

$$E = mc^2$$

BUKU REFERENSI

$$c = \lambda f$$
$$v = \frac{h}{\lambda}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

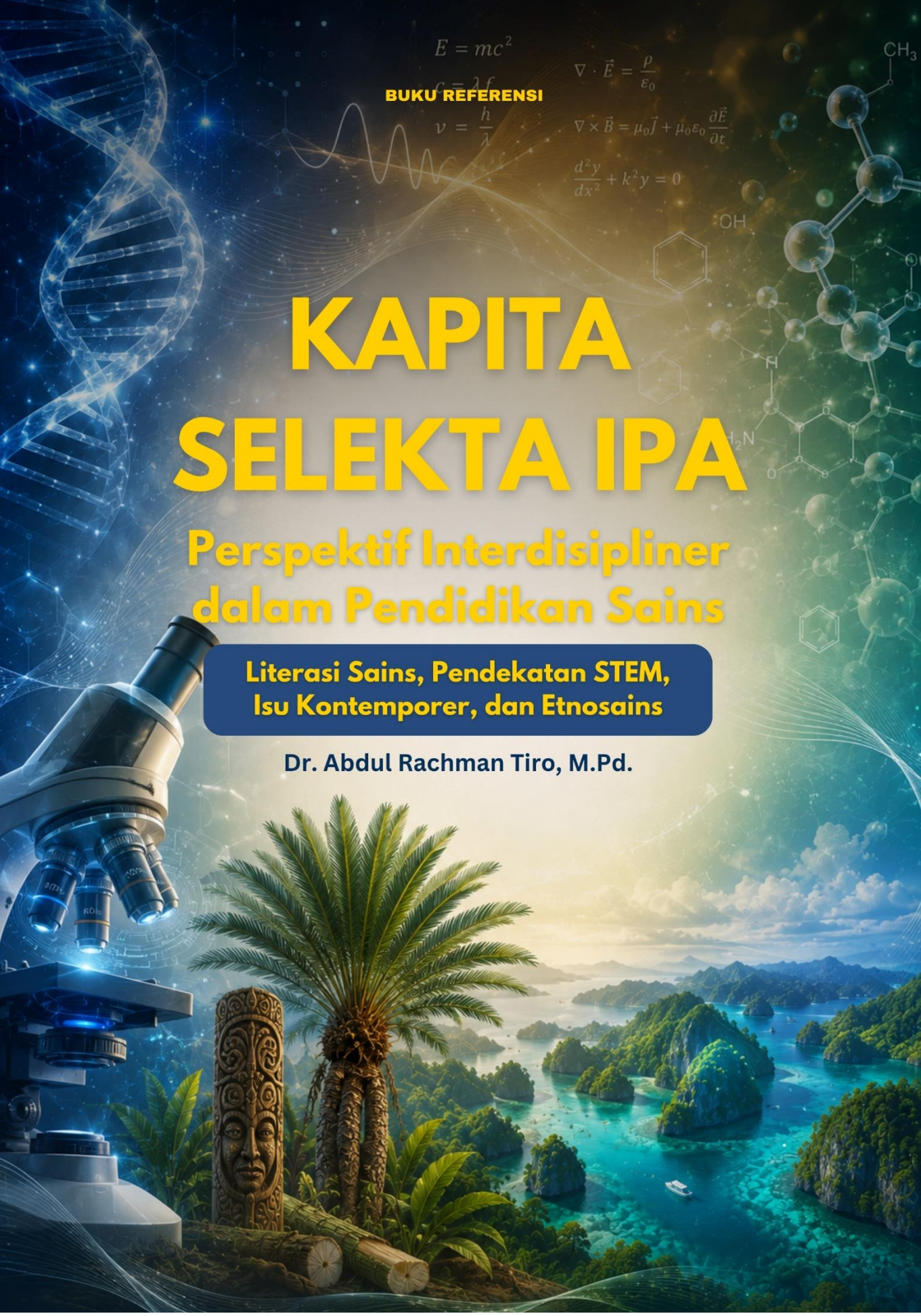
$$\frac{d^2 y}{dx^2} + k^2 y = 0$$

KAPITA SELEKTA IPA

Perspektif Interdisipliner
dalam Pendidikan Sains

Literasi Sains, Pendekatan STEM,
Isu Kontemporer, dan Etnosains

Dr. Abdul Rachman Tiro, M.Pd.



**KAPITA SELEKTA IPA
PERSPEKTIF INTERDISIPLINER DALAM
PENDIDIKAN SAINS
Literasi Sains, Pendekatan STEM, Isu Kontemporer, dan
Etnosains**

Ditulis oleh:

Dr. Abdul Rachman Tiro, M.Pd.

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang keras memperbanyak,
menerjemahkan atau mengutip baik sebagian ataupun keseluruhan isi buku
tanpa izin tertulis dari penerbit.



ISBN: 978 – 634 – 316 – 042 – 7
Viii + 151 hlm; 18,2 x 25,7 cm.
Cetakan I, Juli 2026

Desain Cover dan Tata Letak:
Muhammad Rasya Aiman Hafizh

Diterbitkan, dicetak, dan didistribusikan oleh

PT Media Penerbit Indonesia

Royal Suite No. 6C, Jalan Sedap Malam IX, Sempakata
Kecamatan Medan Selayang, Kota Medan 20131

Telp: 081362150605

Email: ptmediapenerbitindonesia@gmail.com

Web: <https://mediapenerbitindonesia.com>

Anggota IKAPI No.088/SUT/2024



KATA PENGANTAR

Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas perkenan-Nya buku “Kapita Selekta IPA: Integrasi, Inovasi, dan Kearifan Lokal” ini dapat hadir di hadapan pembaca sekalian, khususnya bagi para calon pendidik sains masa depan.

Menjadi guru IPA di abad ke-21 bukan lagi sekadar tugas mentransfer rumus dari buku teks ke papan tulis. Kita hidup di era di mana informasi bergerak lebih cepat daripada cahaya di dalam serat optik, namun di saat yang sama, tantangan seperti disinformasi ilmiah, krisis iklim, dan degradasi karakter bangsa menjadi nyata di depan mata. Oleh karena itu, pertanyaan besarnya adalah: Bagaimana kita menghidupkan sains di dalam kelas?

Buku ini lahir dari kegelisahan bahwa pembelajaran IPA sering kali terjebak dalam sekat-sekat sempit. Fisika dianggap hanya soal angka, Biologi dianggap hanya soal hafalan, dan Kimia dianggap sebagai subjek yang asing. Padahal, alam semesta bekerja secara holistik. Melalui Kapita Selekta IPA, penulis mengajak pembaca untuk melihat sains sebagai satu kesatuan yang utuh (interdisipliner).

Lebih jauh lagi, buku ini menekankan pentingnya menjadi Guru IPA yang Kontekstual. Seorang guru yang mampu membawa laboratorium ke dalam kehidupan sehari-hari, dan membawa kearifan lokal (etnosains) ke dalam diskursus ilmiah modern. Kita tidak ingin siswa kita pandai menghitung kecepatan benda jatuh, namun buta terhadap kearifan nenek moyang mereka dalam memprediksi musim atau menjaga keseimbangan ekosistem.

Struktur buku ini dirancang untuk menantang pemikiran kritis mahasiswa melalui topik-topik mutakhir mulai dari rekayasa genetika, nanoteknologi, hingga eksplorasi antariksa tanpa melupakan akar budaya melalui bab khusus Etnosains. Penulis berharap, setelah membaca buku ini, mahasiswa tidak hanya menguasai konten sains yang mendalam, tetapi juga memiliki kemampuan pedagogis untuk

meluruskan miskonsepsi dan merancang pembelajaran yang bermakna (*meaningful learning*).

Akhir kata, sains adalah tentang rasa ingin tahu. Semoga buku ini dapat memantik api keingintahuan tersebut di hati para calon guru, sehingga mereka mampu menyalakannya kembali di hati murid-murid mereka kelak.

Selamat membaca, selamat bereksplorasi.

Penulis

Dr. Abdul Rachman Tiro, M.Pd
Dosen Pendidikan IPA



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii

BAB I	HAKIKAT IPA DAN INTERKONEKSI ILMU	1
A.	Mengapa Fisika, Kimia, dan Biologi Tidak Bisa Dipisahkan?	2
B.	<i>Nature of Science</i> (NoS): Memahami Bagaimana Sains Bekerja	7
BAB II	LITERASI SAINS DAN BERPIKIR KRITIS	12
A.	Strategi Membedakan Sains, Pseudosains, dan Hoaks Ilmiah	15
B.	Studi Kasus: Isu Kesehatan dan Lingkungan di Media Sosial	18
BAB III	KODE KEHIDUPAN: DARI DNA HINGGA REKAYASA GENETIKA	27
A.	Mekanisme Pewarisan Sifat dan Ekspresi Gen	28
B.	Etika dan Masa Depan Teknologi CRISPR	35
C.	Etika dan Masa Depan GMO (<i>Genetically Modified Organism</i>)	42
BAB IV	PANDEMI DAN MIKROBIOLOGI TERAPAN	50
A.	Mekanisme Virus dan Bakteri Menyerang Sistem Imun... ..	51
B.	Sains di Balik Vaksin dan Antibiotik: Tantangan Resistensi Bakteri	58
BAB V	NANOTEKNOLOGI: KETIKA UKURAN MENJADI PENTING	71
A.	Sifat Unik Material pada Skala Nano	72
B.	Aplikasi Nanoteknologi dalam Pengobatan dan Alat Elektronik	81

BAB VI	DILEMA ENERGI: ANTARA FOSIL DAN TERBARUKAN.....	94
A.	Termodinamika dalam Konversi Energi.....	95
B.	Masa Depan Panel Surya, Energi Nuklir, dan <i>Hydrogen Fuel Cell</i>	102
BAB VII	PERUBAHAN IKLIM DALAM LENSEA SAINS MULTIDISIPLIN	120
A.	Kimia Lingkungan (Gas Rumah Kaca) dan Fisika Radiasi	121
B.	Dampak Ekologis Perubahan Iklim	133
C.	Strategi Mitigasi dan Pengurangan Risiko Bencana.....	143
BAB VIII	EKSPLORASI ANTARIKSA DAN ASTROBIOLOGI.....	158
A.	Fisika Orbit dan Mekanika Perjalanan Antariksa	159
B.	Pencarian Planet Layak Huni: Eksoplanet dan Zona Habitable.....	166
C.	Kolonisasi Mars: Tinjauan Biologi dan Fisika	174
D.	Teleskop Generasi Terkini dan Masa Depan Astronomi.	182
BAB IX	BEDAH MISKONSEPSI IPA DI SEKOLAH MENENGAH	186
A.	Identifikasi Konsep Sulit dalam Kurikulum SMP/SMA	188
B.	Cara Mengoreksi Pemahaman Siswa melalui Model <i>Inquiry</i>	195
BAB X	INTEGRASI STEM DAN PROYEK KREATIF IPA	202
A.	Merancang Pembelajaran Berbasis Proyek (<i>Project Based Learning</i>)	203
B.	Pemanfaatan AI (Kecerdasan Buatan) dalam Riset dan Laboratorium Virtual	208
BAB XI	HAKIKAT IPA DAN INTERKONEKSI ILMU	217
A.	Sains sebagai Proses, Produk, dan Sikap.....	217
B.	Membangun Jembatan antara Fisika, Kimia, dan Biologi	222

BAB XII	ETNOSAINS: MENEMUKAN SAINS DALAM KEARIFAN LOKAL	228
A.	Rekonstruksi Sains Asli (<i>Indigenous Science</i>) menjadi Sains Ilmiah	228
B.	Studi Kasus 1: Proses Pembuatan Tempe (Biologi)	229
C.	Studi Kasus 2: Mitigasi Bencana Tradisional (Fisika)	232
D.	Studi Kasus 3: Pewarna Alami Tekstil (Kimia)	236
E.	Peran Etnosains dalam Melestarikan Budaya melalui Pendidikan	238
DAFTAR PUSTAKA		242
GLOSARIUM		267
INDEKS		273
BIOGRAFI PENULIS.....		276
SINOPSIS		277



BAB I

HAKIKAT IPA DAN INTERKONEKSI ILMU

GAMBARAN UMUM BAB

Bab ini membahas secara mendalam tentang hakikat Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) sebagai sebuah bangunan epistemologis yang utuh, bukan kumpulan fakta yang terpisah-pisah. Pembahasan meliputi asal-usul dan perkembangan IPA sebagai disiplin ilmu. Mengapa fisika, kimia, dan biologi saling berkelindan dan tidak dapat dipisahkan. *Nature of Science* (NoS) sebagai kerangka meta-saintifik yang fundamental serta implikasi pedagogis dari perspektif interdisipliner bagi guru IPA.

Capaian Bab: Setelah mempelajari bab ini, pembaca mampu (a) mendeskripsikan hakikat IPA secara komprehensif; (b) menganalisis koneksi konseptual antara fisika, kimia, dan biologi; (c) menjelaskan prinsip-prinsip NOS dan relevansinya dalam pembelajaran; (d) merancang pendekatan interdisipliner dalam konteks pedagogis IPA.

Bayangkan seorang guru IPA SMP yang sedang mengajarkan topik fotosintesis. Ia menjelaskan bahwa klorofil menyerap energi cahaya matahari untuk mengubah karbon dioksida dan air menjadi glukosa dan oksigen. Mayoritas guru akan berhenti di sini, sebuah deskripsi biologis yang memadai untuk ujian nasional. Namun, jika sang guru memiliki perspektif interdisipliner, ia akan bertanya lebih jauh: Mengapa klorofil berwarna hijau? (fisika optik, panjang gelombang cahaya yang diserap versus dipantulkan). Bagaimana elektron berpindah dari molekul air ke NADP⁺? (kimia redoks). Mengapa reaksi ini membutuhkan suhu dan pH tertentu? (termodinamika kimia). Bagaimana struktur membran tilakoid mengoptimalkan efisiensi energi? (biofisika membran).

Pertanyaan-pertanyaan ini bukan sekadar kerumitan akademik, mereka adalah jendela menuju pemahaman yang jauh lebih kaya dan bermakna tentang kehidupan itu sendiri. Inilah esensi dari pendidikan IPA yang sesungguhnya: mengajarkan bukan hanya fakta, tetapi cara berpikir integratif tentang dunia alam.

