikasi pencemaran, dan mengelola irigasi. Citra satelit, sensor lapangan, dan data cuaca dapat dianalisis dengan AI untuk membantu pemerintah dan masyarakat mengambil keputusan lingkungan. Dengan demikian, AI dapat memperkuat kapasitas monitoring ekologis pada skala wilayah.

Namun, AI juga memiliki risiko lingkungan. Model AI besar membutuhkan pusat data, energi listrik, air pendingin, perangkat keras, dan mineral kritis. UNEP mengingatkan bahwa AI memiliki jejak lingkungan melalui konsumsi energi, penggunaan air, penambangan material, emisi, dan limbah elektronik, sehingga pengembangannya harus diarahkan pada penggunaan yang lebih bertanggung jawab. Oleh karena itu, AI untuk *green innovation* harus mempertimbangkan efisiensi model, sumber energi pusat data, dan manfaat lingkungan yang benar-benar terukur.

Dengan demikian, AI merupakan teknologi yang sangat potensial untuk meningkatkan efisiensi energi dan sumber daya, tetapi tidak boleh dipandang sebagai solusi otomatis. AI harus diarahkan pada masalah keberlanjutan yang jelas, didukung data berkualitas, diawasi secara etis, dan dievaluasi dampak lingkungannya. Dalam kerangka *green innovation and technology management*, AI adalah alat strategis yang membutuhkan manajemen teknologi dan tata kelola keberlanjutan.

BIG DATA UNTUK PENGAMBILAN KEPUTUSAN BERKELANJUTAN

Big data adalah kumpulan data dalam jumlah sangat besar, beragam, cepat berubah, dan memerlukan teknologi khusus untuk penyimpanan, pengolahan, analisis, serta interpretasi. Dalam konteks keberlanjutan, *big data* dapat berasal dari sensor lingkungan, citra satelit, transaksi energi, data transportasi, data produksi industri, data cuaca, media sosial, sistem informasi geografis, dan laporan organisasi. Data tersebut dapat digunakan untuk memahami pola lingkungan, perilaku manusia, dan kinerja sistem secara lebih komprehensif.

Pengambilan keputusan berkelanjutan membutuhkan informasi yang akurat dan terintegrasi. Banyak keputusan lingkungan selama ini dilakukan dengan data terbatas, tidak real-time, atau terpisah antarinstansi. *Big data* memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih berbasis bukti karena dapat menggabungkan data lintas sektor dan lintas skala. Misalnya, data konsumsi energi, kepadatan penduduk, suhu udara, dan tutupan vegetasi dapat digunakan bersama untuk merancang strategi pengurangan pulau panas perkotaan.

Dalam sektor energi, *big data* dapat membantu menganalisis pola konsumsi listrik, memprediksi beban puncak, mengoptimalkan jaringan, dan merancang program efisiensi energi. Data dari *smart meter* dapat menunjukkan kapan dan di mana konsumsi listrik paling tinggi. Informasi ini dapat digunakan untuk menetapkan tarif berbasis waktu, mengatur *demand response*, atau merancang edukasi hemat energi. Dengan demikian, *big data* membantu sistem energi menjadi lebih efisien dan adaptif.

Dalam perencanaan kota, *big data* dapat digunakan untuk menganalisis mobilitas penduduk, kualitas udara, penggunaan ruang publik, risiko banjir, kebutuhan transportasi, dan distribusi fasilitas kota. Data ini membantu perencana kota membuat

keputusan yang lebih tepat terkait jalur transportasi publik, ruang terbuka hijau, drainase, kawasan rawan bencana, dan lokasi fasilitas umum. Namun, penggunaan *big data* dalam kota harus memperhatikan privasi, etika, dan keadilan akses.

Dalam industri, *big data* dapat digunakan untuk mengintegrasikan data produksi, energi, bahan baku, limbah, kualitas, dan rantai pasok. Analisis data tersebut dapat membantu perusahaan mengetahui titik pemborosan, menentukan prioritas efisiensi, dan menyusun laporan keberlanjutan. *Big data* juga dapat membantu perusahaan memenuhi tuntutan ESG karena pelaporan keberlanjutan semakin membutuhkan data yang konsisten, terukur, dan dapat diverifikasi.

UNEP menyatakan bahwa transformasi digital dapat membantu mempercepat pencapaian tujuan lingkungan, tetapi perlu disertai upaya mitigasi risiko digitalisasi. Pandangan ini penting karena *big data* bukan hanya persoalan teknis, tetapi juga tata kelola data, kepemilikan data, keamanan, privasi, dan kemampuan menggunakan data untuk kepentingan publik.

Big data juga dapat memperkuat transparansi kebijakan publik. Pemerintah dapat menggunakan dashboard lingkungan untuk memantau emisi, kualitas udara, sampah, air, energi, dan risiko bencana. Data terbuka dapat mendorong partisipasi masyarakat, penelitian akademik, dan inovasi sektor swasta. Namun, kualitas data harus dijaga agar tidak menghasilkan keputusan yang keliru. Data yang besar tidak selalu berarti data yang benar.

Dengan demikian, *big data* merupakan fondasi penting bagi pengambilan keputusan berkelanjutan. *Big data* memungkinkan organisasi dan pemerintah memahami masalah secara lebih detail, memprediksi risiko, dan mengevaluasi dampak kebijakan. Dalam *green innovation*, *big data* membantu mengubah keberlanjutan dari slogan menjadi proses manajemen berbasis bukti.

BLOCKCHAIN UNTUK TRANSPARANSI RANTAI PASOK HIJAU

Blockchain adalah teknologi buku besar terdistribusi yang memungkinkan data transaksi dicatat secara transparan, sulit diubah, dan dapat diverifikasi oleh berbagai pihak dalam jaringan. Dalam konteks rantai pasok hijau, *blockchain* dapat digunakan untuk melacak asal bahan baku, proses produksi, distribusi, sertifikasi, emisi, dan status produk sepanjang rantai nilai. Teknologi ini dianggap potensial karena rantai pasok global sering kompleks, panjang, dan sulit diawasi secara manual.

Transparansi rantai pasok menjadi penting dalam *green innovation* karena banyak dampak lingkungan produk terjadi di luar perusahaan utama. Bahan baku dapat berasal dari pemasok yang berbeda, diproses di berbagai lokasi, dan didistribusikan melalui jaringan logistik internasional. Tanpa sistem pelacakan yang baik, perusahaan sulit memastikan apakah bahan baku diperoleh secara legal, apakah pemasok mematuhi standar lingkungan, atau apakah klaim produk hijau dapat dipertanggungjawabkan.

Blockchain dapat membantu meningkatkan kepercayaan karena setiap transaksi atau perubahan status produk dapat dicatat dan diverifikasi. Misalnya, produk pertanian dapat dilacak dari petani, pengumpul, pengolah, distributor, hingga konsumen. Produk kayu dapat dilacak dari sumber legal hingga produk akhir. Material daur ulang dapat dilacak untuk memastikan kandungan daur ulangnya benar. Dalam konteks ESG, *blockchain* dapat mendukung bukti keterlacakan yang lebih kuat.

World Economic Forum menekankan bahwa digitalisasi rantai pasok dapat mendukung transparansi dan membantu pelaku usaha kecil serta petani dalam meningkatkan keterlibatan pada proses perdagangan dan rantai nilai. Walaupun penerapannya membutuhkan kesiapan institusi dan infrastruktur, digitalisasi

rantai pasok dapat memperbaiki visibilitas informasi yang sebelumnya terfragmentasi.

Namun, *blockchain* bukan solusi otomatis untuk seluruh masalah rantai pasok hijau. Data yang dimasukkan ke *blockchain* tetap harus benar. Jika data awal salah atau dimanipulasi, *blockchain* hanya menyimpan kesalahan tersebut secara permanen. Oleh karena itu, *blockchain* membutuhkan sistem verifikasi lapangan, audit, sensor, sertifikasi, dan tata kelola data yang baik. Teknologi tidak dapat menggantikan sepenuhnya integritas kelembagaan.

Selain itu, *blockchain* memiliki tantangan teknis dan lingkungan. Beberapa sistem *blockchain*, terutama yang menggunakan mekanisme konsensus boros energi, dapat menimbulkan jejak karbon tinggi. Namun, teknologi *blockchain* yang lebih efisien dan berbasis mekanisme konsensus hemat energi dapat mengurangi persoalan tersebut. Oleh sebab itu, penerapan *blockchain* untuk rantai pasok hijau harus memilih arsitektur teknologi yang sesuai dengan prinsip keberlanjutan.

Penelitian kritis tentang *blockchain* dan keberlanjutan rantai pasok juga mengingatkan bahwa klaim transparansi digital perlu dianalisis secara hati-hati. *Blockchain* dapat memperkuat pelacakan, tetapi tidak selalu menyelesaikan persoalan ketimpangan kekuasaan, ketidakadilan perdagangan, atau lemahnya pengawasan di tingkat lokal. Dengan demikian, *blockchain* harus dilihat sebagai alat pendukung, bukan pengganti tata kelola keberlanjutan.

Dengan demikian, *blockchain* memiliki potensi besar untuk meningkatkan transparansi rantai pasok hijau apabila diterapkan bersama verifikasi, standar, audit, dan partisipasi pemangku kepentingan. Dalam *green innovation and technology management*, *blockchain* relevan sebagai teknologi tata kelola yang membantu organisasi membuktikan klaim hijau, mengurangi *greenwashing*, dan memperkuat kepercayaan pasar.

DIGITAL TWIN UNTUK SIMULASI TEKNOLOGI DAN INFRASTRUKTUR

Digital twin atau kembaran digital adalah representasi virtual dari objek, sistem, proses, bangunan, infrastruktur, kota, atau rantai pasok yang diperbarui dengan data nyata. Digital twin memungkinkan pengguna memantau kondisi aktual, mensimulasikan skenario, memprediksi perubahan, dan menguji keputusan sebelum diterapkan di dunia nyata. Dalam konteks *green innovation*, *digital twin* sangat penting karena dapat membantu mengurangi risiko, biaya, dan pemborosan dalam pengembangan teknologi serta pengelolaan infrastruktur.

Dalam industri manufaktur, *digital twin* dapat digunakan untuk mensimulasikan proses produksi, aliran material, konsumsi energi, dan kinerja mesin. Sebelum perubahan diterapkan di pabrik, perusahaan dapat menguji skenario melalui model digital. Misalnya, perusahaan dapat membandingkan penggunaan mesin baru, perubahan jadwal produksi, pengurangan suhu proses, atau penggantian material. Dengan simulasi tersebut, keputusan dapat dibuat lebih akurat dan risiko kegagalan dapat dikurangi.

Dalam bangunan, *digital twin* dapat digunakan untuk memantau energi, air, suhu, okupansi, kualitas udara, dan kondisi peralatan. Model digital bangunan dapat membantu pengelola melakukan optimasi pendinginan, pencahayaan, ventilasi, dan pemeliharaan. Pada gedung besar, *digital twin* dapat mengurangi biaya operasional dan meningkatkan kenyamanan pengguna. Digital twin juga dapat digunakan sejak tahap desain untuk membandingkan kinerja energi berbagai alternatif rancangan.

Dalam infrastruktur kota, *digital twin* dapat digunakan untuk memodelkan transportasi, banjir, drainase, kualitas udara, jaringan energi, ruang terbuka hijau, dan pertumbuhan kawasan. Pemerintah kota dapat menggunakan *digital twin* untuk menguji dampak kebijakan, misalnya penambahan jalur transportasi publik,

pembangunan taman resapan, perubahan tata guna lahan, atau pengaturan lalu lintas. Dengan cara ini, kota dapat merencanakan kebijakan berbasis simulasi sebelum mengeluarkan biaya besar di lapangan.

Dalam sektor energi, digital twin dapat digunakan untuk memantau pembangkit, jaringan listrik, turbin angin, panel surya, baterai, dan *smart grid*. *Digital twin* membantu memprediksi kerusakan, mengoptimalkan operasi, dan meningkatkan integrasi energi terbarukan. Dalam sistem energi yang semakin kompleks, *digital twin* memberikan kemampuan melihat sistem secara menyeluruh dan melakukan intervensi secara lebih tepat.

Digital twin juga relevan dengan ekonomi sirkular. *Digital twin* dapat menyimpan informasi tentang material, komponen, umur pakai, perawatan, dan potensi daur ulang suatu produk atau bangunan. Kajian terbaru menekankan bahwa *digital twin* dapat menjadi fondasi penting bagi ekonomi sirkular karena informasi yang akurat diperlukan untuk memperpanjang umur produk, mendukung penggunaan kembali, dan meningkatkan kemampuan daur ulang.

Namun, penerapan *digital twin* membutuhkan data berkualitas, sensor, perangkat lunak, kompetensi teknis, interoperabilitas sistem, dan keamanan data. Model digital yang tidak diperbarui dengan data akurat dapat menghasilkan simulasi yang keliru. Selain itu, biaya pengembangan digital twin dapat cukup tinggi, terutama untuk organisasi kecil atau pemerintah daerah dengan kapasitas terbatas. Oleh karena itu, penerapan digital twin perlu disesuaikan dengan skala kebutuhan.

Dengan demikian, digital twin merupakan teknologi strategis untuk simulasi teknologi dan infrastruktur dalam *green innovation*. *Digital twin* membantu organisasi dan pemerintah memahami sistem kompleks, menguji skenario, mengurangi pemborosan, dan meningkatkan kinerja keberlanjutan. Dalam perspektif manajemen teknologi, *digital twin* menjadi alat

penghubung antara data, desain, operasi, dan keputusan berkelanjutan.

PELUANG DAN RISIKO TEKNOLOGI DIGITAL DALAM INOVASI HIJAU

Teknologi digital membuka peluang besar bagi *green innovation* karena dapat meningkatkan efisiensi, transparansi, prediksi, koordinasi, dan partisipasi. IoT memungkinkan monitoring lingkungan secara *real-time*. AI membantu optimasi energi dan sumber daya. *Big data* mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti. *Blockchain* meningkatkan transparansi rantai pasok. *Digital twin* memungkinkan simulasi sebelum implementasi. Dengan demikian, teknologi digital dapat mempercepat transisi menuju sistem ekonomi dan lingkungan yang lebih berkelanjutan.

Peluang pertama adalah peningkatan efisiensi sumber daya. Teknologi digital membantu organisasi menggunakan energi, air, bahan baku, dan waktu secara lebih tepat. Dalam industri, digitalisasi dapat mengurangi produk cacat dan *downtime*. Dalam bangunan, digitalisasi dapat mengatur penggunaan energi berdasarkan okupansi. Dalam kota, digitalisasi dapat mengoptimalkan transportasi, air, sampah, dan ruang publik. Efisiensi ini berkontribusi langsung terhadap pengurangan emisi dan limbah.

Peluang kedua adalah peningkatan transparansi dan akuntabilitas. Dengan data digital, organisasi dapat menunjukkan kinerja lingkungan secara lebih terukur. Pelaporan ESG, audit energi, jejak karbon, dan keterlacakan rantai pasok dapat diperkuat melalui sistem digital. Hal ini penting untuk mengurangi *greenwashing* dan meningkatkan kepercayaan publik. Dalam era keberlanjutan, klaim hijau harus dibuktikan dengan data yang dapat diverifikasi.

Peluang ketiga adalah perluasan akses inovasi hijau. Platform digital dapat menghubungkan masyarakat dengan produk ramah lingkungan, layanan perbaikan, bank sampah, transportasi publik, energi terbarukan, dan pasar material daur ulang. Bagi UMKM, teknologi digital dapat membantu pemasaran produk hijau, pencatatan efisiensi, akses pembiayaan, dan integrasi dengan rantai pasok berkelanjutan. Dengan demikian, digitalisasi dapat memperluas partisipasi masyarakat dalam ekonomi hijau.

Namun, teknologi digital juga memiliki risiko lingkungan. Pusat data dan jaringan digital membutuhkan listrik dalam jumlah besar. Perangkat elektronik membutuhkan mineral kritis dan menghasilkan limbah elektronik. AI berskala besar dapat meningkatkan konsumsi energi dan air. IEA memperkirakan konsumsi listrik pusat data global akan meningkat cepat hingga 2030, sehingga digitalisasi perlu didukung energi bersih, efisiensi pusat data, dan tata kelola energi yang baik.

Risiko berikutnya adalah kesenjangan digital. Tidak semua masyarakat, UMKM, pemerintah daerah, atau organisasi memiliki akses yang sama terhadap internet, perangkat, data, dan kompetensi digital. Jika tidak dikelola, *green digital innovation* dapat memperlebar ketimpangan antara wilayah maju dan tertinggal, perusahaan besar dan UMKM, serta kelompok berpendapatan tinggi dan rendah. Oleh karena itu, transformasi digital hijau harus memperhatikan inklusi digital.

Risiko lain adalah keamanan data, privasi, dan ketergantungan teknologi. Sistem *smart city*, *smart building*, *smart grid*, dan IoT mengumpulkan banyak data pengguna serta infrastruktur. Data tersebut harus dilindungi agar tidak disalahgunakan. Selain itu, ketergantungan berlebihan terhadap sistem digital dapat meningkatkan kerentanan jika terjadi serangan siber, kegagalan sistem, atau gangguan jaringan. Oleh sebab itu, tata kelola digital menjadi bagian penting dari *green innovation*.

Dengan demikian, teknologi digital memiliki peluang besar sekaligus risiko nyata dalam inovasi hijau. Manfaat digitalisasi tidak otomatis terjadi, tetapi harus dirancang melalui prinsip keberlanjutan, efisiensi energi, etika data, inklusi sosial, dan tata kelola yang baik. Di sini teknologi digital diposisikan sebagai alat strategis yang harus digunakan untuk memperkuat keberlanjutan, bukan sekadar mempercepat konsumsi dan modernisasi teknologis.



BAB 12

LIFE CYCLE ASSESSMENT DAN CARBON FOOTPRINT

Bab ini membahas Life Cycle Assessment (LCA) dan Carbon Footprint sebagai perangkat analitis penting dalam *green innovation and technology management*. Dalam konteks manajemen teknologi hijau, inovasi tidak cukup hanya dinilai dari efisiensi teknis, nilai ekonomi, atau keunggulan pasar, tetapi juga perlu dinilai dari dampak lingkungannya sepanjang siklus hidup. Oleh karena itu, LCA dan carbon footprint menjadi pendekatan ilmiah untuk memahami hubungan antara produk, proses, teknologi, konsumsi energi, emisi, penggunaan sumber daya, limbah, serta keputusan strategis organisasi.

LCA memberikan pandangan menyeluruh terhadap dampak lingkungan dari suatu produk atau teknologi sejak tahap pengambilan bahan baku, produksi, distribusi, penggunaan, hingga akhir masa pakai. Sementara itu, *carbon footprint* lebih spesifik berfokus pada emisi gas rumah kaca yang dinyatakan dalam satuan karbon dioksida ekuivalen atau CO₂-eq. Keduanya saling melengkapi: LCA memberikan gambaran multi-dampak lingkungan, sedangkan *carbon footprint* memberikan fokus khusus pada kontribusi terhadap perubahan iklim. Standar ISO 14040 dan ISO 14044 menjadi rujukan utama dalam LCA, sedangkan ISO

14067 digunakan untuk kuantifikasi dan pelaporan jejak karbon produk secara konsisten dengan prinsip LCA

PENGERTIAN LIFE CYCLE ASSESSMENT

Life Cycle Assessment atau LCA adalah metode sistematis untuk mengevaluasi aspek lingkungan dan potensi dampak lingkungan dari suatu produk, proses, jasa, atau teknologi sepanjang siklus hidupnya. Istilah “siklus hidup” mengacu pada seluruh tahapan yang dilalui oleh suatu produk, mulai dari ekstraksi bahan baku, pengolahan material, proses manufaktur, distribusi, penggunaan, pemeliharaan, hingga pembuangan, daur ulang, atau pemulihan energi pada akhir masa pakai. Dengan demikian, LCA membantu menghindari penilaian lingkungan yang parsial karena suatu produk yang tampak ramah lingkungan pada tahap penggunaan belum tentu memiliki dampak rendah pada tahap produksi atau pembuangan (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

Dalam pendekatan LCA, produk dipahami sebagai suatu sistem yang memiliki *input* dan *output*. *Input* dapat berupa bahan baku, energi, air, bahan kimia, dan sumber daya lain, sedangkan *output* dapat berupa produk utama, produk samping, emisi udara, limbah cair, limbah padat, serta pelepasan polutan ke lingkungan. Analisis ini memungkinkan peneliti dan manajer teknologi untuk mengidentifikasi titik kritis atau *environmental hotspot* yang memberikan kontribusi terbesar terhadap beban lingkungan. ISO 14040 menjelaskan bahwa LCA mencakup definisi tujuan dan ruang lingkup, analisis inventori, penilaian dampak, interpretasi hasil, pelaporan, serta tinjauan kritis.

LCA berbeda dengan audit lingkungan konvensional karena tidak hanya memeriksa kepatuhan suatu fasilitas terhadap regulasi, tetapi menilai dampak lingkungan secara menyeluruh dari suatu sistem produk. Sebagai contoh, dalam industri manufaktur, audit lingkungan mungkin hanya melihat emisi

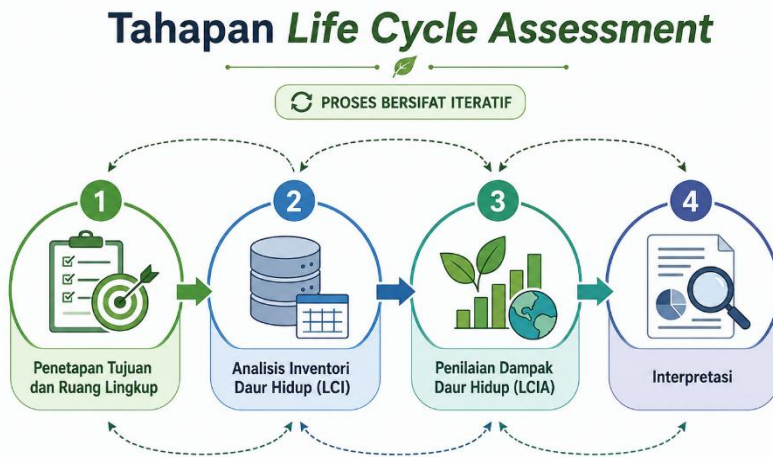
pabrik, sedangkan LCA juga mempertimbangkan emisi dari pemasok bahan baku, transportasi, penggunaan produk oleh konsumen, dan pengelolaan akhir masa pakai. Oleh karena itu, LCA sangat relevan untuk pengembangan teknologi hijau, ekonomi sirkular, desain produk berkelanjutan, dan strategi dekarbonisasi rantai pasok (Baumann & Tillman, 2004; Finnveden et al., 2009).

Secara konseptual, LCA berfungsi sebagai alat untuk mencegah terjadinya *burden shifting*, yaitu perpindahan beban lingkungan dari satu tahap siklus hidup ke tahap lain, dari satu jenis dampak ke dampak lain, atau dari satu wilayah geografis ke wilayah lain. Misalnya, penggunaan material ringan pada kendaraan dapat mengurangi konsumsi bahan bakar saat kendaraan digunakan, tetapi proses produksi material tersebut mungkin membutuhkan energi tinggi dan menghasilkan emisi besar. Dengan LCA, keputusan desain tidak hanya didasarkan pada satu indikator, melainkan pada evaluasi yang lebih menyeluruh (Guinée, 2002; Hauschild et al., 2018).

Dalam konteks *green innovation and technology management*, LCA dapat diposisikan sebagai instrumen evaluasi strategis. Teknologi baru tidak hanya dinilai dari kemampuan menghasilkan efisiensi biaya atau peningkatan produktivitas, tetapi juga dari kemampuannya mengurangi emisi, menghemat energi, menurunkan konsumsi air, mengurangi limbah, serta memperpanjang umur guna material. Oleh sebab itu, LCA membantu organisasi memastikan bahwa inovasi teknologi benar-benar menghasilkan nilai keberlanjutan, bukan sekadar memindahkan dampak lingkungan ke tahapan lain dalam rantai nilai (Schaltegger, Hansen, & Lüdeke-Freund, 2016).

Di Indonesia, penggunaan LCA semakin berkembang dalam penelitian industri, energi, pangan, semen, pengolahan air, pertanian, dan agroindustri. Beberapa studi nasional menggunakan pendekatan *gate-to-gate*, *cradle-to-gate*, maupun *cradle-to-grave* untuk mengukur dampak lingkungan proses produksi dan

mengidentifikasi alternatif pengurangan beban lingkungan. Misalnya, penelitian pada proses produksi semen menggunakan LCA untuk menilai dampak proses produksi dan merumuskan strategi pengurangan emisi; studi lain pada industri pangan dan agroindustri juga menunjukkan bahwa LCA dapat membantu mengidentifikasi tahapan produksi yang paling dominan terhadap emisi dan penggunaan energi.



Gambar 20 Tahapan *life cycle assesement*.

Tahapan LCA secara umum mengikuti kerangka ISO 14040 dan ISO 14044, yaitu: pertama, penentuan tujuan dan ruang lingkup; kedua, analisis inventori siklus hidup atau *life cycle inventory analysis*; ketiga, penilaian dampak siklus hidup atau *life cycle impact assessment*; dan keempat, interpretasi hasil. Keempat tahap tersebut bersifat iteratif, artinya hasil dari satu tahap dapat menyebabkan penyesuaian pada tahap lain. ISO 14044 menjelaskan bahwa LCA juga mencakup aspek pelaporan, tinjauan kritis, keterbatasan studi, serta hubungan antar fase LCA.

Tahap pertama adalah penentuan tujuan dan ruang lingkup. Pada tahap ini, peneliti atau organisasi harus menjelaskan

alasan dilakukannya LCA, audiens yang dituju, jenis keputusan yang akan didukung, serta apakah hasil studi akan digunakan untuk kepentingan internal atau klaim eksternal. Ruang lingkup mencakup penetapan fungsi produk, unit fungsional, batas sistem, asumsi, kriteria alokasi, kategori dampak yang dinilai, metode penilaian dampak, dan kebutuhan data. Unit fungsional sangat penting karena menjadi dasar perbandingan antarproduk atau teknologi, misalnya “1 kg produk”, “1 kWh listrik”, “1 m² bangunan selama 50 tahun”, atau “1 km layanan transportasi” (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

Tahap kedua adalah *life cycle inventory* atau LCI. Pada tahap ini dilakukan pengumpulan dan perhitungan data input-output dari sistem produk. Data input dapat berupa konsumsi energi, bahan baku, air, bahan tambahan, bahan bakar, dan transportasi. Data output dapat berupa produk, emisi CO₂, CH₄, N₂O, SO₂, NO_x, partikulat, limbah cair, limbah padat, serta residu lain. Kualitas data menjadi aspek penting karena hasil LCA sangat bergantung pada representativitas, kelengkapan, konsistensi, ketepatan waktu, dan keandalan data yang digunakan (Frischknecht et al., 2007; Weidema et al., 2013).

Tahap ketiga adalah *life cycle impact assessment* atau LCIA. Pada tahap ini, data inventori diterjemahkan menjadi kategori dampak lingkungan, seperti perubahan iklim, asidifikasi, eutrofikasi, pembentukan ozon fotokimia, toksisitas manusia, ekotoksitas, penipisan sumber daya, penggunaan air, dan penggunaan lahan. Metode LCIA seperti ReCiPe 2016 mengubah data emisi dan ekstraksi sumber daya menjadi skor dampak pada tingkat *midpoint* dan *endpoint*. ReCiPe 2016 banyak digunakan karena menyediakan pendekatan yang harmonis untuk mengonversi inventori siklus hidup menjadi indikator dampak lingkungan yang lebih mudah dianalisis.

Tahap keempat adalah interpretasi hasil. Interpretasi bertujuan untuk mengidentifikasi temuan utama, mengevaluasi

konsistensi hasil, melakukan analisis sensitivitas, memahami ketidakpastian, dan menyusun rekomendasi perbaikan. Pada tahap ini, peneliti perlu menjelaskan bagian mana dari siklus hidup yang memberikan kontribusi terbesar terhadap dampak lingkungan. Misalnya, pada produk berbasis energi, tahap penggunaan mungkin menjadi penyumbang emisi terbesar; sedangkan pada produk pertanian, tahap budidaya, pupuk, dan perubahan penggunaan lahan dapat menjadi faktor dominan (Finnveden et al., 2009; Hauschild et al., 2018).

Dalam praktik manajemen teknologi, tahapan LCA tidak boleh dipahami sebagai prosedur teknis semata, tetapi sebagai proses pembelajaran organisasi. Setiap tahap menghasilkan informasi yang dapat digunakan untuk desain ulang produk, substitusi material, efisiensi energi, pengurangan limbah, peningkatan sistem logistik, pemilihan pemasok, hingga perencanaan model bisnis sirkular. Dengan demikian, LCA berfungsi sebagai jembatan antara analisis ilmiah, pengambilan keputusan manajerial, dan strategi inovasi hijau (Baumann & Tillman, 2004; Schaltegger et al., 2016).

ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN PRODUK DAN TEKNOLOGI

Analisis dampak lingkungan produk dan teknologi merupakan bagian penting dari LCA karena membantu memahami konsekuensi ekologis dari aktivitas produksi dan konsumsi. Produk dan teknologi tidak hanya menghasilkan manfaat ekonomi, tetapi juga menimbulkan tekanan terhadap lingkungan melalui konsumsi energi, eksploitasi bahan baku, emisi gas rumah kaca, pencemaran udara, pencemaran air, produksi limbah, dan perubahan penggunaan lahan. Oleh karena itu, analisis dampak lingkungan diperlukan untuk menilai apakah suatu teknologi benar-benar dapat dikategorikan sebagai teknologi hijau atau

hanya memiliki citra hijau secara terbatas (Guinée, 2002; Hauschild et al., 2018).

Dalam LCA, dampak lingkungan dinilai berdasarkan kategori dampak yang dipilih sesuai tujuan studi. Kategori dampak yang umum digunakan antara lain *global warming potential*, *acidification potential*, *eutrophication potential*, *photochemical ozone formation*, *human toxicity*, *freshwater ecotoxicity*, *land use*, *water depletion*, dan *resource depletion*. Pemilihan kategori dampak harus disesuaikan dengan karakteristik produk atau teknologi yang dikaji. Misalnya, teknologi energi terbarukan perlu dinilai dari emisi karbon, penggunaan material kritis, dampak lahan, dan potensi limbah akhir masa pakai (Finnveden et al., 2009; Huijbregts et al., 2017).

Analisis dampak lingkungan juga menuntut pemahaman terhadap batas sistem. Pendekatan *cradle-to-grave* mencakup seluruh siklus hidup dari ekstraksi bahan baku hingga akhir masa pakai. Pendekatan *cradle-to-gate* mencakup tahap dari bahan baku hingga produk keluar dari pabrik. Pendekatan *gate-to-gate* hanya menilai proses dalam batas fasilitas tertentu. Pemilihan batas sistem harus dijelaskan secara transparan agar hasil LCA dapat ditafsirkan secara benar dan tidak menyesatkan (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

Dalam konteks teknologi hijau, analisis dampak lingkungan dapat digunakan untuk membandingkan beberapa alternatif teknologi. Misalnya, organisasi dapat membandingkan penggunaan bahan bakar fosil dengan biomassa, kemasan plastik konvensional dengan bioplastik, atau sistem produksi linear dengan sistem produksi sirkular. Namun, hasil perbandingan tersebut harus memperhatikan unit fungsional yang sama, kualitas data yang setara, serta metode LCIA yang konsisten. Tanpa kesetaraan metodologis, perbandingan teknologi dapat menghasilkan kesimpulan yang bias (Baumann & Tillman, 2004; Hauschild et al., 2018).

Salah satu manfaat utama analisis dampak lingkungan adalah identifikasi *hotspot*. Hotspot adalah tahapan, aktivitas, bahan, atau proses yang memberikan kontribusi besar terhadap dampak lingkungan total. Setelah hotspot diketahui, organisasi dapat memprioritaskan intervensi, seperti mengganti bahan baku, meningkatkan efisiensi energi, mengurangi transportasi, memilih pemasok rendah emisi, memperbaiki proses produksi, atau merancang sistem daur ulang. Studi LCA pada berbagai sektor di Indonesia menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat membantu menemukan bagian proses yang perlu dioptimalkan untuk menurunkan beban lingkungan.

Analisis dampak lingkungan produk dan teknologi juga penting dalam pengembangan kebijakan publik dan standar industri. Pemerintah dapat menggunakan hasil LCA untuk menetapkan kebijakan ekolabel, insentif teknologi bersih, pengadaan barang hijau, standar emisi, serta strategi ekonomi sirkular. Bagi perusahaan, hasil LCA dapat digunakan untuk mendukung klaim lingkungan, laporan keberlanjutan, pengembangan *environmental product declaration*, dan komunikasi nilai hijau kepada konsumen. Dengan demikian, analisis dampak lingkungan memiliki fungsi ilmiah, manajerial, regulatif, dan komunikatif (UNEP, 2011; ISO, 2006b).

PENGERTIAN CARBON FOOTPRINT

Carbon footprint atau jejak karbon adalah ukuran jumlah emisi gas rumah kaca yang dihasilkan secara langsung maupun tidak langsung oleh suatu produk, proses, aktivitas, organisasi, wilayah, atau individu. Emisi tersebut umumnya dinyatakan dalam satuan karbon dioksida ekuivalen atau CO₂-eq agar berbagai gas rumah kaca seperti CO₂, CH₄, N₂O, dan gas lainnya dapat dibandingkan berdasarkan potensi pemanasan globalnya. IPCC menggunakan konsep CO₂-eq dengan metrik *global warming potential* dalam

horizon waktu tertentu, khususnya GWP100, untuk mengagregasikan emisi berbagai gas rumah kaca.

Carbon footprint memiliki hubungan erat dengan LCA, tetapi cakupannya lebih spesifik. Jika LCA menilai berbagai kategori dampak lingkungan, *carbon footprint* berfokus pada dampak perubahan iklim. Oleh karena itu, *carbon footprint* dapat dipahami sebagai salah satu dimensi dari LCA yang berkaitan dengan emisi gas rumah kaca sepanjang siklus hidup. ISO 14067 menetapkan prinsip, persyaratan, dan pedoman kuantifikasi serta pelaporan *carbon footprint* produk secara konsisten dengan ISO 14040 dan ISO 14044.

Dalam konteks produk, *carbon footprint* dapat dihitung mulai dari bahan baku, produksi, distribusi, penggunaan, hingga akhir masa pakai. Pendekatan ini sering disebut *product carbon footprint*. Sebagai contoh, jejak karbon suatu produk makanan dapat mencakup emisi dari budidaya bahan baku, penggunaan pupuk, energi pengolahan, transportasi, pengemasan, penyimpanan dingin, konsumsi, dan pengelolaan limbah kemasan. Dengan cara ini, organisasi dapat mengetahui tahapan mana yang paling besar kontribusinya terhadap emisi karbon (Wiedmann & Minx, 2008; ISO, 2018).

Dalam konteks organisasi, *carbon footprint* digunakan untuk menghitung emisi dari aktivitas operasional perusahaan. Greenhouse Gas Protocol membagi emisi organisasi ke dalam Scope 1, Scope 2, dan Scope 3. *Scope 1* adalah emisi langsung dari sumber yang dimiliki atau dikendalikan organisasi, seperti pembakaran bahan bakar di fasilitas perusahaan. *Scope 2* adalah emisi tidak langsung dari pembelian listrik, panas, atau uap. *Scope 3* adalah emisi tidak langsung lainnya dalam rantai nilai, seperti bahan baku, transportasi, perjalanan dinas, penggunaan produk, dan akhir masa pakai produk (WRI & WBCSD, 2004; WRI & WBCSD, 2011).

Carbon footprint menjadi instrumen penting dalam agenda dekarbonisasi karena memberikan dasar kuantitatif bagi organisasi untuk menetapkan target pengurangan emisi. Tanpa pengukuran yang jelas, strategi rendah karbon mudah berubah menjadi klaim normatif yang tidak dapat diverifikasi. Oleh karena itu, pengukuran jejak karbon berperan dalam transparansi, akuntabilitas, pelaporan keberlanjutan, pengelolaan risiko iklim, dan pemenuhan tuntutan pasar global yang semakin menekankan produk rendah karbon (GHG Protocol, 2011; ISO, 2018).