Ilmu Pengetahuan Alam, dalam sejarah panjangnya, sesungguhnya tidak pernah mengenal batas-batas disipliner yang kaku. Isaac Newton, ketika merumuskan hukum gravitasinya pada abad ke-17, tidak sedang bertugas sebagai fisikawan semata, ia juga seorang ahli matematika, filsuf alam, dan bahkan alkemis. Antoine Lavoisier, bapak kimia modern, memadukan pengukuran kuantitatif (matematika), pemahaman tentang pembakaran (fisika panas), dan analisis komposisi udara (kimia) dalam satu eksperimen monumental. Charles Darwin, dalam perjalanan epiknya dengan HMS Beagle, memadukan geologi, zoologi, botani, dan anatomi komparatif untuk membangun teori evolusinya.

Sekat-sekat disipliner yang kita kenal sekarang seperti fisika, kimia, biologi sebagai tiga mata pelajaran yang berbeda adalah produk dari sistem pendidikan abad ke-19 yang bertujuan mengorganisir pengetahuan untuk keperluan pengajaran, bukan cerminan dari cara alam semesta sesungguhnya bekerja. Menurut Lederman dan Lederman (2014), *fragmentation of science disciplines* dalam pendidikan telah menciptakan siswa yang mampu mengerjakan soal fisika tetapi tidak mampu memahami fenomena fisika dalam konteks dunia nyata yang selalu bersifat multidisiplin.

A. Mengapa Fisika, Kimia, dan Biologi Tidak Bisa Dipisahkan?

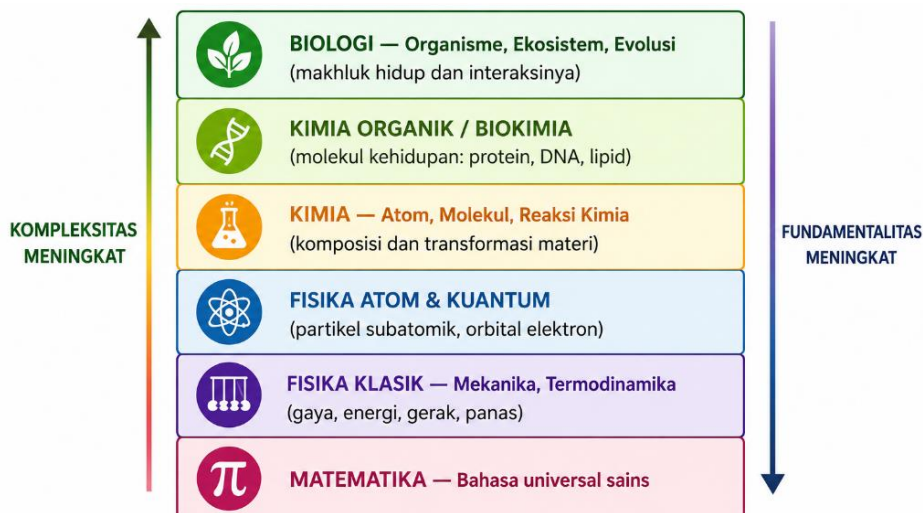
Pertanyaan ini adalah jantung dari Bab 1. Untuk menjawabnya secara tuntas, kita perlu menelusuri koneksi-koneksi mendalam yang menghubungkan ketiga disiplin ini, baik pada level konseptual maupun pada level fenomenologis.

1. Hierarki dan Reduksionisme dalam Ilmu Pengetahuan Alam

Cara pertama untuk memahami koneksi antardisiplin adalah melalui konsep hierarki organisasi ilmu pengetahuan. Secara tradisional,

ilmu-ilmu pengetahuan alam sering digambarkan dalam sebuah hierarki reduktif, dari yang paling fundamental hingga yang paling kompleks:

Gambar 1.1 Hierarki Organisasi Ilmu Pengetahuan Alam



Sumber: Diadaptasi dari Wilson (2012), The Unity of Knowledge

Namun, hierarki reduktif ini memiliki keterbatasan serius jika dipahami secara kaku. Para filsuf sains kontemporer, seperti Philip Anderson (pemenang Nobel Fisika), telah berargumen bahwa *more is different*, bahwa sistem kompleks menunjukkan sifat-sifat emergent yang tidak dapat direduksi ke atau diprediksi dari level yang lebih rendah. Perilaku seekor lebah dalam koloninya, misalnya, tidak dapat dipahami hanya dari biokimia neuronnya, meskipun biokimia tersebut adalah fondasinya.

Ini membawa kita pada pandangan yang lebih tepat: ketiga disiplin ini tidak berada dalam hubungan reduksionistik yang kaku, melainkan dalam hubungan komplementaritas, setiap disiplin menawarkan level analisis dan alat konseptual yang unik dan tidak tergantikan.

2. Koneksi Fundamental: Konsep-Konsep yang Menjembatani

Terdapat sejumlah konsep lintas disiplin (*crosscutting concepts*) yang secara inheren menghubungkan fisika, kimia, dan biologi. *Next Generation Science Standards* (NGSS, 2013) mengidentifikasi tujuh

konsep lintas disiplin utama yang merupakan benang merah yang menjahit ketiga disiplin IPA:

Tabel 1.1 Tujuh Konsep Lintas Disiplin dalam NGSS dan Kaitannya dengan Fisika, Kimia, Biologi

Konsep Lintas Disiplin	Dalam Fisika	Dalam Kimia & Biologi
Pola (<i>Patterns</i>)	Pola gelombang, simetri kristal, periodisitas	Tabel periodik, sekuens DNA, pola pewarisan Mendel
Sebab dan Akibat (<i>Cause and Effect</i>)	Hukum Newton: $F = ma$	Enzim mengkatalis reaksi; gen mengontrol fenotip
Skala, Proporsi, dan Kuantitas	Besaran vektor vs skalar, orde magnitudo	Mol dan stoikiometri, ekspresi gen pada berbagai skala
Sistem dan Model Sistem	Sistem mekanik, termodinamik	Sistem periodik, ekosistem, sistem organ
Aliran Energi dan Materi	Konservasi energi, termodinamika	Fotosintesis, rantai makanan, siklus biogeokimia
Struktur dan Fungsi	Desain optimal struktur mekanik	Ikatan kimia menentukan sifat, struktur protein menentukan fungsi enzim
Stabilitas dan Perubahan	Keseimbangan dinamis, osilasi	Keseimbangan kimia (Le Chatelier), homeostasis biologis

3. Studi Kasus Interkoneksi: Energi sebagai Jembatan Universal

Tidak ada konsep yang lebih kuat dalam menghubungkan fisika, kimia, dan biologi daripada energi. Mari kita telusuri bagaimana konsep tunggal ini merentang dari fisika kuantum hingga ekologi:

ENERGI: BENANG MERAH YANG MENJAHIT TIGA DISIPLIN IPA

Fisika: Energi didefinisikan sebagai kapasitas untuk melakukan kerja. Hukum Pertama Termodinamika menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, hanya diubah bentuknya. Hukum Kedua menyatakan bahwa setiap transformasi energi meningkatkan entropi total semesta (Planck, 1900).

Kimia: Energi disimpan dalam ikatan kimia. Reaksi eksotermik melepaskan energi ($\Delta H < 0$); reaksi endotermik menyerap energi ($\Delta H > 0$). ATP adalah mata uang energi universal karena hidrolisis ikatannya melepaskan $\sim 30,5$ kJ/mol energi bebas (ΔG°). Potensial reduksi standar (E°) menentukan arah aliran elektron dalam reaksi redoks.

Biologi: Fotosintesis mengubah energi foton menjadi energi kimia (ATP dan NADPH) melalui reaksi terang, kemudian menyimpannya dalam ikatan glukosa melalui Siklus Calvin. Respirasi selular mengekstrak energi dari glukosa melalui glikolisis, Siklus Krebs, dan rantai transpor elektron, menghasilkan $\sim 36-38$ ATP per molekul glukosa. Pada level ekosistem, hanya $\sim 10\%$ energi yang ditransfer antar tingkat trofik (Hukum 10%).

Koneksi Mendalam: Satu foton cahaya merah ($\lambda = 680$ nm) memiliki energi $E = hc/\lambda = 1,83$ eV. Energi ini cukup untuk mengeksitasi satu elektron dalam klorofil P680. Empat foton dibutuhkan untuk memecah satu molekul air. Dua belas foton total dibutuhkan untuk menghasilkan satu molekul O_2 dan mereduksi enam CO_2 menjadi satu glukosa. Seluruh narasi ini adalah satu: fisika foton $\rightarrow$ kimia redoks $\rightarrow$ biologi metabolisme $\rightarrow$ ekologi rantai makanan.

4. Studi Kasus Interkoneksi: DNA dan Informasi

Contoh kedua yang sangat kuat adalah DNA molekul kehidupan yang secara gamblang menunjukkan betapa fisika, kimia, dan biologi tidak bisa dipisahkan dalam memahaminya.

Tabel 1.2 Kontribusi Multi-Disiplin dalam Pemahaman DNA

Perspektif Disiplin	Kontribusi terhadap Pemahaman DNA
Fisika	Difraksi sinar-X oleh Rosalind Franklin mengungkap struktur heliks ganda DNA. Fisika statistik menjelaskan stabilitas konformasi heliks. Fisika kuantum menjelaskan ikatan hidrogen antara pasangan basa. Biofisika memahami mekanika motor protein (polimerase, helikase).
Kimia	Struktur kimia nukleotida (gula deoksiribosa, fosfat, basa nitrogen). Aturan Chargaff ($A=T$, $G=C$) berdasarkan komposisi kimia. Ikatan fosfodiester membentuk tulang punggung. Energi kimia ATP menggerakkan replikasi dan transkripsi.
Biologi (Genetika)	DNA sebagai pembawa informasi genetik. Kode genetik: tiga basa $\rightarrow$ satu asam amino. Ekspresi gen: DNA $\rightarrow$ RNA $\rightarrow$ Protein (dogma sentral). Mutasi, seleksi, evolusi pada level molekuler.
Bioinformatika (Interdisiplin)	Komputasi untuk menyimpan, menganalisis, dan menginterpretasi sekuens DNA. Human Genome Project membutuhkan kolaborasi biologi, kimia, fisika, matematika, dan ilmu komputer sekaligus.

Penemuan struktur DNA pada tahun 1953 oleh Watson dan Crick, yang sangat bergantung pada data difraksi sinar-X Rosalind Franklin (fisika) dan aturan komposisi Chargaff (kimia) adalah salah satu demonstrasi paling indah dalam sejarah sains tentang betapa pengetahuan dari satu disiplin dapat menjadi kunci pembuka misteri di disiplin lain.

5. Bidang-Bidang Ilmu Hibrid: Bukti Nyata Interkoneksi

Salah satu bukti paling konkret dari interkoneksi antardisiplin adalah munculnya sejumlah bidang ilmu hibrid yang secara eksplisit berada di persimpangan antara fisika, kimia, dan biologi. Bidang-bidang ini bukan anomali, mereka adalah ekspresi paling natural dari cara sains sesungguhnya bekerja:

BIDANG-BIDANG ILMU HIBRID TERKEMUKA	
•	Biofisika (<i>Biophysics</i>): Menerapkan prinsip dan metode fisika untuk memahami sistem biologis. Contoh: mekanika motor protein, biofisika membran, pencitraan medis (MRI, PET scan), mekanika sel.
•	Kimia Fisika (<i>Physical Chemistry</i>): Menggunakan fisika untuk memahami sistem kimia. Termodinamika kimia, kinetika reaksi, spektroskopi, kimia kuantum.
•	Biokimia (<i>Biochemistry</i>): Menerapkan kimia untuk memahami sistem biologis. Metabolisme, enzimologi, biologi struktural protein, biokimia asam nukleat.
•	Kimia Biologi (<i>Chemical Biology</i>): Menggunakan alat kimia untuk memanipulasi dan mempelajari sistem biologis. CRISPR-Cas9 adalah contoh aplikasinya.
•	Ekologi Kimia (<i>Chemical Ecology</i>): Mempelajari peran senyawa kimia dalam interaksi antar organisme dan lingkungannya.
•	Geofisika dan Geokimia: Menggabungkan fisika dan kimia untuk memahami bumi, sangat relevan dalam konteks perubahan iklim.
•	Nanoteknologi: Manipulasi materi pada skala nano (1–100 nm) yang membutuhkan fisika kuantum, kimia material, dan pemahaman biologis tentang sel.

Menurut Bybee (2019), pendidikan sains abad ke-21 harus mampu mempersiapkan siswa untuk berkontribusi atau berkomunikasi dengan profesional di bidang-bidang hibrid ini. Guru IPA yang tidak memahami interkoneksi antardisiplin tidak akan mampu membuka jendela menuju dunia sains yang sesungguhnya bagi siswanya.

B. *Nature of Science* (NoS): Memahami Bagaimana Sains Bekerja

Nature of Science (NoS) adalah salah satu konsep paling penting sekaligus paling sering diabaikan dalam pendidikan IPA. NoS merujuk

pada karakteristik epistemologis dan epistemis dari pengetahuan ilmiah, apa itu sains, bagaimana sains bekerja, apa yang membuat pengetahuan ilmiah dapat dipercaya, dan apa batas-batas sains.

1. Mengapa NoS Penting untuk Guru IPA?

Penelitian selama tiga dekade terakhir secara konsisten menunjukkan bahwa sebagian besar guru IPA bahkan yang berpengalaman sekalipun memiliki pemahaman yang tidak memadai tentang NoS (Lederman, 2007; Abd-El-Khalick, 2020). Ini adalah masalah serius karena:

- a. Guru yang tidak memahami NoS cenderung mengajarkan sains sebagai kumpulan fakta yang tidak dapat dipertanyakan, bukan sebagai proses penyelidikan yang terus berkembang.
- b. Pemahaman NoS yang lemah membuat guru tidak mampu membimbing siswa untuk berpikir kritis tentang klaim-klaim saintifik.
- c. Guru yang memiliki pemahaman NoS yang baik cenderung menggunakan strategi pengajaran yang lebih inkuiri-based dan mendorong pertanyaan-pertanyaan yang lebih mendalam.
- d. Dalam era informasi yang penuh dengan klaim pseudosaintifik, guru IPA dengan pemahaman NoS yang kuat adalah benteng pertama pertahanan terhadap misinformasi.