Dalam manajemen inovasi hijau, carbon footprint membantu organisasi memahami bahwa emisi karbon bukan hanya persoalan teknis, tetapi juga persoalan desain produk, rantai pasok, model bisnis, perilaku konsumen, dan tata kelola organisasi. Inovasi rendah karbon dapat dilakukan melalui efisiensi energi, elektrifikasi proses, pemanfaatan energi terbarukan, substitusi material, desain produk tahan lama, daur ulang, logistik hijau, dan perubahan pola konsumsi. Dengan demikian, carbon footprint menjadi dasar penting bagi integrasi teknologi hijau dengan strategi bisnis berkelanjutan (Bocken et al., 2014; Geissdoerfer et al., 2017).

PENGUKURAN EMISI KARBON PADA PRODUK, PROSES, DAN ORGANISASI

Pengukuran emisi karbon pada produk, proses, dan organisasi membutuhkan batas sistem yang jelas. Pada level produk, batas sistem dapat mencakup *cradle-to-grave*, *cradle-to-gate*, atau *gate-to-gate*. Pada level proses, pengukuran biasanya difokuskan pada aktivitas produksi tertentu, misalnya konsumsi bahan bakar mesin, penggunaan listrik, emisi proses kimia, atau emisi dari limbah. Pada level organisasi, pengukuran mencakup emisi langsung dan tidak langsung sesuai pendekatan Scope 1, Scope 2, dan Scope 3 (WRI & WBCSD, 2004; WRI & WBCSD, 2011).

Langkah awal pengukuran emisi karbon adalah identifikasi sumber emisi. Sumber emisi dapat berasal dari pembakaran bahan bakar fosil, konsumsi listrik, transportasi, proses industri, penggunaan refrigeran, pengolahan limbah, perubahan penggunaan lahan, serta rantai pasok bahan baku. Setelah sumber emisi diidentifikasi, organisasi mengumpulkan data aktivitas, seperti liter bahan bakar, kWh listrik, ton bahan baku, kilometer transportasi, jumlah limbah, atau volume produksi. Data aktivitas ini kemudian dikalikan dengan faktor emisi yang relevan untuk menghasilkan nilai emisi CO₂-eq (IPCC, 2006; WRI & WBCSD, 2004).

Secara sederhana, rumus umum pengukuran emisi karbon adalah: Emisi GRK = Data Aktivitas × Faktor Emisi × GWP. Data aktivitas menunjukkan besaran kegiatan yang menghasilkan emisi, faktor emisi menunjukkan jumlah emisi per satuan aktivitas, dan GWP digunakan untuk mengonversi gas rumah kaca non-CO₂ menjadi CO₂-eq. Misalnya, emisi dari penggunaan listrik dihitung berdasarkan konsumsi listrik dan faktor emisi jaringan listrik; emisi dari bahan bakar dihitung berdasarkan jumlah bahan bakar dan faktor emisi pembakaran. IPCC AR6 menegaskan bahwa agregasi emisi gas rumah kaca menggunakan CO₂-eq bergantung pada metrik emisi yang digunakan dan memiliki keterbatasan yang harus dijelaskan secara transparan.

Pada level produk, pengukuran *carbon footprint* perlu mengikuti prinsip LCA agar tidak hanya menghitung emisi di pabrik, tetapi juga mempertimbangkan emisi hulu dan hilir. Misalnya, produk dengan emisi rendah pada tahap produksi belum tentu rendah karbon jika bahan bakunya berasal dari proses yang sangat intensif energi atau jika produk tersebut menghasilkan emisi besar pada tahap penggunaan. ISO 14067 menekankan bahwa *carbon footprint* produk harus dikuantifikasi dan dilaporkan berdasarkan prinsip yang konsisten dengan LCA, termasuk transparansi, kelengkapan, konsistensi, akurasi, dan relevansi.

Pada level proses, pengukuran emisi karbon berguna untuk mengidentifikasi efisiensi operasional. Proses yang boros energi, memiliki tingkat kehilangan bahan tinggi, menggunakan bahan bakar fosil, atau menghasilkan limbah besar biasanya memiliki jejak karbon lebih tinggi. Dengan pengukuran proses, manajer dapat menentukan prioritas perbaikan, seperti optimasi mesin, pemulihan panas, pengurangan *scrap*, substitusi bahan bakar, digitalisasi monitoring energi, atau penggantian teknologi produksi. Pendekatan ini sangat relevan untuk industri manufaktur, konstruksi, transportasi, pangan, energi, dan pengolahan limbah (Bala et al., 2015; Hauschild et al., 2018).

Pada level organisasi, pengukuran *carbon footprint* menjadi dasar penyusunan inventarisasi emisi, laporan keberlanjutan, target dekarbonisasi, dan *strategi net-zero*. Scope 3 sering menjadi bagian paling kompleks karena melibatkan pemasok, distribusi, penggunaan produk oleh konsumen, dan akhir masa pakai produk. Namun, Scope 3 juga sering menjadi sumber emisi terbesar dalam rantai nilai perusahaan. Oleh karena itu, pengelolaan *carbon footprint* organisasi tidak dapat dilepaskan dari kolaborasi lintas rantai pasok, transparansi data, serta kemitraan dengan pemasok dan pelanggan (GHG Protocol, 2011; CDP, 2023).

STRATEGI PENGURANGAN JEJAK KARBON

Strategi pengurangan jejak karbon harus dimulai dari hasil pengukuran yang akurat. Organisasi perlu mengetahui sumber emisi terbesar sebelum menentukan tindakan pengurangan. Pendekatan ini disebut *hotspot-based decarbonization*, yaitu strategi dekarbonisasi yang memprioritaskan intervensi pada tahapan atau aktivitas dengan kontribusi emisi paling dominan. Tanpa analisis *hotspot*, organisasi dapat melakukan tindakan yang tampak hijau tetapi dampak pengurangan emisinya relatif kecil (WRI & WBCSD, 2011; Hauschild et al., 2018).

Strategi pertama adalah efisiensi energi. Efisiensi energi dapat dilakukan melalui perbaikan mesin, optimasi proses produksi, pemanfaatan sistem kontrol digital, perawatan preventif, pemulihan panas, penggunaan peralatan hemat energi, dan peningkatan efisiensi bangunan. Dalam banyak sektor industri, konsumsi energi merupakan kontributor utama terhadap emisi karbon, terutama jika energi berasal dari bahan bakar fosil atau listrik berbasis batu bara. Oleh karena itu, efisiensi energi sering menjadi strategi awal yang paling rasional karena dapat menurunkan emisi sekaligus mengurangi biaya operasional (IEA, 2021; IPCC, 2023).

Strategi kedua adalah transisi energi terbarukan. Penggunaan listrik dari sumber energi surya, angin, hidro, biomassa berkelanjutan, atau panas bumi dapat mengurangi emisi Scope 2. Pada industri tertentu, transisi energi juga dapat dilakukan melalui elektrifikasi proses, penggunaan boiler listrik, pompa panas, hidrogen hijau, atau bahan bakar rendah karbon. Namun, transisi energi perlu dinilai dengan LCA karena teknologi energi terbarukan tetap memiliki dampak lingkungan pada tahap produksi material, instalasi, pemeliharaan, dan akhir masa pakai (IPCC, 2023; International Energy Agency, 2021).

Strategi ketiga adalah desain produk rendah karbon. Desain produk dapat diarahkan pada pengurangan berat material, peningkatan umur pakai, kemudahan perbaikan, modularitas, penggunaan material daur ulang, pengurangan kemasan, serta desain untuk daur ulang. Prinsip *eco-design* dan *design for environment* membantu mengurangi emisi sejak tahap perancangan, bukan hanya setelah produk diproduksi. Dalam konteks ekonomi sirkular, desain produk juga diarahkan agar material tetap berada dalam sistem ekonomi selama mungkin dan tidak cepat menjadi limbah (Bocken et al., 2014; Geissdoerfer et al., 2017).

Strategi keempat adalah pengelolaan rantai pasok rendah karbon. Banyak produk memiliki jejak karbon besar pada tahap

hulu, terutama dari bahan baku, pemasok, transportasi, dan proses produksi pihak ketiga. Oleh karena itu, perusahaan perlu bekerja sama dengan pemasok untuk meningkatkan efisiensi energi, menggunakan energi terbarukan, mengganti material intensif karbon, mengurangi jarak transportasi, serta meningkatkan transparansi data emisi. Strategi ini menuntut integrasi antara manajemen rantai pasok, pengadaan hijau, audit pemasok, dan kontrak berbasis kinerja lingkungan (Seuring & Müller, 2008; GHG Protocol, 2011).

Strategi kelima adalah pemanfaatan prinsip ekonomi sirkular. Ekonomi sirkular dapat menurunkan jejak karbon melalui penggunaan ulang, perbaikan, remanufaktur, daur ulang, pemulihan material, dan model bisnis berbasis layanan. Pendekatan ini mengurangi kebutuhan bahan baku primer dan energi produksi baru. Namun, strategi sirkular juga harus dievaluasi dengan LCA karena proses daur ulang, transportasi balik, dan pemrosesan ulang tetap membutuhkan energi dan dapat menghasilkan emisi. Oleh karena itu, tidak semua strategi sirkular otomatis lebih rendah karbon; efektivitasnya perlu dibuktikan secara kuantitatif (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr, Reike, & Hekkert, 2017).

Strategi keenam adalah kompensasi karbon atau *carbon offset*, tetapi strategi ini sebaiknya ditempatkan sebagai langkah terakhir setelah pengurangan emisi langsung dilakukan. Offset dapat berupa proyek reforestasi, restorasi ekosistem, energi terbarukan, atau penangkapan karbon. Namun, penggunaan offset harus memenuhi prinsip tambahanitas, permanensi, transparansi, dan verifikasi. Dalam manajemen teknologi hijau, pengurangan emisi pada sumbernya lebih kuat secara strategis daripada sekadar mengandalkan kompensasi karbon, karena pengurangan langsung mencerminkan perubahan sistem produksi dan model bisnis (Fankhauser et al., 2022; IPCC, 2023).

ENVIRONMENTAL PERFORMANCE INDICATOR

Environmental Performance Indicator atau EPI adalah indikator yang digunakan untuk mengukur, mengevaluasi, dan mengomunikasikan kinerja lingkungan organisasi, produk, proses, atau teknologi. Dalam manajemen lingkungan, EPI berfungsi sebagai alat kuantitatif untuk mengetahui apakah suatu organisasi mengalami peningkatan atau penurunan kinerja lingkungan dari waktu ke waktu. ISO 14031 memberikan pedoman evaluasi kinerja lingkungan dan menjelaskan bahwa organisasi dapat menggunakan indikator kinerja berbasis informasi yang andal dan dapat diverifikasi.

EPI dapat dibedakan menjadi indikator kinerja operasional, indikator kinerja manajemen, dan indikator kondisi lingkungan. Indikator kinerja operasional mengukur aspek teknis seperti konsumsi energi per unit produk, konsumsi air per unit produksi, emisi CO₂-eq per ton produk, limbah per unit output, atau tingkat daur ulang material. Indikator kinerja manajemen mengukur upaya organisasi seperti investasi teknologi hijau, jumlah pelatihan lingkungan, kepatuhan regulasi, audit pemasok, atau implementasi sistem manajemen lingkungan. Indikator kondisi lingkungan mengukur perubahan kualitas lingkungan, seperti kualitas udara, kualitas air, kebisingan, atau keanekaragaman hayati (ISO, 2021; Jasch, 2000).

Dalam konteks LCA dan *carbon footprint*, EPI dapat digunakan untuk menerjemahkan hasil analisis lingkungan menjadi ukuran yang mudah dipahami manajemen. Misalnya, hasil LCA menunjukkan bahwa tahap produksi memberikan kontribusi terbesar terhadap *global warming potential*. Informasi tersebut kemudian dapat diubah menjadi indikator kinerja seperti “kg CO₂-eq per unit produk”, “kWh energi per unit produk”, “persentase energi terbarukan”, atau “rasio material daur ulang”. Dengan demikian, EPI menjadi penghubung antara hasil analisis teknis dan

sistem pengendalian manajemen (Henri & Journeault, 2008; ISO, 2021).

EPI yang baik harus memenuhi beberapa kriteria, yaitu relevan, terukur, dapat dibandingkan, mudah dipahami, konsisten, dapat diverifikasi, dan terkait dengan tujuan strategis organisasi. Indikator yang terlalu banyak dapat membingungkan pengambil keputusan, sedangkan indikator yang terlalu sedikit dapat menyederhanakan persoalan secara berlebihan. Oleh karena itu, organisasi perlu memilih indikator yang mencerminkan aspek lingkungan paling signifikan dan sesuai dengan karakteristik industrinya. Misalnya, industri semen perlu memprioritaskan indikator emisi karbon, konsumsi energi, dan penggunaan bahan bakar alternatif; sedangkan industri pangan perlu memperhatikan energi, air, limbah organik, dan rantai pasok bahan baku (Jasch, 2000; Schaltegger & Burritt, 2018).

EPI juga penting mendukung pelaporan keberlanjutan dan komunikasi kepada pemangku kepentingan. Investor, konsumen, pemerintah, dan masyarakat semakin menuntut bukti kuantitatif bahwa organisasi benar-benar melakukan perbaikan lingkungan. Dengan indikator yang jelas, organisasi dapat menunjukkan kemajuan pengurangan emisi, efisiensi sumber daya, penurunan limbah, peningkatan daur ulang, dan kontribusi terhadap target keberlanjutan. Namun, indikator harus dilaporkan secara jujur agar tidak menjadi alat *greenwashing* (GRI, 2021; Schaltegger & Burritt, 2018).

Dalam *green innovation and technology management*, EPI memiliki fungsi strategis sebagai alat pengendalian inovasi. Setiap inovasi teknologi dapat dinilai berdasarkan dampaknya terhadap indikator kinerja lingkungan. Misalnya, penerapan teknologi digital untuk efisiensi energi dapat diukur melalui penurunan kWh per unit output; substitusi material dapat diukur melalui penurunan kg CO₂-eq; dan penerapan ekonomi sirkular dapat diukur melalui peningkatan persentase material yang digunakan

kembali. Dengan demikian, EPI membantu memastikan bahwa inovasi hijau menghasilkan dampak yang terukur dan dapat dipertanggungjawabkan (Bocken et al., 2014; Schaltegger et al., 2016).

PEMANFAATAN LCA DAN CARBON FOOTPRINT DALAM KEPUTUSAN MANAJEMEN

LCA dan *carbon footprint* dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan manajemen karena keduanya menyediakan informasi kuantitatif tentang dampak lingkungan. Dalam manajemen modern, keputusan tidak lagi hanya didasarkan pada biaya, mutu, dan waktu, tetapi juga pada emisi, efisiensi sumber daya, risiko iklim, reputasi, kepatuhan regulasi, dan keberlanjutan rantai nilai. Dengan LCA dan *carbon footprint*, organisasi dapat mengidentifikasi pilihan teknologi yang paling efisien secara lingkungan dan paling sesuai dengan strategi bisnis jangka panjang (Baumann & Tillman, 2004; Hauschild et al., 2018).

Dalam keputusan desain produk, LCA membantu memilih material, bentuk, proses produksi, kemasan, dan skenario akhir masa pakai yang lebih ramah lingkungan. Misalnya, perusahaan dapat membandingkan apakah penggunaan material daur ulang benar-benar menurunkan dampak lingkungan dibandingkan material primer. Perusahaan juga dapat menilai apakah desain produk yang lebih ringan mengurangi emisi transportasi dan penggunaan energi, atau justru meningkatkan dampak pada tahap produksi material. Dengan demikian, LCA mendukung *eco-design* dan inovasi produk berbasis bukti (Bocken et al., 2014; ISO, 2006b).

Dalam keputusan proses produksi, *carbon footprint* membantu manajemen menentukan prioritas efisiensi energi, substitusi bahan bakar, perbaikan mesin, atau transisi ke energi terbarukan. Jika hasil inventarisasi menunjukkan bahwa konsumsi

listrik adalah penyumbang utama emisi, maka strategi pembelian listrik hijau, pemasangan panel surya, atau peningkatan efisiensi peralatan dapat menjadi prioritas. Jika emisi terbesar berasal dari bahan baku, maka manajemen perlu mengubah spesifikasi material atau bekerja sama dengan pemasok rendah karbon (GHG Protocol, 2011; ISO, 2018).

Dalam keputusan rantai pasok, LCA dan *carbon footprint* membantu organisasi memilih pemasok, rute logistik, moda transportasi, dan sistem distribusi yang lebih rendah emisi. Banyak perusahaan menemukan bahwa dampak lingkungan terbesar tidak berada di pabrik sendiri, melainkan pada rantai pasok hulu dan hilir. Oleh karena itu, pengambilan keputusan manajemen harus melibatkan kolaborasi lintas organisasi, transparansi data, dan standar pelaporan yang konsisten. *Greenhouse Gas Protocol Product Standard* menekankan bahwa pemahaman emisi sepanjang siklus hidup produk dapat membantu organisasi memfokuskan upaya pada peluang pengurangan emisi terbesar.

Dalam keputusan investasi teknologi, LCA dapat digunakan untuk mengevaluasi kelayakan lingkungan dari teknologi baru sebelum diterapkan secara luas. Teknologi yang tampak efisien secara operasional perlu diuji apakah benar-benar menghasilkan pengurangan dampak lingkungan sepanjang siklus hidup. Misalnya, kendaraan listrik memiliki emisi operasional rendah, tetapi dampak produksi baterai, sumber listrik, dan pengelolaan baterai akhir masa pakai harus diperhitungkan. Dengan demikian, LCA membantu mencegah keputusan investasi yang hanya didasarkan pada persepsi hijau tanpa analisis menyeluruh (Hawkins et al., 2013; Hauschild et al., 2018).

Dalam keputusan strategis organisasi, LCA dan *carbon footprint* dapat mendukung penyusunan target dekarbonisasi, strategi ESG, laporan keberlanjutan, pengembangan produk hijau, dan kepatuhan terhadap regulasi pasar global. Banyak pasar internasional semakin menuntut informasi emisi produk,

transparansi rantai pasok, dan bukti pengurangan dampak lingkungan. Oleh sebab itu, organisasi yang mampu menggunakan LCA dan *carbon footprint* secara sistematis akan memiliki keunggulan kompetitif dalam menghadapi tuntutan ekonomi rendah karbon (CDP, 2023; Schaltegger & Burritt, 2018).

Pada akhirnya, pemanfaatan LCA dan carbon footprint dalam keputusan manajemen menunjukkan bahwa keberlanjutan bukan sekadar isu teknis atau tanggung jawab sosial, tetapi bagian dari strategi inovasi dan daya saing. Organisasi yang memahami dampak lingkungan siklus hidup dapat merancang produk lebih baik, mengelola risiko lebih efektif, meningkatkan efisiensi, memperkuat reputasi, dan memenuhi tuntutan pemangku kepentingan. Dalam kerangka *green innovation and technology management*, LCA dan *carbon footprint* menjadi instrumen utama untuk menghubungkan sains lingkungan, inovasi teknologi, dan keputusan manajemen berkelanjutan (Porter & Kramer, 2011; Schaltegger et al., 2016).



BAB 13

TECHNOLOGY READINESS LEVEL **DAN PENILAIAN TEKNOLOGI HIJAU**

Dalam pengembangan teknologi hijau, keberhasilan inovasi tidak hanya ditentukan oleh kebaruan ide, tetapi juga oleh tingkat kesiapan teknologi, kelayakan ekonomi, dampak sosial, kontribusi lingkungan, risiko implementasi, dan peluang komersialisasi. Oleh karena itu, TRL dan penilaian teknologi hijau perlu dipahami sebagai perangkat manajerial untuk memastikan bahwa teknologi tidak berhenti pada tahap penelitian, tetapi mampu berkembang menjadi solusi yang dapat diterapkan, diterima pasar, dan berkontribusi terhadap pembangunan berkelanjutan.

Technology Readiness Level pada awalnya berkembang dalam lingkungan teknologi kedirgantaraan, khususnya NASA, untuk mengukur tingkat kematangan teknologi dari tahap konsep awal hingga sistem siap digunakan. Dalam konteks teknologi energi bersih dan teknologi hijau, International Energy Agency juga menggunakan skala TRL untuk memetakan kematangan teknologi dari gagasan awal, prototipe, demonstrasi, komersialisasi, hingga difusi luas di pasar. IEA bahkan menggunakan skala TRL yang diperluas hingga level 11 untuk menggambarkan perjalanan teknologi energi bersih dari ide awal menuju integrasi pasar dalam skala besar.

KONSEP TECHNOLOGY READINESS LEVEL

Technology Readiness Level atau TRL adalah kerangka pengukuran yang digunakan untuk menilai tingkat kematangan suatu teknologi. TRL membantu peneliti, pengembang, manajer, investor, pemerintah, dan industri memahami apakah suatu teknologi masih berada pada tahap ide, validasi laboratorium, prototipe, demonstrasi, atau sudah siap dikomersialisasikan. Dalam manajemen inovasi, TRL berfungsi sebagai bahasa bersama untuk mengurangi ketidakpastian dalam menilai kemajuan teknologi (Mankins, 1995).

Konsep TRL penting karena inovasi teknologi sering kali menghadapi kesenjangan antara hasil penelitian dan penerapan nyata. Banyak teknologi berhasil dibuktikan secara teoritis di laboratorium, tetapi gagal ketika diterapkan pada lingkungan operasional karena faktor biaya, reliabilitas, skala produksi, regulasi, penerimaan pasar, atau risiko teknis. Dengan TRL, organisasi dapat mengetahui posisi teknologi secara lebih objektif sehingga strategi pengembangan dapat disusun berdasarkan tingkat kesiapan aktual, bukan hanya klaim inovatif.

NASA memperkenalkan TRL sebagai alat untuk menilai kematangan teknologi dalam proyek-proyek berisiko tinggi. Kerangka ini kemudian diadopsi secara luas oleh lembaga riset, industri pertahanan, sektor energi, manufaktur, kesehatan, transportasi, dan teknologi lingkungan. Dalam penerapannya, TRL bukan sekadar ukuran teknis, tetapi juga alat tata kelola inovasi untuk menentukan prioritas pendanaan, kebutuhan pengujian, kesiapan prototipe, dan strategi transisi menuju pasar. IEA menjelaskan bahwa TRL memberi gambaran posisi teknologi dalam perjalanan dari ide awal menuju pasar.

Dalam konteks *green innovation and technology management*, TRL menjadi sangat penting karena teknologi hijau sering membutuhkan proses validasi yang lebih kompleks dibandingkan

teknologi konvensional. Teknologi hijau tidak hanya harus berfungsi secara teknis, tetapi juga harus menunjukkan kinerja lingkungan yang lebih baik, efisiensi sumber daya, pengurangan emisi, keamanan penggunaan, kesesuaian regulasi, dan kelayakan ekonomi. Oleh karena itu, TRL perlu diintegrasikan dengan penilaian keberlanjutan agar teknologi tidak hanya matang secara teknis, tetapi juga layak secara ekologis dan sosial.

TRL juga dapat digunakan untuk mengelola risiko investasi. Teknologi pada TRL rendah biasanya memiliki risiko teknis tinggi dan membutuhkan pendanaan riset. Teknologi pada TRL menengah membutuhkan pengembangan prototipe, pengujian lapangan, dan validasi sistem. Teknologi pada TRL tinggi membutuhkan strategi komersialisasi, model bisnis, sertifikasi, pembiayaan, dan pengembangan pasar. Dengan memahami posisi TRL, organisasi dapat menentukan bentuk dukungan yang paling tepat pada setiap tahap pengembangan teknologi.

Dengan demikian, konsep TRL dapat dipahami sebagai instrumen pengambilan keputusan berbasis kematangan teknologi. TRL membantu menjawab pertanyaan mendasar: apakah teknologi tersebut baru berupa konsep, sudah terbukti di laboratorium, telah diuji pada lingkungan nyata, atau sudah siap digunakan oleh industri dan masyarakat. Dalam teknologi hijau, jawaban atas pertanyaan ini sangat penting karena keberhasilan inovasi hijau tidak cukup diukur dari kebaruan ilmiah, tetapi juga dari kesiapan implementasi dan kontribusinya terhadap keberlanjutan.

TAHAPAN KESIAPAN TEKNOLOGI

Tahapan kesiapan teknologi pada umumnya disusun dalam skala bertingkat dari TRL 1 hingga TRL 9. TRL 1 menggambarkan tahap prinsip dasar yang mulai diamati, sedangkan TRL 9 menunjukkan bahwa sistem teknologi telah terbukti beroperasi dalam lingkungan sebenarnya. Setiap level menunjukkan

peningkatan bukti ilmiah, validasi teknis, pengujian sistem, dan kesiapan operasional. Dalam sektor energi bersih, IEA menggunakan skala yang diperluas hingga TRL 11 untuk menggambarkan tahap setelah komersialisasi, yaitu integrasi skala besar dan stabilitas pertumbuhan pasar.

Pada TRL awal, yaitu TRL 1 sampai TRL 3, teknologi masih berada pada tahap penelitian dasar dan pembuktian konsep. Pada tahap ini, peneliti mengidentifikasi prinsip ilmiah, merumuskan aplikasi potensial, dan melakukan eksperimen awal untuk membuktikan bahwa konsep teknologi memiliki kemungkinan untuk dikembangkan. Dalam teknologi hijau, contoh tahap awal ini dapat berupa riset material baru untuk baterai rendah karbon, katalis pengolahan limbah, teknologi penyerapan karbon, biomaterial, atau sistem sensor lingkungan berbasis kecerdasan buatan.

Pada TRL menengah awal, yaitu TRL 4 sampai TRL 5, teknologi mulai divalidasi melalui prototipe di lingkungan laboratorium dan lingkungan yang relevan. Tahap ini sangat penting karena banyak teknologi gagal ketika bergerak dari konsep menuju prototipe. Validasi tidak hanya memeriksa apakah teknologi bekerja, tetapi juga apakah teknologi dapat bekerja secara stabil, aman, dan efisien dalam kondisi yang mendekati kenyataan. Pada teknologi hijau, pengujian ini dapat mencakup efisiensi energi, umur pakai material, kapasitas produksi, konsumsi air, emisi, limbah, dan kebutuhan pemeliharaan.

Pada TRL menengah lanjut, yaitu TRL 6 sampai TRL 7, teknologi diuji melalui demonstrasi prototipe dalam lingkungan yang semakin mendekati kondisi operasional. Tahap ini sering membutuhkan fasilitas uji coba, proyek percontohan, *pilot plant*, atau demonstrasi lapangan. Dalam pengembangan teknologi hijau, tahap ini menjadi krusial karena kinerja lingkungan yang baik di laboratorium belum tentu sama ketika teknologi diterapkan pada skala industri atau lingkungan sosial yang kompleks. Oleh karena

itu, validasi lapangan menjadi bagian penting dari manajemen risiko teknologi.

Pada TRL tinggi, yaitu TRL 8 sampai TRL 9, teknologi telah melalui proses pengujian, validasi, penyempurnaan, dan siap digunakan dalam sistem operasional. Pada tahap ini, organisasi perlu memperhatikan sertifikasi, standar teknis, keamanan, biaya produksi, rantai pasok, kesiapan pengguna, regulasi, dan model bisnis. Teknologi hijau yang mencapai TRL tinggi harus mampu menunjukkan bahwa manfaat lingkungan tidak hanya terjadi pada tahap eksperimen, tetapi juga dapat dipertahankan dalam operasi nyata dan skala pasar.

IEA menambahkan bahwa untuk teknologi energi bersih, perjalanan teknologi tidak selalu berhenti pada TRL 9. Teknologi yang sudah tersedia secara komersial masih dapat membutuhkan integrasi skala besar, peningkatan daya saing, dan pembuktian stabilitas pertumbuhan pasar. Karena itu, skala TRL yang diperluas membantu menjelaskan bahwa komersialisasi awal belum tentu sama dengan adopsi luas. Teknologi rendah karbon sering membutuhkan dukungan kebijakan, pembiayaan, infrastruktur, standar pasar, dan penerimaan sosial sebelum benar-benar memberi dampak besar terhadap transisi energi.

GREEN TECHNOLOGY ASSESSMENT

Green Technology Assessment adalah proses penilaian terhadap teknologi berdasarkan kontribusinya terhadap efisiensi sumber daya, pengurangan emisi, pengurangan pencemaran, keselamatan lingkungan, kelayakan ekonomi, dan manfaat sosial. Penilaian ini bertujuan memastikan bahwa suatu teknologi benar-benar memberikan nilai hijau, bukan hanya memiliki label ramah lingkungan. Dalam konteks manajemen teknologi, penilaian teknologi hijau menjadi alat untuk membandingkan beberapa

alternatif teknologi sebelum organisasi mengambil keputusan investasi atau implementasi.

Teknologi hijau dapat mencakup energi terbarukan, efisiensi energi, teknologi pengolahan limbah, teknologi air bersih, material ramah lingkungan, bangunan hijau, transportasi rendah emisi, pertanian presisi, ekonomi sirkular, digitalisasi lingkungan, serta teknologi pengurangan emisi karbon. OECD menekankan bahwa pengembangan dan penerapan teknologi hijau penting untuk mitigasi dan adaptasi perubahan iklim, pengurangan dampak negatif aktivitas ekonomi terhadap alam, serta pengurangan polusi.

Green Technology Assessment berbeda dari penilaian teknologi konvensional karena memasukkan indikator lingkungan dan keberlanjutan sebagai bagian inti. Penilaian teknologi konvensional sering menekankan kinerja teknis, produktivitas, biaya, dan potensi pasar. Sementara itu, penilaian teknologi hijau menambahkan dimensi emisi, konsumsi energi, konsumsi air, penggunaan material, potensi daur ulang, dampak terhadap biodiversitas, keselamatan pekerja, dan penerimaan masyarakat. Dengan demikian, teknologi hijau harus diuji melalui pendekatan multidimensi.

Dalam praktiknya, *Green Technology Assessment* dapat menggunakan beberapa metode, seperti *Life Cycle Assessment*, *carbon footprint analysis*, *cost-benefit analysis*, *techno-economic analysis*, *environmental risk assessment*, *multi-criteria decision analysis*, dan *sustainability assessment*. Penggunaan metode tersebut tergantung pada jenis teknologi, tujuan penilaian, ketersediaan data, dan kebutuhan pengambil keputusan. Untuk teknologi pada tahap awal, penilaian mungkin lebih bersifat kualitatif dan eksploratif; sedangkan untuk teknologi pada tahap lanjut, penilaian harus semakin kuantitatif dan berbasis data operasional.

Penelitian internasional menunjukkan bahwa indikator teknologi hijau dapat dikaitkan dengan produksi bersih, investasi

berkelanjutan, pencapaian SDGs, dan peningkatan praktik keberlanjutan organisasi. Ikram dan kolega menekankan pentingnya indikator *green technology* untuk membantu akademisi, manajer, pemerintah, dan pengambil keputusan memahami peran teknologi hijau dalam pembangunan berkelanjutan.

Oleh karena itu, *Green Technology Assessment* berfungsi sebagai instrumen strategis untuk menghindari *greenwashing*. Tidak semua teknologi yang menggunakan istilah hijau secara otomatis lebih berkelanjutan. Suatu teknologi harus dibuktikan melalui indikator yang jelas, data yang valid, metode yang transparan, dan evaluasi dampak sepanjang siklus hidup. Penilaian teknologi hijau perlu ditempatkan sebagai jembatan antara inovasi, keberlanjutan, dan keputusan manajemen.

SUSTAINABILITY ASSESSMENT PADA TEKNOLOGI

Sustainability Assessment pada teknologi adalah proses penilaian menyeluruh terhadap dampak teknologi berdasarkan dimensi ekonomi, sosial, lingkungan, dan tata kelola. Jika *Green Technology Assessment* menekankan aspek kehijauan teknologi, maka *Sustainability Assessment* memberikan cakupan lebih luas karena mempertimbangkan apakah teknologi tersebut layak secara ekonomi, adil secara sosial, aman secara lingkungan, dan dapat dikelola secara institusional. Pendekatan ini sejalan dengan konsep pembangunan berkelanjutan yang menyeimbangkan kebutuhan saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang.

Dalam pengembangan teknologi hijau, *Sustainability Assessment* penting karena suatu teknologi dapat memiliki manfaat lingkungan, tetapi belum tentu layak secara sosial atau ekonomi. Misalnya, teknologi energi terbarukan dapat menurunkan emisi karbon, tetapi membutuhkan investasi awal besar, lahan luas, mineral kritis, atau perubahan pola kerja masyarakat. Sebaliknya, teknologi murah dan mudah diterapkan belum tentu memiliki

dampak lingkungan rendah. Oleh karena itu, penilaian keberlanjutan diperlukan untuk melihat konsekuensi sistemik dari penerapan teknologi.

Dimensi lingkungan dalam *Sustainability Assessment* mencakup konsumsi energi, emisi gas rumah kaca, penggunaan air, limbah, polusi udara, polusi air, penggunaan lahan, biodiversitas, dan potensi daur ulang. Dimensi ekonomi mencakup biaya investasi, biaya operasi, efisiensi produksi, umur pakai teknologi, nilai pasar, produktivitas, dan kelayakan finansial. Dimensi sosial mencakup keselamatan kerja, penerimaan masyarakat, keadilan akses, dampak terhadap tenaga kerja, perubahan perilaku pengguna, dan dampak terhadap komunitas lokal. Dimensi tata kelola mencakup regulasi, transparansi, kepatuhan, akuntabilitas, dan kapasitas kelembagaan.

Sustainability Assessment juga membantu pengambil keputusan memahami *trade-off*. Dalam teknologi hijau, tidak semua tujuan dapat dicapai secara bersamaan. Pengurangan emisi mungkin meningkatkan biaya; peningkatan efisiensi mungkin membutuhkan teknologi yang lebih kompleks; penggunaan material daur ulang mungkin memengaruhi kualitas produk; dan penggunaan lahan untuk energi terbarukan dapat menimbulkan konflik sosial. Oleh karena itu, penilaian keberlanjutan tidak hanya mencari teknologi terbaik secara tunggal, tetapi teknologi paling seimbang menurut prioritas dan konteks.

Literatur mengenai teknologi hijau dan pembangunan berkelanjutan menekankan bahwa teknologi perlu dinilai sebagai bagian dari sistem sosial-ekologis, bukan sebagai artefak teknis yang berdiri sendiri. Studi tentang *green technology and sustainable development* menunjukkan jika metodologi penilaian keberlanjutan harus mengintegrasikan indikator lingkungan, sosial, dan ekonomi agar teknologi dapat dinilai lebih komprehensif.

Dengan demikian, *Sustainability Assessment* pada teknologi berfungsi sebagai alat evaluasi strategis sebelum teknologi diadopsi

secara luas. Dalam konteks *green innovation and technology management*, pendekatan ini membantu organisasi memilih teknologi yang tidak hanya efisien, tetapi juga tangguh, inklusif, dapat diterima, dan selaras dengan tujuan keberlanjutan jangka panjang. Penilaian ini juga memperkuat tanggung jawab etis organisasi dalam memastikan bahwa inovasi teknologi tidak menciptakan masalah baru bagi lingkungan dan masyarakat.

KRITERIA TEKNIS, EKONOMI, SOSIAL, DAN LINGKUNGAN

Pemilihan teknologi hijau memerlukan kriteria evaluasi yang jelas. Empat kelompok kriteria utama yang sering digunakan adalah kriteria teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan. Kriteria teknis menilai kemampuan teknologi untuk bekerja sesuai fungsi yang diharapkan. Kriteria ekonomi menilai kelayakan biaya dan manfaat. Kriteria sosial menilai penerimaan, keadilan, dan dampak terhadap manusia. Kriteria lingkungan menilai kontribusi teknologi terhadap pengurangan beban ekologis. Keempat kriteria ini perlu dipahami secara terpadu.

Kriteria teknis mencakup efisiensi, keandalan, kapasitas, kualitas output, kemudahan operasi, kemudahan pemeliharaan, kompatibilitas dengan sistem yang ada, umur pakai, keselamatan, dan kesiapan teknologi. Dalam kerangka TRL, kriteria teknis sangat berkaitan dengan pembuktian bahwa teknologi dapat bekerja dalam lingkungan yang relevan dan operasional. Teknologi hijau yang memiliki kinerja lingkungan baik tetap sulit diterapkan jika tidak stabil, sulit dirawat, terlalu kompleks, atau tidak sesuai dengan kapasitas teknis organisasi.

Kriteria ekonomi mencakup biaya investasi awal, biaya operasi dan pemeliharaan, efisiensi biaya, periode pengembalian investasi, nilai sekarang bersih, biaya siklus hidup, potensi pendapatan, ketersediaan pembiayaan, dan risiko pasar. Dalam teknologi hijau, analisis ekonomi tidak boleh hanya melihat biaya

awal karena banyak teknologi rendah karbon memiliki biaya investasi tinggi tetapi biaya operasi lebih rendah. Oleh karena itu, *life cycle cost analysis* penting digunakan agar keputusan ekonomi tidak bias terhadap teknologi murah jangka pendek tetapi mahal dalam jangka panjang.

Kriteria sosial mencakup penerimaan masyarakat, dampak terhadap pekerja, keselamatan dan kesehatan kerja, keadilan akses, dampak terhadap kelompok rentan, perubahan perilaku pengguna, dan kontribusi terhadap kesejahteraan lokal. Teknologi hijau yang secara teknis unggul dapat gagal jika tidak diterima oleh pengguna atau menimbulkan konflik sosial. Misalnya, proyek energi terbarukan dapat menghadapi resistensi jika tidak melibatkan masyarakat lokal, tidak memperhatikan hak atas lahan, atau tidak memberikan manfaat ekonomi bagi komunitas sekitar.

Kriteria lingkungan mencakup emisi karbon, konsumsi energi, penggunaan air, limbah, polusi, penggunaan material, potensi daur ulang, dampak terhadap biodiversitas, dan kontribusi terhadap ekonomi sirkular. Kriteria ini sebaiknya dinilai menggunakan metode kuantitatif seperti *LCA*, *carbon footprint*, *material flow analysis*, atau *environmental performance indicator*. OECD menekankan bahwa teknologi hijau perlu mendukung pengurangan polusi, mitigasi perubahan iklim, adaptasi, dan pengurangan dampak negatif aktivitas ekonomi terhadap alam.

Keempat kelompok kriteria tersebut sebaiknya tidak dipertentangkan secara kaku, tetapi diintegrasikan dalam kerangka pengambilan keputusan multikriteria. Dalam praktik manajemen, pilihan teknologi terbaik sering bukan teknologi yang paling unggul pada satu aspek, melainkan teknologi yang memberikan keseimbangan terbaik antara kinerja teknis, biaya, manfaat sosial, dan dampak lingkungan. Oleh karena itu, pendekatan seperti Analytical Hierarchy Process, Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, Multi-Attribute Utility Theory, atau

metode skoring berbobot dapat digunakan dalam pemilihan teknologi hijau.

ANALISIS RISIKO DALAM PENGEMBANGAN TEKNOLOGI HIJAU

Analisis risiko dalam pengembangan teknologi hijau merupakan proses identifikasi, evaluasi, dan pengendalian ketidakpastian yang dapat memengaruhi keberhasilan teknologi. Risiko teknologi hijau dapat muncul dari aspek teknis, ekonomi, regulasi, sosial, lingkungan, rantai pasok, pembiayaan, dan pasar. Semakin rendah TRL suatu teknologi, umumnya semakin tinggi ketidakpastian teknisnya. Sebaliknya, teknologi pada TRL tinggi mungkin memiliki risiko teknis lebih rendah, tetapi tetap menghadapi risiko pasar, regulasi, dan adopsi.

Risiko teknis berkaitan dengan kemungkinan teknologi tidak bekerja sesuai harapan. Risiko ini dapat berupa kegagalan prototipe, rendahnya efisiensi, umur pakai pendek, kesulitan skala produksi, keterbatasan material, gangguan operasional, atau kebutuhan pemeliharaan tinggi. Dalam teknologi hijau, risiko teknis juga mencakup kegagalan mencapai target lingkungan, misalnya emisi yang ternyata tidak lebih rendah dari teknologi konvensional jika dihitung sepanjang siklus hidup.

Risiko ekonomi berkaitan dengan biaya pengembangan, biaya investasi, ketidakpastian harga bahan baku, biaya operasi, ketidakpastian permintaan, serta kesulitan memperoleh pembiayaan. Banyak teknologi hijau membutuhkan investasi awal besar, sedangkan manfaat ekonominya baru terlihat dalam jangka menengah atau panjang. Oleh karena itu, analisis risiko ekonomi perlu memasukkan sensitivitas terhadap harga energi, insentif pemerintah, biaya karbon, harga material, skala produksi, dan perubahan permintaan pasar.

Risiko regulasi dan kebijakan juga sangat penting. Teknologi hijau sering bergantung pada standar lingkungan, insentif fiskal, tarif energi, kebijakan karbon, regulasi limbah, sertifikasi produk, dan aturan keselamatan. Perubahan kebijakan dapat mempercepat atau memperlambat komersialisasi teknologi hijau. Misalnya, teknologi energi terbarukan dapat berkembang pesat jika didukung tarif yang stabil dan akses jaringan listrik, tetapi dapat terhambat jika regulasi interkoneksi, pembiayaan, atau perizinan tidak jelas.

Risiko sosial muncul ketika teknologi tidak diterima oleh masyarakat, pekerja, konsumen, atau pemangku kepentingan lokal. Teknologi hijau dapat menghadapi resistensi jika dianggap mengganggu mata pencaharian, mengubah pola kerja, menaikkan harga produk, atau menimbulkan ketidakadilan distribusi manfaat. Oleh karena itu, analisis risiko sosial perlu mencakup konsultasi publik, pemetaan pemangku kepentingan, analisis dampak sosial, dan strategi komunikasi.

Risiko lingkungan juga harus diperhitungkan secara serius. Teknologi yang diklaim hijau dapat menimbulkan dampak lingkungan baru, seperti limbah baterai, eksploitasi mineral kritis, perubahan penggunaan lahan, konsumsi air tinggi, atau polusi dari proses produksi material. Karena itu, LCA dan *Sustainability Assessment* perlu digunakan sebagai bagian dari analisis risiko agar organisasi tidak mengganti satu masalah lingkungan dengan masalah lingkungan lain. Pendekatan ini membantu mencegah *burden shifting* dalam pengembangan teknologi hijau.

Dengan demikian, analisis risiko dalam teknologi hijau harus bersifat integratif. Risiko tidak boleh hanya dipahami sebagai kegagalan teknis, tetapi sebagai ketidakpastian sistemik yang mencakup teknologi, pasar, kebijakan, masyarakat, dan lingkungan. Dalam manajemen inovasi hijau, analisis risiko membantu organisasi menentukan strategi mitigasi, alokasi sumber

daya, desain proyek percontohan, perlindungan investasi, dan jalur komersialisasi yang lebih realistis.

STRATEGI KOMERSIALISASI TEKNOLOGI HIJAU

Komersialisasi teknologi hijau adalah proses membawa teknologi dari tahap penelitian atau prototipe menuju pasar, pengguna, dan implementasi luas. Proses ini tidak hanya membutuhkan kesiapan teknologi, tetapi juga kesiapan bisnis, kesiapan regulasi, kesiapan rantai pasok, dan kesiapan pengguna. Banyak teknologi hijau gagal dikomersialisasikan bukan karena tidak inovatif, tetapi karena tidak memiliki model bisnis yang tepat, biaya terlalu tinggi, pasar belum siap, atau kebijakan pendukung belum tersedia.

Strategi pertama dalam komersialisasi teknologi hijau adalah validasi nilai. Organisasi perlu menjawab pertanyaan: masalah apa yang diselesaikan teknologi ini, siapa penggunanya, apa manfaat lingkungannya, apa manfaat ekonominya, dan mengapa pasar perlu mengadopsinya. Teknologi hijau harus mampu menunjukkan *value proposition* yang jelas, misalnya penghematan energi, pengurangan biaya limbah, penurunan emisi, peningkatan kepatuhan regulasi, peningkatan reputasi, atau akses ke pasar hijau.

Strategi kedua adalah pengembangan proyek percontohan atau demonstrasi. Pada banyak teknologi hijau, pasar membutuhkan bukti nyata sebelum melakukan adopsi. Demonstrasi lapangan membantu menunjukkan bahwa teknologi tidak hanya bekerja di laboratorium, tetapi juga mampu beroperasi dalam kondisi nyata. IEA menekankan pentingnya demonstrasi dan pemetaan kesiapan teknologi untuk mempercepat inovasi energi bersih dari tahap konsep menuju penerapan pasar.

Strategi ketiga adalah penyusunan model bisnis berkelanjutan. Teknologi hijau dapat dikomersialisasikan melalui

berbagai model, seperti penjualan produk, layanan berbasis kinerja, sewa teknologi, *energy service company*, *product-service system*, lisensi teknologi, kemitraan industri, atau model ekonomi sirkular. Model bisnis yang tepat dapat menurunkan hambatan adopsi, terutama jika pelanggan enggan menanggung investasi awal. Dalam konteks ini, inovasi model bisnis sama pentingnya dengan inovasi teknologi.

Strategi keempat adalah pembiayaan dan investasi. Teknologi hijau sering membutuhkan pembiayaan jangka panjang karena manfaatnya tidak selalu langsung terlihat. Sumber pembiayaan dapat berasal dari modal ventura, dana riset, pembiayaan hijau, obligasi hijau, pembiayaan proyek, dana pemerintah, kemitraan publik-swasta, atau mekanisme karbon. Agar menarik bagi investor, teknologi hijau perlu memiliki bukti TRL yang kuat, analisis pasar, perlindungan kekayaan intelektual, proyeksi keuangan, dan bukti dampak lingkungan.

Strategi kelima adalah regulasi, sertifikasi, dan standar. Teknologi hijau sering membutuhkan sertifikasi efisiensi energi, keamanan produk, emisi, ecolabel, standar material, atau persetujuan lingkungan. Sertifikasi dapat meningkatkan kepercayaan pasar karena memberikan bukti bahwa teknologi telah diuji dan memenuhi persyaratan tertentu. Dalam pasar global, standar dan bukti kinerja lingkungan dapat menjadi syarat penting untuk memasuki rantai pasok internasional.

Strategi keenam adalah pembentukan ekosistem inovasi. Komersialisasi teknologi hijau jarang berhasil jika dilakukan oleh satu aktor saja. Diperlukan kolaborasi antara universitas, industri, pemerintah, lembaga pembiayaan, komunitas, pemasok, dan pengguna. Ekosistem inovasi membantu mempercepat validasi teknologi, pembiayaan, adopsi pasar, pengembangan standar, serta pembentukan permintaan. Dengan demikian, komersialisasi teknologi hijau merupakan proses kolektif yang membutuhkan sinergi pengetahuan, modal, kebijakan, dan pasar.

PENGAMBILAN KEPUTUSAN DALAM PEMILIHAN TEKNOLOGI BERKELANJUTAN

Pengambilan keputusan dalam pemilihan teknologi berkelanjutan merupakan proses memilih alternatif teknologi berdasarkan pertimbangan teknis, ekonomi, sosial, lingkungan, risiko, dan strategi organisasi. Dalam praktik manajemen, keputusan teknologi jarang bersifat sederhana karena setiap alternatif memiliki kelebihan dan keterbatasan. Oleh karena itu, pemilihan teknologi berkelanjutan membutuhkan metode yang transparan, rasional, dan dapat dipertanggungjawabkan.

Langkah pertama adalah mendefinisikan tujuan keputusan. Organisasi perlu menentukan apakah teknologi dipilih untuk mengurangi emisi, meningkatkan efisiensi energi, menurunkan biaya, memperbaiki kualitas produk, memenuhi regulasi, meningkatkan reputasi, atau membuka pasar baru. Tujuan yang berbeda akan menghasilkan kriteria evaluasi yang berbeda. Misalnya, jika tujuan utama adalah dekarbonisasi, maka carbon footprint menjadi indikator utama. Jika tujuan utama adalah efisiensi biaya, maka analisis biaya siklus hidup menjadi lebih dominan.

Langkah kedua adalah menyusun alternatif teknologi. Alternatif dapat berupa teknologi konvensional yang ditingkatkan, teknologi hijau baru, teknologi digital pendukung, sistem sirkular, atau kombinasi beberapa teknologi. Pada tahap ini, TRL membantu menyaring teknologi berdasarkan kesiapan implementasi. Teknologi dengan TRL rendah mungkin cocok untuk riset jangka panjang, sedangkan teknologi dengan TRL tinggi lebih cocok untuk investasi jangka pendek atau penerapan industri.

Langkah ketiga adalah menetapkan kriteria dan bobot. Kriteria dapat mencakup efisiensi teknis, biaya investasi, biaya operasi, emisi karbon, konsumsi energi, dampak sosial, risiko implementasi, kesiapan regulasi, dan peluang pasar. Bobot

menunjukkan tingkat kepentingan setiap kriteria. Dalam konteks teknologi hijau, organisasi perlu berhati-hati agar kriteria ekonomi tidak selalu mendominasi kriteria lingkungan dan sosial. Jika keberlanjutan menjadi strategi utama, maka indikator lingkungan dan sosial perlu memperoleh bobot yang memadai.

Langkah keempat adalah melakukan penilaian multikriteria. Metode seperti AHP, ANP, TOPSIS, PROMETHEE, ELECTRE, atau *weighted scoring model* dapat digunakan untuk membandingkan alternatif teknologi. Pendekatan ini membantu pengambil keputusan menilai teknologi secara sistematis, terutama ketika data kuantitatif dan kualitatif perlu digabungkan. Penilaian multikriteria juga memungkinkan organisasi melakukan analisis sensitivitas untuk mengetahui apakah perubahan bobot akan mengubah pilihan teknologi.

Langkah kelima adalah mengintegrasikan hasil LCA, *carbon footprint*, Sustainability Assessment, dan risiko. Teknologi yang tampak murah belum tentu berkelanjutan jika memiliki emisi tinggi atau risiko sosial besar. Sebaliknya, teknologi yang sangat ramah lingkungan belum tentu dapat diterapkan jika TRL rendah dan risiko teknis terlalu tinggi. Oleh karena itu, keputusan teknologi berkelanjutan perlu menggabungkan bukti kematangan teknologi dan bukti kinerja keberlanjutan.

Pada akhirnya, pengambilan keputusan teknologi berkelanjutan tidak hanya bersifat teknokratis, tetapi juga strategis. Keputusan tersebut menentukan arah inovasi, investasi, reputasi, daya saing, dan kontribusi organisasi terhadap pembangunan berkelanjutan. Dalam kerangka *green innovation and technology management*, teknologi terbaik bukan hanya teknologi yang paling canggih, melainkan teknologi yang paling siap, paling layak, paling rendah dampak, paling diterima, dan paling mampu menciptakan nilai jangka panjang bagi organisasi, masyarakat, dan lingkungan.



BAB 14

GREEN INNOVATION ECOSYSTEM

Bab ini membahas *green innovation ecosystem* atau ekosistem inovasi hijau sebagai fondasi penting dalam pengembangan *green innovation and technology management*. Inovasi hijau tidak dapat dipahami hanya sebagai hasil kerja laboratorium, perusahaan, atau individu penemu teknologi. Inovasi hijau merupakan hasil interaksi berbagai aktor, yaitu pemerintah, perguruan tinggi, industri, masyarakat, komunitas, lembaga pembiayaan, media, startup, inkubator bisnis, dan jejaring global. Karena itu, keberhasilan teknologi hijau sangat ditentukan oleh kualitas ekosistem yang mendukung lahirnya gagasan, riset, prototipe, pembiayaan, regulasi, komersialisasi, dan adopsi sosial.

Ekosistem inovasi hijau menjadi semakin penting karena tantangan keberlanjutan bersifat kompleks dan lintas sektor. Perubahan iklim, krisis energi, degradasi lingkungan, limbah, polusi, dan keterbatasan sumber daya tidak dapat diselesaikan oleh satu aktor saja. Diperlukan kolaborasi antarlembaga untuk memperkuat riset, regulasi, investasi, kewirausahaan, literasi masyarakat, serta perubahan perilaku konsumsi. Dalam konteks Indonesia, agenda ekonomi hijau dan pembangunan rendah karbon telah menjadi bagian dari arah pembangunan nasional, termasuk melalui inisiatif *Low Carbon Development Indonesia* yang diluncurkan

Bappenas untuk mendorong pembangunan rendah karbon, pengelolaan sumber daya berkelanjutan, dan pengentasan kemiskinan.

PENGERTIAN EKOSISTEM INOVASI HIJAU

Ekosistem inovasi hijau adalah sistem interaksi antarpelaku yang mendukung penciptaan, pengembangan, penyebaran, dan pemanfaatan inovasi yang berorientasi pada keberlanjutan lingkungan. Aktor dalam ekosistem ini mencakup pemerintah, perguruan tinggi, lembaga riset, industri, startup, masyarakat, komunitas, lembaga keuangan, organisasi nonpemerintah, dan media. Interaksi di antara aktor tersebut menghasilkan aliran pengetahuan, teknologi, modal, regulasi, legitimasi sosial, dan pasar yang memungkinkan teknologi hijau berkembang dari gagasan menjadi solusi nyata.

Secara konseptual, ekosistem inovasi hijau dapat dipahami sebagai perluasan dari teori sistem inovasi. Dalam teori sistem inovasi, keberhasilan inovasi tidak hanya bergantung pada kemampuan internal perusahaan, tetapi juga pada jejaring kelembagaan, kebijakan, pasar, budaya, dan kapasitas pembelajaran kolektif. Ketika konsep ini diterapkan pada inovasi hijau, maka tujuan sistem bukan hanya pertumbuhan ekonomi dan keunggulan teknologi, tetapi juga pengurangan emisi, efisiensi sumber daya, produksi bersih, ekonomi sirkular, konservasi lingkungan, serta peningkatan kualitas hidup masyarakat (Lundvall, 1992; Nelson, 1993; Schot & Steinmueller, 2018).

Ekosistem inovasi hijau memiliki karakter transformatif karena mendorong perubahan dari sistem produksi dan konsumsi yang eksploitatif menuju sistem yang lebih rendah karbon, efisien, inklusif, dan regeneratif. Dalam hal ini, inovasi hijau tidak hanya berbentuk produk, seperti panel surya, kendaraan listrik, teknologi pengolahan limbah, atau material ramah lingkungan. Inovasi hijau

juga mencakup proses, model bisnis, kebijakan, tata kelola, perilaku sosial, desain kota, praktik pertanian, sistem logistik, serta mekanisme pembiayaan berkelanjutan.

Ekosistem inovasi hijau juga menekankan pentingnya keterhubungan antara riset dan kebutuhan masyarakat. Teknologi yang berhasil secara ilmiah belum tentu berhasil secara sosial apabila tidak sesuai dengan konteks lokal, kemampuan pengguna, pola budaya, daya beli, dan infrastruktur pendukung. Oleh karena itu, ekosistem inovasi hijau harus mampu mempertemukan pengetahuan ilmiah, pengalaman praktis industri, kebutuhan pasar, aspirasi masyarakat, dan arah kebijakan publik.

Dalam perspektif manajemen teknologi, ekosistem inovasi hijau berfungsi sebagai ruang koordinasi untuk mengurangi ketidakpastian inovasi. Teknologi hijau sering menghadapi hambatan berupa biaya awal tinggi, risiko pasar, keterbatasan regulasi, kurangnya literasi pengguna, dan lemahnya infrastruktur. Ekosistem yang kuat dapat mempercepat pembelajaran, berbagi risiko, membuka akses pendanaan, menciptakan pasar awal, dan membangun kepercayaan terhadap teknologi baru.

Dengan demikian, ekosistem inovasi hijau dapat didefinisikan sebagai sistem kolaboratif yang mengintegrasikan pengetahuan, kebijakan, teknologi, modal, pasar, dan partisipasi sosial untuk menghasilkan inovasi yang mendukung keberlanjutan. Konsep ini menjadi penting karena manajemen inovasi hijau tidak cukup dikelola secara individual, tetapi membutuhkan orkestrasi aktor dan institusi dalam suatu sistem yang saling memperkuat.

PERAN PEMERINTAH DALAM KEBIJAKAN DAN REGULASI

Pemerintah memiliki peran sentral dalam membentuk arah ekosistem inovasi hijau karena pemerintah memiliki kewenangan dalam menetapkan kebijakan, regulasi, insentif, standar, perencanaan pembangunan, dan alokasi anggaran. Dalam konteks

inovasi hijau, pemerintah tidak hanya berfungsi sebagai regulator, tetapi juga sebagai fasilitator, katalisator, pembeli awal, penyedia infrastruktur, dan pengarah transformasi ekonomi rendah karbon. Tanpa dukungan pemerintah, teknologi hijau sering sulit bersaing dengan teknologi konvensional yang telah lebih dulu mapan.

Peran pertama pemerintah adalah menetapkan arah kebijakan pembangunan hijau. Kebijakan publik dapat memberikan sinyal jangka panjang kepada industri, investor, perguruan tinggi, dan masyarakat bahwa transformasi hijau merupakan agenda strategis nasional. Di Indonesia, Bappenas melalui *Low Carbon Development Initiative* mendorong pembangunan rendah karbon yang mengintegrasikan pengurangan emisi, pengelolaan sumber daya, dan pertumbuhan ekonomi. Pendekatan ini menunjukkan bahwa kebijakan hijau tidak hanya dipahami sebagai kebijakan lingkungan, tetapi sebagai strategi pembangunan ekonomi.

Peran kedua pemerintah adalah menciptakan regulasi dan standar yang mendorong inovasi. Regulasi emisi, standar efisiensi energi, pengelolaan limbah, ecolabel, bangunan hijau, kendaraan rendah emisi, energi terbarukan, dan ekonomi sirkular dapat mendorong perusahaan berinovasi. Dalam teori *Porter Hypothesis*, regulasi lingkungan yang dirancang dengan baik dapat memicu inovasi, meningkatkan efisiensi, dan memperkuat daya saing perusahaan (Porter & van der Linde, 1995).

Peran ketiga pemerintah adalah menyediakan insentif ekonomi. Teknologi hijau sering menghadapi hambatan biaya awal yang lebih tinggi dibandingkan teknologi konvensional. Oleh karena itu, insentif fiskal, subsidi, pembiayaan lunak, dana riset, kredit pajak, pengadaan pemerintah hijau, dan skema harga karbon dapat membantu mempercepat adopsi teknologi hijau. Dalam konteks transisi energi, dukungan pembiayaan menjadi sangat penting karena proyek energi bersih membutuhkan investasi besar dan horizon pengembalian jangka panjang.

Peran keempat pemerintah adalah memperkuat kelembagaan riset dan inovasi. Pemerintah dapat mempertemukan lembaga riset, universitas, industri, dan daerah melalui program kolaborasi riset, pendanaan kompetitif, laboratorium bersama, serta pusat unggulan teknologi. Di Indonesia, BRIN berperan sebagai lembaga pemerintah di bidang riset dan inovasi berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 78 Tahun 2021, sehingga posisinya penting dalam mengonsolidasikan agenda riset nasional dan memperkuat jejaring inovasi lintas sektor.

Peran kelima pemerintah adalah membangun pasar awal bagi inovasi hijau. Pemerintah dapat menjadi *lead user* melalui pengadaan barang dan jasa ramah lingkungan, pembangunan infrastruktur hijau, penggunaan kendaraan listrik pemerintah, penerapan bangunan hemat energi, serta proyek percontohan energi terbarukan. Dengan cara ini, pemerintah tidak hanya membuat aturan, tetapi juga menciptakan permintaan yang mendorong industri dan startup mengembangkan solusi hijau.

PERAN PERGURUAN TINGGI DALAM RISET DAN PENDIDIKAN

Perguruan tinggi memiliki peran strategis dalam ekosistem inovasi hijau karena menjadi pusat produksi pengetahuan, pengembangan teknologi, pendidikan sumber daya manusia, dan pengabdian kepada masyarakat. Dalam konteks *green innovation and technology management*, perguruan tinggi tidak hanya bertugas menghasilkan lulusan, tetapi juga membangun kapasitas riset, mengembangkan prototipe, mendampingi masyarakat, dan berkolaborasi dengan industri untuk memecahkan masalah keberlanjutan.

Peran pertama perguruan tinggi adalah menghasilkan pengetahuan ilmiah yang menjadi dasar inovasi hijau. Riset tentang energi terbarukan, efisiensi energi, material ramah lingkungan,

teknologi pengolahan limbah, bangunan hijau, transportasi berkelanjutan, pertanian rendah karbon, ekonomi sirkular, LCA, *carbon footprint*, dan teknologi digital untuk lingkungan merupakan contoh kontribusi akademik terhadap inovasi hijau. Pengetahuan ini menjadi fondasi bagi pengembangan teknologi yang lebih efisien, rendah emisi, dan adaptif terhadap kebutuhan masyarakat.

Peran kedua perguruan tinggi adalah mengembangkan kurikulum dan pendidikan keberlanjutan. Mahasiswa perlu dibekali pemahaman mengenai perubahan iklim, ekonomi hijau, teknologi bersih, etika lingkungan, manajemen inovasi, kewirausahaan hijau, serta metode penilaian keberlanjutan. Pendidikan ini penting karena lulusan perguruan tinggi akan menjadi peneliti, profesional, manajer, birokrat, wirausaha, dan pemimpin organisasi yang menentukan arah pembangunan masa depan.

Peran ketiga perguruan tinggi adalah menjadi penghubung antara riset dan implementasi. Banyak hasil penelitian berhenti pada publikasi karena tidak dikembangkan menjadi prototipe, paten, standar, model bisnis, atau produk komersial. Oleh karena itu, perguruan tinggi perlu memperkuat *technology transfer office*, pusat inkubasi, laboratorium inovasi, kemitraan industri, dan skema hilirisasi riset. Dalam ekosistem inovasi hijau, keberhasilan perguruan tinggi tidak hanya diukur dari jumlah publikasi, tetapi juga dari kontribusinya terhadap pemecahan masalah lingkungan dan sosial.

Peran keempat perguruan tinggi adalah melakukan pengabdian kepada masyarakat berbasis inovasi hijau. Perguruan tinggi dapat mendampingi desa, UMKM, komunitas kota, kawasan pesisir, dan industri kecil dalam menerapkan teknologi tepat guna, pengelolaan limbah, energi mandiri, pertanian organik, konservasi air, dan ekonomi sirkular. Dengan demikian, inovasi hijau tidak hanya menjadi agenda industri besar, tetapi juga dapat diterapkan pada skala komunitas dan lokal.

Peran kelima perguruan tinggi adalah membangun jejaring kolaborasi. Inovasi hijau membutuhkan kerja sama multidisiplin antara teknik, manajemen, ekonomi, arsitektur, perencanaan wilayah dan kota, ilmu lingkungan, sosial, kebijakan publik, dan komunikasi. Perguruan tinggi memiliki kemampuan untuk mengintegrasikan berbagai disiplin tersebut sehingga solusi hijau yang dikembangkan lebih komprehensif. Model *triple helix* dan *pentahelix* menempatkan perguruan tinggi sebagai aktor pengetahuan yang menghubungkan pemerintah, industri, masyarakat, dan media (Etzkowitz & Leydesdorff, 2000; Carayannis & Campbell, 2010).

Dengan demikian, perguruan tinggi adalah mesin pengetahuan bagi ekosistem inovasi hijau. Perannya tidak hanya sebagai lembaga pendidikan, tetapi juga sebagai penghasil riset, fasilitator teknologi, pendamping masyarakat, pembentuk budaya keberlanjutan, dan penggerak kolaborasi lintas sektor.

PERAN INDUSTRI DALAM PENGEMBANGAN DAN KOMERSIALISASI TEKNOLOGI

Industri memiliki peran utama dalam mengubah pengetahuan dan prototipe menjadi produk, proses, layanan, dan model bisnis yang dapat digunakan masyarakat. Dalam ekosistem inovasi hijau, industri menjadi aktor yang menguji kelayakan teknologi pada skala produksi, membangun rantai pasok, menanggung risiko pasar, mengembangkan standar kualitas, dan menciptakan nilai ekonomi dari inovasi. Tanpa peran industri, banyak teknologi hijau akan berhenti sebagai hasil riset tanpa dampak nyata.

Peran pertama industri adalah melakukan inovasi proses untuk meningkatkan efisiensi sumber daya. Industri dapat mengurangi konsumsi energi, air, bahan baku, dan limbah melalui produksi bersih, efisiensi mesin, digitalisasi proses, pemanfaatan

energi terbarukan, dan sistem manajemen lingkungan. Inovasi proses ini penting karena sebagian besar dampak lingkungan berasal dari aktivitas produksi, logistik, dan penggunaan energi. Strategi produksi bersih dapat meningkatkan efisiensi sekaligus menurunkan biaya operasional.

Peran kedua industri adalah mengembangkan produk hijau. Produk hijau dapat berupa produk yang hemat energi, mudah didaur ulang, tahan lama, menggunakan material rendah karbon, memiliki kemasan minimal, atau menghasilkan emisi lebih rendah sepanjang siklus hidup. Dalam perspektif *eco-design*, aspek lingkungan perlu dipertimbangkan sejak tahap desain, bukan hanya setelah produk dihasilkan. Dengan demikian, industri dapat mengurangi dampak lingkungan sekaligus memperkuat posisi pasar.

Peran ketiga industri adalah melakukan komersialisasi teknologi. Komersialisasi membutuhkan kemampuan produksi massal, distribusi, pemasaran, sertifikasi, layanan purna jual, pembiayaan, dan strategi model bisnis. Teknologi hijau yang berhasil secara teknis belum tentu berhasil secara komersial jika tidak sesuai dengan kebutuhan pasar, terlalu mahal, sulit digunakan, atau tidak memiliki dukungan infrastruktur. Oleh karena itu, industri harus mampu menggabungkan inovasi teknologi dengan inovasi bisnis.

Peran keempat industri adalah memperkuat rantai pasok hijau. Banyak dampak lingkungan produk berasal dari pemasok bahan baku, transportasi, distribusi, dan akhir masa pakai. Industri dapat mendorong pemasok menerapkan standar lingkungan, menggunakan material bersertifikat, mengurangi emisi, dan memperbaiki transparansi data. *Green supply chain management* menjadi penting karena keberlanjutan perusahaan tidak dapat dipisahkan dari keberlanjutan rantai nilainya (Seuring & Müller, 2008).

Peran kelima industri adalah berinvestasi dalam riset dan pengembangan. Industri yang hanya bergantung pada teknologi lama akan sulit bersaing dalam ekonomi rendah karbon. Investasi R&D memungkinkan industri mengembangkan teknologi baru, meningkatkan efisiensi, memperkuat paten, dan memperluas pasar. Dalam ekosistem inovasi hijau, industri perlu bermitra dengan perguruan tinggi, lembaga riset, *startup*, dan pemerintah agar risiko inovasi dapat dibagi dan proses pembelajaran menjadi lebih cepat.

Dengan demikian, industri merupakan aktor penting yang menghubungkan inovasi hijau dengan pasar. Peran industri bukan hanya mencari keuntungan, tetapi juga menciptakan nilai berkelanjutan melalui produk, proses, rantai pasok, dan model bisnis yang lebih rendah dampak lingkungan.

PERAN MASYARAKAT DAN KOMUNITAS DALAM ADOPSI INOVASI HIJAU

Masyarakat dan komunitas memiliki peran penting dalam ekosistem inovasi hijau karena keberhasilan teknologi tidak hanya ditentukan oleh penemu dan produsen, tetapi juga oleh pengguna. Inovasi hijau membutuhkan penerimaan, perubahan perilaku, partisipasi, dan kepercayaan masyarakat. Teknologi yang secara teknis unggul dapat gagal jika tidak dipahami, tidak diterima, atau tidak sesuai dengan kebutuhan sosial-budaya masyarakat.

Peran pertama masyarakat adalah sebagai pengguna dan adopter inovasi hijau. Keputusan masyarakat untuk menggunakan transportasi publik, memilah sampah, menggunakan energi terbarukan, membeli produk hemat energi, mengurangi plastik sekali pakai, atau mendukung produk lokal berkelanjutan merupakan bagian dari adopsi inovasi hijau. Dalam teori difusi inovasi, adopsi dipengaruhi oleh persepsi manfaat, kesesuaian

dengan nilai pengguna, kompleksitas, kemampuan diuji coba, dan kemudahan diamati (Rogers, 2003).

Peran kedua masyarakat adalah sebagai sumber pengetahuan lokal. Banyak solusi hijau membutuhkan pemahaman terhadap konteks tempat, budaya, iklim, pola konsumsi, dan praktik keseharian. Komunitas lokal memiliki pengetahuan mengenai sumber daya, kebiasaan, masalah lingkungan, dan potensi wilayah. Dalam konteks perencanaan dan teknologi tepat guna, pengetahuan lokal dapat membantu memastikan bahwa inovasi hijau tidak bersifat top-down, tetapi sesuai dengan kebutuhan nyata masyarakat.

Peran ketiga masyarakat adalah sebagai pengawas sosial. Komunitas dapat mendorong akuntabilitas perusahaan dan pemerintah dalam menjalankan agenda hijau. Masyarakat dapat mengkritisi pencemaran, praktik *greenwashing*, penggunaan sumber daya yang tidak adil, atau kebijakan yang tidak berpihak pada keberlanjutan. Dengan demikian, masyarakat berperan sebagai penjaga legitimasi sosial dalam ekosistem inovasi hijau.

Peran keempat masyarakat adalah sebagai pelaku inovasi akar rumput. Banyak inovasi hijau lahir dari komunitas, seperti bank sampah, pertanian kota, energi desa, konservasi mangrove, pengelolaan air hujan, daur ulang kreatif, dan gerakan konsumsi berkelanjutan. Inovasi akar rumput penting karena sering lebih adaptif, murah, berbasis partisipasi, dan mudah diterima masyarakat. Namun, inovasi seperti ini memerlukan dukungan kebijakan, pembiayaan, dan pendampingan teknis agar dapat berkembang.

Peran kelima masyarakat adalah membangun budaya keberlanjutan. Inovasi hijau tidak akan berhasil apabila pola konsumsi masyarakat tetap boros energi, boros material, dan tidak peduli terhadap limbah. Oleh karena itu, edukasi publik, kampanye lingkungan, literasi iklim, dan gerakan komunitas sangat penting.

Perubahan teknologi perlu berjalan bersama perubahan perilaku agar dampak lingkungan dapat berkurang secara nyata.

Dengan demikian, masyarakat dan komunitas bukan objek pasif dalam inovasi hijau, melainkan aktor aktif yang menentukan keberhasilan adopsi, legitimasi, dan keberlanjutan teknologi. Dalam kerangka *green innovation ecosystem*, masyarakat menjadi ruang uji sosial bagi teknologi dan sekaligus sumber kreativitas berbasis kebutuhan lokal.

KOLABORASI PENTAHHELIX DALAM INOVASI HIJAU

Kolaborasi pentahelix adalah model kerja sama yang melibatkan lima aktor utama, yaitu pemerintah, akademisi, industri, masyarakat, dan media. Model ini berkembang dari konsep *triple helix* yang menekankan hubungan antara universitas, industri, dan pemerintah. Dalam konteks inovasi hijau, pentahelix dianggap lebih sesuai karena keberlanjutan tidak hanya membutuhkan teknologi dan kebijakan, tetapi juga partisipasi masyarakat dan komunikasi publik.

Pemerintah dalam pentahelix berperan menetapkan regulasi, insentif, arah kebijakan, dan dukungan kelembagaan. Akademisi berperan menghasilkan pengetahuan, riset, pendidikan, evaluasi ilmiah, dan pendampingan. Industri berperan mengembangkan teknologi, memproduksi, mengomersialisasikan, dan menciptakan pasar. Masyarakat berperan sebagai pengguna, pengawas, dan penggerak perubahan perilaku. Media berperan menyebarkan informasi, membangun opini publik, meningkatkan literasi, dan memperkuat akuntabilitas.