2. Aspek-Aspek Utama NoS

Berdasarkan konsensus komunitas pendidikan sains internasional, terdapat sejumlah aspek NoS yang telah disepakati (*agreed-upon aspects of NOS*) sebagai yang paling fundamental dan paling relevan untuk konteks K-12 (Lederman *et al.*, 2002; Kampourakis, 2020):

ASPEK-ASPEK UTAMA *NATURE OF SCIENCE* (NoS)

1. **Pengetahuan Ilmiah Bersifat Tentatif (*Tentative Nature*):** Pengetahuan ilmiah terbuka untuk direvisi ketika ada bukti baru. Ini bukan kelemahan, melainkan kekuatan sains. Contoh: Model atom Dalton → Thomson → Rutherford → Bohr → mekanika kuantum.

2. Berbasis Empiris (<i>Empirical Basis</i>): Pengetahuan ilmiah didasarkan pada bukti dari dunia natural. Sains mengandalkan observasi dan eksperimen, bukan otoritas atau wahyu.
3. Peran Inferensi dan Kreativitas: Ilmuwan tidak hanya mengumpulkan data, tetapi mereka membuat inferensi melampaui data dan menggunakan kreativitas dan imajinasi untuk membangun teori.
4. Subjektivitas dalam Objektivitas: Meskipun berusaha objektif, ilmuwan adalah manusia yang memiliki nilai, kepercayaan, dan latar belakang yang memengaruhi pertanyaan yang mereka ajukan, desain eksperimen, dan interpretasi data.
5. Inkorporasi Teori dan Hukum: Teori dan hukum adalah dua jenis pengetahuan ilmiah yang berbeda fungsinya, teori menjelaskan, hukum mendeskripsikan. Teori TIDAK akan 'naik pangkat' menjadi hukum dengan bukti yang cukup.
6. Mitos Metode Ilmiah Tunggal: Tidak ada satu metode ilmiah yang universal. Ilmuwan menggunakan berbagai pendekatan dari eksperimen terkontrol, observasi naturalistik, hingga pemodelan komputasional dan kajian historis.
7. Sains Tertanam dalam Konteks Sosial-Budaya: Sains dilakukan oleh manusia dalam konteks sosial. Nilai-nilai budaya, ekonomi, dan politik memengaruhi arah dan prioritas penelitian ilmiah.
8. Fungsi Teori dalam Observasi: Observasi bukan proses pasif, teori mengarahkan apa yang kita cari dan bagaimana kita menginterpretasikan apa yang kita lihat. (<i>Theory-ladenness of observation</i>)

3. Mitos dan Miskonsepsi Tentang Sains

Salah satu aspek NoS yang paling penting untuk dipahami guru IPA adalah mitos-mitos tentang sains yang beredar luas di masyarakat dan bahkan dalam buku teks sekolah. Miskonsepsi ini perlu diidentifikasi dan diluruskan agar tidak diwariskan kepada generasi berikutnya:

Tabel 1.3 Miskonsepsi Umum tentang Sains dan Pemahaman yang Benar

Miskonsepsi Umum tentang Sains	Pemahaman yang Benar (Berdasarkan NoS)
Sains bekerja dengan metode ilmiah yang baku dan linear: tujuan → hipotesis → eksperimen → kesimpulan.	Sains menggunakan berbagai metode yang fleksibel dan non-linear. Banyak penemuan besar terjadi secara tidak terduga (<i>serendipity</i>). Einstein menemukan relativitas melalui Gedankenexperiment (eksperimen pikiran), bukan eksperimen laboratorium.
Teori ilmiah adalah sekadar teori belum terbukti dan belum pasti.	Dalam sains, teori adalah penjelasan yang telah didukung oleh banyak bukti dan telah diuji secara ekstensif. Teori Evolusi, Teori Sel, Teori Atom, dan Teori Relativitas adalah contoh pengetahuan ilmiah yang sangat kokoh.
Ilmuwan adalah sosok superrasional yang bebas dari nilai dan bias.	Ilmuwan adalah manusia biasa yang dipengaruhi oleh nilai pribadi, norma budaya, dan insentif institusional. <i>Peer review</i> ada justru karena kesadaran bahwa individu bisa salah.
Fakta sains adalah kebenaran mutlak yang tidak bisa berubah.	Semua pengetahuan ilmiah bersifat tentatif dapat direvisi dengan bukti baru. Ini adalah kekuatan, bukan kelemahan. Revisi Newtonian oleh Einstein adalah contoh terbaik.
Sains dapat menjawab semua pertanyaan.	Sains hanya dapat menjawab pertanyaan tentang dunia natural yang dapat diuji secara empiris. Pertanyaan tentang nilai, estetika, moral, dan makna berada di luar domain sains.

4. Pendekatan Eksplisit-Reflektif dalam Pengajaran NoS

Bagaimana guru dapat mengajarkan NoS secara efektif? Penelitian secara konsisten menunjukkan bahwa pendekatan eksplisit-reflektif (*explicit-reflective approach*) jauh lebih efektif daripada pendekatan implisit (*implicit approach*).

Pendekatan implisit berasumsi bahwa siswa akan secara otomatis mengembangkan pemahaman NoS yang tepat melalui aktivitas sains seperti eksperimen dan inkuiri. Namun, penelitian menunjukkan bahwa

ini sangat jarang terjadi. Siswa dapat melakukan eksperimen bertahun-tahun tanpa pernah merefleksikan apa artinya bahwa pengetahuan ilmiah bersifat tentatif atau bagaimana nilai-nilai memengaruhi sains.

Pendekatan eksplisit-reflektif, sebaliknya, secara sengaja memasukkan diskusi, refleksi, dan analisis tentang aspek-aspek NoS dalam konteks pembelajaran konten IPA. Misalnya, ketika mengajarkan tentang model atom, guru secara eksplisit mendiskusikan bagaimana model-model atom berkembang dari waktu ke waktu, apa yang memicu perubahan model, apa bukti yang mendukung setiap model, dan apa implikasinya tentang sifat tentatif pengetahuan ilmiah.

5. NoS dalam Konteks Indonesia dan Isu Lokal

Pemahaman NoS memiliki relevansi yang sangat khusus dalam konteks Indonesia. Di satu sisi, Indonesia memiliki tradisi sains lokal yang kaya pengetahuan tradisional tentang tanaman obat, pertanian, dan astronomi yang digunakan oleh berbagai suku dan budaya. Di sisi lain, Indonesia menghadapi tantangan besar dalam membedakan pengetahuan saintifik dari kepercayaan tradisional, pseudosains, dan hoaks.

Guru IPA di Indonesia perlu memiliki kepekaan budaya dalam mengajarkan NoS: menghargai pengetahuan lokal (*local wisdom*/kearifan lokal) sambil sekaligus mengembangkan kemampuan siswa untuk berpikir kritis dan berbasis bukti. Ini bukan tentang mempertentangkan sains dengan tradisi, melainkan tentang memahami domain dan cara kerja masing-masing.

Studi Kirana *et al.* (2021) pada guru-guru IPA SMP di Jawa Tengah menunjukkan bahwa sebagian besar guru memiliki skor NoS yang rendah terutama pada aspek *tentativeness of scientific knowledge* dan *subjective nature of science*. Ini menunjukkan kebutuhan mendesak untuk memperkuat pemahaman NoS dalam program pendidikan guru IPA di Indonesia.

6. Prinsip “More is Different” dan Sifat Emergent dalam Sistem Kompleks

Prinsip "More is Different," yang diperkenalkan oleh fisikawan Philip Anderson, menekankan bahwa sistem kompleks memiliki sifat emergent yang tidak dapat diprediksi hanya dari karakteristik bagian-bagiannya yang lebih sederhana. Dalam konteks sains, ini berarti bahwa ketika elemen-elemen dasar digabungkan, mereka dapat menghasilkan perilaku baru yang tidak terlihat pada elemen individu. Buku ini mengacu pada prinsip ini untuk menekankan pentingnya pendekatan interdisipliner dalam memahami fenomena alam.

Salah satu contoh nyata dari sifat emergent adalah perilaku air. Molekul air terdiri dari dua atom hidrogen dan satu atom oksigen. Secara individu, atom-atom ini tidak memiliki sifat cairan atau kemampuan untuk mendukung kehidupan. Namun, ketika bergabung menjadi molekul air, mereka menunjukkan sifat baru seperti tegangan permukaan, kapilaritas, dan kemampuan untuk melarutkan berbagai zat. Sifat-sifat ini tidak dapat diprediksi hanya dengan melihat atom-atom penyusunnya, sebagaimana dibahas dalam Bab I: Hakikat IPA dan Interkoneksi Ilmu.

Contoh lain adalah otak manusia. Neuron, sebagai unit dasar sistem saraf, berfungsi melalui sinyal listrik sederhana. Namun, ketika miliaran neuron ini terhubung dalam jaringan yang kompleks, mereka menghasilkan kesadaran, emosi, dan kemampuan berpikir abstrak. Fungsi-fungsi ini adalah sifat emergent yang tidak dapat dijelaskan hanya dengan mempelajari neuron secara individual. Buku ini menyoroti pentingnya memahami interaksi jaringan dalam Bab III: Kode Kehidupan.

Dalam ekosistem, sifat emergent juga terlihat jelas. Misalnya, interaksi antara berbagai spesies dalam ekosistem hutan hujan menghasilkan stabilitas ekosistem, siklus nutrisi, dan keanekaragaman hayati. Setiap spesies memainkan peran tertentu, tetapi keseluruhan ekosistem menunjukkan perilaku dan fungsi yang lebih kompleks daripada jumlah bagian-bagiannya, sebagaimana dijelaskan dalam Bab VII: Perubahan Iklim dalam Lensa Sains Multidisiplin.

Prinsip "More is Different" mengajarkan pentingnya pendekatan holistik dalam memahami sistem kompleks. Ini menantang reduksionisme tradisional yang sering mencoba memecah sistem

menjadi bagian-bagian terkecilnya untuk dipahami. Dalam pendidikan sains, pemahaman tentang sifat emergent mendorong siswa untuk melihat sains sebagai jaringan interkoneksi, di mana interaksi antara elemen-elemen dapat menghasilkan fenomena baru yang menakjubkan. Dengan demikian, pendekatan ini tidak hanya memperkaya pemahaman ilmiah tetapi juga mendorong inovasi dalam memecahkan masalah kompleks di dunia nyata.



BAB II

LITERASI SAINS DAN BERPIKIR KRITIS

GAMBARAN UMUM BAB
Bab ini membahas secara komprehensif tentang literasi sains (<i>scientific literacy</i>) sebagai kompetensi fundamental abad ke-21, baik bagi siswa maupun guru IPA. Pembahasan meliputi: (1) definisi dan evolusi konsep literasi sains; (2) kerangka PISA untuk literasi sains; (3) strategi konkret untuk membedakan sains dari pseudosains dan hoaks ilmiah; (4) berpikir kritis sebagai inti literasi sains; serta (5) studi kasus mendalam tentang isu-isu kesehatan dan lingkungan di media sosial.
Capaian Bab: Setelah mempelajari bab ini, pembaca mampu (a) mendefinisikan literasi sains dan menjelaskan dimensi-dimensinya; (b) mengidentifikasi ciri-ciri pseudosains dan hoaks ilmiah menggunakan kriteria yang valid; (c) menerapkan kerangka berpikir kritis dalam mengevaluasi klaim saintifik; (d) merancang pembelajaran yang mengembangkan literasi sains siswa; (e) menganalisis studi kasus isu kesehatan dan lingkungan di media sosial.

Pada 31 Desember 2019, sebuah *cluster pneumonia* misterius dilaporkan di Wuhan, Tiongkok. Kurang dari tiga bulan kemudian, WHO mendeklarasikan COVID-19 sebagai pandemi global, krisis kesehatan terbesar abad ke-21 yang merenggut jutaan nyawa dan mengguncang seluruh tatanan sosial, ekonomi, dan pendidikan dunia. Tetapi pandemi COVID-19 ternyata bukan hanya wabah virus, ia adalah wabah informasi yang para ilmuwan menyebutnya sebagai infodemic.

Selama pandemi, media sosial dibanjiri dengan klaim-klaim yang saling bertentangan: bahwa virus itu tidak nyata, bahwa vaksin mengandung chip mikro, bahwa minum air panas bisa membunuh virus,

bahwa 5G menyebabkan COVID-19. Di sisi lain, komunitas ilmiah bekerja dengan kecepatan yang belum pernah ada sebelumnya, vaksin mRNA dikembangkan dalam waktu kurang dari setahun berkat teknologi yang telah disiapkan selama lebih dari dua dekade. Efektivitas berbagai intervensi seperti masker, ventilasi, jarak sosial, dievaluasi dalam puluhan ribu studi yang dipublikasikan dalam waktu bersamaan.

Situasi ini mengekspos dengan sangat jelas betapa pentingnya literasi sains, yaitu kemampuan untuk memahami, mengevaluasi, dan menggunakan informasi ilmiah secara kritis. Masyarakat yang literasi sainsnya rendah rentan terhadap hoaks, antivaksin, dan keputusan kesehatan yang membahayakan. Guru IPA berada di garis terdepan dalam membangun literasi sains generasi berikutnya.

A. Strategi Membedakan Sains, Pseudosains, dan Hoaks Ilmiah

Kemampuan membedakan sains dari pseudosains dan hoaks ilmiah adalah kompetensi yang paling praktis dan paling mendesak bagi masyarakat modern dan bagi guru IPA yang ingin membekali siswanya untuk hidup di era informasi.

1. Mendefinisikan Sains, Pseudosains, dan Hoaks

Sebelum kita bisa mengajarkan siswa untuk membedakan ketiganya, kita perlu memahami masing-masing istilah:

DEFINISI OPERASIONAL: SAINS, PSEUDOSAINS, DAN HOAKS ILMIAH

Sains (*Science*): Sistem pengetahuan tentang dunia natural yang dibangun melalui observasi empiris, eksperimentasi, dan penalaran logis. Ciri khas: dapat difalsifikasi (bisa dibuktikan salah), dapat direplikasi, mengalami *peer review*, bersifat tentatif, bergantung pada bukti, dan diakui oleh komunitas ahli yang relevan.

Pseudosains (*Pseudoscience*): Klaim, keyakinan, atau praktik yang diklaim bersifat ilmiah tetapi tidak memenuhi kriteria-kriteria sains yang valid. Ciri khas: mengklaim sebagai 'sains' tanpa melalui proses validasi ilmiah, tidak dapat difalsifikasi, mengandalkan anekdot daripada data sistematis, menolak revisi meskipun ada bukti

kontradiktif. Contoh: astrologi, homeopati, terapi magnet, detoksifikasi 'ilmiah'.

Hoaks Ilmiah (*Science Hoax/Science Misinformation*): Informasi yang salah tentang sains, baik yang disengaja (disinformasi) maupun tidak disengaja (misinformasi). Hoaks ilmiah berbeda dari pseudosains: pseudosains adalah sistem kepercayaan yang stabil, sedangkan hoaks ilmiah adalah informasi spesifik yang salah. Contoh: Vaksin menyebabkan autisme (berdasarkan studi Wakefield yang telah ditarik dan penelitiannya dicabut lisensinya), klaim bahwa 5G menyebabkan COVID-19.

Sains yang Disengketakan (*Contested Science*): Ini adalah kategori yang sering disamakan dengan pseudosains, tetapi sebenarnya berbeda. Sains yang disengketakan adalah area di mana ada ketidakpastian ilmiah yang nyata dan di mana para ilmuwan yang kompeten masih belum sepakat. Contoh: debat tentang takaran optimal vitamin D, beberapa aspek dari mekanisme penuaan, atau interaksi antara gaya hidup dan risiko kanker tertentu.

2. Ciri-Ciri Pseudosains: Checklist untuk Guru IPA

Carl Sagan dalam bukunya *The Demon-Haunted World* (1996) mengembangkan apa yang disebutnya sebagai '*baloney detection kit*' seperangkat alat untuk mendeteksi klaim-klaim yang lemah atau palsu. Diperbarui untuk konteks kontemporer, berikut adalah checklist yang dapat digunakan guru IPA.

Gambar 2.1 *Checklist* Identifikasi Pseudosains

CIRI-CIRI PSEUDOSAINS — Semakin banyak yang cocok, semakin waspada	
✗	Tidak dapat difalsifikasi: tidak ada bukti yang bisa membuktikan klaim tersebut salah
✗	Tidak melewati <i>peer review</i> dalam jurnal ilmiah terpercaya
✗	Mengandalkan anekdot dan testimonial, bukan data sistematis
✗	Mengklaim 'dilarang/disembunyikan' oleh institusi besar
✗	Menggunakan bahasa <i>ilmiah-sounding</i> tetapi tidak bermakna (<i>quantum healing, vibrational energy, dll.</i>)
✗	Menolak direvisi meskipun ada bukti kontradiktif
✗	Bergantung pada kewenangan seseorang, bukan pada kualitas bukti (guru besar belum tentu benar)
✗	Hasil tidak dapat direplikasi oleh peneliti independen
✗	Tidak ada mekanisme yang masuk akal (<i>plausible mechanism</i>) yang menjelaskan bagaimana klaim tersebut bisa benar

3. Strategi Praktis Membedakan Sains dari Pseudosains

Berikut adalah strategi langkah-demi-langkah yang dapat digunakan guru IPA untuk mengajarkan siswa cara mengevaluasi klaim ilmiah:

KERANGKA EVALUASI KLAIM ILMIAH: 5S (<i>Five Source Questions</i>)
Source (Sumber): Dari mana klaim ini berasal? Apakah sumbernya adalah ahli yang teridentifikasi dalam bidang yang relevan? Apakah sumber ini transparan tentang metodenya, pendanaannya, dan konflik kepentingannya? Apakah klaim ini berasal dari jurnal <i>peer-reviewed</i>, atau dari blog, media sosial, atau situs non-akademik?
Study (Studi): Apakah ada studi yang mendukung klaim ini? Bagaimana desain studinya? Apakah menggunakan kelompok kontrol? Berapa besar sampelnya? Apakah hasil telah direplikasi oleh peneliti independen? Apakah ada meta-analisis atau <i>systematic review</i> yang mendukung klaim ini?
Scientific Consensus (Konsensus Ilmiah): Apakah komunitas ilmiah secara luas setuju dengan klaim ini? Jika klaim ini bertentangan dengan konsensus ilmiah yang ada, apakah ada bukti yang sangat kuat untuk mendukungnya? (Ingat: <i>extraordinary claims require extraordinary evidence</i>).

Statistics (Statistik): Apakah data statistik digunakan dengan benar? Apakah ada perbedaan antara korelasi dan kausalitas? Apakah ukuran efek (*effect size*) dilaporkan, bukan hanya signifikansi statistik? Apakah confidence interval dilaporkan?

Scrutiny (Pengawasan): Apakah klaim ini telah diuji secara kritis oleh para ahli yang skeptis? Apakah ada upaya untuk memfalsifikasi klaim ini, dan apa hasilnya? Apakah klaim ini telah bertahan dari kritik dan pengujian independen?

4. *Lateral Reading*: Strategi Verifikasi Cepat

Salah satu strategi verifikasi informasi yang paling efektif yang ditemukan oleh penelitian pendidikan digital adalah *lateral reading*, membaca secara lateral, bukan vertikal. Alih-alih membaca satu sumber secara mendalam (vertikal), *lateral reading* berarti membuka tab-tab baru untuk mencari informasi tentang sumber tersebut dari perspektif eksternal.

Studi yang dilakukan oleh *Stanford History Education Group* (2019) menunjukkan bahwa *fact-checker profesional* dan sejarawan menggunakan *lateral reading* secara intuitif, sementara mahasiswa (bahkan dari universitas top) cenderung membaca secara vertikal dan lebih mudah tertipu oleh situs web yang terlihat kredibel. Mengajarkan *lateral reading* kepada siswa IPA adalah keterampilan hidup yang nilainya melampaui konteks kelas sains.

B. Studi Kasus: Isu Kesehatan dan Lingkungan di Media Sosial

Bagian ini menghadirkan analisis mendalam terhadap beberapa kasus nyata penyebaran informasi sains yang salah di media sosial Indonesia dan global. Setiap studi kasus dianalisis menggunakan kerangka yang telah dikembangkan sebelumnya, dan disertai dengan strategi pedagogis untuk menggunakannya dalam pembelajaran IPA.

1. Studi Kasus 1: Antivaksin dan Misinformasi Kesehatan

Latar Belakang Kasus: Antivaksin (*vaccine hesitancy* dan *anti-vaccination movement*) adalah salah satu bentuk misinformasi kesehatan yang paling berbahaya dan paling banyak diteliti. WHO menyebutnya

sebagai salah satu dari sepuluh ancaman utama kesehatan global. Di Indonesia, gerakan antivaksin menguat terutama di media sosial sejak pandemi COVID-19, dengan berbagai klaim yang beredar luas tentang bahaya vaksin.

Klaim-Klaim Yang Beredar Di Media Sosial Indonesia:

- a. Vaksin mRNA mengubah DNA manusia. Klaim ini menunjukkan ketidakpahaman dasar tentang biologi molekuler. mRNA adalah instruksi sementara yang tidak pernah masuk ke nukleus dan tidak memiliki mekanisme untuk mengubah DNA.
- b. Vaksin mengandung chip mikro 5G. Secara fisik mustahil. Ukuran chip terkecil sekalipun jauh lebih besar dari jarum suntik terkecil. Dan sinyal 5G tidak dapat dikirimkan melalui chip dalam tubuh manusia.
- c. Vaksin menyebabkan autisme. Klaim ini berasal dari studi Wakefield (1998) yang telah ditarik dari jurnal *The Lancet*, penelitiannya dicabut lisensi medisnya karena penipuan ilmiah, dan tidak ada studi dari ratusan penelitian replikasi yang menemukan hubungan ini.
- d. Vaksin lebih berbahaya daripada penyakit COVID-19. Bertentangan dengan data epidemiologis dari ratusan juta orang yang divaksinasi di seluruh dunia.

Tabel 2.1 Analisis Kasus Antivaksin Menggunakan Kerangka 5S

Analisis Menggunakan Kerangka 5S	
Analisis Menggunakan Kerangka 5S	Temuan
Source (Sumber)	Klaim-klaim antivaksin umumnya berasal dari: akun media sosial anonim atau tidak terverifikasi, situs web antivaksin yang tidak <i>peer-reviewed</i> , tokoh-tokoh non-ahli yang memiliki agenda tertentu, atau dari studi-studi yang telah ditarik (<i>retracted papers</i>).
Study (Studi)	Tidak ada studi <i>peer-reviewed</i> yang kredibel yang mendukung klaim-klaim antivaksin inti. Studi Wakefield tentang vaksin-autisme (basis klaim utama antivaksin) adalah studi fraudulent

Analisis Menggunakan Kerangka 5S	Temuan
	yang melibatkan hanya 12 anak tanpa kelompok kontrol.
Scientific Consensus (Konsensus)	Konsensus ilmiah global sangat kuat: vaksin adalah salah satu intervensi medis yang paling aman dan paling efektif. CDC, WHO, EMA, dan BPOM Indonesia semuanya mendukung keamanan vaksin berbasis bukti yang sangat kuat.
Statistics (Statistik)	Data vaksinasi COVID-19 dari lebih dari 13 miliar dosis yang diberikan secara global menunjukkan rasio manfaat-risiko yang sangat menguntungkan vaksin. Efek samping serius jarang (risiko miokarditis vaksin mRNA: ~1-4 per 100.000; risiko miokarditis dari COVID-19: jauh lebih tinggi).
Scrutiny (Pengawasan)	Klaim antivaksin telah diuji secara ekstensif dan ditolak oleh komunitas ilmiah. Sistem VAERS (yang sering disalahgunakan untuk mendukung klaim antivaksin) adalah sistem pelaporan pasif yang tidak menunjukkan kausalitas—hanya korelasi temporal.

Implikasi Pedagogis: Kasus antivaksin adalah material pembelajaran yang sangat kaya untuk mengembangkan literasi sains siswa. Guru IPA dapat menggunakannya untuk:

- Mengajarkan biologi molekuler dalam konteks yang relevan (bagaimana mRNA bekerja, dogma sentral biologi)
- Mengajarkan cara mengevaluasi sumber informasi ilmiah
- Mendiskusikan perbedaan antara risiko absolut dan risiko relatif
- Membahas bagaimana sains merespons kesalahan: kasus penarikan studi Wakefield

- e. Mengembangkan empati dan kemampuan berkomunikasi, bagaimana kita berdialog dengan orang yang memiliki kekhawatiran tentang vaksin

2. Studi Kasus 2: Perubahan Iklim dan Denialisme

Latar Belakang Kasus: Perubahan iklim (*climate change*) adalah salah satu isu sains yang paling diperdebatkan secara publik, meskipun konsensus ilmiah tentangnya sangat jelas. Lebih dari 97% ilmuwan iklim yang aktif meneliti setuju bahwa pemanasan global terjadi dan disebabkan terutama oleh aktivitas manusia. Namun, jajak pendapat publik menunjukkan bahwa sebagian besar masyarakat tidak menyadari betapa kuatnya konsensus ini.

Situasi di mana terdapat konsensus ilmiah yang kuat tetapi persepsi publik yang berbeda disebut sebagai *consensus gap* atau *scientific consensus-public gap*. Penelitian menunjukkan bahwa salah satu penyebab utama gap ini adalah strategi dezinformasi yang disengaja oleh kelompok-kelompok tertentu, mirip dengan strategi yang sebelumnya digunakan oleh industri tembakau untuk menabur keraguan tentang hubungan merokok-kanker.

TEKNIK-TEKNIK DENIALISME IKLIM YANG PERLU DIKENALI SISWA

1. **Pemalsuan Konsensus (*Fake Experts*):** Menghadirkan segelintir 'ilmuwan' yang menolak konsensus tanpa mengungkapkan bahwa mereka adalah minoritas yang sangat kecil, sering kali tidak memiliki keahlian dalam klimatologi, atau memiliki konflik kepentingan.
2. ***Cherry-Picking Data*:** Memilih data yang mendukung argumen mereka sambil mengabaikan data yang jauh lebih banyak yang bertentangan. Contoh: 'Suhu lebih dingin dari biasa di kota X tahun ini, berarti pemanasan global tidak nyata.' (Mengacaukan cuaca lokal dengan iklim global.)
3. **Logika yang Tidak Masuk Akal (*Illogical Reasoning*):** Menyimpulkan sesuatu yang tidak didukung oleh premisnya. Contoh: 'Iklim sudah berubah alami sepanjang sejarah, jadi perubahan iklim saat ini juga alami.'

- | |
|--|
| 4. Menabur Keraguan Tidak Layak (<i>Impossible Expectations</i>): Menuntut tingkat kepastian yang tidak realistis. 'Sains belum 100% pasti tentang perubahan iklim.' (Tidak ada yang 100% pasti dalam sains, ini adalah standar yang tidak pernah dituntut dari ilmu lain.) |
| 5. <i>Argumen Slippery Slope</i>: 'Jika kita menerima kebijakan iklim, itu artinya kita menyerahkan kedaulatan ekonomi kepada elit global.' (Melompat dari fakta sains ke konsekuensi politik yang ekstrem.) |

Implikasi Pedagogis: Kasus perubahan iklim memberikan kesempatan yang sangat baik untuk mengintegrasikan fisika (radiasi dan efek rumah kaca), kimia (siklus karbon, absorpsi IR oleh CO₂), dan biologi (dampak ekologis) sekaligus mengajarkan literasi informasi dan berpikir kritis tentang konsensus ilmiah.

Studi yang dilakukan oleh van der Linden *et al.* (2017) menemukan bahwa inokulasi terhadap misinformasi iklim yaitu memperingatkan siswa tentang teknik-teknik manipulasi yang digunakan oleh denialists sebelum mereka terpapar misinformasi tersebut, secara signifikan lebih efektif daripada sekadar memberikan informasi yang benar. Ini '*prebunking*' sebagai lawan dari '*debunking*'.