Kolaborasi pentahelix penting karena inovasi hijau menghadapi masalah yang kompleks dan saling terkait. Misalnya, pengembangan energi terbarukan tidak hanya membutuhkan teknologi panel surya atau turbin angin, tetapi juga regulasi tarif, pembiayaan, penerimaan masyarakat, infrastruktur jaringan,

pelatihan teknis, informasi publik, dan model bisnis. Tanpa kolaborasi antarpihak, teknologi hijau mudah terhambat oleh fragmentasi kebijakan, lemahnya koordinasi, dan rendahnya adopsi sosial.

Dalam konteks Indonesia, model pentahelix relevan untuk pengembangan desa energi mandiri, pengelolaan sampah, UMKM hijau, pariwisata berkelanjutan, kawasan industri hijau, transportasi rendah emisi, dan ekonomi sirkular. Studi tentang kolaborasi pentahelix dalam kebijakan energi terbaru di Indonesia menegaskan bahwa aktor non-negara seperti akademisi, bisnis, komunitas, dan media memiliki peran komplementer bersama pemerintah dalam memproduksi solusi energi yang berkelanjutan dan sesuai konteks lokal.

Kolaborasi pentahelix juga membantu memperkuat legitimasi inovasi. Ketika teknologi hijau dikembangkan melalui partisipasi banyak aktor, keputusan yang diambil menjadi lebih transparan dan lebih mudah diterima. Perguruan tinggi memberikan legitimasi ilmiah, pemerintah memberikan legitimasi regulatif, industri memberikan legitimasi pasar, masyarakat memberikan legitimasi sosial, dan media memberikan legitimasi komunikasi. Kombinasi ini penting untuk mempercepat difusi inovasi.

Namun, kolaborasi pentahelix tidak otomatis berhasil. Tantangannya meliputi perbedaan kepentingan, ketimpangan sumber daya, lemahnya koordinasi, kurangnya kepercayaan, ego sektoral, dan tidak jelasnya pembagian peran. Oleh karena itu, kolaborasi pentahelix membutuhkan tata kelola yang baik, tujuan bersama, mekanisme koordinasi, indikator kinerja, pembagian manfaat, serta ruang dialog yang berkelanjutan.

INKUBATOR BISNIS, *STARTUP* HIJAU, DAN KEWIRAUSAHAAN BERKELANJUTAN

Inkubator bisnis memiliki peran penting dalam ekosistem inovasi hijau karena membantu mengubah ide menjadi usaha yang layak. Inkubator menyediakan pendampingan, pelatihan bisnis, akses mentor, akses investor, jaringan pasar, fasilitas kerja, validasi produk, dan dukungan legal. Bagi *startup* hijau, inkubator sangat penting karena teknologi atau produk yang dikembangkan sering membutuhkan validasi teknis, pembuktian dampak lingkungan, dan strategi bisnis yang berbeda dari usaha konvensional.

Startup hijau adalah perusahaan rintisan yang mengembangkan produk, layanan, atau platform berbasis keberlanjutan. Contohnya meliputi energi terbarukan, pengelolaan sampah, teknologi air bersih, pertanian presisi, material ramah lingkungan, logistik rendah karbon, pemantauan emisi, ekonomi sirkular, dan digitalisasi lingkungan. *Startup* hijau memiliki potensi besar karena lebih fleksibel, cepat bereksperimen, dan mampu mengisi celah pasar yang belum dilayani perusahaan besar.

Kewirausahaan berkelanjutan atau *sustainable entrepreneurship* adalah aktivitas kewirausahaan yang menciptakan nilai ekonomi sekaligus menyelesaikan masalah sosial dan lingkungan. Dalam perspektif ini, keberhasilan usaha tidak hanya diukur dari laba, tetapi juga dari dampak terhadap emisi, limbah, efisiensi sumber daya, pekerjaan hijau, pemberdayaan masyarakat, dan kualitas lingkungan. Kewirausahaan berkelanjutan menempatkan keberlanjutan sebagai inti model bisnis, bukan sekadar aktivitas tanggung jawab sosial.

Inkubator hijau perlu berbeda dari inkubator bisnis umum karena *startup* hijau sering membutuhkan indikator dampak yang lebih kompleks. Selain validasi pasar, *startup* hijau harus mampu menunjukkan dampak lingkungan melalui carbon footprint, pengurangan limbah, efisiensi energi, LCA sederhana, atau

indikator kinerja lingkungan. Bukti dampak ini penting untuk menarik investor, mitra industri, pemerintah, dan konsumen yang peduli terhadap keberlanjutan.

Di tingkat ASEAN, penguatan ekosistem startup dipandang penting untuk mendukung pertumbuhan ekonomi, pembangunan sosial, dan pengelolaan lingkungan. ERIA menekankan bahwa ekosistem kewirausahaan yang inklusif dan inovatif dapat membantu ASEAN menghadapi transformasi ekonomi sekaligus menjawab isu sosial dan lingkungan.

Dalam konteks Indonesia, *startup* hijau dan UMKM hijau perlu didukung melalui pendanaan, pembinaan, akses pasar, sertifikasi, literasi digital, dan kemitraan rantai pasok. *White paper* mengenai Green MSMEs and Net Zero menekankan pentingnya kerangka strategis bagi UMKM hijau dan transformasi ekonomi yang selaras dengan iklim di Indonesia.

Dengan demikian, inkubator bisnis, startup hijau, dan kewirausahaan berkelanjutan merupakan komponen penting dalam ekosistem inovasi hijau. Ketiganya mempercepat proses dari ide menuju pasar, memperluas partisipasi ekonomi hijau, dan menciptakan solusi yang lebih adaptif terhadap kebutuhan masyarakat.

STRATEGI PENGUATAN EKOSISTEM INOVASI HIJAU DI INDONESIA



Gambar 22 Strategi penguatan ekosistem inovasi hijau di Indonesia.

Strategi penguatan ekosistem inovasi hijau di Indonesia perlu dimulai dari penyelarasan kebijakan nasional, daerah, industri, dan pendidikan. Indonesia memiliki agenda pembangunan rendah karbon, ekonomi hijau, transisi energi, ekonomi sirkular, dan *net-zero emission*. Namun, berbagai agenda tersebut perlu dihubungkan dengan strategi riset, investasi, pengembangan SDM, dan industrialisasi hijau agar tidak berjalan terpisah. Bappenas telah menempatkan pembangunan rendah karbon sebagai paradigma menuju ekonomi hijau, sehingga ekosistem inovasi hijau perlu menjadi bagian dari implementasi pembangunan tersebut.

Strategi pertama adalah memperkuat riset terapan dan hilirisasi teknologi hijau. Banyak riset perguruan tinggi dan lembaga penelitian belum sampai pada tahap prototipe, demonstrasi, atau komersialisasi. Oleh karena itu, diperlukan pendanaan riset yang berorientasi pada solusi, kemitraan riset industri, laboratorium bersama, pengujian teknologi, serta

mekanisme transfer teknologi yang lebih efektif. BRIN, perguruan tinggi, pemerintah daerah, dan industri perlu memperkuat kolaborasi agar riset hijau tidak hanya menghasilkan publikasi, tetapi juga teknologi yang dapat diterapkan.

Strategi kedua adalah memperkuat pembiayaan hijau. Teknologi hijau sering membutuhkan investasi awal besar dan periode pengembalian yang lebih panjang. Oleh karena itu, Indonesia memerlukan instrumen pembiayaan seperti kredit hijau, dana inovasi, obligasi hijau, pembiayaan campuran, insentif pajak, dan dukungan investor berdampak. Tanpa pembiayaan yang memadai, *startup* hijau dan industri kecil sulit meningkatkan skala teknologi.

Strategi ketiga adalah membangun pasar bagi produk dan teknologi hijau. Pemerintah dapat menggunakan pengadaan barang dan jasa hijau sebagai instrumen penciptaan permintaan. Industri besar dapat mendorong pemasok menerapkan standar lingkungan. Konsumen dapat didorong melalui ekolabel, literasi, dan transparansi informasi produk. Pasar hijau tidak muncul secara otomatis; pasar perlu dibentuk melalui regulasi, insentif, edukasi, dan bukti manfaat ekonomi.

Strategi keempat adalah meningkatkan kapasitas sumber daya manusia. Transformasi hijau membutuhkan insinyur, manajer, perencana kota, arsitek, teknisi, analis data, auditor energi, ahli LCA, wirausaha, dan pembuat kebijakan yang memahami keberlanjutan. Perguruan tinggi dan lembaga pelatihan perlu memasukkan ekonomi hijau, inovasi hijau, LCA, carbon footprint, ESG, energi terbarukan, ekonomi sirkular, dan kewirausahaan berkelanjutan ke dalam kurikulum dan pelatihan profesional.

Strategi kelima adalah memperkuat ekosistem startup dan UMKM hijau. UMKM merupakan tulang punggung ekonomi Indonesia, tetapi banyak yang masih menghadapi keterbatasan teknologi, modal, literasi keberlanjutan, dan akses pasar. Penguatan UMKM hijau dapat dilakukan melalui inkubasi, digitalisasi,

efisiensi energi, sertifikasi, desain produk ramah lingkungan, akses pembiayaan, dan integrasi ke rantai pasok hijau. Agenda Green MSMEs and Net Zero menekankan pentingnya dukungan lintas pemangku kepentingan untuk mempercepat transformasi UMKM yang selaras dengan iklim.

Strategi keenam adalah memperkuat tata kelola pentahelix. Pemerintah, akademisi, industri, masyarakat, dan media perlu memiliki forum kolaborasi yang jelas pada tingkat nasional, regional, dan lokal. Forum tersebut dapat digunakan untuk merancang agenda riset, proyek percontohan, program pendidikan, pengembangan startup, pembiayaan hijau, dan kampanye publik. Kolaborasi seperti ini penting agar inovasi hijau tidak hanya menjadi program sektoral, tetapi menjadi gerakan sistemik.

Strategi ketujuh adalah memperkuat data, indikator, dan evaluasi. Ekosistem inovasi hijau membutuhkan indikator yang dapat mengukur jumlah riset hijau, paten hijau, startup hijau, investasi hijau, pengurangan emisi, efisiensi energi, penciptaan pekerjaan hijau, dan dampak sosial. Tanpa data, kebijakan inovasi hijau sulit dievaluasi. Oleh karena itu, sistem pemantauan dan evaluasi perlu dibangun agar strategi penguatan ekosistem inovasi hijau dapat berjalan berbasis bukti.

Dengan demikian, penguatan ekosistem inovasi hijau di Indonesia membutuhkan pendekatan sistemik. Inovasi hijau tidak cukup didorong melalui satu kebijakan atau satu teknologi. Diperlukan integrasi antara riset, pendidikan, industri, komunitas, pembiayaan, regulasi, pasar, dan budaya keberlanjutan. Dalam kerangka *green innovation and technology management*, Indonesia memiliki peluang besar untuk menjadikan inovasi hijau sebagai sumber daya saing, penciptaan pekerjaan hijau, dan transformasi menuju ekonomi rendah karbon.



BAB 15

STRATEGI IMPLEMENTASI *GREEN INNOVATION AND TECHNOLOGY MANAGEMENT*

Bab ini membahas strategi implementasi *green innovation and technology management* sebagai tahap penting setelah organisasi memahami konsep inovasi hijau, teknologi hijau, LCA, *carbon footprint*, TRL, dan ekosistem inovasi hijau. Implementasi merupakan proses menerjemahkan visi keberlanjutan menjadi program, proyek, teknologi, pembiayaan, tata kelola, indikator kinerja, dan perubahan perilaku organisasi. Dengan demikian, inovasi hijau tidak berhenti sebagai wacana, dokumen strategis, atau hasil penelitian, tetapi menjadi praktik manajerial yang nyata dalam proses produksi, layanan, rantai pasok, dan model bisnis.

Strategi implementasi inovasi hijau perlu dipahami sebagai proses sistemik karena perubahan menuju teknologi rendah karbon dan ramah lingkungan tidak dapat dilakukan secara parsial. Organisasi perlu menyelaraskan tujuan bisnis, kebijakan lingkungan, kemampuan teknologi, sumber daya manusia, pembiayaan, regulasi, dan budaya organisasi. IEA menekankan bahwa kebijakan inovasi energi bersih memerlukan paket kebijakan yang memadukan dukungan riset, insentif, regulasi, dan

pembentukan pasar agar inovator mampu mengatasi hambatan pada tiap tahap kematangan teknologi.

PERENCANAAN STRATEGIS INOVASI HIJAU

Perencanaan strategis inovasi hijau adalah proses merumuskan arah, tujuan, prioritas, sumber daya, dan mekanisme implementasi inovasi yang berorientasi pada keberlanjutan. Dalam organisasi modern, strategi inovasi hijau tidak cukup ditempatkan sebagai program tambahan, tetapi harus menjadi bagian dari strategi korporasi, strategi operasional, dan strategi daya saing. Hal ini penting karena tuntutan pasar, regulasi lingkungan, risiko iklim, dan tekanan pemangku kepentingan semakin mendorong organisasi untuk mengintegrasikan keberlanjutan dalam pengambilan keputusan bisnis (Porter & Kramer, 2011; Schaltegger, Hansen, & Lüdeke-Freund, 2016).

Tahap awal perencanaan strategis inovasi hijau adalah analisis konteks internal dan eksternal. Analisis internal mencakup kemampuan teknologi, kapasitas sumber daya manusia, budaya organisasi, struktur biaya, sistem produksi, rantai pasok, dan kinerja lingkungan. Analisis eksternal mencakup regulasi, tren pasar hijau, kebutuhan pelanggan, tekanan investor, kebijakan karbon, perkembangan teknologi, serta kompetisi industri. OECD menegaskan bahwa inovasi hijau dapat membantu negara dan organisasi mencapai tujuan lingkungan melalui peningkatan produktivitas material, pengurangan polusi, dan mitigasi perubahan iklim.

Perencanaan strategis juga membutuhkan penetapan visi dan sasaran yang jelas. Sasaran inovasi hijau dapat berupa pengurangan emisi karbon, efisiensi energi, pengurangan limbah, peningkatan penggunaan material daur ulang, substitusi bahan berbahaya, peningkatan produk ramah lingkungan, atau pengembangan model bisnis sirkular. Sasaran tersebut sebaiknya

terukur, terbatas waktu, dan terhubung dengan indikator kinerja organisasi agar dapat dimonitor secara objektif.

Strategi inovasi hijau perlu disusun berdasarkan prioritas dampak. Organisasi dapat menggunakan LCA, *carbon footprint*, audit energi, *material flow analysis*, dan *environmental performance indicator* untuk menemukan titik kritis atau *hotspot*. Setelah *hotspot* diketahui, organisasi dapat menentukan prioritas inovasi, misalnya memperbaiki proses yang paling boros energi, mengganti bahan baku intensif karbon, mengurangi limbah produksi, atau memperbaiki desain produk. Pendekatan ini membuat strategi inovasi hijau berbasis data, bukan hanya berbasis citra lingkungan.

Perencanaan strategis juga harus memperhatikan kesiapan teknologi dan kesiapan organisasi. Teknologi yang masih berada pada TRL rendah perlu diarahkan untuk riset, prototipe, dan validasi. Teknologi pada TRL menengah perlu diarahkan ke proyek percontohan dan demonstrasi. Teknologi pada TRL tinggi perlu diarahkan ke skala produksi, komersialisasi, dan difusi pasar. Dengan demikian, perencanaan strategis inovasi hijau harus membedakan antara agenda eksplorasi teknologi baru dan agenda eksploitasi teknologi yang sudah matang.

Dalam konteks Indonesia, perencanaan strategis inovasi hijau perlu diselaraskan dengan agenda pembangunan rendah karbon, ekonomi hijau, transisi energi, dan penguatan UMKM hijau. Bappenas menempatkan pembangunan rendah karbon sebagai pergeseran paradigma menuju ekonomi hijau, sehingga organisasi, industri, pemerintah daerah, dan perguruan tinggi perlu menurunkan agenda nasional tersebut ke dalam program inovasi, investasi, pendidikan, dan pengembangan teknologi.

ROADMAP PENGEMBANGAN TEKNOLOGI HIJAU



Gambar 15.2. Roadmap Pengembangan Teknologi Hijau

Gambar 23 Roadmap pengembangan teknologi hijau.

Roadmap pengembangan teknologi hijau adalah dokumen strategis yang menggambarkan tahapan pengembangan teknologi dari tahap riset, prototipe, demonstrasi, komersialisasi, hingga adopsi luas. *Roadmap* membantu organisasi memahami posisi teknologi saat ini, target masa depan, kebutuhan sumber daya, risiko, aktor yang terlibat, serta waktu implementasi. Dalam manajemen teknologi, roadmap berfungsi sebagai jembatan antara visi strategis dan tindakan operasional (Phaal, Farrukh, & Probert, 2004).

Roadmap teknologi hijau harus memuat beberapa komponen utama, yaitu tujuan teknologi, kebutuhan pasar, tingkat kesiapan teknologi, sumber daya riset, infrastruktur uji, kebutuhan pendanaan, mitra strategis, regulasi, indikator kinerja, dan target dampak lingkungan. Komponen tersebut membantu organisasi memastikan bahwa teknologi hijau tidak dikembangkan secara sporadis, tetapi melalui tahapan yang sistematis. IEA menyatakan bahwa kebijakan inovasi energi bersih harus disesuaikan dengan

tingkat kematangan teknologi, konteks pasar, dan hambatan spesifik yang dihadapi inovator.

Roadmap teknologi hijau juga perlu mengintegrasikan TRL. Pada tahap awal, organisasi perlu memperkuat riset dasar, validasi konsep, dan eksperimen laboratorium. Pada tahap menengah, organisasi perlu membangun prototipe, melakukan pengujian lapangan, dan menilai kinerja teknis serta lingkungan. Pada tahap lanjut, organisasi perlu menyiapkan sertifikasi, produksi skala besar, model bisnis, pembiayaan, dan strategi pasar. Dengan cara ini, *roadmap* tidak hanya menunjukkan urutan waktu, tetapi juga menunjukkan peningkatan kematangan teknologi.

Roadmap yang baik perlu menghubungkan teknologi dengan kebutuhan pengguna. Banyak teknologi hijau gagal bukan karena tidak canggih, tetapi karena tidak sesuai dengan kebutuhan pasar, kemampuan pengguna, infrastruktur lokal, atau daya beli. Oleh sebab itu, proses penyusunan *roadmap* perlu melibatkan pelanggan, pemasok, regulator, akademisi, komunitas, dan lembaga pembiayaan. Pendekatan partisipatif membantu memastikan bahwa teknologi dikembangkan berdasarkan kebutuhan nyata dan bukan hanya berdasarkan dorongan laboratorium.

Roadmap juga harus mempertimbangkan aspek keberlanjutan sepanjang siklus hidup. Teknologi hijau yang direncanakan perlu diuji melalui LCA, *carbon footprint*, *sustainability assessment*, dan analisis risiko. Misalnya, teknologi energi terbarukan perlu dinilai bukan hanya dari emisi operasional, tetapi juga dari material, proses manufaktur, lahan, limbah akhir masa pakai, dan kemampuan daur ulang. Dengan demikian, *roadmap* teknologi hijau harus menghindari perpindahan beban lingkungan dari satu tahap ke tahap lain.

Dalam konteks implementasi nasional, *roadmap* teknologi hijau dapat mendukung prioritas sektor seperti energi terbarukan, efisiensi energi, kendaraan listrik, bangunan hijau, pengolahan sampah, industri rendah karbon, pertanian cerdas iklim, dan

ekonomi sirkular. Reuters melaporkan bahwa Indonesia pernah menyampaikan rencana besar pembangunan energi terbarukan hingga 75 GW dalam 15 tahun, sehingga roadmap teknologi dan investasi menjadi sangat penting agar target tersebut tidak hanya bersifat deklaratif, tetapi dapat diimplementasikan melalui proyek, pembiayaan, dan infrastruktur.

MANAJEMEN PERUBAHAN DALAM ORGANISASI

Manajemen perubahan dalam organisasi adalah proses mengarahkan individu, tim, struktur, budaya, dan sistem kerja agar mampu menerima serta menjalankan inovasi hijau. Implementasi teknologi hijau sering mengubah kebiasaan kerja, standar produksi, pola pengadaan, sistem pelaporan, proses desain, hubungan dengan pemasok, dan cara organisasi mengukur keberhasilan. Oleh karena itu, inovasi hijau membutuhkan perubahan organisasi, bukan hanya pengadaan teknologi baru.

Perubahan menuju inovasi hijau sering menghadapi resistensi internal. Resistensi dapat muncul karena karyawan merasa teknologi baru lebih rumit, biaya awal dianggap tinggi, manfaat lingkungan dianggap tidak langsung, atau perubahan dianggap mengganggu rutinitas kerja. Kotter (1996) menjelaskan bahwa perubahan organisasi membutuhkan rasa urgensi, koalisi penggerak, visi, komunikasi, pemberdayaan, kemenangan jangka pendek, konsolidasi, dan pelebagaan perubahan. Prinsip ini relevan untuk implementasi inovasi hijau karena perubahan keberlanjutan perlu dipimpin dan dikomunikasikan secara konsisten.

Manajemen perubahan inovasi hijau perlu dimulai dari kepemimpinan puncak. Pimpinan organisasi harus menunjukkan komitmen melalui kebijakan, alokasi anggaran, insentif kinerja, integrasi target lingkungan dalam strategi bisnis, dan keteladanan perilaku. Jika pimpinan hanya menyampaikan jargon hijau tanpa

perubahan struktur dan sumber daya, maka inovasi hijau mudah dipahami sebagai program simbolis. Kepemimpinan yang kuat membantu membangun legitimasi internal dan mengurangi resistensi.

Perubahan juga membutuhkan pengembangan kapasitas sumber daya manusia. Karyawan perlu memahami prinsip efisiensi energi, pengelolaan limbah, produksi bersih, *carbon footprint*, LCA, ekonomi sirkular, dan sistem manajemen lingkungan. Pelatihan teknis diperlukan agar teknologi hijau dapat dioperasikan dengan benar, sedangkan pelatihan manajerial diperlukan agar setiap unit mampu mengintegrasikan indikator keberlanjutan dalam pekerjaannya. Dengan demikian, perubahan hijau harus didukung pembelajaran organisasi.

Komunikasi internal menjadi faktor penting dalam manajemen perubahan. Organisasi perlu menjelaskan mengapa inovasi hijau penting, apa manfaatnya bagi organisasi, bagaimana dampaknya terhadap pekerjaan, dan bagaimana karyawan dapat berkontribusi. Komunikasi yang baik membantu mengubah inovasi hijau dari kewajiban administratif menjadi gerakan bersama. Dalam teori *diffusion of innovations*, adopsi inovasi dipengaruhi oleh persepsi manfaat, kesesuaian, kompleksitas, kemampuan diuji coba, dan kemudahan diamati (Rogers, 2003).

Manajemen perubahan juga perlu memperhatikan sistem insentif. Jika kinerja karyawan hanya diukur dari kuantitas produksi atau efisiensi biaya jangka pendek, maka tujuan lingkungan akan sulit tercapai. Organisasi perlu memasukkan indikator seperti pengurangan energi, pengurangan limbah, efisiensi material, kepatuhan lingkungan, dan ide inovasi hijau ke dalam sistem penghargaan. Dengan cara ini, perilaku hijau menjadi bagian dari sistem manajemen, bukan sekadar kampanye.

PEMBIAYAAN DAN INVESTASI TEKNOLOGI HIJAU

Pembiayaan dan investasi merupakan faktor kunci dalam implementasi teknologi hijau. Banyak teknologi hijau membutuhkan biaya awal yang besar, seperti energi terbarukan, efisiensi energi, pengolahan limbah, elektrifikasi proses, teknologi digital lingkungan, dan infrastruktur rendah karbon. Meskipun biaya operasionalnya dapat lebih rendah dalam jangka panjang, hambatan investasi awal sering menjadi penghalang utama adopsi. Oleh karena itu, strategi pembiayaan hijau perlu dirancang secara matang.

Sumber pembiayaan teknologi hijau dapat berasal dari modal internal perusahaan, pinjaman bank, obligasi hijau, pembiayaan proyek, dana pemerintah, modal ventura, kemitraan publik-swasta, *blended finance*, hibah riset, dan pembiayaan internasional. Dalam teknologi yang masih baru, pembiayaan publik sering diperlukan untuk menurunkan risiko awal. Pada tahap komersialisasi, pembiayaan swasta menjadi semakin penting untuk memperluas skala pasar. OECD menekankan pentingnya standar produk dan pembiayaan hijau untuk mengurangi risiko investasi teknologi bersih dan meningkatkan kepercayaan pasar.

Analisis investasi teknologi hijau perlu menggunakan pendekatan biaya siklus hidup. Keputusan investasi tidak boleh hanya melihat biaya pembelian awal karena teknologi hijau sering menghasilkan manfaat jangka panjang berupa penghematan energi, pengurangan limbah, pengurangan biaya karbon, peningkatan efisiensi, dan akses pasar hijau. Oleh sebab itu, metode seperti Net Present Value, Internal Rate of Return, Payback Period, Life Cycle Costing, dan Cost-Benefit Analysis perlu dikombinasikan dengan indikator lingkungan.

Pembiayaan teknologi hijau juga perlu memperhitungkan risiko. Risiko tersebut mencakup risiko teknologi, risiko pasar, risiko regulasi, risiko harga energi, risiko rantai pasok, dan risiko

penerimaan pengguna. Investor memerlukan bukti bahwa teknologi memiliki tingkat kesiapan yang memadai, pasar yang jelas, manfaat lingkungan yang terukur, serta tata kelola proyek yang baik. IEA menyatakan bahwa dukungan kebijakan, insentif finansial, regulasi, dan dukungan riset berperan penting dalam mempercepat inovasi energi bersih, khususnya di negara berkembang.

Dalam konteks Indonesia, pembiayaan transisi energi dan teknologi hijau menjadi isu strategis. Reuters melaporkan bahwa ADB menyetujui pinjaman kebijakan sebesar USD 500 juta untuk mendukung upaya transisi energi Indonesia, termasuk penguatan kerangka regulasi energi bersih dan tata kelola sektor energi. Hal ini menunjukkan bahwa implementasi teknologi hijau membutuhkan dukungan pembiayaan besar dan koordinasi lintas lembaga.

Pembiayaan hijau tidak hanya penting bagi perusahaan besar, tetapi juga bagi UMKM dan *startup* hijau. UMKM sering memiliki keterbatasan modal, literasi keuangan, akses teknologi, dan kemampuan memenuhi standar lingkungan. White paper Bappenas tentang Green MSMEs and Net Zero menekankan perlunya kerangka strategis untuk mendorong transformasi ekonomi Indonesia yang selaras dengan iklim melalui pemberdayaan UMKM hijau.

KEBIJAKAN, REGULASI, DAN INSENTIF

Kebijakan, regulasi, dan insentif merupakan instrumen penting untuk menciptakan lingkungan yang mendukung implementasi inovasi hijau. Pasar tidak selalu secara otomatis memilih teknologi yang lebih ramah lingkungan karena harga produk konvensional sering belum mencerminkan biaya eksternal seperti polusi, emisi karbon, kerusakan lingkungan, dan dampak kesehatan. Oleh karena itu, pemerintah perlu merancang kebijakan

yang mengoreksi kegagalan pasar dan mendorong investasi pada teknologi hijau.

Regulasi lingkungan dapat berfungsi sebagai pendorong inovasi. Standar emisi, kewajiban efisiensi energi, aturan pengelolaan limbah, standar bangunan hijau, larangan bahan berbahaya, dan kewajiban pelaporan keberlanjutan dapat mendorong organisasi mencari solusi teknologi yang lebih bersih. Porter dan van der Linde (1995) berpendapat bahwa regulasi lingkungan yang dirancang dengan baik dapat mendorong inovasi, meningkatkan efisiensi, dan memperkuat daya saing.

Insentif ekonomi juga diperlukan karena teknologi hijau sering memiliki biaya awal tinggi. Insentif dapat berupa subsidi, pengurangan pajak, pembiayaan lunak, *feed-in tariff*, *carbon pricing*, kredit karbon, insentif riset, dan pengadaan pemerintah hijau. Studi terbaru tentang insentif fiskal menunjukkan bahwa kebijakan fiskal dan pajak dapat membantu menutup kesenjangan pembiayaan perusahaan dan membagi risiko inovasi teknologi hijau.

Kebijakan inovasi hijau perlu dirancang sebagai paket kebijakan. Dukungan riset saja tidak cukup jika tidak ada pasar. Insentif pembelian tidak cukup jika teknologi belum matang. Regulasi ketat dapat gagal jika industri tidak memiliki kapasitas teknologi. Oleh karena itu, kebijakan inovasi hijau perlu memadukan dukungan riset, demonstrasi, pembiayaan, standar, infrastruktur, pelatihan, dan pembentukan permintaan. IEA menekankan bahwa paket kebijakan yang efektif dapat mempercepat pengembangan teknologi energi bersih dan menciptakan peluang ekonomi.

Dalam konteks organisasi, kebijakan internal juga penting. Perusahaan, perguruan tinggi, dan lembaga publik perlu memiliki kebijakan pengadaan hijau, efisiensi energi, pengurangan limbah, perjalanan rendah karbon, penggunaan material ramah lingkungan, serta pelaporan indikator keberlanjutan. Kebijakan internal ini menjadi dasar perubahan perilaku dan operasional.

Tanpa kebijakan internal, inovasi hijau mudah bergantung pada inisiatif individu dan tidak berkelanjutan.

Di Indonesia, kebijakan pembangunan rendah karbon, ekonomi hijau, dan transisi energi perlu diterjemahkan ke dalam regulasi sektoral dan daerah. Tantangannya adalah memastikan konsistensi antara kebijakan nasional, kebijakan daerah, kebutuhan industri, dan kapasitas pelaku usaha. Jika kebijakan terlalu normatif tanpa instrumen implementasi, maka inovasi hijau sulit berkembang. Sebaliknya, jika kebijakan didukung insentif, standar, pembiayaan, dan evaluasi, maka inovasi hijau dapat menjadi penggerak transformasi ekonomi.

TATA KELOLA DAN KEPEMIMPINAN BERKELANJUTAN

Tata kelola berkelanjutan adalah sistem pengambilan keputusan, struktur organisasi, aturan, akuntabilitas, dan mekanisme koordinasi yang memastikan bahwa tujuan ekonomi, sosial, dan lingkungan dikelola secara seimbang. Dalam implementasi inovasi hijau, tata kelola menjadi penting karena inovasi hijau sering melibatkan banyak unit, seperti produksi, riset, keuangan, pemasaran, pengadaan, SDM, legal, dan hubungan masyarakat. Tanpa tata kelola yang jelas, program hijau mudah terfragmentasi.

Kepemimpinan berkelanjutan diperlukan untuk mengarahkan organisasi menuju transformasi hijau. Pemimpin tidak hanya bertugas menetapkan target, tetapi juga membangun budaya, menyediakan sumber daya, mengatasi konflik kepentingan, dan memastikan bahwa keputusan bisnis mempertimbangkan dampak jangka panjang. Kepemimpinan berkelanjutan berbeda dari kepemimpinan konvensional karena tidak hanya berfokus pada laba, tetapi juga pada nilai sosial, ekologi, dan antargenerasi.

Tata kelola inovasi hijau perlu memasukkan keberlanjutan ke dalam struktur formal organisasi. Hal ini dapat dilakukan melalui pembentukan komite keberlanjutan, unit manajemen lingkungan, tim inovasi hijau, sistem pelaporan ESG, audit internal, dan mekanisme pengambilan keputusan berbasis indikator lingkungan. Dengan struktur formal, inovasi hijau tidak bergantung pada proyek sesaat, tetapi menjadi bagian dari sistem organisasi.

Akuntabilitas menjadi elemen penting tata kelola. Organisasi perlu menjelaskan siapa yang bertanggung jawab atas target emisi, efisiensi energi, pengurangan limbah, inovasi produk hijau, dan pelaporan keberlanjutan. Jika tanggung jawab tidak jelas, maka program hijau sering gagal karena tidak ada pihak yang memiliki mandat kuat. Oleh sebab itu, indikator keberlanjutan perlu dimasukkan ke dalam target kinerja unit dan pimpinan.

Kepemimpinan berkelanjutan juga membutuhkan transparansi. Organisasi perlu menyampaikan capaian, tantangan, dan keterbatasan program inovasi hijau secara jujur. Transparansi penting untuk membangun kepercayaan pemangku kepentingan dan mencegah *greenwashing*. OECD menekankan bahwa inovasi hijau harus dikaitkan dengan kinerja lingkungan dan ekonomi, sehingga pengukuran dan pelaporan menjadi bagian penting dalam menilai kontribusi inovasi.

Dalam konteks Indonesia, tata kelola inovasi hijau perlu diperkuat pada level organisasi, daerah, dan nasional. Koordinasi antarlembaga, konsistensi kebijakan, kapasitas teknis, dan kualitas data menjadi faktor penting. Implementasi inovasi hijau tidak akan efektif jika setiap lembaga bekerja sendiri-sendiri. Oleh karena itu, tata kelola kolaboratif berbasis pentahelix—pemerintah, akademisi, industri, masyarakat, dan media—perlu diperkuat.

MONITORING DAN EVALUASI PROGRAM INOVASI HIJAU

Monitoring dan evaluasi atau Monev merupakan proses untuk menilai apakah program inovasi hijau berjalan sesuai rencana, menghasilkan *output*, mencapai *outcome*, dan memberikan dampak lingkungan yang diharapkan. Monitoring berfokus pada pemantauan pelaksanaan program secara berkala, sedangkan evaluasi berfokus pada penilaian efektivitas, efisiensi, relevansi, dampak, dan keberlanjutan program. Tanpa Monev, organisasi sulit mengetahui apakah inovasi hijau benar-benar memberikan hasil atau hanya menjadi aktivitas administratif.

Monev program inovasi hijau harus dimulai dari indikator yang jelas. Indikator dapat berupa penurunan konsumsi energi, pengurangan emisi CO₂-eq, pengurangan limbah, peningkatan material daur ulang, jumlah produk hijau, jumlah proyek inovasi, nilai investasi hijau, jumlah karyawan terlatih, efisiensi biaya, dan tingkat kepuasan pemangku kepentingan. Indikator tersebut perlu dikaitkan dengan target waktu dan baseline agar kemajuan dapat diukur secara objektif.

Monitoring perlu dilakukan secara periodik. Data dapat dikumpulkan melalui audit energi, pengukuran emisi, catatan produksi, laporan keuangan, sistem digital, sensor IoT, survei karyawan, dan laporan pemasok. Penggunaan teknologi digital dapat mempercepat monitoring karena data energi, emisi, limbah, dan proses produksi dapat dipantau hampir secara real-time. Dengan demikian, monitoring tidak hanya menjadi kegiatan pelaporan akhir tahun, tetapi alat pengendalian operasional.

Evaluasi perlu melihat hubungan antara input, aktivitas, *output*, *outcome*, dan *impact*. *Input* mencakup anggaran, SDM, teknologi, dan kebijakan. Aktivitas mencakup pelatihan, instalasi teknologi, riset, pilot project, dan kampanye. *Output* mencakup produk, laporan, prototipe, atau fasilitas baru. *Outcome* mencakup perubahan kinerja lingkungan dan perilaku organisasi. *Impact*

mencakup kontribusi terhadap pengurangan emisi, efisiensi sumber daya, daya saing, dan keberlanjutan jangka panjang.

Monev juga perlu memasukkan pembelajaran organisasi. Jika suatu program tidak mencapai target, organisasi harus menganalisis penyebabnya, apakah karena teknologi tidak sesuai, data kurang akurat, pembiayaan kurang, resistensi internal, regulasi tidak mendukung, atau pasar belum siap. Evaluasi yang baik tidak hanya menghukum kegagalan, tetapi menghasilkan pembelajaran untuk perbaikan desain program berikutnya.

Dalam implementasi inovasi hijau, Monev juga penting untuk akuntabilitas eksternal. Investor, pemerintah, konsumen, dan masyarakat semakin membutuhkan bukti bahwa organisasi benar-benar menurunkan dampak lingkungan. Karena itu, hasil Monev dapat digunakan dalam laporan keberlanjutan, laporan ESG, sertifikasi, pengajuan pembiayaan hijau, dan komunikasi kepada pemangku kepentingan. Dengan Monev yang baik, organisasi dapat membangun kredibilitas dan menghindari klaim hijau yang tidak berbasis data.