3. Studi Kasus 3: Obat Herbal dan Klaim Kesehatan di Media Sosial Indonesia

Latar Belakang Kasus: Indonesia memiliki kekayaan tanaman obat yang luar biasa, lebih dari 30.000 spesies tanaman diketahui memiliki potensi obat. Namun, media sosial sering kali menjadi arena penyebaran klaim-klaim yang berlebihan, tidak terbukti, atau bahkan berbahaya tentang penggunaan tanaman obat. Selama pandemi COVID-19, misalnya, beredar luas klaim bahwa berbagai ramuan herbal dari eucalyptus hingga jintan hitam hingga jahe dapat mencegah atau menyembuhkan COVID-19.

Kasus ini sangat nuanced karena membutuhkan kemampuan untuk: (a) menghargai pengetahuan tradisional yang memiliki dasar empiris; (b) membedakan antara potensi yang menjanjikan dan klaim yang sudah terbukti; (c) memahami perbedaan antara anekdot dan uji klinis terkontrol; (d) mengevaluasi kualitas bukti ilmiah yang tersedia.

Tabel 2.2 Kategorisasi Klaim Obat Herbal Berdasarkan Kualitas Bukti

Kategori Klaim	Contoh	Status Bukti Ilmiah
Klaim yang terbukti dan valid	Kunyit (<i>curcumin</i>) memiliki aktivitas anti-inflamasi yang terdokumentasi dalam studi <i>in vitro</i> dan beberapa studi klinis terbatas.	Menjanjikan tetapi belum cukup kuat untuk klaim klinis yang kuat. Perlu lebih banyak uji klinis terkontrol.
Klaim yang berlebihan	“Minum jamu jahe setiap hari menyembuhkan diabetes.” Jahe memang memiliki beberapa aktivitas hipoglikemik ringan, tetapi menyebut 'menyembuhkan diabetes' adalah klaim yang berlebihan dan berbahaya.	Beberapa studi menunjukkan efek moderat pada kadar gula darah, tetapi tidak sebagai pengganti pengobatan diabetes.
Klaim yang tidak berdasar	“Daun sirsak membunuh sel kanker 10.000 kali lebih kuat dari kemoterapi.” Klaim viral ini tidak memiliki basis dalam uji klinis pada manusia.	Beberapa studi <i>in vitro</i> (sel dalam laboratorium), tetapi hasil <i>in vitro</i> tidak secara otomatis berlaku pada manusia. Klaim '10.000 kali lebih kuat' tidak berdasar.
Klaim yang berbahaya	“Minum air perasan bawang putih dapat menyembuhkan COVID-19, tidak perlu vaksin.” Klaim yang tidak terbukti dan menghalangi upaya perlindungan yang efektif.	Tidak ada bukti bahwa bawang putih dapat mencegah atau menyembuhkan COVID-19. WHO secara eksplisit membantah klaim ini.

Pelajaran Penting: Kasus ini mengajarkan beberapa pelajaran penting tentang evaluasi klaim ilmiah:

- Perbedaan antara studi *in vitro*, studi pada hewan, dan uji klinis pada manusia, ketiganya memberikan tingkat bukti yang berbeda.
- Pentingnya dosis, mekanisme, dan bioavailabilitas dalam klaim farmakologi.
- Perbedaan antara senyawa aktif dalam konsentrasi laboratorium versus dalam makanan/minuman sehari-hari.
- Bahaya klaim yang menghalangi orang untuk mencari pengobatan medis yang terbukti efektif.
- Pentingnya menghargai pengetahuan tradisional sambil tetap menuntut standar bukti ilmiah yang sama.

4. Pedoman Praktis: Menggunakan Studi Kasus dalam Pembelajaran

Studi kasus adalah salah satu metode pedagogis yang paling efektif untuk mengembangkan literasi sains (Herreid, 2022). Berikut adalah panduan praktis untuk menggunakan studi kasus media sosial dalam pembelajaran IPA:

LANGKAH-LANGKAH PENGGUNAAN STUDI KASUS MEDIA SOSIAL DALAM PEMBELAJARAN IPA
Langkah 1 — Pilih Kasus yang Relevan dan Kontekstual: Gunakan kasus yang benar-benar beredar di media sosial yang digunakan siswa. Kasus yang pernah viral lebih menarik perhatian daripada contoh hipotetis. Pastikan kasus yang dipilih sesuai dengan jenjang usia dan tidak menimbulkan distres psikologis.
Langkah 2 — Sajikan Kasus Tanpa Memberikan Jawaban Dulu: Berikan kepada siswa klaim atau konten media sosial yang aktual. Minta mereka untuk menilai terlebih dahulu: Apa yang kalian pikirkan tentang klaim ini? Apakah kalian percaya? Mengapa?
Langkah 3 — Inkuiri Berpandu (<i>Guided Inquiry</i>): Pandu siswa untuk mencari informasi menggunakan sumber-sumber ilmiah terpercaya. Ajarkan lateral reading. Bantu mereka mengidentifikasi bukti yang relevan.

Langkah 4 — Diskusi Dan *Argumentation*: Siswa mempresentasikan temuan mereka dan mempertahankan posisi berdasarkan bukti. Guru memfasilitasi diskusi kritis. Dorong siswa untuk mengubah posisi jika bukti menunjukkan hal tersebut.

Langkah 5 — Koneksi Ke Konten Ipa: Hubungkan studi kasus dengan konsep-konsep sains yang relevan dalam kurikulum. Kasus antivaksin → biologi sel, imunologi, genetika. Kasus iklim → fisika radiasi, kimia atmosfer, biologi ekosistem.

Langkah 6 — Refleksi Dan Transfer: Minta siswa merefleksikan proses berpikir mereka: Apa yang mengubah pikiran Anda? Apa yang membuat Anda tetap skeptis? Bagaimana Anda akan mengaplikasikan ini di kehidupan sehari-hari?

5. Membedakan Sains, Pseudosains, dan Hoaks: Studi Kasus dan Analisi

Dalam era informasi yang melimpah, kemampuan untuk membedakan antara sains, pseudosains, dan hoaks menjadi sangat penting. Bab II dari buku ini menekankan literasi sains dan berpikir kritis untuk memahami dan mengevaluasi informasi ilmiah. Salah satu contoh kasus yang dibahas adalah klaim bahwa vaksin menyebabkan autisme pada anak-anak. Klaim ini sering muncul secara online dan telah menjadi perdebatan publik yang signifikan.

Menggunakan kerangka evaluasi 5S, kita dapat menganalisis klaim ini sebagai berikut:

- a. **Source (Sumber)**, klaim ini sering berasal dari blog pribadi atau media sosial daripada jurnal ilmiah yang diakui, menunjukkan kurangnya kredibilitas.
- b. **Study (Studi)**, banyak klaim tentang vaksin dan autisme didasarkan pada penelitian yang telah ditarik kembali atau tidak memenuhi standar ilmiah yang ketat, menunjukkan desain studi yang tidak valid.
- c. **Scientific Consensus**, konsensus ilmiah, berdasarkan banyak penelitian yang direplikasi, menunjukkan bahwa tidak ada hubungan kausal antara vaksin dan autisme.
- d. **Statistics**, klaim ini sering salah menginterpretasikan data statistik, mengabaikan faktor lain yang relevan, dan tidak menggunakan data dengan benar.
- e. **Scrutiny (Pengawasan)**, klaim ini telah banyak dibantah oleh para ahli dan organisasi kesehatan seperti WHO dan CDC, menunjukkan bahwa klaim tersebut tidak tahan terhadap pengawasan kritis.

Dengan menerapkan kerangka 5S, pembaca dapat lebih mudah membedakan antara informasi yang valid dan klaim yang tidak berdasar, meningkatkan literasi sains dan kemampuan berpikir kritis mereka.

Produk seperti terapi magnet dan air alkalin sering dipromosikan tanpa bukti ilmiah yang valid. Klaimnya berasal dari sumber tidak kredibel, dengan studi lemah dan tanpa dukungan konsensus ilmiah. Manfaatnya sering kali tidak didukung data statistik yang valid dan jarang diuji secara kritis, sering dibantah oleh pakar kesehatan.



BAB III

KODE KEHIDUPAN: DARI DNA HINGGA REKAYASA GENETIKA

Sejak penemuan struktur *double helix* oleh James Watson dan Francis Crick pada tahun 1953, pemahaman manusia mengenai materi genetik telah berkembang dari sekadar deskripsi kimiawi molekul menjadi sebuah disiplin rekayasa yang mampu menulis ulang kode kehidupan itu sendiri. Asam *deoksiribonukleat* atau yang dikenal dengan istilah *deoxyribonucleic acid* (selanjutnya disebut DNA) tidak lagi dipandang sebagai *blueprint* statis, melainkan sebagai sistem informasi dinamis yang ekspresinya diatur oleh jaringan regulasi berlapis, mulai dari faktor transkripsi hingga modifikasi epigenetik yang dapat diwariskan tanpa mengubah *sekuens nukleotida* (Boulas & Greer, 2022). Bab ini disusun untuk membawa pembaca menyusuri perjalanan konseptual tersebut, dari mekanisme klasik pewarisan sifat hingga implikasi etis dari kemampuan manusia mengedit genom secara presisi.

Pembahasan dalam bab ini dibagi menjadi tiga sub-bab utama yang saling berkaitan secara logis. Sub-bab pertama mengulas mekanisme molekuler pewarisan sifat dan regulasi ekspresi gen, termasuk peran epigenetika sebagai jembatan antara genotipe dan fenotipe yang responsif terhadap lingkungan. Sub-bab kedua membahas teknologi *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats* (CRISPR) beserta kerangka etikanya, termasuk perdebatan mengenai *germline editing* dan keadilan akses teknologi. Sub-bab ketiga mengulas Organisme Hasil Modifikasi Genetik atau *Genetically Modified Organism* (GMO), mencakup aspek keamanan pangan, regulasi internasional, serta proyeksi masa depan bioteknologi pertanian dalam konteks ketahanan pangan global.

Lebih jauh, kapita selekta ini menempatkan ketiga tema tersebut dalam konteks Indonesia secara spesifik, mengingat negara ini merupakan salah satu pusat keanekaragaman hayati tropis terbesar di dunia sekaligus pasar konsumen pangan terbesar di Asia Tenggara, sehingga keputusan kebijakan mengenai bioteknologi genetika di

Indonesia memiliki implikasi yang jauh melampaui batas domestik. Dengan menggabungkan perspektif teori molekuler global dengan studi kasus regulasi lokal, bab ini diharapkan dapat membekali pembaca dengan kerangka berpikir yang tidak hanya bersifat teknis-ilmiah, tetapi juga peka terhadap dimensi sosial, ekonomi, dan kebijakan publik yang menyertai setiap kemajuan dalam memahami dan merekayasa kode kehidupan.

A. Mekanisme Pewarisan Sifat dan Ekspresi Gen

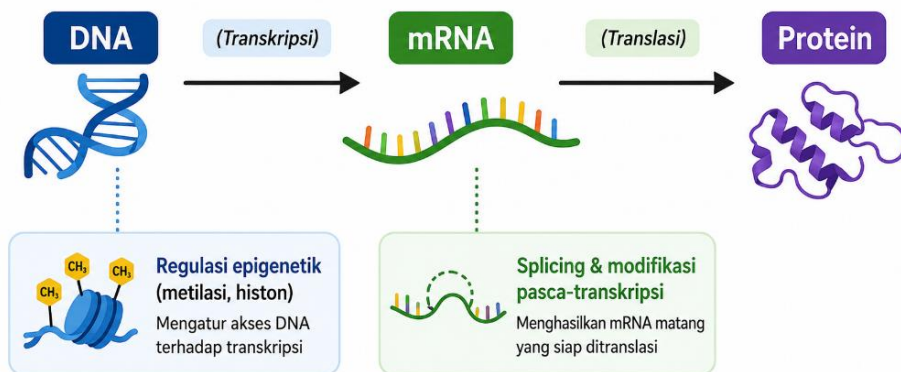
1. Dasar Molekuler Pewarisan Sifat: Dari Hukum Mendel ke Kromatin

Prinsip dasar pewarisan sifat yang dirumuskan oleh Gregor Mendel pada abad ke-19 tetap menjadi fondasi konseptual genetika modern, meskipun penjelasan molekulernya baru terkuak satu abad kemudian. Hukum segregasi dan hukum berpasangan bebas menjelaskan pola pewarisan pada tingkat fenotipe, tetapi tidak menjelaskan mekanisme fisik di balik fenomena tersebut. Penjelasan molekuler baru tersedia setelah ditemukannya bahwa gen merupakan segmen DNA yang terletak pada kromosom, dan bahwa pemisahan kromosom homolog selama meiosis secara fisik mendasari hukum segregasi Mendel. Dengan demikian, sifat yang tampak pada keturunan merupakan hasil interaksi antara alel-alel yang diwariskan dari kedua induk melalui proses rekombinasi genetik saat pembentukan gamet.

Pada tingkat molekuler, informasi genetik tersimpan dalam urutan basa nitrogen seperti adenin, timin, guanin, dan sitosin yang membentuk kode genetik triplet (*codon*) penentu urutan asam amino dalam protein. Namun, ekspresi informasi tersebut tidak bersifat statis; ia ditentukan oleh struktur kromatin, yakni kompleks DNA dengan protein histon yang derajat kepadatannya (*euchromatin* versus *heterochromatin*) menentukan aksesibilitas gen terhadap mesin transkripsi. Riset terbaru menegaskan bahwa mekanisme remodeling kromatin termasuk pergeseran nukleosom (*nucleosome sliding*), pelepasan histon, serta pemadatan dan dekomposisi kromatin bekerja secara terkoordinasi dengan metilasi DNA dan modifikasi histon untuk mengatur ekspresi gen, diferensiasi sel, dan identitas seluler (CAS, 2026). Implikasinya, dua individu dengan sekuens DNA identik pada

suatu lokus tetap dapat menunjukkan fenotipe berbeda apabila status kromatinnya berbeda.