HAMBATAN IMPLEMENTASI DAN STRATEGI PENYELESAIANNYA

Implementasi *green innovation and technology management* sering menghadapi berbagai hambatan. Hambatan pertama adalah biaya awal yang tinggi. Banyak teknologi hijau membutuhkan investasi besar untuk riset, peralatan, instalasi, pelatihan, sertifikasi, dan perubahan proses. Strategi penyelesaiannya adalah menggunakan analisis biaya siklus hidup, mengakses pembiayaan hijau, mencari insentif pemerintah, menerapkan proyek bertahap, dan memulai dari area dengan potensi penghematan terbesar.

Hambatan kedua adalah keterbatasan teknologi dan infrastruktur. Beberapa teknologi hijau belum matang, belum tersedia secara lokal, sulit dipelihara, atau belum didukung

infrastruktur pendukung. Strategi penyelesaiannya adalah menggunakan pendekatan TRL, melakukan pilot project, bekerja sama dengan perguruan tinggi dan lembaga riset, membangun kemitraan teknologi, serta memperkuat kapasitas teknis internal. IEA menekankan bahwa kebijakan inovasi perlu disesuaikan dengan kematangan teknologi dan konteks lokal agar teknologi bersih dapat berkembang lebih efektif.

Hambatan ketiga adalah resistensi organisasi. Karyawan dan manajer dapat menolak perubahan karena merasa nyaman dengan sistem lama, khawatir terhadap beban kerja baru, atau tidak memahami manfaat inovasi hijau. Strategi penyelesaiannya adalah memperkuat komunikasi, pelatihan, kepemimpinan, insentif, dan partisipasi karyawan. Perubahan akan lebih mudah diterima jika individu memahami alasan perubahan dan melihat manfaatnya bagi pekerjaan serta masa depan organisasi.

Hambatan keempat adalah lemahnya data dan indikator. Banyak organisasi belum memiliki data energi, emisi, limbah, dan material yang akurat. Tanpa data, organisasi sulit menyusun target dan mengevaluasi keberhasilan. Strategi penyelesaiannya adalah membangun sistem pencatatan lingkungan, melakukan audit awal, menggunakan indikator sederhana, memanfaatkan teknologi digital, serta meningkatkan kapasitas staf dalam pengukuran dan pelaporan.

Hambatan kelima adalah ketidakpastian regulasi dan pasar. Teknologi hijau sering bergantung pada kebijakan, insentif, standar, harga energi, harga karbon, dan preferensi konsumen. Jika regulasi berubah atau pasar belum siap, investasi menjadi berisiko. Strategi penyelesaiannya adalah melakukan analisis skenario, membangun dialog dengan pemerintah, mengikuti perkembangan kebijakan, melakukan diversifikasi pasar, serta mengembangkan model bisnis yang adaptif.

Hambatan keenam adalah lemahnya kolaborasi ekosistem. Inovasi hijau sulit berkembang jika pemerintah, industri,

perguruan tinggi, masyarakat, dan lembaga pembiayaan bekerja secara terpisah. Strategi penyelesaiannya adalah memperkuat kolaborasi pentahelix, membangun forum inovasi hijau, mengembangkan proyek percontohan bersama, memperkuat inkubator bisnis, dan menciptakan mekanisme berbagi risiko. OECD menekankan bahwa transisi menuju inovasi hijau memerlukan lebih dari pendekatan *technology push*; diperlukan pula dukungan sisi permintaan dan perubahan organisasi serta kelembagaan.

Dengan demikian, hambatan implementasi inovasi hijau harus dipahami sebagai tantangan manajerial, teknologis, finansial, sosial, dan kelembagaan. Penyelesaiannya memerlukan pendekatan terpadu yang menggabungkan strategi, pembiayaan, regulasi, kepemimpinan, data, dan kolaborasi. Dalam kerangka *green innovation and technology management*, keberhasilan implementasi tidak hanya diukur dari keberadaan teknologi hijau, tetapi dari kemampuan organisasi mengubah teknologi tersebut menjadi kinerja lingkungan, nilai ekonomi, dan manfaat sosial yang nyata.



BAB 16

GREEN ENTREPRENEURSHIP **DAN PELUANG USAHA BERKELANJUTAN**

Kewirausahaan hijau tidak hanya berorientasi pada penciptaan keuntungan ekonomi, tetapi juga diarahkan untuk menjawab persoalan lingkungan, sosial, dan keberlanjutan. Dalam kerangka ini, wirausaha hijau dipahami sebagai pelaku usaha yang mampu mengidentifikasi peluang bisnis dari isu-isu lingkungan, seperti efisiensi energi, pengelolaan limbah, ekonomi sirkular, produk ramah lingkungan, energi terbarukan, pertanian berkelanjutan, transportasi rendah emisi, dan jasa konsultasi keberlanjutan.

Green entrepreneurship menjadi semakin relevan karena dunia usaha saat ini menghadapi tekanan perubahan iklim, keterbatasan sumber daya, tuntutan konsumen hijau, regulasi lingkungan, serta meningkatnya perhatian investor terhadap ESG. OECD menekankan bahwa penguatan UKM dan kewirausahaan hijau membutuhkan akses terhadap pembiayaan berkelanjutan, keterampilan, teknologi, efisiensi energi, dan kebijakan yang mendorong transisi hijau. Dalam konteks Indonesia, penguatan UMKM hijau juga menjadi bagian penting dari transformasi ekonomi yang selaras dengan target *net-zero emission*.

PENGERTIAN *GREEN ENTREPRENEURSHIP*

Green entrepreneurship adalah aktivitas kewirausahaan yang mengintegrasikan tujuan ekonomi, lingkungan, dan sosial dalam proses penciptaan nilai. Seorang wirausaha hijau tidak hanya melihat peluang dari kebutuhan pasar, tetapi juga dari masalah lingkungan yang membutuhkan solusi inovatif. Dengan demikian, *green entrepreneurship* dapat dipahami sebagai proses menciptakan usaha yang menghasilkan keuntungan sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan meningkatkan kualitas kehidupan masyarakat.

Dalam literatur kewirausahaan berkelanjutan, *green entrepreneurship* sering dikaitkan dengan *sustainable entrepreneurship*, yaitu proses mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mengeksploitasi peluang bisnis yang mampu mengurangi dampak terhadap lingkungan serta menciptakan manfaat sosial. Gast, Gundolf, dan Cesinger (2017) menjelaskan bahwa kewirausahaan berkelanjutan berupaya menggabungkan orientasi ekonomi, sosial, dan ekologis dalam praktik bisnis. Artinya, keberhasilan usaha tidak hanya diukur dari pertumbuhan pendapatan, tetapi juga dari kontribusinya terhadap keberlanjutan.

Green entrepreneurship berbeda dari kewirausahaan konvensional karena memiliki orientasi nilai yang lebih luas. Kewirausahaan konvensional umumnya berfokus pada inovasi, laba, pertumbuhan pasar, dan keunggulan kompetitif. Sementara itu, *green entrepreneurship* memasukkan aspek lingkungan sebagai inti model bisnis. Produk, proses, rantai pasok, kemasan, energi, limbah, dan pola konsumsi dipertimbangkan agar usaha tidak hanya produktif, tetapi juga bertanggung jawab terhadap ekosistem.

Green entrepreneurship dapat berbentuk usaha kecil, startup teknologi, *social enterprise*, koperasi hijau, usaha berbasis komunitas, atau perusahaan komersial yang menjadikan

keberlanjutan sebagai inti strategi. Contohnya adalah usaha daur ulang plastik, produk kerajinan dari limbah, energi surya skala rumah tangga, pertanian organik, restoran bebas sampah, jasa audit energi, platform berbagi barang, transportasi ramah lingkungan, dan produksi material bangunan rendah karbon.

Dalam konteks manajemen inovasi hijau, *green entrepreneurship* berperan sebagai mekanisme hilirisasi gagasan dan teknologi. Banyak inovasi hijau lahir dari riset, tetapi tidak berdampak luas jika tidak dikembangkan menjadi produk, jasa, atau model bisnis. Wirausaha hijau berperan menghubungkan teknologi dengan pasar, kebutuhan konsumen, pembiayaan, dan jejaring distribusi. Oleh karena itu, *green entrepreneurship* menjadi jembatan antara inovasi teknologi dan perubahan sosial-ekonomi.

Di Indonesia, *green entrepreneurship* mulai berkembang seiring meningkatnya kesadaran terhadap ekonomi sirkular, perubahan iklim, pengelolaan sampah, dan produk ramah lingkungan. Penelitian Nuringsih (2020) menunjukkan bahwa *green entrepreneurship* memiliki keterkaitan dengan nilai hijau dan pembangunan berkelanjutan, terutama dalam membangun kesadaran kewirausahaan yang lebih peduli lingkungan di kalangan generasi muda.

Dengan demikian, *green entrepreneurship* dapat dirumuskan sebagai kegiatan kewirausahaan yang mengubah masalah lingkungan menjadi peluang usaha berkelanjutan melalui inovasi produk, proses, layanan, dan model bisnis. Orientasinya bukan sekadar “menjual produk hijau”, tetapi membangun sistem usaha yang mengurangi dampak ekologis, menciptakan nilai ekonomi, dan memberikan manfaat sosial.

KARAKTERISTIK PENGUSAHA HIJAU

Pengusaha hijau memiliki karakteristik yang membedakannya dari pengusaha konvensional. Karakteristik

pertama adalah kesadaran ekologis. Pengusaha hijau memahami bahwa kegiatan ekonomi memiliki hubungan langsung dengan lingkungan, baik melalui konsumsi energi, penggunaan material, produksi limbah, emisi karbon, maupun perubahan perilaku konsumen. Kesadaran ini membuat keputusan bisnis tidak hanya mempertimbangkan keuntungan, tetapi juga dampak jangka panjang terhadap alam dan masyarakat.

Karakteristik kedua adalah orientasi pada *triple bottom line*, yaitu keseimbangan antara keuntungan ekonomi, manfaat sosial, dan perlindungan lingkungan. Pengusaha hijau tidak menolak keuntungan, tetapi menempatkan keuntungan sebagai sarana untuk memperkuat keberlanjutan usaha dan dampak positif. Prinsip ini sejalan dengan pemikiran Elkington (1997) bahwa bisnis berkelanjutan perlu memperhatikan *people*, *planet*, dan *profit* secara terpadu.

Karakteristik ketiga adalah kemampuan inovatif. Pengusaha hijau perlu mampu menciptakan produk, proses, dan model bisnis yang lebih efisien dan lebih rendah dampak lingkungan. Inovasi dapat berupa penggunaan bahan daur ulang, desain kemasan yang dapat digunakan kembali, proses produksi hemat energi, digitalisasi layanan, model bisnis berbasis sewa, atau sistem pengembalian produk setelah digunakan. Dengan inovasi, isu lingkungan dapat diubah menjadi sumber keunggulan kompetitif.

Karakteristik keempat adalah keberanian menghadapi ketidakpastian. Pasar hijau sering masih berkembang, regulasi dapat berubah, teknologi belum sepenuhnya matang, dan konsumen belum selalu bersedia membayar lebih untuk produk ramah lingkungan. Oleh karena itu, pengusaha hijau membutuhkan keberanian, ketekunan, dan kemampuan adaptasi. Mereka perlu membangun kepercayaan pasar melalui edukasi, bukti kualitas, transparansi, dan konsistensi nilai.

Karakteristik kelima adalah orientasi pembelajaran. Dunia keberlanjutan bergerak cepat, baik dari sisi teknologi, regulasi, preferensi konsumen, maupun standar pasar. Pengusaha hijau perlu terus belajar tentang LCA, *carbon footprint*, ekonomi sirkular, sertifikasi lingkungan, pemasaran hijau, pembiayaan hijau, dan manajemen rantai pasok. Kemampuan belajar membuat usaha hijau lebih siap menghadapi perubahan dan meningkatkan kualitas inovasi.

Karakteristik keenam adalah kepedulian sosial. Banyak usaha hijau tidak hanya berfokus pada produk ramah lingkungan, tetapi juga melibatkan masyarakat, UMKM, petani, pemulung, komunitas lokal, perempuan, dan kelompok rentan. Pengusaha hijau yang kuat biasanya mampu membangun model bisnis yang inklusif, misalnya dengan memberdayakan pemasok lokal, menciptakan pekerjaan hijau, atau meningkatkan pendapatan komunitas melalui pengelolaan sumber daya yang lebih baik.

Karakteristik ketujuh adalah integritas dan transparansi. Karena produk hijau mudah disalahgunakan untuk *greenwashing*, pengusaha hijau harus mampu menunjukkan bukti atas klaim lingkungannya. Klaim seperti “ramah lingkungan”, “organik”, “rendah karbon”, atau “berkelanjutan” harus didukung data, proses, sertifikasi, atau penjelasan yang dapat diverifikasi. Transparansi meningkatkan kepercayaan konsumen dan memperkuat reputasi usaha.

PELUANG BISNIS BERBASIS LINGKUNGAN

Peluang bisnis berbasis lingkungan muncul dari kebutuhan masyarakat dan industri untuk mengurangi dampak ekologis. Masalah seperti sampah plastik, polusi udara, limbah makanan, konsumsi energi tinggi, pencemaran air, ketergantungan bahan bakar fosil, dan penurunan kualitas lingkungan dapat menjadi sumber peluang bisnis. Dalam *green entrepreneurship*, masalah

lingkungan tidak hanya dipandang sebagai beban, tetapi sebagai ruang inovasi.

Peluang pertama adalah bisnis pengelolaan sampah dan ekonomi sirkular. Usaha dapat dikembangkan dalam bentuk bank sampah digital, daur ulang plastik, kompos limbah organik, pengolahan limbah tekstil, *upcycling* produk bekas, jasa pengumpulan sampah terpilah, serta desain produk berbasis material daur ulang. Model bisnis ini penting karena urbanisasi dan konsumsi modern menghasilkan volume sampah yang terus meningkat.

Peluang kedua adalah energi terbarukan dan efisiensi energi. Usaha dapat bergerak di bidang pemasangan panel surya, audit energi, lampu hemat energi, manajemen energi bangunan, sistem monitoring listrik, teknologi biogas, kompor efisien, dan jasa konsultasi efisiensi energi. Di tengah meningkatnya kebutuhan dekarbonisasi, bisnis energi hijau memiliki prospek besar, terutama jika didukung regulasi, pembiayaan, dan kesadaran konsumen.

Peluang ketiga adalah pertanian dan pangan berkelanjutan. Usaha dapat dikembangkan melalui pertanian organik, hidroponik, urban farming, pupuk kompos, pestisida nabati, pangan lokal, pengurangan limbah makanan, kemasan pangan ramah lingkungan, serta rantai pasok pangan rendah karbon. Pasar pangan sehat dan berkelanjutan semakin berkembang karena konsumen modern mulai memperhatikan kesehatan, keamanan pangan, dan dampak lingkungan.

Peluang keempat adalah produk rumah tangga ramah lingkungan. Produk seperti sabun alami, deterjen rendah fosfat, sedotan bambu, tas pakai ulang, kemasan isi ulang, perlengkapan dapur bebas plastik, produk perawatan tubuh alami, dan produk berbahan lokal dapat menjadi usaha potensial. Produk ini biasanya menarik konsumen urban yang memiliki kesadaran lingkungan dan gaya hidup hijau.

Peluang kelima adalah bangunan hijau dan material ramah lingkungan. Usaha dapat mencakup material bangunan daur ulang, bata ramah lingkungan, cat rendah VOC, insulasi alami, desain bangunan hemat energi, taman vertikal, pengelolaan air hujan, dan jasa konsultasi *green building*. Di sektor arsitektur dan perkotaan, peluang ini semakin relevan karena bangunan dan kota berkontribusi besar terhadap konsumsi energi dan emisi.

Peluang keenam adalah jasa profesional keberlanjutan. Seiring meningkatnya kebutuhan ESG, *carbon footprint*, LCA, sertifikasi lingkungan, pelaporan keberlanjutan, dan audit energi, muncul peluang bisnis jasa konsultasi. Peluang ini relevan bagi lulusan perguruan tinggi, peneliti, insinyur, perencana kota, arsitek, dan profesional manajemen yang memiliki keahlian analisis lingkungan.

Peluang ketujuh adalah bisnis berbasis digital untuk keberlanjutan. Teknologi digital dapat digunakan untuk platform jual-beli produk hijau, aplikasi pengelolaan sampah, *marketplace* produk lokal berkelanjutan, sistem pemantauan emisi, aplikasi berbagi kendaraan, platform donasi karbon, dan pelacakan rantai pasok. OECD menekankan bahwa digitalisasi dapat membantu UKM dalam transisi hijau, terutama melalui efisiensi, akses informasi, dan peningkatan kapasitas bisnis.

INOVASI PRODUK HIJAU UNTUK PASAR MODERN

Inovasi produk hijau adalah proses menciptakan atau memperbaiki produk agar memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah sepanjang siklus hidupnya. Produk hijau tidak hanya dinilai dari bahan yang digunakan, tetapi juga dari proses produksi, konsumsi energi, umur pakai, kemasan, distribusi, penggunaan, perawatan, dan akhir masa pakai. Oleh karena itu, inovasi produk hijau perlu mengacu pada pendekatan siklus hidup.

Pasar modern memiliki karakteristik yang semakin kritis terhadap isu lingkungan. Konsumen tidak hanya membeli fungsi produk, tetapi juga nilai, identitas, dan dampak yang melekat pada produk tersebut. Konsumen muda, komunitas urban, lembaga pendidikan, perusahaan, dan pasar ekspor semakin memperhatikan asal bahan, proses produksi, jejak karbon, kemasan, dan reputasi merek. Karena itu, inovasi produk hijau dapat menjadi sumber diferensiasi pasar.

Inovasi produk hijau dapat dilakukan melalui substitusi bahan. Bahan yang sulit terurai, beracun, boros energi, atau berasal dari sumber tidak berkelanjutan dapat diganti dengan bahan daur ulang, biomaterial, material lokal, bahan organik, atau material bersertifikasi. Namun, penggantian bahan harus diuji secara teknis dan lingkungan agar tidak menurunkan kualitas produk atau menciptakan dampak baru di tahap lain.

Inovasi juga dapat dilakukan melalui desain produk. Produk dapat dirancang agar tahan lama, mudah diperbaiki, modular, hemat energi, ringan, mudah dibongkar, dan mudah didaur ulang. Prinsip *eco-design* menekankan bahwa keputusan desain pada tahap awal sangat menentukan dampak lingkungan produk sepanjang siklus hidupnya. Dengan desain yang baik, produk hijau tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga fungsional dan menarik bagi konsumen.

Kemasan merupakan aspek penting dalam inovasi produk hijau. Banyak produk modern menghasilkan limbah kemasan yang besar. Oleh karena itu, usaha hijau dapat menggunakan kemasan isi ulang, kemasan kompos, kemasan kertas bersertifikat, kemasan minimal, atau sistem pengembalian kemasan. Namun, inovasi kemasan perlu mempertimbangkan keamanan produk, biaya, logistik, dan perilaku konsumen.

Inovasi produk hijau juga perlu memperhatikan standar dan klaim lingkungan. Produk yang dipasarkan sebagai ramah lingkungan harus memiliki penjelasan yang jelas, misalnya

“menggunakan 70% bahan daur ulang”, “dapat digunakan ulang”, “bebas bahan tertentu”, atau “mengurangi konsumsi energi”. Klaim yang terlalu umum dapat menimbulkan keraguan konsumen. Transparansi menjadi elemen penting dalam pemasaran produk hijau.

Dalam pasar modern, inovasi produk hijau harus menggabungkan keberlanjutan dengan estetika, kenyamanan, harga, dan kualitas. Banyak konsumen tidak akan membeli produk hijau jika produk tersebut dianggap kurang menarik, sulit digunakan, atau terlalu mahal. Oleh sebab itu, pengusaha hijau perlu memastikan bahwa nilai lingkungan berjalan bersama nilai fungsional dan nilai emosional produk.

UMKM DAN EKONOMI HIJAU

UMKM memiliki posisi strategis dalam ekonomi hijau karena jumlahnya besar, menyerap banyak tenaga kerja, dan dekat dengan masyarakat lokal. Di Indonesia, UMKM merupakan tulang punggung ekonomi nasional, sehingga transformasi menuju ekonomi hijau tidak mungkin berhasil tanpa melibatkan UMKM. Bappenas menegaskan bahwa integrasi prinsip keberlanjutan dalam pengembangan UMKM menjadi keharusan bagi Indonesia untuk mencapai target *net-zero* dan transformasi ekonomi yang selaras dengan iklim.

UMKM dapat berkontribusi pada ekonomi hijau melalui efisiensi energi, pengurangan limbah, penggunaan bahan lokal, desain produk ramah lingkungan, digitalisasi pemasaran, dan penerapan ekonomi sirkular. Usaha kecil seperti kuliner, kerajinan, fesyen, pertanian, perikanan, konstruksi, dan jasa dapat mengurangi dampak lingkungan melalui langkah sederhana, seperti mengurangi kemasan plastik, memanfaatkan limbah produksi, menggunakan energi hemat, dan memperbaiki manajemen bahan baku.

Namun, UMKM sering menghadapi hambatan dalam menerapkan praktik hijau. Hambatan tersebut mencakup keterbatasan modal, rendahnya literasi lingkungan, kurangnya akses teknologi, belum adanya standar sederhana, terbatasnya akses pasar hijau, dan anggapan bahwa praktik hijau selalu mahal. OECD menyebut bahwa dukungan kebijakan bagi UKM perlu mencakup peningkatan efisiensi energi, akses pembiayaan berkelanjutan, keterampilan, dan teknologi.

Transformasi UMKM menuju ekonomi hijau perlu dilakukan secara bertahap. Tahap awal dapat dimulai dari praktik yang murah dan mudah, seperti pemilahan limbah, penghematan listrik, pengurangan air, penggunaan bahan baku lokal, dan pencatatan konsumsi energi. Tahap berikutnya dapat berupa desain ulang produk, penggantian bahan, sertifikasi, digitalisasi, dan kolaborasi rantai pasok. Pendekatan bertahap penting agar UMKM tidak merasa terbebani.

UMKM hijau juga membutuhkan dukungan ekosistem. Pemerintah dapat memberikan pelatihan, insentif, sertifikasi sederhana, pembiayaan mikro hijau, dan akses pengadaan. Perguruan tinggi dapat membantu riset, desain produk, pendampingan teknologi, dan pengukuran dampak. Industri besar dapat mengintegrasikan UMKM hijau ke dalam rantai pasok. Komunitas dan media dapat membantu edukasi pasar. Dengan kolaborasi tersebut, UMKM hijau dapat berkembang lebih cepat.

Dalam konteks lokal, UMKM hijau dapat menjadi alat pemberdayaan masyarakat. Misalnya, usaha pengolahan limbah organik menjadi kompos dapat mendukung petani; usaha kerajinan limbah dapat meningkatkan pendapatan rumah tangga; dan usaha pangan lokal dapat memperkuat ekonomi daerah. Dengan demikian, ekonomi hijau bukan hanya agenda teknologi tinggi, tetapi juga strategi ekonomi kerakyatan yang berbasis sumber daya lokal dan keberlanjutan.

UMKM hijau juga memiliki peluang besar dalam pasar modern karena konsumen mulai memperhatikan produk lokal, sehat, etis, dan ramah lingkungan. Namun, agar mampu bersaing, UMKM perlu memperkuat kualitas produk, desain kemasan, cerita merek, pemasaran digital, konsistensi pasokan, dan bukti klaim lingkungan. Dengan demikian, ekonomi hijau dapat menjadi sumber daya saing baru bagi UMKM Indonesia.

STRATEGI PEMASARAN PRODUK RAMAH LINGKUNGAN

Strategi pemasaran produk ramah lingkungan atau *green marketing* adalah proses merancang, mengomunikasikan, dan mendistribusikan produk yang memiliki nilai lingkungan kepada konsumen. *Green marketing* tidak hanya berarti mempromosikan produk sebagai “hijau”, tetapi juga menjelaskan manfaat, bukti, nilai, dan kontribusi produk terhadap keberlanjutan. Strategi ini penting karena konsumen membutuhkan informasi yang jelas sebelum mempercayai klaim lingkungan.

Langkah pertama dalam *green marketing* adalah segmentasi pasar. Tidak semua konsumen memiliki tingkat kepedulian lingkungan yang sama. Ada konsumen yang sangat peduli lingkungan, ada yang tertarik jika harga kompetitif, ada yang membeli karena gaya hidup, dan ada yang belum memahami manfaat produk hijau. Dengan segmentasi, pengusaha dapat menyesuaikan pesan, harga, kanal distribusi, dan strategi komunikasi.

Langkah kedua adalah membangun proposisi nilai yang kuat. Produk ramah lingkungan harus menawarkan manfaat ganda, yaitu manfaat fungsional dan manfaat lingkungan. Misalnya, produk pembersih alami tidak hanya harus aman bagi lingkungan, tetapi juga efektif membersihkan. Lampu hemat energi tidak hanya rendah emisi, tetapi juga menghemat biaya listrik. Jika

manfaat fungsional lemah, konsumen sulit mempertahankan pembelian.

Langkah ketiga adalah membangun narasi merek. Produk hijau sering memiliki cerita yang kuat, seperti penggunaan bahan lokal, pemberdayaan masyarakat, pengurangan sampah, konservasi alam, atau produksi etis. Cerita ini dapat meningkatkan nilai emosional produk. Namun, narasi harus jujur dan berbasis fakta. Konsumen modern semakin kritis terhadap klaim hijau yang tidak jelas.

Langkah keempat adalah transparansi informasi. Pengusaha perlu menjelaskan bahan, proses produksi, kemasan, cara penggunaan, cara pembuangan, atau dampak lingkungan produk. Jika memungkinkan, produk dapat dilengkapi dengan sertifikasi, label, QR code, laporan dampak sederhana, atau data pengurangan limbah. Transparansi membantu membangun kepercayaan dan membedakan produk hijau dari produk yang hanya melakukan *greenwashing*.

Langkah kelima adalah pemanfaatan kanal digital. Media sosial, *marketplace*, *website*, video pendek, dan komunitas daring dapat membantu memperluas pasar produk hijau. Kanal digital juga memungkinkan edukasi konsumen melalui konten tentang gaya hidup hijau, cara menggunakan produk, manfaat lingkungan, dan cerita di balik produk. Bagi UMKM, pemasaran digital dapat menjadi sarana murah untuk menjangkau konsumen yang lebih luas.

Langkah keenam adalah kolaborasi dengan komunitas. Produk ramah lingkungan sering lebih mudah diterima jika dipromosikan melalui komunitas yang memiliki nilai serupa, seperti komunitas *zero waste*, *urban farming*, pecinta alam, komunitas ibu rumah tangga, sekolah, kampus, dan organisasi sosial. Kolaborasi ini dapat meningkatkan kredibilitas dan menciptakan pasar berbasis kepercayaan.

Langkah ketujuh adalah pengelolaan harga. Produk hijau sering dianggap lebih mahal karena bahan, proses, atau skala produksi yang masih terbatas. Pengusaha perlu menjelaskan nilai jangka panjang, seperti penghematan, daya tahan, kesehatan, dampak sosial, dan kontribusi lingkungan. Strategi harga juga dapat disesuaikan melalui paket isi ulang, sistem langganan, bundling, atau insentif pengembalian kemasan.

SOCIAL ENTERPRISE DAN BISNIS BERBASIS DAMPAK

Social enterprise adalah bentuk usaha yang menggunakan mekanisme bisnis untuk mencapai tujuan sosial dan lingkungan. Berbeda dari bisnis konvensional yang menjadikan laba sebagai tujuan utama, social enterprise menempatkan dampak sebagai inti misi organisasi. Namun, berbeda pula dari organisasi amal murni, *social enterprise* berusaha membangun pendapatan agar misi sosial dan lingkungan dapat berkelanjutan.

Dalam konteks *green entrepreneurship*, *social enterprise* dapat menjadi model yang sangat relevan. Banyak persoalan lingkungan berkaitan dengan persoalan sosial, seperti kemiskinan, pekerjaan informal, akses energi, akses air bersih, pengelolaan sampah, dan kerentanan masyarakat terhadap perubahan iklim. *Social enterprise* dapat mengembangkan model usaha yang sekaligus mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan kesejahteraan komunitas.

Contoh *social enterprise* hijau adalah usaha daur ulang yang memberdayakan pemulung, koperasi energi desa, usaha pertanian organik berbasis petani kecil, bisnis produk *upcycling* yang melibatkan perempuan, platform pengurangan limbah makanan, atau usaha air bersih berbasis komunitas. Dalam model seperti ini, dampak tidak hanya berada pada produk akhir, tetapi juga pada proses produksi dan hubungan dengan pemangku kepentingan.

Literatur *social entrepreneurship* menekankan bahwa usaha sosial menggunakan prinsip bisnis untuk menciptakan dampak

sosial dan lingkungan. Rezky menjelaskan bahwa social entrepreneurship menggunakan prinsip bisnis untuk menciptakan dan mengelola usaha yang menghasilkan dampak sosial serta lingkungan. Pandangan ini sejalan dengan perkembangan bisnis berbasis dampak yang tidak hanya mengejar profit, tetapi juga memperkuat solusi terhadap masalah publik.

Bisnis berbasis dampak membutuhkan pengukuran dampak. Dampak dapat diukur melalui jumlah limbah yang dikurangi, emisi yang dihindari, pendapatan komunitas yang meningkat, jumlah penerima manfaat, peningkatan akses energi, atau perubahan perilaku masyarakat. Pengukuran ini penting untuk menjaga akuntabilitas dan menarik dukungan investor berdampak, donor, pemerintah, dan konsumen.

Social enterprise juga menghadapi tantangan keberlanjutan finansial. Karena memiliki misi sosial dan lingkungan, biaya operasional sering lebih kompleks dibandingkan bisnis biasa. Oleh karena itu, *social enterprise* perlu merancang model pendapatan yang kuat, mengelola biaya, membangun kemitraan, dan menjaga keseimbangan antara misi dan pasar. Jika terlalu berorientasi pada misi tanpa model bisnis yang sehat, usaha sulit bertahan; sebaliknya, jika terlalu mengejar profit, misi sosial dapat melemah.

Dalam kerangka *green innovation and technology management*, *social enterprise* menunjukkan bahwa inovasi hijau tidak selalu harus berbentuk teknologi tinggi. Inovasi hijau juga dapat berupa desain kelembagaan, model bisnis, pola kemitraan, dan pemberdayaan komunitas. Dengan demikian, social enterprise menjadi salah satu jalur penting untuk memastikan bahwa transisi hijau berjalan inklusif dan memberi manfaat bagi masyarakat luas.

TANTANGAN DAN PROSPEK GREEN ENTREPRENEURSHIP

Green entrepreneurship memiliki prospek besar, tetapi juga menghadapi tantangan yang kompleks. Tantangan pertama adalah

keterbatasan modal. Banyak wirausaha hijau membutuhkan investasi untuk bahan ramah lingkungan, riset produk, sertifikasi, kemasan, teknologi produksi, dan pemasaran. Namun, lembaga keuangan sering belum memahami risiko dan potensi bisnis hijau, terutama pada level UMKM dan *startup*. Karena itu, akses pembiayaan hijau menjadi kebutuhan penting.

Tantangan kedua adalah rendahnya literasi konsumen. Banyak konsumen belum memahami perbedaan antara produk hijau yang benar-benar berdampak dan produk yang hanya menggunakan klaim hijau. Akibatnya, produk ramah lingkungan kadang dianggap mahal atau kurang praktis. Untuk mengatasi hal ini, pengusaha hijau perlu melakukan edukasi pasar melalui informasi sederhana, transparansi proses, cerita produk, dan bukti manfaat.

Tantangan ketiga adalah biaya produksi yang relatif tinggi. Bahan baku ramah lingkungan, proses produksi etis, dan kemasan berkelanjutan sering lebih mahal karena skala produksi masih kecil. Strategi yang dapat dilakukan adalah kolaborasi pemasok, pembelian kolektif, desain produk sederhana, sistem isi ulang, pemanfaatan bahan lokal, serta peningkatan efisiensi produksi. Ketika skala usaha meningkat, biaya dapat ditekan.

Tantangan keempat adalah risiko *greenwashing*. Ketika tren hijau meningkat, sebagian pelaku usaha dapat menggunakan klaim ramah lingkungan tanpa bukti yang kuat. Hal ini dapat merusak kepercayaan konsumen terhadap produk hijau secara umum. Oleh karena itu, *green entrepreneurship* membutuhkan etika bisnis, transparansi, sertifikasi yang relevan, dan komunikasi yang bertanggung jawab.

Tantangan kelima adalah keterbatasan regulasi dan infrastruktur pendukung. Pengelolaan sampah, energi terbarukan, daur ulang, dan produk ramah lingkungan membutuhkan dukungan regulasi, sistem logistik, fasilitas pemrosesan, standar, dan pasar. Tanpa infrastruktur, pengusaha hijau sulit

mengembangkan usaha secara efisien. Oleh karena itu, dukungan pemerintah dan kolaborasi ekosistem sangat penting.

Meskipun demikian, prospek *green entrepreneurship* sangat besar. Perubahan iklim, krisis energi, tuntutan ESG, gaya hidup sehat, kesadaran konsumen, dan kebijakan ekonomi hijau menciptakan peluang pasar baru. OECD menegaskan bahwa tidak ada transisi *net-zero* tanpa keterlibatan UKM, karena UKM memiliki peran besar dalam ekonomi, pekerjaan, dan rantai pasok.

Di Indonesia, prospek *green entrepreneurship* juga diperkuat oleh besarnya jumlah UMKM, kekayaan sumber daya lokal, potensi ekonomi kreatif, kebutuhan pengelolaan sampah, peluang energi terbarukan, dan pasar konsumen muda. Bappenas bersama mitra pembangunan telah mendorong kerangka strategis Green MSMEs and Net Zero untuk memperkuat transformasi ekonomi Indonesia yang selaras dengan iklim.

Dengan demikian, *green entrepreneurship* memiliki masa depan yang menjanjikan apabila didukung oleh pembiayaan, regulasi, literasi konsumen, inovasi produk, ekosistem kolaboratif, dan pengukuran dampak yang kredibel. *Green entrepreneurship* perlu dipahami sebagai salah satu instrumen utama untuk mengubah inovasi hijau menjadi peluang usaha, penciptaan lapangan kerja, pemberdayaan masyarakat, dan transformasi ekonomi berkelanjutan.



BAB 17

***GREEN INNOVATION* UNTUK MASYARAKAT UMUM DAN PENDIDIKAN**

Inovasi hijau tidak hanya menjadi urusan industri, pemerintah, perguruan tinggi, atau startup teknologi, tetapi juga perlu menjadi bagian dari kehidupan masyarakat sehari-hari. Keberhasilan teknologi hijau sangat ditentukan oleh tingkat literasi masyarakat, pendidikan lingkungan, perubahan perilaku, partisipasi komunitas, dan kemampuan publik untuk mengadopsi solusi yang sederhana, murah, dan sesuai konteks lokal.

Dalam perspektif pendidikan, inovasi hijau berkaitan erat dengan *Education for Sustainable Development* atau ESD. UNESCO menempatkan ESD sebagai pendekatan pendidikan yang mendorong peserta didik memiliki pengetahuan, keterampilan, nilai, dan sikap untuk mengambil keputusan yang mendukung keberlanjutan. Program ESD for 2030 menekankan lima area prioritas, yaitu kebijakan, lingkungan belajar, kapasitas pendidik, pemberdayaan pemuda, dan aksi pada tingkat lokal.

PENTINGNYA LITERASI INOVASI HIJAU BAGI MASYARAKAT

Literasi inovasi hijau adalah kemampuan masyarakat untuk memahami, menilai, memilih, menggunakan, dan berpartisipasi dalam pengembangan solusi ramah lingkungan. Literasi ini tidak hanya mencakup pengetahuan tentang perubahan iklim, sampah, energi, air, dan polusi, tetapi juga pemahaman tentang bagaimana teknologi, perilaku, kebijakan, dan gaya hidup dapat mengurangi tekanan terhadap lingkungan. Dengan literasi yang baik, masyarakat tidak hanya menjadi pengguna teknologi hijau, tetapi juga menjadi pelaku perubahan.