Gambar 3.1. Alur Sentral Ekspresi Gen (Dogma Sentral Biologi Molekuler) Beserta Titik-Titik Regulasi Tambahan Pada Tingkat Epigenetik dan Pasca-Transkripsi



2. Regulasi Ekspresi Gen: Transkripsi, Pasca-transkripsi, dan Epigenetika

Regulasi ekspresi gen berlangsung pada berbagai tahapan, mulai dari inisiasi transkripsi hingga modifikasi protein pasca-translasi. Pada tahap transkripsi, faktor transkripsi berikatan dengan elemen regulator seperti promotor dan *enhancer* untuk mengaktifkan atau merepresi RNA *polimerase*. Penelitian kontemporer menyoroti pentingnya interaksi antara faktor transkripsi dengan kondensat fase (*phase separation*) dan perlekungan *enhancer-promoter* (*enhancer-promoter looping*) dalam arsitektur nukleus, yang membentuk domain regulasi yang sangat terorganisasi dan secara langsung memengaruhi efisiensi transkripsi gen target (Ochiai et al., 2023). Temuan ini menggeser pemahaman gen dari entitas linear menjadi entitas yang keberfungsianannya sangat bergantung pada organisasi tiga dimensi genom dalam ruang inti sel.

Selain regulasi pada tingkat DNA, regulasi pasca-transkripsi melalui RNA *non-coding* turut memainkan peran krusial. Modifikasi kimiawi pada RNA, seperti N6-metiladenosin (m6A), memengaruhi stabilitas, lokalisasi, dan translasi RNA substrat, serta berkontribusi terhadap arsitektur kromatin dan stabilitas genom, dengan peran penting dalam diferensiasi sel punca, neurogenesis, dan respons imun (Boulias & Greer, 2022). Di samping itu, mikroRNA (miRNA), RNA *non-coding*

panjang (*long non-coding RNA*), dan RNA sirkular (*circular RNA*) berperan dalam regulasi pasca-transkripsi gen-gen kunci yang terlibat dalam resistensi insulin, metabolisme lipid, dan jalur inflamasi (Amine et al., 2025). Mekanisme berlapis ini menunjukkan bahwa fenotipe akhir suatu organisme merupakan hasil integrasi sinyal regulasi yang jauh lebih kompleks dibandingkan model gen tunggal-sifat tunggal yang diajarkan pada tingkat dasar.

Pola Pewarisan Non-Mendel: Pewarisan Sitoplasmik dan Poligenik

Tidak semua pola pewarisan sifat dapat dijelaskan secara memadai melalui hukum Mendel klasik yang berasumsi pada pewarisan inti sel secara berpasangan dari kedua induk. Pewarisan sitoplasmik (*cytoplasmic inheritance*), misalnya, melibatkan materi genetik yang terdapat pada organel seperti mitokondria dan kloroplas, yang umumnya diwariskan hanya dari induk betina melalui sitoplasma sel telur, sehingga menghasilkan pola pewarisan maternal yang berbeda secara fundamental dari pewarisan Mendelian. Fenomena ini memiliki relevansi klinis penting pada manusia, karena mutasi pada DNA mitokondria dapat menyebabkan berbagai penyakit metabolik dan neuromuskular yang diwariskan secara eksklusif melalui jalur maternal, sehingga pola pewarisan penyakit tersebut pada pohon keluarga akan tampak berbeda dari pola pewarisan autosomal maupun terkait-X yang lazim dipelajari dalam genetika klasik.

Selain pewarisan sitoplasmik, banyak sifat fenotipe kompleks pada manusia seperti tinggi badan, warna kulit, dan kerentanan terhadap penyakit metabolik ditentukan oleh interaksi banyak gen secara simultan, suatu fenomena yang disebut pewarisan poligenik (*polygenic inheritance*). Pada pewarisan poligenik, setiap gen yang terlibat umumnya memberikan kontribusi kecil terhadap fenotipe akhir, dan efek kumulatif dari banyak gen tersebut menghasilkan distribusi fenotipe yang kontinu pada populasi, alih-alih kategori diskret yang dihasilkan oleh pewarisan gen tunggal sederhana. Variasi genetik yang mendasari sifat-sifat poligenik melibatkan perubahan urutan nukleotida DNA yang diwariskan melalui mitosis dan meiosis pada banyak lokus genom secara bersamaan. Setiap varian umumnya memberikan kontribusi yang kecil terhadap fenotipe, sehingga ekspresi suatu sifat merupakan hasil efek kumulatif dari banyak gen yang sering kali juga dipengaruhi oleh faktor

lingkungan. Oleh karena itu, pendekatan berbasis *genome-wide association studies* (GWAS) menjadi metode yang lebih sesuai dibandingkan analisis Mendelian klasik untuk mengidentifikasi lokus-lokus genetik yang berkontribusi terhadap arsitektur genetik sifat-sifat kompleks dan poligenik (Visscher et al., 2017).

Tabel 3.1 Perbandingan Pola-Pola Pewarisan Sifat Pada Makhluk Hidup Beyond Hukum Mendel Klasik

Pola Pewarisan	Sumber Materi Genetik	Karakteristik Khas
Mendelian (gen tunggal)	Inti sel, kedua induk	Rasio fenotipe diskret (mis. 3:1, 1:2:1)
Sitoplasmik (mitokondria)	Sitoplasma, umumnya induk betina	Pewarisan maternal eksklusif
Poligenik	Inti sel, banyak lokus, kedua induk	Distribusi fenotipe kontinu
Epigenetik	Modifikasi kromatin tanpa ubah sekuens	Reversibel, dapat dipengaruhi lingkungan

3. Epigenetika: Jembatan Antara Genotipe, Lingkungan, dan Fenotipe

Epigenetika didefinisikan sebagai sekumpulan modifikasi kimiawi yang bersifat reversibel dan dapat diwariskan, yang mengubah ekspresi gen tanpa mengubah urutan nukleotida DNA itu sendiri (Cavalli & Heard, 2019). Empat mekanisme epigenetik utama yang telah diidentifikasi meliputi metilasi DNA, modifikasi histon, regulasi oleh RNA non-coding, dan remodeling kromatin (Kobow & Khan, 2024). Metilasi DNA, sebagai mekanisme epigenetik yang pertama kali ditemukan, umumnya terjadi pada residu sitosin di wilayah promotor; ketika wilayah ini termetilasi, aksesibilitas faktor transkripsi terhadap promotor gen akan terhambat sehingga transkripsi gen tersebut tertekan (Moore & Fan, 2013). Mekanisme ini menjelaskan bagaimana faktor lingkungan, seperti pola makan, paparan zat kimia, atau tingkat stres, dapat memodifikasi ekspresi gen tanpa menyebabkan mutasi pada sekuens DNA.

Fenomena epigenetik tidak hanya berperan pada tingkat individu, tetapi juga dapat diwariskan antargenerasi melalui mekanisme yang dikenal sebagai pewarisan epigenetik transgenerasional. Pada tumbuhan, bukti menunjukkan bahwa elemen transposabel (*transposable elements*) berperan penting dalam menghubungkan genetika dan epigenetika karena aktivitasnya tidak hanya menyebabkan perubahan pada urutan DNA, tetapi juga memengaruhi pola metilasi DNA, struktur kromatin, dan regulasi ekspresi gen. Variasi epigenetik yang berkaitan dengan elemen transposabel dapat dipertahankan selama beberapa generasi dan berkontribusi terhadap adaptasi tanaman terhadap perubahan lingkungan (Quadrana & Colot, 2016). Di bidang biomedis, pemahaman mengenai mekanisme epigenetik telah mendorong berkembangnya terapi berbasis epigenetik, khususnya untuk pengobatan kanker. Sejumlah obat epigenetik telah memperoleh persetujuan dari Food and Drug Administration (FDA), termasuk penghambat DNA methyltransferase seperti azacitidine dan decitabine serta penghambat histone deacetylase seperti vorinostat, romidepsin, belinostat, panobinostat, dan inhibitor EZH2 tazemetostat. Keberhasilan pengembangan obat-obat tersebut menunjukkan bahwa modifikasi epigenetik tidak hanya penting dalam memahami mekanisme penyakit, tetapi juga telah menjadi target terapeutik yang efektif dalam pengobatan presisi modern.

Tabel 3.2 Empat Mekanisme Epigenetik Utama Beserta Target Molekuler dan Relevansi Klinisnya.

Mekanisme Epigenetik	Target Molekuler	Efek Umum pada Ekspresi Gen	Contoh Relevansi Klinis
Metilasi DNA	Residu sitosin pada promoter	Represi transkripsi	Biomarker kanker, penuaan biologis
Modifikasi histon	Residu asam amino histon (asetilasi, metilasi)	Mengatur kepadatan kromatin	Resistensi insulin, osteoarthritis
RNA non-coding	miRNA, lncRNA, circRNA	Regulasi pasca-transkripsi	Penyakit metabolik, kanker

Remodeling kromatin	Kompleks remodeler ATP-dependent	Mengubah aksesibilitas DNA	Diferensiasi sel punca
---------------------	----------------------------------	----------------------------	------------------------

Disarikan dari Wang et al (2023)

4. Mutasi dan Variasi Genetik sebagai Sumber Keragaman Hayati

Mutasi didefinisikan sebagai perubahan permanen pada urutan nukleotida DNA yang dapat diwariskan kepada keturunannya, baik dalam skala kecil pada tingkat gen tunggal maupun dalam skala besar pada tingkat struktur kromosom. Mutasi melibatkan modifikasi urutan basa DNA yang ditransmisikan melalui proses mitosis maupun meiosis, sehingga perubahan tersebut dapat diturunkan secara stabil pada generasi berikutnya apabila terjadi pada sel germinal (Visscher et al., 2017). Berdasarkan faktor penyebabnya, mutasi dapat dibedakan menjadi mutasi alami yang terjadi secara spontan akibat kesalahan replikasi DNA atau pajanan radiasi kosmik latar, dan mutasi buatan yang sengaja diinduksi melalui agen mutagen kimiawi maupun fisik untuk tujuan penelitian atau pemuliaan tanaman. Mutasi juga dapat dikategorikan berdasarkan jaringan tempat terjadinya, yakni mutasi somatik yang hanya memengaruhi sel tubuh individu yang bersangkutan tanpa diwariskan, dan mutasi generatif (germinal) yang terjadi pada sel kelamin dan berpotensi diwariskan kepada keturunan (Pierce, 2012).

Pengaruh mutasi terhadap ekspresi gen bersifat sangat kontekstual, ditentukan oleh interaksi molekuler kompleks antara lokasi mutasi, jenis perubahan nukleotida, dan jaringan regulasi yang terlibat. Tinjauan literatur sistematis berbasis PRISMA 2020 yang menganalisis ratusan artikel ilmiah menegaskan bahwa berbagai tipe mutasi termasuk mutasi titik, mutasi pada wilayah *splicing*, dan mutasi pada elemen regulator non-coding dapat membentuk pola ekspresi gen yang berbeda-beda secara signifikan, sehingga generalisasi sederhana mengenai dampak mutasi terhadap fenotipe akhir perlu dilakukan dengan kehati-hatian ilmiah yang memadai.

Sebagai ilustrasi konkret dalam bidang kesehatan, mutasi titik pada gen *bla CTX-M* telah terbukti berkontribusi terhadap berkembangnya resistensi antibiotik pada bakteri anggota famili *Enterobacteriaceae*. Mutasi yang mengubah residu asam amino pada enzim CTX-M β -laktamase dapat memodifikasi struktur situs aktif enzim sehingga meningkatkan kemampuan hidrolisis terhadap antibiotik

β -laktam, khususnya sefalosporin spektrum luas, serta mengurangi efektivitas terapi antimikroba. Fenomena ini menunjukkan bahwa perubahan genetik pada tingkat satu atau beberapa nukleotida dapat menghasilkan perubahan fenotip yang signifikan dan berdampak luas terhadap kesehatan masyarakat melalui meningkatnya penyebaran bakteri resisten antibiotik (Lu et al., 2023; Judge et al., 2023).

Pada tingkat populasi, akumulasi mutasi dari generasi ke generasi merupakan bahan baku utama (*raw material*) bagi proses evolusi, karena mutasi menciptakan variasi genetik baru yang kemudian dapat diseleksi secara alami berdasarkan kesesuaiannya dengan tekanan lingkungan (Futuyma, 2015). Penerapan mutasi terinduksi dalam pemuliaan tanaman pangan di Indonesia memberikan ilustrasi aplikatif yang relevan; penelitian terhadap beberapa varietas kedelai (*Glycine max* L.) hasil mutasi gen menunjukkan peningkatan keragaman genetik berumur genjah serta toleransi terhadap cekaman air, baik cekaman kekeringan maupun cekaman jenuh air, dibandingkan varietas induk yang belum dimutasi (Nurhidayat, 2022). Studi semacam ini menegaskan bahwa pemahaman mengenai mutasi dan variasi genetik tidak hanya relevan secara teoretis, tetapi juga memiliki aplikasi praktis langsung dalam upaya meningkatkan resiliensi pertanian terhadap perubahan iklim di Indonesia.

Tabel 3.3 Klasifikasi Jenis Mutasi Berdasarkan Tingkat Perubahan dan Sifat Pewarisannya

Jenis Mutasi	Tingkat Perubahan	Sifat Pewarisan	Contoh Dampak
Mutasi gen (titik)	Sekuens nukleotida tunggal	Dapat diwariskan jika pada sel germinal	Perubahan struktur protein/enzim
Mutasi kromosom	Struktur/jumlah kromosom	Dapat diwariskan, dampak umumnya lebih besar	Sindrom genetik, sterilitas
Mutasi somatik	Sel tubuh (bukan sel kelamin)	Tidak diwariskan ke keturunan	Kanker, mosaikisme jaringan

Mutasi generatif (germinal)	Sel kelamin/gamet	Diwariskan ke keturunan	Variasi fenotipe pada generasi berikutnya
-----------------------------	-------------------	-------------------------	---

Disarikan dari Pierce (2012) dan Visscher et al (2017)

5. Implikasi Pedagogis: Mengajarkan Pewarisan Sifat secara Kontekstual

Dari perspektif pendidikan sains, pemahaman bahwa ekspresi gen bersifat dinamis dan dipengaruhi lingkungan membawa konsekuensi penting bagi cara materi genetika diajarkan di tingkat sekolah maupun perguruan tinggi. Model pengajaran konvensional yang menekankan hubungan linear antara genotipe dan fenotipe berisiko menimbulkan kesalahpahaman bahwa sifat-sifat individu sepenuhnya ditentukan secara deterministik oleh gen. Pendekatan kapita selekta yang relevan dengan temuan epigenetika kontemporer perlu menekankan bahwa fenotipe merupakan hasil interaksi dinamis antara informasi genetik, regulasi epigenetik, dan faktor lingkungan, sehingga peserta didik memperoleh pemahaman yang lebih utuh mengenai kompleksitas biologis sekaligus relevansinya dengan isu kesehatan masyarakat seperti penyakit metabolik dan kanker.