Literasi inovasi hijau penting karena banyak persoalan lingkungan muncul dari aktivitas keseharian masyarakat. Konsumsi energi rumah tangga, penggunaan plastik sekali pakai, pilihan transportasi, pola makan, pengelolaan sampah, penggunaan air, dan perilaku konsumsi berpengaruh terhadap jejak ekologis. Tanpa pemahaman yang memadai, masyarakat sulit membedakan antara solusi yang benar-benar ramah lingkungan dan sekadar klaim hijau atau *greenwashing*.

Dalam konteks perubahan iklim, literasi hijau membantu masyarakat memahami hubungan antara aktivitas manusia dan peningkatan emisi gas rumah kaca. Masyarakat perlu mengetahui bahwa keputusan sederhana seperti menghemat listrik, menggunakan transportasi umum, mengurangi limbah makanan, memilah sampah, atau membeli produk tahan lama dapat menjadi bagian dari kontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim. Literasi ini memperkuat kesadaran bahwa keberlanjutan bukan hanya urusan pemerintah, tetapi juga tanggung jawab warga.

Literasi inovasi hijau juga penting untuk meningkatkan penerimaan terhadap teknologi baru. Banyak teknologi hijau, seperti panel surya, kendaraan listrik, kompor hemat energi, biopori, bank sampah digital, dan aplikasi pengelolaan limbah,

mebutuhkan pemahaman pengguna. Jika masyarakat tidak memahami manfaat, cara penggunaan, biaya, dan dampaknya, teknologi tersebut sulit diadopsi. Rogers (2003) menjelaskan bahwa adopsi inovasi dipengaruhi oleh persepsi manfaat, kesesuaian dengan nilai pengguna, tingkat kerumitan, kemampuan diuji coba, dan kemudahan diamati.

Literasi hijau juga memiliki dimensi sosial. Masyarakat yang memiliki literasi lingkungan lebih mampu berpartisipasi dalam musyawarah publik, pengawasan lingkungan, program pemerintah, dan gerakan komunitas. Partisipasi ini penting karena banyak kebijakan hijau membutuhkan dukungan warga, seperti pengurangan sampah plastik, konservasi air, perlindungan ruang terbuka hijau, transportasi publik, dan energi bersih. Dengan demikian, literasi menjadi prasyarat demokratisasi inovasi hijau.

Di Indonesia, peningkatan literasi hijau perlu disesuaikan dengan karakter masyarakat yang beragam. Masyarakat perkotaan menghadapi isu sampah, transportasi, polusi udara, dan konsumsi energi. Masyarakat pedesaan menghadapi isu pertanian, air, hutan, energi lokal, dan perubahan iklim. Masyarakat pesisir menghadapi isu abrasi, mangrove, pencemaran laut, dan perubahan mata pencaharian. Karena itu, literasi inovasi hijau harus berbasis konteks lokal, bukan hanya berupa kampanye umum.

Literasi inovasi hijau juga harus dikemas secara komunikatif. Bahasa teknis seperti LCA, *carbon footprint*, ekonomi sirkular, dan efisiensi energi perlu diterjemahkan menjadi pesan sederhana yang dekat dengan kehidupan masyarakat. Misalnya, carbon footprint dapat dijelaskan sebagai “jejak emisi dari aktivitas kita”; ekonomi sirkular dapat dijelaskan sebagai “menggunakan kembali bahan agar tidak cepat menjadi sampah”; dan efisiensi energi dapat dijelaskan sebagai “memakai energi secukupnya tanpa mengurangi fungsi”.

Dengan demikian, literasi inovasi hijau merupakan fondasi perubahan sosial menuju keberlanjutan. Masyarakat yang

memiliki literasi hijau akan lebih kritis, lebih siap mengadopsi teknologi, lebih peduli terhadap dampak konsumsi, dan lebih mampu berpartisipasi dalam pembangunan rendah karbon.

PENDIDIKAN LINGKUNGAN DI SEKOLAH DAN PERGURUAN TINGGI

Pendidikan lingkungan di sekolah dan perguruan tinggi merupakan instrumen strategis untuk membangun generasi yang memiliki kesadaran, pengetahuan, keterampilan, dan etika keberlanjutan. Pendidikan lingkungan tidak hanya mengajarkan konsep ekologis, tetapi juga membentuk cara berpikir sistemik tentang hubungan manusia, teknologi, ekonomi, budaya, dan alam. Karena itu, pendidikan lingkungan perlu menjadi bagian integral dari kurikulum, budaya sekolah, kegiatan kampus, dan praktik kehidupan sehari-hari.

UNESCO melalui ESD for 2030 menekankan bahwa pendidikan berperan penting dalam mencapai SDGs dan menghadapi tantangan keberlanjutan global. ESD tidak hanya bertujuan mentransfer pengetahuan, tetapi juga mendorong transformasi individu dan masyarakat agar mampu mengambil tindakan berkelanjutan. Pendekatan ini relevan bagi sekolah dan perguruan tinggi karena peserta didik perlu dilatih menjadi pemecah masalah, bukan hanya penghafal konsep lingkungan.

Pada tingkat sekolah, pendidikan lingkungan dapat dimasukkan melalui mata pelajaran IPA, IPS, geografi, prakarya, kewirausahaan, pendidikan Pancasila, seni, dan proyek lintas mata pelajaran. Topik seperti sampah, air, energi, tanaman, polusi, iklim, pangan, dan kesehatan lingkungan dapat dikaitkan dengan pengalaman langsung siswa. Pendekatan berbasis proyek, seperti membuat kompos, menanam pohon, mengukur sampah kelas, membuat biopori, atau menghemat listrik, dapat membuat pendidikan lingkungan lebih konkret.

Program sekolah hijau memiliki peran penting dalam membangun budaya lingkungan. Di Indonesia, Program Adiwiyata telah menjadi salah satu model pendidikan lingkungan yang mendorong sekolah membangun budaya peduli dan berwawasan lingkungan. Studi tahun 2024 menyebutkan bahwa Adiwiyata diarahkan untuk menciptakan budaya cinta lingkungan di sekolah dan meningkatkan kreativitas siswa dalam pengelolaan lingkungan.

Pada tingkat perguruan tinggi, pendidikan lingkungan perlu dikembangkan lebih luas melalui kurikulum, riset, pengabdian kepada masyarakat, tata kelola kampus, dan inovasi teknologi. Perguruan tinggi dapat mengintegrasikan isu keberlanjutan dalam mata kuliah teknik, arsitektur, perencanaan kota, ekonomi, manajemen, pendidikan, hukum, pertanian, kesehatan, dan ilmu sosial. Dengan demikian, keberlanjutan tidak hanya menjadi mata kuliah pilihan, tetapi menjadi perspektif lintas disiplin.

Perguruan tinggi juga perlu menjadi laboratorium hidup atau *living laboratory* bagi inovasi hijau. Kampus dapat menerapkan pengelolaan sampah terpadu, efisiensi energi, panel surya, transportasi ramah lingkungan, konservasi air, ruang terbuka hijau, kantin rendah sampah, dan pengukuran *carbon footprint*. Mahasiswa dapat terlibat langsung dalam riset dan evaluasi program tersebut. Dengan cara ini, kampus tidak hanya mengajarkan keberlanjutan, tetapi mempraktikkannya.

Pendidikan lingkungan juga perlu mengembangkan kompetensi abad ke-21, seperti berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, komunikasi, literasi data, dan pemecahan masalah. Isu lingkungan bersifat kompleks sehingga tidak dapat diselesaikan dengan satu disiplin ilmu. Peserta didik perlu dilatih memahami keterkaitan antara teknologi, kebijakan, ekonomi, perilaku, dan nilai budaya. Pendekatan ini sesuai dengan arah UNESCO yang

menekankan pembelajaran transformatif untuk aksi iklim dan keberlanjutan.

Dengan demikian, pendidikan lingkungan di sekolah dan perguruan tinggi adalah investasi jangka panjang untuk membangun masyarakat berkelanjutan. Pendidikan lingkungan yang baik tidak berhenti pada pengetahuan, tetapi menghasilkan kebiasaan, kepedulian, inovasi, dan partisipasi aktif dalam memecahkan masalah lingkungan.

PERAN GURU DAN DOSEN DALAM MEMBANGUN KESADARAN KEBERLANJUTAN

Guru dan dosen memiliki peran sentral dalam membangun kesadaran keberlanjutan karena mereka berinteraksi langsung dengan peserta didik. Peran pendidik tidak hanya menyampaikan materi, tetapi juga membentuk nilai, sikap, cara berpikir, dan kebiasaan. Dalam konteks inovasi hijau, guru dan dosen berperan sebagai fasilitator pembelajaran, teladan perilaku, pengembang kurikulum, penghubung komunitas, dan penggerak perubahan budaya pendidikan.

Guru di sekolah dapat membangun kesadaran keberlanjutan melalui pembelajaran kontekstual. Isu lingkungan perlu dikaitkan dengan lingkungan sekitar siswa, seperti sampah sekolah, kebersihan sungai, penggunaan air, tanaman di halaman, kualitas udara, makanan sehat, dan energi listrik. Ketika siswa melihat hubungan antara pelajaran dan kehidupannya, kesadaran lingkungan menjadi lebih mudah tumbuh. Pembelajaran tidak lagi bersifat abstrak, tetapi menjadi pengalaman nyata.

Dosen di perguruan tinggi memiliki peran lebih luas karena dapat menghubungkan pendidikan, riset, dan pengabdian kepada masyarakat. Dosen dapat mengembangkan mata kuliah berbasis keberlanjutan, membimbing penelitian tentang teknologi hijau, mengajak mahasiswa melakukan pengabdian berbasis

lingkungan, dan membangun kolaborasi dengan industri serta pemerintah. Dengan demikian, dosen menjadi aktor penting dalam ekosistem inovasi hijau.

Guru dan dosen juga berperan sebagai teladan. Peserta didik lebih mudah menerima nilai keberlanjutan jika melihat pendidiknya menerapkan perilaku ramah lingkungan, seperti menghemat energi, mengurangi plastik sekali pakai, memilah sampah, menggunakan bahan ajar digital secara bijak, atau merawat lingkungan belajar. Keteladanan membuat pendidikan lingkungan tidak hanya berupa nasihat, tetapi menjadi praktik sehari-hari.

Peran pendidik dalam ESD juga ditegaskan oleh UNESCO. Salah satu area prioritas ESD for 2030 adalah membangun kapasitas pendidik agar mampu mengintegrasikan keberlanjutan dalam pembelajaran. Hal ini menunjukkan bahwa guru dan dosen perlu memperoleh pelatihan, sumber belajar, metode pedagogis, dan dukungan kelembagaan agar mampu mengajarkan isu keberlanjutan secara efektif.

Guru dan dosen juga perlu mengembangkan metode pembelajaran aktif. Pendidikan lingkungan akan lebih bermakna jika peserta didik diajak melakukan observasi, eksperimen, proyek, diskusi, kampanye, audit lingkungan, studi kasus, dan refleksi. Misalnya, mahasiswa dapat menghitung jejak karbon kegiatan kampus, siswa dapat membuat kompos dari sampah kantin, atau kelas dapat merancang kampanye hemat energi. Metode ini membangun keterampilan praktis dan tanggung jawab sosial.

Di era digital, guru dan dosen juga perlu memanfaatkan media teknologi. Video, simulasi, aplikasi pengukuran energi, peta digital, sensor sederhana, media sosial, dan platform pembelajaran dapat digunakan untuk meningkatkan pemahaman peserta didik. Namun, teknologi digital harus diarahkan untuk memperkuat aksi nyata, bukan hanya konsumsi informasi. Pendidikan hijau harus menggabungkan literasi digital dengan literasi ekologis.

Dengan demikian, guru dan dosen adalah agen perubahan dalam membangun kesadaran keberlanjutan. Peran mereka sangat menentukan apakah inovasi hijau dipahami sebagai konsep teknis semata atau menjadi nilai hidup yang tertanam dalam generasi muda.

PERILAKU RAMAH LINGKUNGAN DALAM KEHIDUPAN SEHARI-HARI

Perilaku ramah lingkungan dalam kehidupan sehari-hari adalah tindakan individu dan keluarga yang bertujuan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Perilaku ini dapat berupa penghematan energi, pengurangan sampah, pemilahan limbah, penggunaan air secara bijak, konsumsi produk lokal, penggunaan transportasi rendah emisi, perawatan tanaman, dan pengurangan limbah makanan. Meskipun tampak sederhana, perilaku harian memiliki dampak kolektif yang besar apabila dilakukan secara luas.

Perilaku ramah lingkungan perlu dimulai dari rumah. Rumah tangga dapat menghemat listrik dengan mematikan lampu dan peralatan yang tidak digunakan, menggunakan peralatan hemat energi, mengatur ventilasi alami, dan memanfaatkan cahaya matahari. Penghematan energi tidak hanya menurunkan biaya, tetapi juga mengurangi emisi tidak langsung dari pembangkit listrik. Dalam konteks literasi hijau, keluarga menjadi ruang pendidikan pertama bagi perilaku keberlanjutan.

Pengurangan sampah adalah perilaku penting lainnya. Masyarakat dapat menerapkan prinsip 5R, yaitu *refuse, reduce, reuse, recycle*, dan *rot*. Prinsip ini mendorong masyarakat menolak barang yang tidak perlu, mengurangi konsumsi, menggunakan kembali barang, mendaur ulang, dan mengolah sampah organik menjadi kompos. Perubahan perilaku ini penting karena persoalan sampah bukan hanya masalah teknologi pengolahan, tetapi juga pola konsumsi.

Perilaku konsumsi juga perlu diarahkan menjadi lebih berkelanjutan. Masyarakat dapat memilih produk yang tahan lama, dapat diperbaiki, memiliki kemasan minimal, menggunakan bahan lokal, atau diproduksi secara etis. Konsumen juga dapat mengurangi pembelian impulsif dan memperpanjang masa pakai barang. Dalam ekonomi sirkular, konsumsi yang bertanggung jawab menjadi bagian penting untuk mengurangi tekanan terhadap sumber daya.

Transportasi sehari-hari juga memiliki dampak lingkungan. Penggunaan transportasi umum, berjalan kaki, bersepeda, berbagi kendaraan, atau memilih kendaraan rendah emisi dapat menurunkan polusi dan konsumsi bahan bakar. Namun, perilaku ini memerlukan dukungan infrastruktur, keamanan, kenyamanan, dan kebijakan publik. Karena itu, perilaku hijau individu perlu didukung sistem kota yang ramah lingkungan.

Perilaku ramah lingkungan juga mencakup pengelolaan air. Masyarakat dapat memperbaiki kebocoran, menggunakan air secukupnya, menampung air hujan, membuat biopori, menjaga saluran air, dan tidak membuang limbah ke sungai. Pada wilayah yang rawan kekeringan atau banjir, perilaku pengelolaan air menjadi bagian dari adaptasi perubahan iklim.

Perubahan perilaku tidak dapat terjadi hanya melalui informasi. Diperlukan kebiasaan, norma sosial, fasilitas, insentif, dan contoh nyata. Teori perilaku lingkungan menunjukkan bahwa tindakan ramah lingkungan dipengaruhi oleh pengetahuan, nilai, kemampuan, kemudahan, biaya, dan dukungan sosial. Oleh karena itu, kampanye lingkungan perlu disertai fasilitas seperti tempat sampah terpilah, akses transportasi publik, bank sampah, dan pasar produk ramah lingkungan.

Dengan demikian, perilaku ramah lingkungan dalam kehidupan sehari-hari adalah bentuk inovasi sosial yang penting. Teknologi hijau tidak akan efektif jika tidak didukung perilaku hijau. Sebaliknya, perilaku hijau masyarakat dapat mempercepat

adopsi teknologi, memperkuat budaya keberlanjutan, dan mengurangi dampak lingkungan secara kolektif.

KOMUNITAS HIJAU DAN GERAKAN SOSIAL LINGKUNGAN

Komunitas hijau adalah kelompok masyarakat yang memiliki kepedulian dan kegiatan bersama untuk menjaga lingkungan. Komunitas ini dapat berbentuk komunitas bank sampah, komunitas pecinta sungai, komunitas *urban farming*, komunitas sepeda, komunitas *zero waste*, komunitas konservasi mangrove, komunitas energi desa, atau kelompok edukasi lingkungan. Komunitas hijau berperan penting karena mampu mengubah kesadaran individu menjadi aksi kolektif.

Gerakan sosial lingkungan muncul ketika masyarakat merasa bahwa masalah lingkungan membutuhkan perubahan yang lebih luas. Gerakan ini dapat mendorong pemerintah memperbaiki kebijakan, menekan industri agar lebih bertanggung jawab, dan mengedukasi publik tentang praktik keberlanjutan. Dalam banyak kasus, gerakan lingkungan menjadi kekuatan moral yang menjaga agar pembangunan tidak mengabaikan ekologi dan keadilan sosial.

Komunitas hijau memiliki keunggulan karena dekat dengan masalah lokal. Mereka memahami kondisi sungai, sampah, ruang terbuka, banjir, polusi, dan kebiasaan masyarakat setempat. Pengetahuan lokal ini membuat komunitas mampu merancang solusi yang lebih sesuai konteks. Misalnya, pengelolaan sampah berbasis RT/RW lebih mudah diterapkan jika melibatkan warga yang memahami pola konsumsi dan perilaku lingkungan di wilayahnya.

Bank sampah merupakan contoh gerakan komunitas yang berkembang di Indonesia. Studi tentang partisipasi masyarakat dalam bank sampah menunjukkan bahwa keterlibatan komunitas diperlukan dalam pengelolaan sampah padat, dan bank sampah

menjadi salah satu indikator penerimaan masyarakat terhadap sistem pengelolaan sampah di tingkat desa atau lingkungan.

Komunitas hijau juga dapat berperan dalam pendidikan nonformal. Banyak masyarakat memperoleh pengetahuan lingkungan bukan dari sekolah, tetapi dari kegiatan komunitas, pelatihan, media sosial, kerja bakti, kebun komunitas, atau kampanye lokal. Pendidikan berbasis komunitas sering lebih efektif karena dilakukan melalui pengalaman langsung dan hubungan sosial yang dekat.

Gerakan sosial lingkungan juga penting dalam melindungi ekosistem yang memiliki nilai budaya. Contoh dari Papua menunjukkan bahwa hutan mangrove memiliki nilai ekologis dan sosial bagi perempuan lokal, tetapi terancam oleh pembangunan dan pencemaran plastik. Upaya penanaman kembali mangrove dan pembersihan wilayah pesisir yang dipimpin komunitas menunjukkan pentingnya peran warga dalam konservasi lingkungan.

Namun, komunitas hijau sering menghadapi tantangan berupa keterbatasan dana, regenerasi anggota, konflik kepentingan, rendahnya dukungan pemerintah, dan kelelahan aktivisme. Oleh karena itu, komunitas perlu didukung melalui kemitraan dengan sekolah, kampus, pemerintah daerah, dunia usaha, dan media. Dukungan tersebut dapat berupa pelatihan, fasilitas, pendanaan kecil, akses data, dan pengakuan formal.

Dengan demikian, komunitas hijau dan gerakan sosial lingkungan merupakan bagian penting dari ekosistem inovasi hijau. Mereka memperluas partisipasi publik, menjaga keberlanjutan lokal, dan menjadikan inovasi hijau sebagai gerakan sosial, bukan hanya proyek teknologi.

TEKNOLOGI SEDERHANA RAMAH LINGKUNGAN UNTUK MASYARAKAT

Teknologi sederhana ramah lingkungan adalah teknologi yang mudah dibuat, mudah digunakan, murah, sesuai kebutuhan lokal, dan mampu mengurangi dampak lingkungan. Teknologi seperti ini penting karena tidak semua masyarakat memiliki akses terhadap teknologi tinggi. Dalam banyak konteks, solusi sederhana justru lebih efektif karena sesuai dengan kemampuan ekonomi, budaya, dan kapasitas teknis masyarakat.

Salah satu contoh teknologi sederhana adalah komposter rumah tangga. Komposter dapat digunakan untuk mengolah sampah organik menjadi pupuk. Teknologi ini membantu mengurangi volume sampah yang dikirim ke tempat pembuangan akhir dan menghasilkan manfaat bagi tanaman. Komposter dapat dibuat dari ember bekas, drum, lubang tanah, atau sistem takakura. Selain ramah lingkungan, teknologi ini juga mendidik keluarga tentang siklus bahan organik.

Biopori merupakan teknologi sederhana lain yang relevan untuk masyarakat perkotaan. Lubang resapan biopori membantu meningkatkan infiltrasi air hujan, mengurangi genangan, memperbaiki kualitas tanah, dan mengolah sampah organik. Teknologi ini relatif murah dan dapat diterapkan di halaman rumah, sekolah, kampus, kantor, dan ruang publik. Biopori menunjukkan bahwa inovasi hijau tidak selalu membutuhkan teknologi kompleks.

Teknologi pemanenan air hujan juga penting, terutama di wilayah yang mengalami kekeringan musiman atau tekanan air bersih. Masyarakat dapat menampung air hujan dari atap rumah untuk digunakan menyiram tanaman, mencuci, atau kebutuhan non-konsumsi lainnya. Jika dirancang dengan penyaringan yang baik, teknologi ini dapat mengurangi ketergantungan pada air tanah dan membantu konservasi sumber daya air.

Energi terbarukan skala kecil juga dapat menjadi teknologi sederhana bagi masyarakat. Contohnya adalah lampu tenaga surya, pompa air surya, kompor biomassa efisien, biogas rumah tangga, dan pengering hasil pertanian tenaga surya. Teknologi ini sangat relevan di wilayah pedesaan, pertanian, dan daerah yang akses energinya terbatas. Namun, keberhasilan penerapannya memerlukan pelatihan, perawatan, dan model pembiayaan yang sesuai.

Teknologi sederhana juga dapat diterapkan dalam pengurangan plastik. Misalnya, sistem isi ulang, tas kain, wadah pakai ulang, sedotan bambu, kemasan daun, dan alat produksi sederhana berbasis bahan lokal. Di tingkat UMKM, teknologi sederhana seperti pencacah plastik, alat pres limbah, atau mesin pengering hemat energi dapat membantu meningkatkan nilai ekonomi limbah.

Teknologi digital sederhana juga dapat mendukung masyarakat. Aplikasi pencatatan sampah, grup WhatsApp bank sampah, peta lokasi pengumpulan limbah, kampanye media sosial, atau sistem QR sederhana untuk informasi produk dapat memperkuat literasi dan koordinasi. Digitalisasi tidak harus mahal; yang penting adalah membantu masyarakat mengakses informasi, berkoordinasi, dan mengukur perubahan.

Dengan demikian, teknologi sederhana ramah lingkungan memiliki peran penting dalam memperluas akses inovasi hijau. Teknologi tersebut dapat menjadi pintu masuk bagi masyarakat untuk memahami keberlanjutan secara praktis, meningkatkan kemandirian lokal, dan membangun budaya inovasi dari bawah.

PARTISIPASI PUBLIK DALAM PROGRAM INOVASI HIJAU

Partisipasi publik adalah keterlibatan masyarakat dalam proses perencanaan, pelaksanaan, pengawasan, dan evaluasi program inovasi hijau. Partisipasi ini penting karena program

lingkungan sering gagal ketika dirancang secara *top-down* tanpa memahami kebutuhan, kemampuan, nilai, dan aspirasi masyarakat. Inovasi hijau yang melibatkan publik lebih berpeluang diterima, digunakan, dan dipelihara.

Partisipasi publik dapat dimulai dari tahap identifikasi masalah. Masyarakat perlu diajak menjelaskan masalah lingkungan yang mereka alami, seperti banjir, sampah, polusi, kekurangan air, penurunan kualitas tanah, atau hilangnya ruang hijau. Informasi dari masyarakat membantu perencana dan pengambil kebijakan memahami persoalan dari sudut pandang warga. Dengan demikian, solusi yang dirancang menjadi lebih relevan.

Pada tahap perencanaan, masyarakat dapat dilibatkan dalam musyawarah, forum warga, survei, lokakarya, atau *focus group discussion*. Keterlibatan ini membantu memilih prioritas program, lokasi intervensi, teknologi yang digunakan, pembagian peran, dan mekanisme pembiayaan. Partisipasi juga meningkatkan rasa memiliki atau *sense of ownership* sehingga masyarakat lebih bersedia menjaga program.

Pada tahap pelaksanaan, partisipasi publik dapat berupa kerja bakti, pengelolaan bank sampah, penanaman pohon, pemeliharaan taman, pengelolaan komposter, pemantauan kualitas air, atau kampanye lingkungan. Partisipasi langsung membangun keterampilan dan memperkuat solidaritas sosial. Dalam program inovasi hijau, warga tidak hanya menjadi penerima manfaat, tetapi juga pelaksana dan penjaga keberlanjutan program.

Pada tahap monitoring dan evaluasi, masyarakat dapat membantu mengawasi apakah program berjalan sesuai tujuan. Misalnya, warga dapat memantau volume sampah yang berkurang, jumlah pohon yang hidup, perubahan perilaku memilah sampah, atau kualitas kebersihan lingkungan. Evaluasi partisipatif membuat program lebih transparan dan mencegah dominasi keputusan oleh pihak tertentu.

Partisipasi publik juga memperkuat legitimasi kebijakan. Program seperti pembatasan plastik, transportasi publik, pengelolaan sampah, energi terbarukan, atau ruang terbuka hijau sering membutuhkan perubahan perilaku warga. Jika masyarakat merasa dilibatkan sejak awal, resistensi dapat berkurang. Sebaliknya, jika program dipaksakan tanpa komunikasi, masyarakat dapat menolak meskipun program tersebut secara teknis baik.

Di Indonesia, partisipasi masyarakat dalam pengelolaan lingkungan sering terlihat pada gerakan bank sampah, konservasi mangrove, kampung iklim, *urban farming*, dan pengelolaan desa wisata berkelanjutan. Literatur tentang partisipasi komunitas dalam konteks pembangunan berkelanjutan di Indonesia menunjukkan bahwa keberhasilan program sangat bergantung pada model partisipasi, kepemimpinan lokal, kapasitas komunitas, dan dukungan kelembagaan.

Dengan demikian, partisipasi publik adalah kunci keberhasilan inovasi hijau. Teknologi dan kebijakan tidak akan berkelanjutan tanpa keterlibatan warga. Dalam kerangka *green innovation and technology management*, publik perlu dipahami sebagai mitra inovasi, bukan sekadar objek sosialisasi.

MEMBANGUN BUDAYA INOVASI HIJAU DI MASYARAKAT

Budaya inovasi hijau adalah pola pikir, nilai, kebiasaan, dan praktik sosial yang mendorong masyarakat untuk mencari solusi kreatif terhadap masalah lingkungan. Budaya ini terbentuk ketika masyarakat tidak hanya memahami pentingnya lingkungan, tetapi juga terbiasa bertindak, berkolaborasi, bereksperimen, dan memperbaiki cara hidup agar lebih berkelanjutan. Budaya inovasi hijau menjadi tujuan akhir dari literasi, pendidikan, teknologi, dan partisipasi publik.

Membangun budaya inovasi hijau membutuhkan proses jangka panjang. Perubahan budaya tidak cukup dilakukan melalui kampanye sesaat. Diperlukan pendidikan sejak dini, keteladanan keluarga, kebijakan publik, fasilitas pendukung, komunitas aktif, media yang edukatif, dan insentif sosial. Ketika perilaku hijau menjadi kebiasaan bersama, masyarakat akan lebih mudah menerima teknologi dan kebijakan keberlanjutan.

Sekolah dan kampus memiliki peran penting dalam membangun budaya hijau. Lingkungan pendidikan dapat membentuk kebiasaan memilah sampah, menghemat energi, menjaga taman, membawa botol minum, menggunakan transportasi ramah lingkungan, dan melakukan proyek keberlanjutan. UNESCO melalui “Greening Education Partnership” mendorong agar pendidikan hijau tidak hanya masuk kurikulum, tetapi juga mewarnai lingkungan belajar, kapasitas pendidik, sekolah, dan komunitas.

Keluarga juga menjadi fondasi budaya hijau. Anak-anak belajar dari kebiasaan orang tua dalam mengelola sampah, menggunakan air, memilih makanan, merawat tanaman, dan memperlakukan alam. Jika keluarga membiasakan perilaku ramah lingkungan, maka nilai keberlanjutan akan lebih mudah melekat. Oleh karena itu, literasi hijau perlu menjangkau rumah tangga, bukan hanya lembaga pendidikan formal.

Media dan teknologi digital dapat mempercepat budaya inovasi hijau. Konten edukatif tentang gaya hidup hijau, tutorial teknologi sederhana, cerita komunitas, data lingkungan, dan kampanye kreatif dapat meningkatkan kesadaran masyarakat. Namun, media juga perlu menjaga akurasi informasi agar tidak memperkuat klaim hijau yang menyesatkan. Budaya inovasi hijau membutuhkan komunikasi yang inspiratif sekaligus berbasis pengetahuan.

Budaya inovasi hijau juga perlu diperkuat melalui ekonomi lokal. Masyarakat akan lebih mudah menerima

keberlanjutan jika melihat manfaat ekonomi langsung, seperti penghasilan dari bank sampah, kompos untuk pertanian, produk daur ulang, wisata berbasis konservasi, energi mandiri, atau UMKM hijau. Dengan demikian, keberlanjutan tidak hanya dipahami sebagai kewajiban moral, tetapi juga sebagai peluang kesejahteraan.

Pemerintah daerah dapat memperkuat budaya hijau melalui kebijakan dan fasilitas. Penyediaan tempat sampah terpilah, ruang terbuka hijau, transportasi publik, jalur sepeda, insentif kampung hijau, program sekolah hijau, dan dukungan komunitas dapat menciptakan lingkungan yang memudahkan perilaku hijau. Budaya akan lebih mudah terbentuk jika sistem sosial dan infrastruktur mendukung tindakan ramah lingkungan.

Dengan demikian, membangun budaya inovasi hijau di masyarakat berarti membangun ekosistem nilai, pengetahuan, perilaku, teknologi, dan kolaborasi. Budaya ini menjadi syarat agar *green innovation and technology management* tidak hanya berkembang di ruang industri dan akademik, tetapi benar-benar hidup dalam praktik sosial masyarakat.



BAB 18

ARAH MASA DEPAN *GREEN INNOVATION* *AND TECHNOLOGY MANAGEMENT*

Setelah membahas dasar inovasi hijau, teknologi hijau, LCA, *carbon footprint*, TRL, ekosistem inovasi, implementasi, kewirausahaan hijau, serta pendidikan masyarakat, bab ini menempatkan inovasi hijau dalam konteks masa depan global. Perubahan iklim, krisis energi, tekanan sumber daya, transformasi digital, tuntutan ESG, dan kebutuhan pekerjaan hijau akan semakin menentukan arah industri, kota, pendidikan, dan masyarakat.

Masa depan inovasi hijau tidak hanya akan ditentukan oleh kecanggihan teknologi, tetapi juga oleh kemampuan manusia dan organisasi mengelola perubahan secara adil, etis, inklusif, dan berkelanjutan. UNEP dalam *Emissions Gap Report 2025* menegaskan bahwa penurunan emisi global yang sangat besar dibutuhkan agar dunia tetap berada pada jalur Perjanjian Paris, yaitu sekitar 35% untuk lintasan 2°C dan 55% untuk lintasan 1,5°C pada 2035 dibandingkan tingkat 2019. Ini menunjukkan bahwa inovasi hijau tidak lagi bersifat pilihan tambahan, tetapi menjadi kebutuhan strategis bagi masa depan pembangunan.

TREN GLOBAL INOVASI HIJAU

Tren global inovasi hijau saat ini bergerak dari pendekatan lingkungan yang bersifat reaktif menuju pendekatan strategis, sistemik, dan transformatif. Pada masa lalu, banyak organisasi memandang isu lingkungan sebagai kewajiban kepatuhan terhadap regulasi. Namun, pada masa depan, inovasi hijau akan semakin dipahami sebagai sumber daya saing, peluang investasi, penguatan reputasi, dan dasar pembentukan model bisnis baru. Pergeseran ini menunjukkan bahwa keberlanjutan telah masuk ke inti strategi pembangunan dan manajemen teknologi (Porter & van der Linde, 1995; Schaltegger, Hansen, & Lüdeke-Freund, 2016).

Tren pertama adalah percepatan transisi energi. Dunia sedang bergerak menuju energi terbarukan, elektrifikasi, efisiensi energi, penyimpanan energi, jaringan listrik cerdas, kendaraan listrik, hidrogen rendah karbon, dan teknologi penangkapan karbon. International Energy Agency menempatkan inovasi energi bersih sebagai elemen penting dalam transisi menuju sistem energi yang aman, terjangkau, dan rendah emisi. Hal ini memperlihatkan bahwa inovasi hijau akan sangat terkait dengan transformasi sistem energi global.

Tren kedua adalah meningkatnya perhatian terhadap ekonomi sirkular. Model ekonomi linear “ambil-buat-buang” semakin dipandang tidak sesuai dengan keterbatasan sumber daya dan tekanan lingkungan. Ekonomi sirkular mendorong desain produk yang tahan lama, dapat diperbaiki, digunakan ulang, didaur ulang, dan dikembalikan ke sistem produksi. Dalam konteks inovasi hijau, ekonomi sirkular tidak hanya mengurangi limbah, tetapi juga menciptakan peluang bisnis baru melalui model layanan, remanufaktur, *sharing economy*, dan pengelolaan material tertutup (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr, Reike, & Hekkert, 2017).

Tren ketiga adalah integrasi teknologi digital dengan keberlanjutan. Internet of Things, kecerdasan buatan, *big data*, *blockchain*, *digital twin*, dan sistem sensor akan semakin digunakan untuk memantau energi, emisi, kualitas udara, rantai pasok, produksi, dan infrastruktur kota. Digitalisasi dapat meningkatkan efisiensi, transparansi, dan kemampuan prediksi dalam pengelolaan lingkungan. Namun, teknologi digital juga perlu dinilai secara kritis karena pusat data, perangkat elektronik, dan limbah elektronik juga memiliki dampak lingkungan.

Tren keempat adalah meningkatnya tuntutan transparansi ESG dan pelaporan keberlanjutan. Investor, konsumen, pemerintah, dan masyarakat menuntut bukti kuantitatif mengenai emisi, penggunaan energi, limbah, dampak sosial, dan tata kelola perusahaan. Hal ini mendorong organisasi menggunakan LCA, *carbon footprint*, *environmental performance indicators*, dan standar pelaporan keberlanjutan. Dengan demikian, inovasi hijau pada masa depan akan semakin terkait dengan pengukuran, akuntabilitas, dan pembuktian dampak.

Tren kelima adalah pergeseran dari inovasi teknologi tunggal menuju inovasi sistem. Masalah iklim, energi, pangan, air, transportasi, dan kota tidak dapat diselesaikan hanya dengan satu teknologi. Diperlukan kombinasi teknologi, kebijakan, pembiayaan, perubahan perilaku, pendidikan, dan tata kelola. Karena itu, masa depan inovasi hijau akan lebih menekankan *system innovation*, yaitu perubahan dalam sistem produksi, konsumsi, infrastruktur, kelembagaan, dan budaya masyarakat (Geels, 2002; Schot & Steinmueller, 2018).

TEKNOLOGI MASA DEPAN UNTUK KEBERLANJUTAN

Teknologi masa depan untuk keberlanjutan akan berkembang pada berbagai bidang, mulai dari energi, industri, pangan, bangunan, transportasi, air, limbah, hingga kota cerdas. Teknologi

tersebut tidak hanya ditujukan untuk meningkatkan efisiensi, tetapi juga untuk mengurangi emisi, memperpanjang umur material, memperbaiki kualitas lingkungan, dan meningkatkan ketahanan masyarakat terhadap perubahan iklim. Dalam konteks manajemen teknologi, tantangannya adalah memilih teknologi yang matang, layak, aman, dan sesuai dengan kebutuhan lokal.

Energi terbarukan akan tetap menjadi salah satu pilar utama teknologi masa depan. Panel surya, turbin angin, panas bumi, hidro skala kecil, biomassa berkelanjutan, dan penyimpanan energi akan semakin penting untuk menggantikan sistem energi berbasis fosil. Namun, pengembangan energi terbarukan juga membutuhkan inovasi pada baterai, jaringan listrik cerdas, sistem penyimpanan, manajemen beban, dan integrasi energi terdistribusi. IEA menunjukkan bahwa investasi dan inovasi energi bersih menjadi faktor penting untuk mempercepat dekarbonisasi global.

Teknologi penyimpanan energi dan baterai akan menjadi semakin strategis. Ketergantungan energi terbarukan pada kondisi cuaca membuat penyimpanan energi penting untuk menjaga stabilitas pasokan. Inovasi baterai masa depan tidak hanya berfokus pada kapasitas dan harga, tetapi juga pada keamanan, umur pakai, daur ulang, ketersediaan mineral kritis, dan dampak lingkungan sepanjang siklus hidup. Oleh karena itu, inovasi baterai perlu dikaitkan dengan ekonomi sirkular dan rantai pasok yang bertanggung jawab.

Teknologi hidrogen rendah karbon juga dipandang sebagai salah satu solusi potensial untuk sektor yang sulit didekarbonisasi, seperti industri berat, baja, semen, kimia, pelayaran, dan transportasi jarak jauh. Namun, hidrogen hijau masih menghadapi tantangan biaya, infrastruktur, efisiensi konversi, transportasi, dan standar keselamatan. Karena itu, pengembangan hidrogen perlu ditempatkan dalam roadmap teknologi yang realistis berdasarkan TRL, kelayakan ekonomi, dan kebutuhan sektor.

Teknologi penangkapan, pemanfaatan, dan penyimpanan karbon atau CCUS juga akan menjadi bagian dari portofolio teknologi masa depan, terutama untuk industri yang menghasilkan emisi proses. Teknologi ini dapat membantu mengurangi emisi dari sektor semen, baja, kimia, dan pembangkit tertentu. Namun, CCUS perlu dinilai secara kritis karena memerlukan energi, biaya tinggi, infrastruktur penyimpanan, serta tata kelola risiko jangka panjang. Teknologi ini sebaiknya tidak digunakan sebagai alasan untuk menunda efisiensi energi dan transisi energi bersih.

Teknologi berbasis alam atau *nature-based solutions* juga penting dalam masa depan keberlanjutan. Restorasi mangrove, rehabilitasi hutan, pertanian regeneratif, ruang terbuka hijau kota, taman hujan, dan koridor ekologis dapat membantu mitigasi dan adaptasi perubahan iklim. Teknologi masa depan tidak selalu berarti teknologi mekanis atau digital; dalam banyak konteks, solusi berbasis ekosistem justru lebih murah, adaptif, dan memberi manfaat sosial-ekologis yang luas.

Teknologi digital akan menjadi penguat lintas sektor. AI dapat digunakan untuk optimasi energi, prediksi kerusakan mesin, pemantauan emisi, desain material, dan pengelolaan lalu lintas. IoT dapat membantu memantau konsumsi air, energi, udara, dan limbah secara real-time. *Blockchain* dapat meningkatkan transparansi rantai pasok hijau. *Digital twin* dapat mensimulasikan bangunan, industri, dan kota sebelum kebijakan diterapkan. Namun, setiap teknologi digital harus dinilai dampak energinya agar tidak menciptakan beban lingkungan baru.

NET ZERO EMISSION DAN DEKARBONISASI

Net Zero Emission adalah kondisi ketika jumlah emisi gas rumah kaca yang dilepaskan ke atmosfer seimbang dengan jumlah emisi yang dikurangi atau diserap kembali. Konsep ini tidak berarti tidak ada emisi sama sekali, tetapi emisi yang tersisa harus

dikompensasi melalui pengurangan, penyerapan, atau penghilangan karbon yang kredibel. Dalam konteks pembangunan, *net zero* menjadi tujuan strategis untuk membatasi pemanasan global dan mengurangi risiko iklim jangka panjang.

Dekarbonisasi adalah proses mengurangi ketergantungan terhadap karbon, terutama dari bahan bakar fosil dan proses industri intensif emisi. Dekarbonisasi mencakup efisiensi energi, transisi energi terbarukan, elektrifikasi, substitusi bahan bakar, perubahan proses produksi, pengelolaan karbon, desain produk rendah emisi, dan perubahan pola konsumsi. Karena itu, dekarbonisasi bukan hanya agenda sektor energi, tetapi agenda lintas sektor yang mencakup industri, transportasi, bangunan, pertanian, dan kota.

UNEP menegaskan bahwa kesenjangan emisi global masih sangat besar. Dalam *Emissions Gap Report 2025* disebutkan bahwa pengurangan emisi tahunan sebesar 35% dan 55% pada 2035 dibandingkan tingkat 2019 dibutuhkan untuk tetap selaras dengan lintasan 2°C dan 1,5°C. Pesan ini menunjukkan bahwa strategi *net zero* harus dipercepat melalui inovasi teknologi, kebijakan, investasi, dan perubahan perilaku.

Net zero menuntut organisasi memiliki strategi pengukuran emisi yang akurat. Perusahaan, pemerintah, kampus, dan industri perlu menghitung emisi Scope 1, Scope 2, dan Scope 3 agar mengetahui sumber emisi terbesar. Tanpa inventarisasi emisi, target net zero mudah menjadi klaim normatif yang tidak dapat diverifikasi. Karena itu, *carbon footprint*, LCA, dan pelaporan keberlanjutan menjadi instrumen penting dalam perjalanan dekarbonisasi.

Dekarbonisasi juga membutuhkan pembiayaan besar. Investasi transisi energi global telah meningkat, tetapi masih belum cukup untuk mencapai target *net zero*. Laporan pasar energi menunjukkan bahwa investasi transisi energi global telah melampaui USD 2 triliun, tetapi kebutuhan tahunan menuju 2030

masih jauh lebih besar, terutama untuk energi terbarukan, jaringan listrik, penyimpanan energi, transportasi listrik, hidrogen, dan teknologi industri rendah karbon.

Namun, net zero juga harus dikelola secara adil. Transisi yang terlalu cepat tanpa perlindungan sosial dapat berdampak pada pekerja, komunitas tambang, UMKM, rumah tangga berpendapatan rendah, dan daerah yang bergantung pada industri fosil. Karena itu, konsep *just transition* penting agar dekarbonisasi tidak menciptakan ketimpangan baru. ILO menekankan bahwa transisi hijau perlu didukung oleh kebijakan ketenagakerjaan, keterampilan, perlindungan sosial, dialog sosial, dan penguatan UMKM.

Dengan demikian, *net zero* dan dekarbonisasi adalah agenda manajemen strategis jangka panjang. Organisasi perlu menggabungkan teknologi, pembiayaan, regulasi, perubahan organisasi, dan partisipasi pemangku kepentingan. Dalam kerangka *green innovation and technology management*, *net zero* menjadi arah besar yang menguji keseriusan inovasi hijau dalam menghasilkan dampak nyata.

GREEN JOBS DAN KEBUTUHAN KOMPETENSI BARU

Green jobs adalah pekerjaan yang berkontribusi pada pelestarian atau pemulihan lingkungan, baik melalui pengurangan emisi, efisiensi energi, pengelolaan limbah, konservasi sumber daya, energi terbarukan, bangunan hijau, pertanian berkelanjutan, transportasi rendah emisi, maupun jasa keberlanjutan. *Green jobs* tidak hanya muncul pada sektor teknologi tinggi, tetapi juga pada UMKM, pertanian, konstruksi, pendidikan, keuangan, pariwisata, dan ekonomi kreatif.

Kebutuhan *green jobs* akan meningkat seiring transisi menuju ekonomi rendah karbon. Pekerjaan baru akan muncul pada bidang audit energi, teknisi panel surya, analisis carbon footprint,

ahli LCA, manajer ESG, perancang produk hijau, teknisi kendaraan listrik, pengelola limbah, konsultan ekonomi sirkular, analisis data lingkungan, dan wirausaha hijau. OECD menegaskan bahwa transisi hijau merupakan peluang untuk meningkatkan keterampilan dan pembelajaran sepanjang hayat sehingga manfaat pembangunan dapat lebih luas.

Green jobs juga membutuhkan *reskilling* dan *upskilling*. Banyak pekerja dari sektor konvensional perlu memperoleh keterampilan baru agar dapat beradaptasi dengan teknologi rendah karbon. Misalnya, teknisi mesin konvensional perlu memahami kendaraan listrik; pekerja konstruksi perlu memahami bangunan hijau; manajer produksi perlu memahami efisiensi energi dan pengukuran emisi; dosen dan guru perlu memahami pendidikan keberlanjutan. Dengan demikian, transisi hijau adalah transisi keterampilan.

Kompetensi masa depan tidak hanya bersifat teknis. Pekerja hijau juga membutuhkan kompetensi sistemik, seperti berpikir kritis, analisis data, pemecahan masalah kompleks, kolaborasi lintas disiplin, komunikasi keberlanjutan, etika lingkungan, dan literasi kebijakan. Isu keberlanjutan tidak dapat diselesaikan hanya oleh satu disiplin ilmu, sehingga kompetensi kolaboratif menjadi sangat penting.

Perguruan tinggi dan lembaga pendidikan vokasi memiliki peran penting dalam menyiapkan *green jobs*. Kurikulum perlu memasukkan energi terbarukan, LCA, *carbon footprint*, *circular economy*, ESG, teknologi digital untuk lingkungan, manajemen risiko iklim, dan kewirausahaan hijau. UNESCO melalui *Greening Education Partnership* mendorong transformasi pendidikan agar kurikulum, sekolah, guru, komunitas, dan sistem pendidikan mendukung aksi iklim.

Green jobs juga perlu dikelola dengan prinsip keadilan. Pekerjaan hijau harus layak, aman, inklusif, dan memberikan perlindungan sosial. Transisi hijau tidak boleh hanya menciptakan

pekerjaan baru bagi kelompok berpendidikan tinggi, tetapi juga membuka peluang bagi pekerja informal, perempuan, pemuda, UMKM, dan masyarakat lokal. ILO menekankan pentingnya *just transition* agar perubahan menuju ekonomi berkelanjutan memberikan manfaat bagi pemerintah, bisnis, dan tenaga kerja.

Dengan demikian, *green jobs* adalah konsekuensi sekaligus prasyarat dari inovasi hijau. Tanpa tenaga kerja yang kompeten, teknologi hijau tidak akan dapat dioperasikan, dipelihara, dikembangkan, dan dikomersialisasikan secara efektif. Oleh karena itu, masa depan *green innovation and technology management* sangat bergantung pada transformasi pendidikan, pelatihan, dan kebijakan ketenagakerjaan.

PERAN GENERASI MUDA DALAM TRANSFORMASI HIJAU

Generasi muda memiliki peran strategis dalam transformasi hijau karena mereka adalah pengguna teknologi masa depan, pelaku inovasi, wirausaha, peneliti, aktivis, pendidik, dan pemimpin masa depan. Mereka hidup dalam era ketika krisis iklim, digitalisasi, ekonomi kreatif, dan perubahan sosial terjadi secara bersamaan. Karena itu, generasi muda memiliki peluang besar untuk mempercepat perubahan melalui gagasan, teknologi, komunitas, dan gerakan sosial.

Peran pertama generasi muda adalah sebagai agen literasi dan perubahan perilaku. Anak muda sering menjadi kelompok yang cepat mengadopsi gaya hidup baru, seperti pengurangan plastik, transportasi ramah lingkungan, produk lokal, makanan sehat, *zero waste*, dan kampanye digital. Melalui media sosial, generasi muda dapat menyebarluaskan pesan keberlanjutan dengan cara kreatif, visual, dan mudah dipahami.

Peran kedua adalah sebagai inovator teknologi dan startup hijau. Banyak startup lingkungan, platform digital pengelolaan sampah, energi terbarukan, pertanian kota, produk daur ulang, dan

bisnis sosial lahir dari inisiatif generasi muda. Kemampuan mereka dalam digitalisasi, desain, jejaring, dan kewirausahaan membuat generasi muda dapat menghubungkan masalah lingkungan dengan peluang usaha baru.

Peran ketiga adalah sebagai peneliti dan mahasiswa. Perguruan tinggi dapat menjadi ruang penting bagi generasi muda untuk mengembangkan riset tentang teknologi hijau, LCA, carbon footprint, material ramah lingkungan, bangunan hijau, energi terbarukan, dan ekonomi sirkular. Penelitian mahasiswa dapat menjadi embrio inovasi jika didukung inkubator, pendanaan, laboratorium, dan kemitraan industri.

Peran keempat adalah sebagai aktivis dan penggerak komunitas. Gerakan iklim global menunjukkan bahwa generasi muda mampu memberikan tekanan moral dan politik kepada pemerintah dan industri. UNESCO mencatat bahwa suara anak muda penting dalam agenda pendidikan hijau dan aksi iklim, termasuk dalam diskusi mengenai kemajuan, tantangan, dan peluang *greening education*.

Peran kelima adalah sebagai pembelajar sepanjang hayat. Transformasi hijau membutuhkan keterampilan yang terus berkembang. Generasi muda perlu membangun kompetensi lintas bidang, seperti teknologi, manajemen, desain, ekonomi, kebijakan, komunikasi, dan etika. Mereka juga perlu belajar membaca data, memahami risiko iklim, dan menilai klaim keberlanjutan secara kritis.

Namun, generasi muda juga membutuhkan dukungan ekosistem. Mereka memerlukan pendidikan berkualitas, akses pembiayaan, mentor, ruang eksperimen, inkubator bisnis, kebijakan pemuda, akses teknologi, dan kesempatan terlibat dalam pengambilan keputusan. Tanpa dukungan tersebut, potensi generasi muda dapat terhambat oleh keterbatasan modal, akses, jaringan, dan legitimasi.

Dengan demikian, generasi muda bukan hanya penerima dampak krisis lingkungan, tetapi juga aktor utama transformasi hijau. Dalam kerangka *green innovation and technology management*, investasi pada generasi muda berarti investasi pada kapasitas inovasi, kepemimpinan, dan keberlanjutan masa depan.

TANTANGAN ETIKA DALAM PENGEMBANGAN TEKNOLOGI HIJAU

Pengembangan teknologi hijau tidak bebas dari tantangan etika. Meskipun teknologi hijau bertujuan mengurangi dampak lingkungan, proses pengembangannya dapat menimbulkan masalah baru jika tidak dikelola secara hati-hati. Tantangan etika muncul pada penggunaan sumber daya, distribusi manfaat, risiko sosial, transparansi data, dampak terhadap pekerja, dan potensi *greenwashing*. Oleh karena itu, inovasi hijau harus dikembangkan dengan prinsip tanggung jawab.

Tantangan pertama adalah keadilan lingkungan. Teknologi hijau dapat membutuhkan lahan, mineral kritis, air, dan infrastruktur baru. Jika pengembangan teknologi dilakukan tanpa konsultasi dan perlindungan hak masyarakat, maka kelompok rentan dapat menanggung beban lingkungan atau sosial. Misalnya, proyek energi terbarukan skala besar dapat menimbulkan konflik lahan jika tidak dikelola secara partisipatif. Karena itu, prinsip keadilan harus melekat dalam perencanaan teknologi hijau.

Tantangan kedua adalah rantai pasok mineral dan material. Baterai, panel surya, turbin angin, dan teknologi digital membutuhkan mineral tertentu. Ekstraksi mineral dapat menimbulkan kerusakan lingkungan, konflik sosial, dan persoalan tenaga kerja jika tidak diatur dengan baik. Maka, inovasi hijau perlu memastikan rantai pasok yang bertanggung jawab, transparan, dan sesuai standar sosial-lingkungan.

Tantangan ketiga adalah *greenwashing*. Organisasi dapat menggunakan istilah hijau, rendah karbon, ramah lingkungan, atau berkelanjutan tanpa bukti yang kuat. Praktik ini merusak kepercayaan publik dan menghambat inovasi yang benar-benar berdampak. Oleh karena itu, klaim lingkungan harus didukung data, LCA, *carbon footprint*, sertifikasi, atau indikator kinerja yang dapat diverifikasi.

Tantangan keempat adalah kesenjangan akses teknologi. Teknologi hijau yang mahal dapat hanya dinikmati kelompok berpendapatan tinggi, sementara masyarakat miskin tetap menghadapi polusi, energi mahal, dan risiko iklim. Etika inovasi hijau menuntut agar teknologi dirancang inklusif, terjangkau, dan sesuai kebutuhan masyarakat luas. Prinsip *just transition* menegaskan bahwa transisi hijau perlu melindungi pekerja, UMKM, dan komunitas yang rentan.

Tantangan kelima adalah dampak digitalisasi. Teknologi digital dapat membantu keberlanjutan, tetapi juga menimbulkan persoalan energi pusat data, privasi, pengawasan, bias algoritma, limbah elektronik, dan ketimpangan akses. Oleh karena itu, AI, IoT, *blockchain*, dan *digital twin* harus dikembangkan dengan prinsip efisiensi energi, perlindungan data, inklusivitas, dan transparansi.

Tantangan keenam adalah tanggung jawab antargenerasi. Inovasi hijau seharusnya tidak hanya menyelesaikan masalah hari ini, tetapi juga tidak mewariskan risiko baru kepada generasi mendatang. Keputusan teknologi harus memperhitungkan umur pakai, limbah akhir masa pakai, kemampuan daur ulang, keamanan jangka panjang, dan dampak ekologis. Etika keberlanjutan menuntut keseimbangan antara kebutuhan saat ini dan hak generasi masa depan.

Dengan demikian, masa depan teknologi hijau harus dibangun di atas prinsip etika. Teknologi yang disebut hijau harus benar-benar adil, transparan, aman, inklusif, dan bertanggung

jawab sepanjang siklus hidupnya. Tanpa etika, inovasi hijau dapat kehilangan legitimasi sosial dan berubah menjadi solusi semu.

MASA DEPAN INDUSTRI, KOTA, DAN MASYARAKAT BERKELANJUTAN



Gambar 24 Masa depan industri, kota, dan masyarakat berkelanjutan.

Masa depan industri berkelanjutan akan ditandai oleh produksi rendah karbon, efisiensi energi, ekonomi sirkular, digitalisasi, dan rantai pasok hijau. Industri tidak lagi cukup menghasilkan produk berkualitas dengan biaya rendah, tetapi juga harus membuktikan bahwa proses produksinya rendah emisi, hemat sumber daya, aman bagi pekerja, dan bertanggung jawab terhadap lingkungan. Konsep industri hijau akan menjadi bagian penting dari daya saing global.

Industri masa depan akan semakin menggunakan teknologi digital untuk efisiensi dan keberlanjutan. Sensor, AI, robotika, *digital twin*, dan analitik data dapat membantu mengurangi limbah, mengoptimalkan energi, memperbaiki

pemeliharaan mesin, dan meningkatkan produktivitas. Namun, digitalisasi industri harus dikombinasikan dengan energi bersih dan desain sirkular agar tidak sekadar memindahkan beban lingkungan ke konsumsi listrik dan limbah elektronik.

Masa depan kota berkelanjutan akan ditentukan oleh kemampuan kota mengelola energi, transportasi, air, limbah, ruang terbuka hijau, perumahan, dan ketahanan iklim. Kota akan semakin membutuhkan bangunan hemat energi, transportasi publik, jalur pejalan kaki, jalur sepeda, kawasan campuran, ruang biru-hijau, pengelolaan banjir berbasis ekosistem, dan sistem data perkotaan. Inovasi hijau dalam kota tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga berkaitan dengan desain ruang dan perilaku warga.

Kota masa depan juga harus menjadi kota yang inklusif. Teknologi cerdas tidak cukup jika tidak menjawab ketimpangan akses terhadap air, energi, transportasi, hunian, ruang publik, dan udara bersih. Karena itu, konsep *smart city* perlu dikembangkan menjadi *smart sustainable city*, yaitu kota yang menggunakan teknologi untuk mendukung keberlanjutan, keadilan, partisipasi, dan kualitas hidup.

Masyarakat berkelanjutan pada masa depan akan ditandai oleh perubahan gaya hidup. Konsumsi berlebihan akan semakin dipertanyakan, sementara penggunaan kembali, berbagi, memperbaiki, membeli produk lokal, menghemat energi, dan mengurangi limbah akan menjadi bagian dari budaya baru. Namun, perubahan gaya hidup perlu didukung infrastruktur, harga yang adil, pendidikan, dan kebijakan publik agar tidak hanya menjadi pilihan individu tertentu.

Pendidikan menjadi fondasi masyarakat berkelanjutan. UNESCO menekankan pentingnya pendidikan untuk pembangunan berkelanjutan, termasuk penguatan kurikulum, kapasitas pendidik, sekolah hijau, komunitas, dan aksi iklim. Dengan pendidikan yang tepat, masyarakat dapat memahami

risiko lingkungan, mengadopsi teknologi hijau, serta berpartisipasi dalam pengambilan keputusan.

Pada akhirnya, masa depan industri, kota, dan masyarakat berkelanjutan akan bergantung pada integrasi tiga hal: inovasi teknologi, inovasi kelembagaan, dan inovasi sosial. Teknologi memberikan alat, kelembagaan memberikan aturan dan koordinasi, sedangkan masyarakat memberikan legitimasi dan perubahan perilaku. Ketiganya harus berjalan bersama agar transformasi hijau tidak hanya menjadi proyek, tetapi menjadi sistem kehidupan baru.

TRANFORMASI LINGKUNGAN DENGAN TEKNOLOGI SINERGIS

Secara umum, *green innovation and technology management* dapat disimpulkan sebagai pendekatan manajemen yang mengintegrasikan inovasi, teknologi, keberlanjutan, dan nilai sosial-ekonomi. Pendekatan ini menempatkan teknologi bukan hanya sebagai alat produktivitas, tetapi juga sebagai instrumen untuk mengurangi emisi, menghemat sumber daya, memperbaiki kualitas lingkungan, menciptakan pekerjaan hijau, dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Dengan demikian, inovasi hijau adalah strategi transformasi, bukan sekadar respons terhadap tekanan lingkungan.

Rekomendasi pertama adalah memperkuat integrasi inovasi hijau dalam strategi organisasi. Pemerintah, industri, perguruan tinggi, UMKM, dan lembaga masyarakat perlu menjadikan keberlanjutan sebagai bagian dari perencanaan, investasi, kurikulum, riset, dan pengambilan keputusan. Inovasi hijau tidak boleh diperlakukan sebagai program tambahan, tetapi sebagai orientasi utama dalam menghadapi masa depan ekonomi rendah karbon.

Rekomendasi kedua adalah memperkuat pengukuran dan pembuktian dampak. Organisasi perlu menggunakan *LCA*, *carbon footprint*, *environmental performance indicators*, *sustainability assessment*, dan *ESG reporting* secara lebih sistematis. Tanpa pengukuran, klaim hijau sulit dipercaya. Dengan pengukuran, organisasi dapat mengetahui *hotspot*, menetapkan target, memantau kemajuan, dan membangun kepercayaan pemangku kepentingan.

Rekomendasi ketiga adalah mempercepat pengembangan teknologi hijau berdasarkan tingkat kesiapan teknologi. TRL perlu digunakan untuk membedakan teknologi yang masih memerlukan riset, teknologi yang perlu diuji melalui *pilot project*, dan teknologi yang siap dikomersialisasikan. Dengan demikian, sumber daya riset, investasi, dan kebijakan dapat diarahkan secara lebih tepat.

Rekomendasi keempat adalah memperkuat ekosistem kolaborasi pentahelix. Pemerintah, perguruan tinggi, industri, masyarakat, dan media harus bekerja dalam sistem yang saling mendukung. Pemerintah menyediakan regulasi dan insentif, perguruan tinggi menyediakan pengetahuan, industri mengembangkan pasar, masyarakat mengadopsi dan mengawasi, sedangkan media memperluas literasi publik. Tanpa kolaborasi, inovasi hijau akan berjalan terfragmentasi.

Rekomendasi kelima adalah memperkuat pendidikan dan kompetensi hijau. Sekolah, perguruan tinggi, vokasi, pelatihan profesional, dan pendidikan masyarakat perlu diarahkan untuk membangun literasi keberlanjutan, keterampilan teknologi hijau, kewirausahaan hijau, serta etika lingkungan. *Green jobs* masa depan membutuhkan SDM yang tidak hanya kompeten secara teknis, tetapi juga mampu berpikir sistemik, kolaboratif, dan etis.

Rekomendasi keenam adalah memastikan transisi hijau berlangsung adil dan inklusif. *Net zero*, dekarbonisasi, dan teknologi hijau tidak boleh menciptakan ketimpangan baru. Pekerja, UMKM, masyarakat lokal, generasi muda, perempuan, dan

kelompok rentan harus memperoleh akses terhadap manfaat transisi. Prinsip *just transition* perlu menjadi dasar dalam kebijakan, investasi, pendidikan, dan pengembangan teknologi.

Sebagai penutup, masa depan *green innovation and technology management* akan ditentukan oleh kemampuan manusia mengubah krisis lingkungan menjadi momentum transformasi. Teknologi hijau akan menjadi penting, tetapi teknologi saja tidak cukup. Diperlukan kepemimpinan, etika, pendidikan, pembiayaan, tata kelola, partisipasi masyarakat, dan budaya inovasi. Dengan pendekatan tersebut, inovasi hijau dapat menjadi jalan menuju industri yang lebih bersih, kota yang lebih layak huni, masyarakat yang lebih adil, dan masa depan yang lebih berkelanjutan.



DAFTAR PUSTAKA

- Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50(2), 179–211.
- Ali, Z. A., et al. (2025). Digital twins: Cornerstone to circular economy and sustainable development. *Environment, Development and Sustainability*.
- Asiah, N., et al. (2024). Pendampingan sekolah Adiwiyata: Pengelolaan lingkungan sekolah sebagai sarana membangun kesadaran dan aksi nyata terhadap keberlanjutan lingkungan. *Jurnal Abdimas Hasil Eksplorasi*.
- Asian Development Bank. (2024). *ADB approves policy-based loan for Indonesia's energy transition efforts*. Asian Development Bank.
- Badan Perencanaan Pembangunan Nasional. (2021). *Low carbon development: A paradigm shift towards a green economy in Indonesia*. Bappenas.
- Badrudin, S., et al. (2025). Community participation in emergency waste management through environmental social movements and community independence. *Journal of International Relations, Peace and Law*.
- Baines, T., Brown, S., Benedettini, O., & Ball, P. (2012). Examining green production and its role within the competitive strategy of manufacturers. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 5(1), 53–87.
- Bala, A., Raugei, M., Benveniste, G., Gazulla, C., & Fullana-i-Palmer, P. (2015). Simplified tools for global warming

- potential evaluation: When “good enough” is best. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20, 1023–1035.
- Banuwati, N., & Hasibuan, S. (2025). Green manufacturing practices for improving sustainability performance in packaging manufacturing MSMEs. *Asian Journal of Applied Research for Community Development and Empowerment*, 9(2), 75–80.
- Bappenas. (2019). *Low carbon development: A paradigm shift towards a green economy in Indonesia*. Kementerian PPN/Bappenas.
- Bappenas. (2025). *Green SMEs and net zero: Strategic framework for Indonesia's climate-aligned economic transformation*. Kementerian PPN/Bappenas.
- Barney, J. B. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99–120.
- Baumann, H., & Tillman, A.-M. (2004). *The hitch hiker's guide to LCA: An orientation in life cycle assessment methodology and application*. Studentlitteratur.
- Beatley, T. (2011). *Biophilic cities: Integrating nature into urban design and planning*. Island Press.
- Belz, F.-M., & Binder, J. K. (2017). *Sustainable entrepreneurship: A convergent process model*. *Business Strategy and the Environment*, 26(1), 1–17.
- Berardi, U. (2013). Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable building. *Sustainable Cities and Society*, 8, 72–78.
- Bernards, N. (2024). Blockchain and sustainability governance in global supply chains. *Environment and Planning E: Nature and Space*, 7(1), 322–345.
- Betz, F. (2011). *Managing technological innovation: Competitive advantage from change* (3rd ed.). Wiley.
- Bibri, S. E. (2018). *Smart sustainable cities of the future: The untapped potential of big data analytics and context-aware computing for advancing sustainability*. Springer.

- Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2020). The emerging data-driven smart city and its innovative applied solutions for sustainability. *Energy Informatics*, 3(1), 1–42.
- Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308–320.
- Bocken, N. M. P., Short, S. W., Rana, P., & Evans, S. (2014). A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production*, 65, 42–56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.039>
- Boons, F., & Lüdeke-Freund, F. (2013). Business models for sustainable innovation: State-of-the-art and steps toward a research agenda. *Journal of Cleaner Production*, 45, 9–19.
- Boyer, J., & Kokosy, A. (2022). Technology-push and market-pull strategies: The influence of the innovation ecosystem on companies' involvement in the Industry 4.0 paradigm. *Journal of Risk Finance*, 23(4), 395–413.
- Burgelman, R. A., Christensen, C. M., & Wheelwright, S. C. (2009). *Strategic management of technology and innovation* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Carayannis, E. G., & Campbell, D. F. J. (2010). Triple helix, quadruple helix and quintuple helix and how do knowledge, innovation and the environment relate to each other? *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development*, 1(1), 41–69.
- Carson, R. (1962). *Silent spring*. Houghton Mifflin.
- CDP. (2023). *CDP technical note: Relevance of Scope 3 categories by sector*. CDP Worldwide.
- Chen, Y.-S., Lai, S.-B., & Wen, C.-T. (2006). The influence of green innovation performance on corporate advantage in Taiwan. *Journal of Business Ethics*, 67, 331–339.

- Ching, F. D. K., & Shapiro, I. M. (2020). *Green building illustrated* (2nd ed.). Wiley.
- Christensen, C. M. (1997). *The innovator's dilemma: When new technologies cause great firms to fail*. Harvard Business School Press.
- Cohen, B. (2017). *The emergence of the urban entrepreneur: How the growth of cities and the sharing economy are driving a new breed of innovators*. Praeger.
- Cohen, B., & Winn, M. I. (2007). Market imperfections, opportunity and sustainable entrepreneurship. *Journal of Business Venturing*, 22(1), 29–49.
- Dangelico, R. M., & Pontrandolfo, P. (2015). Being “green and competitive”: The impact of environmental actions and collaborations on firm performance. *Business Strategy and the Environment*, 24(6), 413–430.
- Dangelico, R. M., & Pujari, D. (2010). Mainstreaming green product innovation: Why and how companies integrate environmental sustainability. *Journal of Business Ethics*, 95(3), 471–486.
- Dangelico, R. M., & Pujari, D. (2010). Mainstreaming green product innovation: Why and how companies integrate environmental sustainability. *Journal of Business Ethics*, 95(3), 471–486.
- Dean, T. J., & McMullen, J. S. (2007). Toward a theory of sustainable entrepreneurship: Reducing environmental degradation through entrepreneurial action. *Journal of Business Venturing*, 22(1), 50–76.
- Delima, N. S. C., & Farahdiba, A. U. (2022). Analisis Life Cycle Assessment (LCA) proses produksi semen pada perusahaan semen (gate to gate). *Envirous*, 3(1), 40–44. <https://doi.org/10.33005/envirous.v3i1.63>
- Dosi, G. (1982). Technological paradigms and technological trajectories. *Research Policy*, 11(3), 147–162.

- Eccles, R. G., Ioannou, I., & Serafeim, G. (2014). The impact of corporate sustainability on organizational processes and performance. *Management Science*, 60(11), 2835–2857.
- Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. Capstone.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation.
- Ellen MacArthur Foundation. (2024). *The circular economy: Definition and model explained*. Ellen MacArthur Foundation.
- Etzkowitz, H., & Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: From national systems and mode 2 to a triple helix of university–industry–government relations. *Research Policy*, 29(2), 109–123.
- European Commission. (2017). *Technology readiness levels: Horizon 2020 work programme*. European Commission.
- Fankhauser, S., Smith, S. M., Allen, M., Axelsson, K., Hale, T., Hepburn, C., Kendall, J. M., Khosla, R., Lezaun, J., Mitchell-Larson, E., Obersteiner, M., Rajamani, L., Rickaby, R., Seddon, N., & Wetzer, T. (2022). The meaning of net zero and how to get it right. *Nature Climate Change*, 12, 15–21. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01245-w>
- Farr, D. (2018). *Sustainable urbanism: Urban design with nature*. Wiley.
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., & Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Florida, R. (1996). Lean and green: The move to environmentally conscious manufacturing. *California Management Review*, 39(1), 80–105.

- Fraga-Lamas, P., Lopes, S. I., & Fernández-Caramés, T. M. (2021). Green IoT and edge AI as key technological enablers for a sustainable digital transition towards a smart circular economy. *Sensors*, 21(17), 5745.
- Friede, G., Busch, T., & Bassen, A. (2015). ESG and financial performance: Aggregated evidence from more than 2000 empirical studies. *Journal of Sustainable Finance & Investment*, 5(4), 210–233.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., Hirsch, R., Hellweg, S., Humbert, S., Köllner, T., Loerincik, Y., Margni, M., & Nemecek, T. (2007). *Implementation of life cycle impact assessment methods*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Gast, J., Gundolf, K., & Cesinger, B. (2017). Doing business in a green way: A systematic review of the ecological sustainability entrepreneurship literature. *Journal of Cleaner Production*, 147, 44–56.
- Gault, F. (2018). Defining and measuring innovation in all sectors of the economy. *Research Policy*, 47(3), 617–622.
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31(8–9), 1257–1274.
- Gehl, J. (2010). *Cities for people*. Island Press.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy: A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32.

- Gkargkavouzi, A. (2025). Greening education for climate resilience: Strategies, challenges, and policy implications. *MPRA Paper*.
- Global Reporting Initiative. (2021). *GRI standards*. Global Reporting Initiative.
- Goel, A., et al. (2024). An overview of digital transformation and environmental sustainability: Threats, opportunities, and challenges. *Sustainability*, 16(24), 11079.
- Govindan, K., Kaliyan, M., Kannan, D., & Haq, A. N. (2014). Barriers analysis for green supply chain management implementation in Indian industries using analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*, 147, 555–568.
- Green Building Council Indonesia. (n.d.). *Certification*. GBC Indonesia.
- Green Building Council Indonesia. (n.d.). *GREENSHIP rating tools new building*. GBC Indonesia.
- Greenhouse Gas Protocol. (2011). *Product life cycle accounting and reporting standard*. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development.
- Guinée, J. B. (Ed.). (2002). *Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards*. Kluwer Academic Publishers.
- Guo, M., Nowakowska-Grunt, J., Gorbanyov, V., & Egorova, M. (2020). Green technology and sustainable development: Assessment and green growth frameworks. *Sustainability*, 12(16), 6571.
- Hafidz, M. S., & colleagues. (2025). A systematic review of green human resource development in manufacturing companies. *Jurnal Ilmu Manajemen*, 22(2).
- Hall, J. K., Daneke, G. A., & Lenox, M. J. (2010). Sustainable development and entrepreneurship: Past contributions

- and future directions. *Journal of Business Venturing*, 25(5), 439–448.
- Han, H., & colleagues. (2025). Leveraging Industry 4.0 technologies for sustainable supply chain management: A systematic review. *Sustainable Futures*.
- Hart, S. L. (1995). A natural-resource-based view of the firm. *Academy of Management Review*, 20(4), 986–1014. <https://doi.org/10.5465/amr.1995.9512280033>
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (Eds.). (2018). *Life cycle assessment: Theory and practice*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 53–64. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>
- Henri, J.-F., & Journeault, M. (2008). Environmental performance indicators: An empirical study of Canadian manufacturing firms. *Journal of Environmental Management*, 87(1), 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.009>
- Hockerts, K., & Wüstenhagen, R. (2010). Greening Goliaths versus emerging Davids: Theorizing about the role of incumbents and new entrants in sustainable entrepreneurship. *Journal of Business Venturing*, 25(5), 481–492.
- Hoppmann, J., Peters, M., Schneider, M., & Hoffmann, V. H. (2021). The impact of demand-pull and technology-push policies on firms' knowledge search. *Technological Forecasting and Social Change*, 170, 120863.
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level.