B. Etika dan Masa Depan Teknologi CRISPR

1. Prinsip Kerja dan Lanskap Aplikasi CRISPR-Cas9

Teknologi *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats* (CRISPR) berpasangan dengan protein Cas9 merupakan sistem editing genom yang diadaptasi dari mekanisme imunitas adaptif bakteri terhadap infeksi virus. Sistem ini memanfaatkan RNA pemandu (*guide RNA*) untuk mengarahkan enzim Cas9 memotong DNA pada lokus spesifik, yang kemudian dapat diperbaiki oleh sel melalui jalur *non-homologous end joining* atau *homology-directed repair*, sehingga memungkinkan penyisipan, penghapusan, atau penggantian sekuens genetik secara terarah. Sejak diperkenalkan sebagai alat editing genom pada awal dekade 2010-an, CRISPR-Cas9 telah merevolusi riset biomedis karena kesederhanaan, efisiensi, dan biaya operasionalnya yang jauh lebih rendah dibandingkan teknologi pendahulunya seperti *zinc-finger nuclease* dan TALEN.

Aplikasi teknologi CRISPR-Cas kini telah berkembang jauh melampaui penelitian dasar dan memasuki berbagai bidang kedokteran translasional. Dalam biomedis, CRISPR telah digunakan dalam uji klinis untuk terapi penyakit genetik, termasuk β -talasemia dan anemia sel sabit, melalui penyuntingan genom pada sel punca hematopoietik. Selain itu, teknologi ini terus dikembangkan untuk terapi kanker, penyakit infeksi, dan berbagai kelainan genetik lainnya (Doudna, 2020; Frangoul et al., 2021). Di bidang kedokteran gigi dan kesehatan mulut, kajian *scoping review* terbaru menunjukkan bahwa CRISPR memiliki potensi dalam diagnosis molekuler, rekayasa jaringan, terapi penyakit periodontal, kanker rongga mulut, serta penyakit maksilofasial. Meskipun demikian, penerapan klinisnya masih menghadapi berbagai tantangan, seperti efek *off-target*, efisiensi sistem penghantaran (*delivery system*), serta aspek keamanan, etika, dan regulasi (Dziedzic et al., 2025). Perkembangan tersebut menegaskan bahwa CRISPR bukan lagi sekadar alat penelitian, tetapi telah menjadi platform teknologi lintas disiplin yang berpotensi mentransformasi layanan kesehatan, kedokteran presisi, dan tata kelola riset genetika.

2. Risiko Teknis: Efek Non-Target dan Keterbatasan Presisi

Salah satu tantangan teknis paling signifikan dalam aplikasi CRISPR adalah *off-target effects*, yaitu pemotongan DNA pada sekuens yang tidak dituju akibat kemiripan parsial sekuens target dengan lokus lain dalam genom. Efek non-target ini dapat menyebabkan komplikasi serius dan dalam kasus tertentu bersifat fatal bagi pasien, karena perubahan yang tidak disengaja pada gen-gen krusial dapat memicu disregulasi seluler yang tidak terduga (Pickar-Oliver & Gersbach, 2019). Untuk meminimalkan risiko tersebut, para peneliti kini banyak memanfaatkan perangkat *in silico* berupa algoritma prediksi komputasional yang dapat memperkirakan lokasi paling rawan terjadinya efek non-target sebelum eksperimen *wet-lab* dilakukan, sehingga desain RNA pemandu dapat dioptimalkan terlebih dahulu secara komputasional.

Keterbatasan teknis lain yang relevan mencakup efisiensi pengiriman (*delivery*) komponen CRISPR ke dalam sel atau jaringan target, variasi respons imun tubuh terhadap protein Cas9 yang berasal dari bakteri, serta potensi mosaikisme genetik apabila editing dilakukan

pada tahap embrio multisel. Kajian sistematis terhadap aplikasi CRISPR pada bidang kedokteran gigi menegaskan bahwa keterbatasan teknis ini, bersama dengan isu etis dan regulasi, merupakan penghalang penting bagi translasi klinis teknologi genom editing ke praktik kesehatan rutin. Dengan demikian, optimisme terhadap potensi terapeutik CRISPR perlu diimbangi dengan kehati-hatian metodologis yang memadai sebelum aplikasi klinis berskala luas dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

3. Kerangka Etika: Germline Editing, Persetujuan, dan Keadilan

Perdebatan etika mengenai teknologi CRISPR paling intens berpusat pada *germline genome editing*, yaitu modifikasi genetik pada sel germinal atau embrio yang dapat diwariskan kepada generasi berikutnya. Dalam laporannya, *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine* (NASEM) menyatakan bahwa penerapan *heritable human genome editing* untuk tujuan reproduksi belum layak dilakukan pada kondisi saat ini. Namun, kemungkinan penerapannya di masa depan dapat dipertimbangkan secara terbatas apabila telah tersedia bukti ilmiah yang memadai mengenai keamanan dan efektivitasnya, memenuhi standar risiko-manfaat sebagaimana uji klinis, ditujukan untuk mencegah penyakit genetik berat yang tidak memiliki alternatif terapi yang memadai, serta berada di bawah pengawasan regulasi dan tata kelola yang sangat ketat (NASEM, 2017). Sikap kehati-hatian tersebut sejalan dengan rekomendasi yang dihasilkan dalam pertemuan ilmiah internasional di Napa Valley pada tahun 2015 serta *International Summit on Human Gene Editing*, yang menegaskan bahwa penyuntingan genom germline untuk tujuan reproduksi belum layak diterapkan hingga aspek ilmiah, etika, hukum, dan sosial dapat dipenuhi secara memadai (Baltimore et al., 2015).

Tinjauan sistematis terhadap 223 publikasi mengenai etika *editing* embrio manusia menggunakan CRISPR-Cas9 mengidentifikasi enam tema etis utama: risiko/bahaya, potensi manfaat, pengawasan (*oversight*), persetujuan terinformasi (*informed consent*), keadilan dan kesetaraan sosial, serta kekhawatiran terhadap eugenika (Wiley et al., 2025). Tema keadilan menjadi sorotan khusus karena terdapat indikasi bahwa disparitas akses terhadap teknologi reproduksi berbantuan tidak selalu dapat dijelaskan oleh kemampuan membayar; pada beberapa negara yang mensubsidi biaya teknologi reproduksi, anak-anak yang

lahir melalui teknologi tersebut secara rata-rata berasal dari ibu dengan status sosial ekonomi yang lebih tinggi dibandingkan anak yang dikonsepsi secara alami (Imrie *et al.*, 2023). Pola ini menimbulkan kekhawatiran bahwa *embryo editing* berpotensi diadopsi secara tidak proporsional oleh kelompok berstatus sosial ekonomi tinggi meskipun biaya telah disubsidi, sehingga memperlebar kesenjangan kesehatan antar kelompok masyarakat.

Lebih jauh, riset genetika dan genomika tidak dapat dilepaskan dari sejarah eugenika, dan sebagian literatur yang ditinjau merefleksikan kekhawatiran bahwa memperlakukan CRISPR sebagai alat untuk memperbaiki kesehatan populasi berpotensi menjadikannya alat eugenika baru. Diskusi bioetika kontemporer juga menggeser fokus dari pertanyaan biner seperti apakah teknologi ini boleh digunakan atau tidak menjadi pertanyaan yang lebih bernuansa mengenai pilihan di antara berbagai bioteknologi yang tersedia, misalnya antara *gene editing* dan seleksi embrio (*embryo selection*) sebagai alternatif yang dianggap lebih etis oleh sebagian pihak (Lanphier *et al.*, 2015, dalam Tandfonline, 2024). McMahan dan Savulescu (2024) berargumen bahwa keputusan mengenai pilihan teknologi semestinya didasarkan pada dua alasan etis yang berbeda: pertimbangan mengenai kesejahteraan anak yang akan dilahirkan, serta pertimbangan mengenai keadilan distributif dalam masyarakat secara lebih luas.

Tabel 3.4 Enam Tema Etis Utama dalam Perdebatan Editing Embrio Manusia Menggunakan CRISPR-Cas9

Tema Etis	Inti Perdebatan	Pihak yang Relevan
Risiko/bahaya	Efek non-target, keamanan jangka panjang	Peneliti, regulator, pasien
Potensi manfaat	Pencegahan penyakit genetik berat	Pasien, keluarga, klinisi
Pengawasan (oversight)	Standar uji klinis, badan regulasi internasional	NASEM, WHO, otoritas nasional
Persetujuan terinformasi	Kapasitas memahami risiko jangka panjang & lintas generasi	Pasien, orang tua, komite etik

Keadilan & kesetaraan	Akses tidak merata berdasar status sosial ekonomi	Pembuat kebijakan, masyarakat
Eugenika	Risiko penyalahgunaan untuk "perbaikan" populasi	Bioetikawan, masyarakat sipil

4. Masa Depan CRISPR: Tata Kelola Global dan Arah Riset

Masa depan teknologi CRISPR sangat bergantung pada kemampuan komunitas internasional membangun tata kelola yang adaptif terhadap kecepatan inovasi teknologi sekaligus tetap menjaga prinsip kehati-hatian. Pendekatan regulasi yang terlampaui restriktif berisiko menghambat manfaat terapeutik yang signifikan bagi pasien dengan penyakit genetik berat, sementara pendekatan yang terlampaui permisif berisiko membuka jalan bagi penyalahgunaan, termasuk *enhancement* non-terapeutik yang memperburuk ketimpangan sosial. Beberapa ahli bioetika mengusulkan kerangka tata kelola berlapis yang membedakan secara tegas antara editing somatik untuk tujuan terapeutik yang relatif lebih dapat diterima secara etis karena efeknya tidak diwariskan dengan editing germline yang efeknya bersifat lintas generasi dan karenanya memerlukan ambang persetujuan sosial yang jauh lebih tinggi.

Riset ke depan diperkirakan akan berfokus pada peningkatan presisi melalui varian Cas baru dan teknik *base editing* maupun *prime editing* yang meminimalkan pemotongan DNA untai ganda, sehingga menurunkan risiko efek non-target secara signifikan. Selain itu, kolaborasi lintas negara dalam pembentukan standar etika bersama menjadi krusial mengingat sifat lintas batas dari riset genetik kontemporer, sebagaimana ditunjukkan oleh keterlibatan Akademi Sains Tiongkok dan *Royal Society* Inggris dalam *International Summit on Human Gene Editing*. Pendidikan publik mengenai literasi genetika juga menjadi elemen penting agar masyarakat dapat berpartisipasi secara bermakna dalam diskursus kebijakan yang akan menentukan batas-batas penggunaan teknologi ini di masa depan.

5. Studi Kasus: Aplikasi CRISPR pada Pemuliaan Tanaman Pangan

Di luar aplikasi biomedis, CRISPR juga membuka babak baru dalam pemuliaan tanaman pangan dengan presisi yang jauh lebih tinggi

dibandingkan teknik mutasi acak maupun transgenik konvensional. Pendekatan *base editing* dan *prime editing* memungkinkan ilmuwan menyunting basa nukleotida tunggal pada lokus gen target tanpa menyebabkan pemotongan untai ganda DNA, sehingga risiko efek non-target dapat ditekan secara signifikan dibandingkan sistem CRISPR-Cas9 generasi awal. Teknik ini telah diaplikasikan untuk mengembangkan varietas tanaman dengan sifat-sifat unggul seperti resistensi terhadap penyakit, peningkatan kandungan nutrisi, serta toleransi terhadap cekaman lingkungan abiotik seperti suhu ekstrem dan salinitas tanah yang tinggi, dengan tingkat presisi genetik yang memungkinkan modifikasi sangat terarah pada gen tunggal tanpa mengubah keseluruhan latar belakang genetik varietas unggul yang telah ada.

Perbedaan filosofis antara hasil *gene editing* presisi dan produk transgenik konvensional menjadi pertimbangan penting dalam pengembangan kerangka regulasi kontemporer. Produk hasil *gene editing* yang tidak menyisipkan materi genetik asing (*foreign DNA*) ke dalam genom tanaman melainkan hanya mengubah sekuens asli organisme itu sendiri, secara konseptual lebih menyerupai hasil mutasi alami yang dipercepat dibandingkan rekayasa genetika transgenik yang melibatkan transfer gen antarspesies. Sejumlah negara mulai mempertimbangkan pendekatan regulasi yang membedakan dua kategori produk ini, meskipun belum terdapat konsensus internasional yang seragam, sehingga produk yang sama dapat diklasifikasikan secara berbeda di berbagai yurisdiksi, menciptakan kompleksitas tambahan bagi perdagangan benih dan komoditas pertanian hasil bioteknologi lintas negara.

6. Dimensi Ekonomi dan Akses Global Terhadap Terapi Berbasis CRISPR

Selain pertimbangan etis mengenai *germline editing*, dimensi ekonomi terapi berbasis CRISPR menjadi isu mendesak yang berkaitan langsung dengan prinsip keadilan dalam akses layanan kesehatan global. Biaya pengembangan dan produksi terapi gen berbasis CRISPR yang telah memperoleh persetujuan regulasi, misalnya untuk talasemia dan anemia sel sabit, diketahui berada pada kisaran harga yang sangat tinggi, sering kali mencapai ratusan ribu hingga jutaan dolar Amerika Serikat

per pasien untuk satu siklus terapi tunggal. Struktur harga semacam ini menimbulkan kekhawatiran serius bahwa manfaat revolusioner dari teknologi *gene editing* hanya akan dapat dijangkau oleh segelintir pasien di negara berpendapatan tinggi, sementara mayoritas beban penyakit genetik justru terkonsentrasi di negara berpendapatan rendah dan menengah yang memiliki akses jauh lebih terbatas terhadap sistem pembiayaan kesehatan inovatif (Henderson, 2019, dalam Critical Debates HSGJ, 2026).