- International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 138–147.
<https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Hungerford, H. R., & Volk, T. L. (1990). Changing learner behavior through environmental education. *The Journal of Environmental Education*, 21(3), 8–21.
- IFRS Foundation. (2023). *IFRS S1 General requirements for disclosure of sustainability-related financial information*. IFRS Foundation.
- IFRS Foundation. (2023). *IFRS S2 Climate-related disclosures*. IFRS Foundation.
- Ikram, M., Zhang, Q., Sroufe, R., & Ferasso, M. (2021). Assessing green technology indicators for cleaner production and sustainable investment. *Journal of Cleaner Production*, 324, 129090.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. IPCC.
- International Energy Agency. (2017). *Digitalisation and energy*. IEA.
- International Energy Agency. (2020). *Clean energy innovation*. IEA.
- International Energy Agency. (2021). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. IEA.
- International Energy Agency. (2022). *An energy sector roadmap to net zero emissions in Indonesia*. IEA.
- International Energy Agency. (2024). *Clean energy innovation policies in emerging and developing economies*. IEA.
- International Energy Agency. (2024). *Energy technology perspectives 2024*. IEA.
- International Energy Agency. (2024). *Tracking clean energy innovation policies*. IEA.
- International Energy Agency. (2024). *World energy outlook 2024*. IEA.
- International Energy Agency. (2025). *Energy and AI*. IEA.

- International Energy Agency. (2025). *Energy efficiency 2025: Buildings*. IEA.
- International Energy Agency. (2025). *World energy outlook 2025*. IEA.
- International Energy Agency. (2026). *Energy technology perspectives 2026*. IEA.
- International Energy Agency. (2026). *ETP clean energy technology guide*. IEA.
- International Labour Organization. (2024). *Green employment diagnostics for a just transition*. ILO.
- International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14040:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14044:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001: Environmental management systems—Requirements with guidance for use*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 14067:2018 Greenhouse gases—Carbon footprint of products—Requirements and guidelines for quantification*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2021). *ISO 14031:2021 Environmental management—Environmental performance evaluation—Guidelines*. ISO.
- International Renewable Energy Agency. (2024). *Renewable energy statistics 2024*. IRENA.
- International Renewable Energy Agency. (2026). *Renewable capacity statistics 2026*. IRENA.

- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Chapter 9: Buildings*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Islami, S. S. (2023). A systematic literature review of sustainable manufacturing. *International Journal of Current Educational Research and Development*, 2(1).
- ISO. (2006). *ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2013). *ISO 16290:2013 Space systems—Definition of the technology readiness levels and their criteria of assessment*. International Organization for Standardization.
- Jasch, C. (2000). Environmental performance evaluation and indicators. *Journal of Cleaner Production*, 8(1), 79–88. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(99\)00235-8](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(99)00235-8)
- Jensen, B. B., & Schnack, K. (1997). The action competence approach in environmental education. *Environmental Education Research*, 3(2), 163–178.
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2020). Achieving sustainable performance in a data-driven agriculture supply chain. *International Journal of Production Economics*, 219, 179–194.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2025). *Laporan kinerja Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi tahun 2025*. Kementerian ESDM.
- Kementerian Perindustrian Republik Indonesia. (2015). *Rencana induk pembangunan industri nasional 2015–2035*. Kementerian Perindustrian Republik Indonesia.
- Kemp, R., & Pearson, P. (2007). *Final report MEI project about measuring eco-innovation*. UNU-MERIT.

- Khalil, T. M. (2000). *Management of technology: The key to competitiveness and wealth creation*. McGraw-Hill.
- Khan, I. S., Ahmad, M. O., & Majava, J. (2021). Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line. *Sustainability*, 13(5), 2875.
- Kibert, C. J. (2016). *Sustainable construction: Green building design and delivery* (4th ed.). Wiley.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232.
- Kotter, J. P. (1996). *Leading change*. Harvard Business School Press.
- Kraus, S., Burtscher, J., Vallaster, C., & Angerer, M. (2018). Sustainable entrepreneurship orientation: A reflection on status-quo research on factors facilitating responsible managerial practices. *Sustainability*, 10(2), 444.
- Kshetri, N. (2018). Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives. *International Journal of Information Management*, 39, 80–89.
- Lacy, P., & Rutqvist, J. (2015). *Waste to wealth: The circular economy advantage*. Palgrave Macmillan.
- Laosirihongthong, T., Adebajo, D., & Tan, K. C. (2013). Green supply chain management practices and performance. *Industrial Management & Data Systems*, 113(8), 1088–1109.
- Lehmann, S. (2010). *The principles of green urbanism: Transforming the city for sustainability*. Earthscan.
- Lestari, A. S. (2022). Building green schools through Adiwiyata school in environmental education. *Proceedings of International Conference on Religion, Science and Education*.

- Liu, X., et al. (2024). Green innovation and corporate ESG performance. *Journal of Cleaner Production*.
- Lovins, A. B. (2011). *Reinventing fire: Bold business solutions for the new energy era*. Chelsea Green Publishing.
- Lundvall, B.-Å. (1992). *National systems of innovation: Towards a theory of innovation and interactive learning*. Pinter.
- Mankins, J. C. (1995). *Technology readiness levels: A white paper*. NASA.
- Maslikhah, M. (2024). Environmental education and Adiwiyata program acceleration in schools. *At-Talim: Media Informasi Pendidikan Islam*.
- Matei, A., et al. (2024). Artificial Internet of Things, sensor-based digital twin, and sustainable smart systems. *Sustainability*, 16(16), 6749.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The limits to growth*. Universe Books.
- Meilani, S. E. R., & Sukmawati, R. A. (2023). Peran green innovation dan environmental responsibility terhadap nilai perusahaan. *Jurnal Riset Akuntansi dan Keuangan*, 11(2), 245–258.
- Morella, P., Lambán, M. P., Royo, J., Sánchez, J. C., & Corrales, L. C. (2023). Technologies associated with Industry 4.0 in green supply chains: A systematic literature review. *Sustainability*, 15(12), 9784.
- Muda, F. (2025). Community participation in Indonesian sustainable tourism: A systematic literature review. *Priviet Social Sciences Journal*.
- Mugoni, E., & colleagues. (2024). Sustainable supply chain management practices and environmental performance: A systematic review. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, 3(1).
- Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The circular economy: An interdisciplinary exploration of the concept and

- application in a global context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369–380.
- Nazir, S., & colleagues. (2024). Impact of green supply chain management practices on environmental performance of manufacturing firms. *Sustainability*, 16(6), 2278.
- Nelson, R. R. (Ed.). (1993). *National innovation systems: A comparative analysis*. Oxford University Press.
- Newman, P., & Kenworthy, J. (2015). *The end of automobile dependence: How cities are moving beyond car-based planning*. Island Press.
- Newman, P., Beatley, T., & Boyer, H. (2017). *Resilient cities: Overcoming fossil fuel dependence* (2nd ed.). Island Press.
- Nidumolu, R., Prahalad, C. K., & Rangaswami, M. R. (2009). Why sustainability is now the key driver of innovation. *Harvard Business Review*, 87(9), 56–64.
- Núñez-Jimenez, A., Knoeri, C., Hoppmann, J., & Hoffmann, V. H. (2017). Balancing technology-push and demand-pull policies for fostering innovations in socio-technical systems. *International Conference on Public Policy*.
- Nuringsih, K. (2020). Role of green entrepreneurship in raising the effect of green value toward sustainable development. *International Journal of Entrepreneurship and Business Environment*, 3(1), 1–15.
- Nyuga, G., et al. (2024). Assessing the mediating role of knowledge management in the relationship between technological innovation and sustainable competitive advantage. *Heliyon*, 10(2024), e-series.
- OECD & Eurostat. (2018). *Oslo manual 2018: Guidelines for collecting, reporting and using data on innovation* (4th ed.). OECD Publishing.
- OECD. (2009). *Sustainable manufacturing and eco-innovation: Framework, practices and measurement*. OECD.

- OECD. (2010). *Eco-innovation in industry: Enabling green growth*. OECD Publishing.
- OECD. (2011). *Towards green growth*. OECD Publishing.
- OECD. (2011). *Towards green growth*. OECD Publishing.
<https://doi.org/10.1787/9789264111318-en>
- OECD. (2011). *Transitioning to green innovation and technology*. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- OECD. (2019). *Business models for the circular economy: Opportunities and challenges for policy*. OECD Publishing.
- OECD. (2019). *Measuring the digital transformation: A roadmap for the future*. OECD Publishing.
- OECD. (2021). *No net zero without SMEs: Exploring the key issues for greening SMEs and green entrepreneurship*. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- OECD. (2024). *Green technology and innovation*. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- OECD. (2024). *Greening SMEs*. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- OECD. (2025). *Science, technology and innovation outlook 2025*. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2024). *Jobs and skills for a just transition*. OECD.
- Panuju, A. Y. T. (2024). Green innovation for SMEs in Indonesia: A literature analysis. *Journal of Engineering and Scientific Research*, 6(1), 1–10.
- Patterson, M. G. (1996). What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5), 377–390.
- Phaal, R., Farrukh, C. J. P., & Probert, D. R. (2004). Technology roadmapping: A planning framework for evolution and

- revolution. *Technological Forecasting and Social Change*, 71(1–2), 5–26.
- Porter, M. E. (1985). *Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance*. Free Press.
- Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2011). Creating shared value. *Harvard Business Review*, 89(1–2), 62–77.
- Porter, M. E., & van der Linde, C. (1995). Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), 97–118.
<https://doi.org/10.1257/jep.9.4.97>
- Purwanto, U. S., Sujiwo, A. S., & Susanti, M. (2023). Analysis of supporting factors of the successful implementation of green manufacturing for Indonesian manufacturing SMEs. *AMCA Journal of Science and Technology*, 3(1), 13–19.
- Rachman, I., et al. (2021). Community participation on waste bank to facilitate solid waste management in a village setting. *Journal of Environmental Science and Sustainable Development*.
- Raman, R. (2025). Social entrepreneurship and sustainable technologies: An integrative review. *Sustainable Futures*, 9, 100315.
- Raworth, K. (2017). *Doughnut economics: Seven ways to think like a 21st-century economist*. Chelsea Green Publishing.
- Rennings, K. (2000). Redefining innovation—Eco-innovation research and the contribution from ecological economics. *Ecological Economics*, 32(2), 319–332.
[https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00112-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00112-3)
- Rezky, M. I. (2022). Social entrepreneurship in sustainable development. *Journal of Environmental Science and Sustainable Development*, 5(2), 1–15.
- Rifkin, J. (2011). *The third industrial revolution: How lateral power is transforming energy, the economy, and the world*. Palgrave Macmillan.

- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., ... Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472–475.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (5th ed.). Free Press.
- Rogers, R., & Gumuchdian, P. (1997). *Cities for a small planet*. Faber and Faber.
- Sachs, J. D., Schmidt-Traub, G., Mazzucato, M., Messner, D., Nakicenovic, N., & Rockström, J. (2019). Six transformations to achieve the Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*, 2, 805–814.
- Sahin, I. (2006). Detailed review of Rogers' diffusion of innovations theory and educational technology-related studies based on Rogers' theory. *The Turkish Online Journal of Educational Technology*, 5(2), 14–23.
- Sarkis, J. (2012). A boundaries and flows perspective of green supply chain management. *Supply Chain Management: An International Journal*, 17(2), 202–216.
- Sarkis, J., Kouhizadeh, M., & Zhu, Q. S. (2021). Digitalization and the greening of supply chains. *Industrial Management & Data Systems*, 121(1), 65–85.
- Schaltegger, S., & Burritt, R. (2018). *Business cases and corporate engagement with sustainability: Differentiating ethical motivations*. Springer.
- Schaltegger, S., & Wagner, M. (2011). Sustainable entrepreneurship and sustainability innovation: Categories and interactions. *Business Strategy and the Environment*, 20(4), 222–237.
- Schaltegger, S., Hansen, E. G., & Lüdeke-Freund, F. (2016). Business models for sustainability: Origins, present

- research, and future avenues. *Organization & Environment*, 29(1), 3–10. <https://doi.org/10.1177/1086026615599806>
- Schiederig, T., Tietze, F., & Herstatt, C. (2012). Green innovation in technology and innovation management: An exploratory literature review. *R&D Management*, 42(2), 180–192. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9310.2011.00672.x>
- Schiederig, T., Tietze, F., & Herstatt, C. (2012). Green innovation in technology and innovation management: An exploratory literature review. *R&D Management*, 42(2), 180–192.
- Schilling, M. A. (2020). *Strategic management of technological innovation* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Schot, J., & Steinmueller, W. E. (2018). Three frames for innovation policy: R&D, systems of innovation and transformative change. *Research Policy*, 47(9), 1554–1567.
- Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699–1710. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020>
- Sezen, B., & Çankaya, S. Y. (2013). Effects of green manufacturing and eco-innovation on sustainability performance. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, 99, 154–163.
- Sharifi, A. (2021). Co-benefits and synergies between urban climate change mitigation and adaptation measures: A literature review. *Science of the Total Environment*, 750, 141642.
- Shepherd, D. A., & Patzelt, H. (2011). The new field of sustainable entrepreneurship: Studying entrepreneurial action linking “what is to be sustained” with “what is to be developed.” *Entrepreneurship Theory and Practice*, 35(1), 137–163.
- Soewarno, N., Tjahjadi, B., & Fithrianti, F. (2019). Green innovation strategy and green innovation: The roles of green organizational identity and environmental organizational legitimacy. *Management Decision*, 57(11), 3061–3078.

- Sovacool, B. K. (2016). How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 13, 202–215.
- Sovacool, B. K., & Dworkin, M. H. (2015). *Global energy justice: Problems, principles, and practices*. Cambridge University Press.
- Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435–438.
- Stern, N. (2007). *The economics of climate change: The Stern review*. Cambridge University Press.
- Syafri, W., Prabowo, H., Nur, S. A., & Muafi, M. (2021). The impact of workplace green behavior and green innovation on green performance of SMEs: A case study in Indonesia. *Journal of Asian Finance, Economics and Business*, 8(5), 365–374.
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415.
- Teece, D. J. (2007). Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of sustainable enterprise performance. *Strategic Management Journal*, 28(13), 1319–1350.
- Tidd, J., & Bessant, J. (2021). *Managing innovation: Integrating technological, market and organizational change* (7th ed.). Wiley.
- Tilbury, D. (1995). Environmental education for sustainability: Defining the new focus of environmental education in the 1990s. *Environmental Education Research*, 1(2), 195–212.
- Tjahjadi, B., Soewarno, N., Karima, T. E., & Sutarsa, A. A. P. (2020). The role of green innovation between green market orientation and business performance: Its implication for open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology*,

Market, and Complexity, 6(4), 173.
<https://doi.org/10.3390/joitmc6040173>

- Tjahjadi, B., Soewarno, N., Nadyaningrum, V., & Aminy, A. (2020). Human capital readiness and global market orientation in Indonesian micro-, small- and medium-sized enterprises business performance. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 69(1), 168–185.
- Tripopsakul, S. (2025). ESG practices, green innovation, and financial performance. *Journal of Risk and Financial Management*, 18(8), 467.
- UNEP. (2024). *Emissions gap report 2024: No more hot air ... please!* United Nations Environment Programme.
- UNEP. (2025). *Emissions gap report 2025*. United Nations Environment Programme.
- UNESCO. (2020). *Education for sustainable development: A roadmap*. UNESCO.
- UNESCO. (2024). *Greening curriculum guidance: Teaching and learning for climate action*. UNESCO.
- UNESCO. (2024). *Greening Education Partnership*. UNESCO.
- UNESCO. (2025). *Education for sustainable development for 2030*. UNESCO.
- UNESCO. (2025). *Greening Education Partnership*. UNESCO.
- UNIDO. (2019). *Green industry policies for supporting green technology innovation*. United Nations Industrial Development Organization.
- United Nations Development Programme & Ministry of National Development Planning/Bappenas. (2022). *The economic, social, and environmental benefits of a circular economy in Indonesia*. UNDP Indonesia.
- United Nations Environment Programme. (2011). *Towards a life cycle sustainability assessment: Making informed choices on products*. UNEP.

- United Nations Environment Programme. (2023). *UNEP input to the Global Digital Compact*. UNEP.
- United Nations Environment Programme. (2024). *Beyond an age of waste: Global waste management outlook 2024*. UNEP.
- United Nations Environment Programme. (2024). *Digital transformations*. UNEP.
- United Nations Environment Programme. (2024). *Global resources outlook 2024: Bend the trend—Pathways to a liveable planet as resource use spikes*. UNEP.
- United Nations Environment Programme. (2025). *AI has an environmental problem: Here's what the world can do about it*. UNEP.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2021). *Emerging climate technologies in the energy supply sector*. UNFCCC.
- United Nations Global Compact. (n.d.). *The ten principles of the UN Global Compact*. United Nations Global Compact.
- United Nations Human Settlements Programme. (2024). *World cities report 2024: Cities and climate action*. UN-Habitat.
- United Nations Industrial Development Organization & United Nations Environment Programme. (2010). *Resource efficient and cleaner production programme*. UNIDO/UNEP.
- United Nations Industrial Development Organization. (2019). *Green industry policies for supporting green technology innovation*. UNIDO.
- United Nations Industrial Development Organization. (2019). *Independent terminal evaluation: Resource efficient and cleaner production programme in Indonesia*. UNIDO.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. United Nations.
- Velenturf, A. P. M., & Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1437–1457.

- Verbong, G., & Geels, F. W. (2010). Exploring sustainability transitions in the electricity sector with socio-technical pathways. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(8), 1214–1221.
- Wals, A. E. J. (2011). Learning our way to sustainability. *Journal of Education for Sustainable Development*, 5(2), 177–186.
- Weidema, B. P., Bauer, C., Hischier, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., Vadenbo, C. O., & Wernet, G. (2013). *Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3*. Ecoinvent Centre.
- Wesseling, J. H., & Meijerhof, N. (2023). Developing and applying the mission-oriented innovation systems framework. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 47, 100745.
- Wibowo, S. F. (2019). Does green innovation matter? A study on Indonesia's SMEs. *Economic Journal of Emerging Markets*, 11(1), 1–12.
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A definition of carbon footprint. In C. C. Pertsova (Ed.), *Ecological economics research trends* (pp. 1–11). Nova Science Publishers.
- Wiedmann, T., Lenzen, M., Keyßer, L. T., & Steinberger, J. K. (2020). Scientists' warning on affluence. *Nature Communications*, 11, 3107.
- World Bank. (2023). *Scaling up to phase down: Financing energy transitions in the power sector*. World Bank.
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford University Press.
- World Economic Forum. (2024). *How digitalization can drive sustainable supply chains*. World Economic Forum.
- World Economic Forum. (2025). *Artificial intelligence for efficiency, sustainability and inclusivity in TradeTech*. World Economic Forum.
- World Green Building Council. (2024). *Annual report 2023–2024*. WorldGBC.

- World Green Building Council. (n.d.). *World Green Building Council*. WorldGBC.
- World Health Organization & United Nations Children's Fund. (2023). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: Special focus on gender*. WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme.
- World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. (2004). *The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard* (Revised ed.). WRI/WBCSD.
- World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. (2011). *Corporate value chain (Scope 3) accounting and reporting standard*. WRI/WBCSD.
- Yuezhen, F., et al. (2025). The role of government fiscal incentives in green technological innovation. *Technological Forecasting and Social Change*.
- Yulia, L. (2023). Building a sustainable business through social entrepreneurship. *Journal of Management Science*, 6(2), 120–132.
- Zhu, Q., Sarkis, J., & Lai, K. H. (2008). Confirmation of a measurement model for green supply chain management practices implementation. *International Journal of Production Economics*, 111(2), 261–273.



GLOSARIUM

A

Adopsi Teknologi

Proses penerimaan dan penggunaan teknologi baru oleh individu, organisasi, atau masyarakat.

Artificial Intelligence (AI)

Teknologi kecerdasan buatan yang memungkinkan sistem melakukan analisis, pembelajaran, dan pengambilan keputusan secara otomatis.

Audit Energi

Proses evaluasi penggunaan energi untuk mengidentifikasi peluang penghematan dan peningkatan efisiensi.

B

Bangunan Hijau (Green Building)

Bangunan yang dirancang, dibangun, dan dioperasikan dengan memperhatikan efisiensi energi, air, material, dan kenyamanan penghuni.

Big Data Analytics

Metode pengolahan dan analisis data dalam jumlah besar untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih akurat.

Biodegradable Material

Material yang dapat terurai secara alami oleh mikroorganisme tanpa menimbulkan pencemaran lingkungan.

Biomassa

Bahan organik yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan.

C

Carbon Footprint (Jejak Karbon)

Total emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh suatu aktivitas, produk, organisasi, atau individu.

Carbon Neutrality

Kondisi ketika jumlah emisi karbon yang dihasilkan seimbang dengan jumlah karbon yang diserap atau dikompensasi.

Circular Business Model

Model bisnis yang mempertahankan nilai produk dan material selama mungkin melalui penggunaan ulang, perbaikan, dan daur ulang.

Circular Economy (Ekonomi Sirkular)

Sistem ekonomi yang mengurangi limbah melalui prinsip reduce, reuse, recycle, recover, dan regenerate.

Clean Technology

Teknologi yang dirancang untuk mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan efisiensi sumber daya.

Cleaner Production

Strategi pencegahan pencemaran melalui peningkatan efisiensi proses dan pengurangan limbah sejak sumbernya.

D

Daur Ulang (Recycling)

Proses mengolah kembali material bekas menjadi produk baru yang bernilai guna.

Decarbonization

Upaya mengurangi emisi karbon dalam aktivitas ekonomi dan industri.

Digital Twin

Representasi digital suatu aset, sistem, atau proses fisik untuk simulasi dan optimasi.

Difusi Inovasi

Proses penyebaran inovasi dari pencipta kepada pengguna yang lebih luas.

E**Eco-Efficiency**

Pendekatan yang bertujuan menghasilkan nilai ekonomi lebih tinggi dengan dampak lingkungan yang lebih rendah.

Eco-Innovation

Inovasi yang memberikan manfaat lingkungan sepanjang siklus hidup produk atau layanan.

Efisiensi Energi

Kemampuan menghasilkan output yang sama atau lebih besar dengan penggunaan energi yang lebih sedikit.

Efisiensi Sumber Daya

Pemanfaatan sumber daya secara optimal untuk meminimalkan pemborosan.

Emisi Gas Rumah Kaca

Gas yang menyebabkan efek rumah kaca, seperti karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen oksida (N₂O).

Energy Management System (EMS)

Sistem untuk memantau, mengendalikan, dan meningkatkan penggunaan energi.

ESG (Environmental, Social, Governance)

Kerangka penilaian kinerja organisasi berdasarkan aspek lingkungan, sosial, dan tata kelola.

F**Footprint Analysis**

Metode pengukuran dampak lingkungan suatu aktivitas atau produk.

G

Gas Rumah Kaca (GRK)

Gas di atmosfer yang berkontribusi terhadap pemanasan global.

Global Warming

Peningkatan suhu rata-rata bumi akibat meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca.

Green Business Model

Model bisnis yang menciptakan nilai ekonomi dengan tetap memperhatikan keberlanjutan lingkungan dan sosial.

Green Economy

Sistem ekonomi yang rendah karbon, efisien sumber daya, dan inklusif.

Green Entrepreneurship

Kegiatan kewirausahaan yang berorientasi pada penciptaan nilai ekonomi sekaligus manfaat lingkungan.

Green Innovation

Inovasi yang mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan mendukung keberlanjutan.

Green Manufacturing

Sistem manufaktur yang meminimalkan penggunaan sumber daya dan pencemaran.

Green Marketing

Strategi pemasaran yang menekankan aspek ramah lingkungan.

Green Product Innovation

Pengembangan produk dengan dampak lingkungan yang lebih rendah.

Green Process Innovation

Perbaikan proses operasional untuk mengurangi limbah dan meningkatkan efisiensi.

Green Supply Chain Management (GSCM)

Pengelolaan rantai pasok dengan mempertimbangkan dampak lingkungan pada seluruh siklus produk.

Green Technology

Teknologi yang mendukung perlindungan lingkungan dan keberlanjutan.

Greenwashing

Praktik memberikan kesan ramah lingkungan tanpa tindakan nyata yang mendukung klaim tersebut.

I

Industrial Ecology

Pendekatan yang meniru siklus alam dalam sistem industri.

Internet of Things (IoT)

Jaringan perangkat yang saling terhubung untuk mengumpulkan dan bertukar data.

Inovasi Berkelanjutan (Sustainable Innovation)

Inovasi yang menghasilkan manfaat ekonomi, sosial, dan lingkungan secara seimbang.

K

Keberlanjutan (Sustainability)

Kemampuan memenuhi kebutuhan saat ini tanpa mengurangi kemampuan generasi mendatang.

Kecerdasan Buatan

Lihat Artificial Intelligence (AI).

Komersialisasi Teknologi

Proses mengubah hasil penelitian atau teknologi menjadi produk atau layanan yang bernilai ekonomi.

L

Lean Manufacturing

Pendekatan produksi yang berfokus pada pengurangan pemborosan.

Life Cycle Assessment (LCA)

Metode penilaian dampak lingkungan produk dari tahap bahan baku hingga pembuangan.

Life Cycle Thinking

Pendekatan yang mempertimbangkan dampak lingkungan sepanjang siklus hidup produk.

Low Carbon Development

Pembangunan yang berorientasi pada pengurangan emisi karbon.

M**Material Flow Analysis (MFA)**

Metode untuk menganalisis aliran material dalam suatu sistem.

Microhydro

Pembangkit listrik tenaga air berskala kecil.

O**Organizational Innovation**

Perubahan dalam struktur, proses, atau budaya organisasi untuk meningkatkan kinerja.

P**Panel Surya**

Perangkat yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik.

Panas Bumi (Geothermal Energy)

Energi yang berasal dari panas dalam bumi.

Product-Service System (PSS)

Model bisnis yang menggabungkan produk dan layanan dalam satu paket nilai.

R**Renewable Energy (Energi Terbarukan)**

Energi yang berasal dari sumber yang dapat diperbarui secara alami.

Resource Efficiency

Lihat Efisiensi Sumber Daya.

Ride Sharing

Sistem berbagi kendaraan untuk mengurangi penggunaan kendaraan pribadi.

S

Sharing Economy

Model ekonomi berbasis penggunaan bersama sumber daya.

Smart City

Kota yang memanfaatkan teknologi digital untuk meningkatkan kualitas hidup dan efisiensi layanan.

Smart Grid

Jaringan listrik cerdas yang memanfaatkan teknologi digital untuk mengoptimalkan distribusi energi.

Sustainable Development

Pembangunan yang menyeimbangkan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan.

Sustainability Performance

Kinerja organisasi dalam mencapai tujuan keberlanjutan.

T

Take-Back System

Sistem pengembalian produk bekas kepada produsen untuk didaur ulang atau diproses kembali.

Technology Management

Proses perencanaan, pengembangan, implementasi, dan evaluasi teknologi untuk mencapai tujuan organisasi.

Technology Readiness Level (TRL)

Ukuran tingkat kematangan teknologi dari tahap penelitian hingga komersialisasi.

Technology Transfer

Proses pemindahan pengetahuan dan teknologi dari satu pihak ke pihak lain.

Transit-Oriented Development (TOD)

Konsep pengembangan kawasan yang berpusat pada transportasi publik.

U

UMKM Hijau

Usaha mikro, kecil, dan menengah yang menerapkan prinsip keberlanjutan dalam operasionalnya.

V

Value Creation

Proses menciptakan manfaat atau nilai bagi pelanggan dan pemangku kepentingan.

W

Waste Management

Pengelolaan limbah melalui pengurangan, pemanfaatan kembali, daur ulang, dan pengolahan akhir.



INDEKS

A

- Adopsi teknologi
- Agile innovation
- Air bersih
- Analisis aliran material (Material Flow Analysis)
- Analisis siklus hidup (Life Cycle Assessment)
- Artificial Intelligence (AI)
- Audit energi
- Automasi industri

B

- Bangunan hijau (Green Building)
- Big Data Analytics
- Biodegradable material
- Biodiversitas
- Biomassa
- Blue economy
- Blue-green infrastructure

C

- Carbon footprint
- Carbon neutrality
- Carbon reduction
- Circular business model
- Circular economy

Clean energy
Clean technology
Cleaner production
Climate change mitigation
Closed-loop system

D

Daur ulang
Decarbonization
Desain produk hijau
Digital innovation
Digital sustainability
Digital technology
Digital transformation
Digital twin
Difusi inovasi

E

Eco-design
Eco-efficiency
Eco-innovation
Ecological sustainability
Efisiensi energi
Efisiensi sumber daya
Ekonomi hijau
Ekonomi rendah karbon
Ekonomi sirkular
Emisi gas rumah kaca
Energi angin
Energi biomassa
Energi panas bumi
Energi surya
Energi terbarukan

Environmental management
ESG (Environmental, Social, Governance)

F

Footprint analysis

G

Gas rumah kaca
Geothermal energy
Global warming
Governance
Green building
Green business model
Green business strategy
Green city
Green economy
Green entrepreneurship
Green growth
Green innovation
Green innovation ecosystem
Green logistics
Green management
Green manufacturing
Green marketing
Green mobility
Green organizational innovation
Green process innovation
Green product innovation
Green supply chain
Green supply chain management
Green technology
Green transportation
Greenwashing

H

Human capital
Hybrid energy system

I

Industrial ecology
Industrial symbiosis
Industry 4.0
Innovation ecosystem
Innovation management
Internet of Things (IoT)
Investasi hijau

J

Jejak karbon
Jaringan listrik cerdas

K

Kapabilitas teknologi
Keberlanjutan
Keunggulan kompetitif
Kinerja keberlanjutan
Kinerja lingkungan
Kolaborasi inovasi
Komersialisasi teknologi
Konservasi energi
Kota cerdas

L

Lean manufacturing
Life cycle assessment (LCA)

Life cycle thinking
Low-carbon development

M

Manajemen inovasi
Manajemen lingkungan
Manajemen teknologi
Material flow analysis
Microhydro
Model bisnis hijau
Monitoring lingkungan

N

Natural resource management
Net zero emission

O

Organizational innovation

P

Panel surya
Pembangunan berkelanjutan
Pembangunan rendah karbon
Pengelolaan limbah
Penghematan energi
Perubahan iklim
Product-service system
Produksi bersih
Produksi berkelanjutan

R

Recycling
Reduce

Regenerative economy
Remanufacturing
Renewable energy
Repair
Resource efficiency
Reuse
Reverse logistics
Ride sharing

S

Sharing economy
Smart city
Smart energy system
Smart grid
Smart manufacturing
Sustainable development
Sustainable innovation
Sustainability performance
Sustainable technology

T

Take-back system
Technology adoption
Technology diffusion
Technology management
Technology readiness level (TRL)
Technology transfer
Teknologi bersih
Teknologi digital
Teknologi hijau
Teknologi rendah karbon
Transformasi digital
Transformasi hijau

Transportasi berkelanjutan
Transportasi rendah emisi
Transit-oriented development (TOD)

U

UMKM hijau
Urban farming

V

Value creation
Value chain
Vehicle electrification

W

Waste management
Waste minimization
Water efficiency

Z

Zero emission
Zero waste

SUBINDEKS PENTING

Green Innovation

- definisi
- karakteristik
- dimensi
- manfaat
- penerapan sektor energi
- penerapan sektor industri
- penerapan sektor transportasi
- penerapan sektor bangunan

- penerapan sektor pertanian
- penerapan pada UMKM
- strategi implementasi

Technology Management

- pengertian
- fungsi
- peran organisasi
- efisiensi sumber daya
- strategi teknologi hijau
- technology readiness level
- transfer teknologi
- komersialisasi teknologi
- tantangan transformasi hijau

Circular Economy

- prinsip reduce
- prinsip reuse
- prinsip recycle
- remanufacturing
- reverse logistics
- closed-loop system
- circular business model

Digital Technology for Green Innovation

- Artificial Intelligence
- Big Data Analytics
- Internet of Things
- Digital Twin
- Smart Grid
- Smart City
- Industry 4.0



PROFIL PENULIS



Prof. Dr. Ir. Lalu Mulyadi, MT adalah seorang akademisi dan praktisi di bidang arsitektur, perencanaan wilayah, perkotaan, serta manajemen rekayasa. Beliau aktif sebagai dosen dan peneliti, dengan perhatian keilmuan pada pengembangan wilayah perkotaan, arsitektur kota, metodologi penelitian, pelestarian lingkungan binaan, serta kajian pembangunan berkelanjutan.

Dalam perjalanan akademiknya, **Prof. Dr. Ir. Lalu Mulyadi, MT** telah terlibat dalam berbagai kegiatan pendidikan, penelitian, pengabdian kepada masyarakat, serta penulisan karya ilmiah dan buku ajar. Berbagai gagasan akademiknya diarahkan untuk memperkuat pemahaman mahasiswa dan masyarakat akademik terhadap pentingnya perencanaan, perancangan, dan pengelolaan lingkungan binaan yang berkelanjutan, kontekstual, dan responsif terhadap kebutuhan masyarakat.

Melalui buku ini, penulis berupaya memberikan kontribusi keilmuan yang dapat digunakan sebagai referensi bagi mahasiswa, dosen, peneliti, praktisi, maupun pihak-pihak yang memiliki perhatian terhadap bidang arsitektur, perkotaan, pengembangan wilayah, dan manajemen rekayasa.



Fourry Handoko, Ph.D., IPU., ASEAN Eng. adalah seorang akademisi dan praktisi di bidang Manajemen; Teknik dan Manajemen Industri; serta Manaje-men Rekayasa, dengan kekhususan pada mana-jemen dan system industri berkelanjutan; inova-si serta transfer teknologi hijau. pada peren-canaan wilayah, perkotaan, serta manajemen rekayasa. Penulis aktif sebagai dosen dan peneliti, dengan perhatian keilmuan pada pengembangan manajemen dan system industry hijau beserta manajemen inovasi hijau dan trenafer serta difusi teknologi hijau.

Dalam perjalanan akademiknya, **Fourry Handoko, Ph.D., IPU., ASEAN Eng.** telah terlibat dalam berbagai kegiatan pendidikan, penelitian, pengabdian kepada masyarakat, baik pada skala nasional maupun internasional. Berbagai gagasan akademiknya diarahkan untuk memperkuat pemahaman mahasiswa dan masyarakat baik pada akademik maupun non akademik terhadap pentingnya manajemen dan system industry hijau untuk tercapainya Profit, People dan Planet dalam konteks sustainability.

Melalui tulisan ini, penulis mencoba memberikan kontribusi keilmuan yang dapat digunakan sebagai referensi bagi mahasiswa, dosen, peneliti, praktisi, maupun pihak-pihak yang memiliki perhatian terhadap bidang bidang terkait diatas.



Prof. Dr. Ir. Julianus Hutabarat, MSIE.

adalah seorang Profesor dalam bidang Teknik dan Manajemen Industri dengan kekhususan pada bidang Ergonomi dan Sistem Produksi. Penelitian Ergonomi lebih diarahkan pada *Cognitive Ergonomic* dan *Product Design*, Produktivitas kerja, dan Analisis beban kerja. Penulis sebagai dosen di Institut Teknologi Nasional Malang.

Aktif meneliti dan telah menerbitkan berbagai publikasi ilmiah, termasuk di jurnal bereputasi. Beberapa risetnya meliputi *Ergonomic Chair Design as a Solution to Musculoskeletal Disorders among Traditional Cobblers: An Anthropometric*; *Study Risk of Musculoskeletal Disorder in the Working Posture of Online Motorcycle Drivers (Case Study: Drivers at Malang District)*; *Impact of a Stretching Program on Musculoskeletal Discomfort in Online Motorcycle Taxi Drivers: A Pre-Post Intervention Study*; *Integrated Posture and Mental Workload Assessment Model for Musculoskeletal Risk Mitigation in Motorcycle Ride-Hailing Operators*. Telah menerbitkan beberapa buku diantaranya: *Dasar-Dasar Pengetahuan Ergonomi*; *Kognitif Ergonomi: Musculoskeletal Discomfort dan Mental Workload*; *Stress and Mental for Leader*

julianus1961@lecturer.itn.ac.id