Beberapa model pembiayaan alternatif telah diusulkan untuk mengatasi tantangan akses ini, termasuk skema pembiayaan berbasis hasil (*outcome-based payment*) yang mengaitkan pembayaran dengan efektivitas terapi jangka panjang, kemitraan publik-swasta untuk subsidi biaya produksi, serta transfer teknologi ke fasilitas produksi regional di negara berkembang guna menurunkan biaya logistik dan distribusi. Pendekatan semacam ini telah diuji coba pada konteks teknologi vaksin mRNA melalui program transfer teknologi yang melibatkan Organisasi Kesehatan Dunia dan mitra regional di Afrika, yang bertujuan membangun resiliensi dan memperkuat kapasitas riset, pengembangan, serta produksi vaksin lokal di kawasan yang sebelumnya tidak dapat mengakses vaksin COVID-19 secara tepat waktu (WHO, 2024). Model transfer teknologi serupa berpotensi diadaptasi untuk terapi berbasis CRISPR guna mempersempit kesenjangan akses bioteknologi presisi antarwilayah di masa mendatang, meskipun kompleksitas teknis produksi terapi gen jauh lebih tinggi dibandingkan produksi vaksin konvensional.

Tantangan akses ini menegaskan bahwa keberhasilan teknologi CRISPR secara ilmiah tidak otomatis menjamin pemerataan manfaatnya secara global. Tanpa intervensi kebijakan yang disengaja untuk menurunkan barrier ekonomi, terdapat risiko nyata bahwa kesenjangan kesehatan antarnegara dan antarkelas sosial justru akan melebar seiring kemajuan bioteknologi presisi, sebuah ironi yang berlawanan dengan tujuan awal pengembangan teknologi tersebut untuk meringankan beban penyakit genetik bagi seluruh umat manusia. Oleh karena itu, kerangka tata kelola CRISPR yang komprehensif perlu mengintegrasikan strategi pembiayaan dan distribusi yang adil sejak fase awal pengembangan, bukan sekadar sebagai pertimbangan tambahan setelah produk memperoleh persetujuan regulasi.

C. Etika dan Masa Depan GMO (*Genetically Modified Organism*)

1. Prinsip Dasar dan Tujuan Pengembangan GMO

Organisme hasil modifikasi genetik atau *Genetically Modified Organism* (GMO) merujuk pada organisme yang materi genetiknya telah diubah menggunakan teknik bioteknologi modern dengan cara yang tidak terjadi secara alami melalui perkawinan atau rekombinasi alami. Dalam konteks pertanian, modifikasi genetik umumnya diarahkan untuk meningkatkan ketahanan tanaman terhadap herbisida, hama, atau kondisi lingkungan yang merugikan seperti kekeringan, sekaligus meningkatkan nilai gizi hasil panen (*National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*, 2016). Sebagai ilustrasi, terdapat varietas jagung hasil modifikasi genetik yang dirancang toleran terhadap kekeringan (*drought tolerant*) untuk mendukung produktivitas pertanian di wilayah rawan kekeringan. Tujuan pengembangan semacam ini sangat relevan dengan tantangan ketahanan pangan global di tengah perubahan iklim yang semakin nyata (Nemali et al., 2015).

Selain toleransi terhadap tekanan lingkungan, sejumlah varietas GMO dikembangkan untuk meningkatkan kualitas gizi produk pangan, misalnya kedelai hasil modifikasi genetik dengan kandungan asam oleat yang ditingkatkan untuk kepentingan kesehatan kardiovaskular konsumen, maupun kedelai yang dimodifikasi untuk memproduksi asam stearidonat (Bawa & Anilakumar, 2013). Pengembangan tersebut menunjukkan bahwa motivasi di balik rekayasa genetika tanaman pangan tidak terbatas pada aspek produktivitas semata, melainkan juga mencakup dimensi gizi dan kesehatan masyarakat yang lebih luas, sehingga GMO perlu dipahami sebagai bagian dari strategi bioteknologi pangan yang multidimensional.

2. Kerangka Regulasi dan Asesmen Keamanan Pangan

Kerangka regulasi GMO bervariasi secara signifikan antarnegara, mencerminkan perbedaan filosofi tata kelola risiko. Uni Eropa menerapkan kerangka regulasi berbasis proses (*process-based*) yang paling komprehensif, mewajibkan protokol asesmen risiko yang ekstensif terlepas dari karakteristik spesifik produk, disertai ketentuan pelabelan wajib, persyaratan keterlacakan (*traceability*), dan rentang

waktu persetujuan yang dapat mencapai tiga hingga tujuh tahun untuk peristiwa GM baru (Eckerstorfer *et al.*, 2019). *European Food Safety Authority* (EFSA) secara berkelanjutan memperbarui panduan karakterisasi molekuler dan asesmen risiko lingkungan untuk tanaman hasil modifikasi genetik yang dikembangkan melalui pendekatan biologi sintetik, dengan menekankan perlunya evaluasi *case-by-case* terhadap teknologi-teknologi baru (EFSA, 2020).

Asesmen keamanan pangan terhadap produk GMO umumnya mencakup studi pemberian pakan (*feeding studies*) pada hewan model untuk mendeteksi efek toksikologis maupun nutrisi yang merugikan. Sejumlah varietas jagung GMO secara konsisten menunjukkan profil keamanan yang baik dalam uji pemberian pakan pada rodensia, tanpa efek merugikan yang teramati pada berbagai parameter asesmen komprehensif (Sun *et al.*, 2022; Then & Bauer-Panskus, 2017). Studi-studi terbaru bahkan telah mengintegrasikan pendekatan analitik lanjutan, termasuk evaluasi toksisitas kronis dengan analisis metabolit serum, untuk memperkuat keandalan kesimpulan keamanan pangan tersebut. Selain itu, kedelai GMO bertumpuk (*stacked event*) yang menggabungkan beberapa sifat sekaligus, seperti DBN9004 × DBN8002 × DBN8205, juga telah menunjukkan bukti keamanan pangan dalam studi pemberian pakan subkronis pada rodensia tanpa efek merugikan terkait perlakuan pada berbagai parameter toksikologis (Then & Bauer-Panskus, 2017).

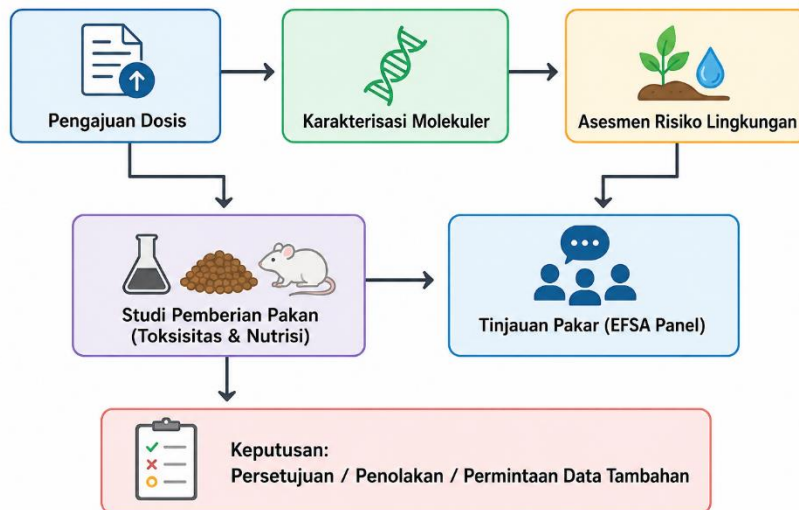
Tabel 3.5 Karakteristik Kerangka Regulasi GMO, Dengan Uni Eropa Sebagai Rujukan Kerangka Paling Komprehensif

Aspek Regulasi	Uni Eropa	Karakteristik Umum Regulasi Global
Basis regulasi	Berbasis proses (<i>process-based</i>)	Bervariasi: berbasis proses atau berbasis produk
Pelabelan	Wajib	Bervariasi antarnegara
Keterlacakan	Wajib (<i>traceability</i>)	Tidak selalu diwajibkan
Lama proses persetujuan	3-7 tahun untuk peristiwa GM baru	Bervariasi, umumnya lebih singkat di luar UE

Evaluasi berkelanjutan	Renewal authorisation berkala oleh EFSA	Bervariasi tingkat ketatnya
------------------------	---	-----------------------------

Disarikan dari Eckerstorfer *et al.* (2019) dan Dokumen EFSA (2020)

Gambar 3.2 Alur Umum Proses Asesmen Risiko dan Persetujuan Regulasi GMO Untuk Pangan dan Pakan di Uni Eropa



3. Kontroversi Publik: Persepsi Risiko versus Bukti Ilmiah

Komunikasi sains mengenai GMO menghadapi tantangan unik karena topik ini berada pada persimpangan antara kompleksitas teknis molekuler, kepentingan ekonomi industri agribisnis skala besar, dan kekhawatiran eksistensial masyarakat mengenai keamanan rantai pangan yang dikonsumsi sehari-hari. Studi mengenai komunikasi risiko menunjukkan bahwa penyajian informasi keamanan pangan GMO secara teknis-saintifik semata, tanpa memperhatikan konteks sosial dan nilai-nilai yang dipegang oleh berbagai kelompok masyarakat, cenderung tidak efektif dalam mengubah persepsi publik yang skeptis, bahkan berpotensi memperkuat polarisasi sikap apabila disampaikan dengan nada yang dianggap merendahkan kekhawatiran masyarakat awam. Pendekatan komunikasi sains yang lebih partisipatif, melibatkan dialog dua arah antara ilmuwan, regulator, dan masyarakat sipil, dinilai lebih efektif dalam membangun kepercayaan publik terhadap proses asesmen keamanan pangan GMO secara berkelanjutan.

Meskipun bukti ilmiah dari studi keamanan pangan secara konsisten menunjukkan profil risiko yang dapat dikelola untuk produk

GMO yang telah disetujui, penerimaan publik terhadap teknologi ini tetap menjadi tantangan tersendiri yang tidak semata-mata bersifat ilmiah, melainkan juga sosiokultural dan politis. Ketimpangan antara konsensus ilmiah dan persepsi publik ini sebagian dijelaskan oleh faktor-faktor seperti rendahnya literasi sains masyarakat awam mengenai mekanisme rekayasa genetika, ketidakpercayaan terhadap perusahaan agribisnis multinasional yang mendominasi pasar benih GMO, serta kekhawatiran mengenai dampak jangka panjang yang belum dapat diverifikasi sepenuhnya melalui studi jangka pendek. Tantangan ketahanan pangan global, keberlanjutan lingkungan, dan keamanan pangan menjadi tiga dimensi yang harus diseimbangkan secara hati-hati dalam merumuskan kebijakan GMO yang bertanggung jawab.

Dari perspektif keberlanjutan, perdebatan mengenai GMO juga melibatkan pertanyaan mengenai dampak ekologis jangka panjang, termasuk potensi aliran gen (*gene flow*) ke kerabat liar tanaman budidaya, perkembangan resistensi hama atau gulma terhadap sifat-sifat yang direkayasa, serta dampaknya terhadap keanekaragaman agrobiologis. Pemantauan lingkungan pascapemasaran (*post-market environmental monitoring*) telah menjadi komponen wajib dalam kerangka regulasi Uni Eropa untuk memantau kemunculan hazard baru, perubahan eksposur, atau ketidakpastian ilmiah baru yang belum teridentifikasi pada asesmen awal. Pendekatan pemantauan berkelanjutan ini mencerminkan prinsip kehati-hatian (*precautionary principle*) yang menjadi salah satu pilar utama tata kelola bioteknologi pertanian modern.

4. Masa Depan GMO: Konvergensi dengan Bioteknologi Presisi

Perkembangan teknologi *gene editing* presisi seperti CRISPR membuka babak baru dalam evolusi GMO, karena memungkinkan modifikasi genetik yang lebih terarah dan minim dampak di luar target dibandingkan teknik transgenik konvensional yang mengandalkan transfer gen antarspesies. Beberapa kerangka regulasi mulai mempertimbangkan perbedaan filosofis ini, di mana produk hasil *gene editing* yang tidak menyisipkan materi genetik asing (*foreign DNA*) berpotensi diperlakukan berbeda dari produk transgenik tradisional dalam beberapa yurisdiksi, meskipun Uni Eropa tetap menerapkan kerangka berbasis proses yang relatif konservatif terhadap inovasi

semacam ini. Konvergensi antara bioteknologi presisi dan pemuliaan tanaman konvensional diperkirakan akan menjadi arah dominan riset pertanian masa depan, dengan fokus pada peningkatan hasil panen, efisiensi penggunaan sumber daya air dan nutrisi, serta resiliensi terhadap perubahan iklim.

Pada akhirnya, masa depan GMO akan sangat ditentukan oleh kemampuan para pemangku kebijakan untuk membangun mekanisme tata kelola yang transparan, berbasis bukti ilmiah, dan inklusif terhadap partisipasi publik. Keseimbangan antara keamanan, keberlanjutan, dan keamanan pangan global memerlukan kerangka kerja yang tidak hanya mengandalkan otoritas regulasi formal, tetapi juga melibatkan dialog aktif dengan masyarakat sipil, petani, dan konsumen. Pendidikan sains mengenai bioteknologi pertanian, termasuk pemahaman mengenai perbedaan antara rekayasa genetika transgenik dan *gene editing* presisi, menjadi kebutuhan mendesak agar diskursus publik mengenai GMO dapat bergerak dari sekadar polarisasi sentimen menuju pertimbangan berbasis data dan konteks ilmiah yang memadai.

5. Studi Kasus: Kerangka Regulasi GMO di Indonesia

Indonesia memiliki landasan hukum khusus mengenai keamanan hayati produk rekayasa genetik (PRG) melalui Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2005 tentang Keamanan Hayati Produk Rekayasa Genetik, yang berlaku baik bagi PRG yang diintroduksi dari luar negeri maupun hasil riset domestik. Regulasi ini mendefinisikan keamanan hayati PRG sebagai cakupan keamanan lingkungan, keamanan pangan, dan/atau keamanan pakan, dengan tujuan eksplisit mencegah risiko yang merugikan keanekaragaman hayati serta kesehatan manusia, hewan, dan ikan akibat proses produksi, penyiapan, penyimpanan, maupun distribusi produk PRG (Estiati & Herman, 2015). Implementasi regulasi ini melibatkan koordinasi antarlembaga, termasuk Kementerian Lingkungan Hidup, Kementerian Pertanian, Komisi Keamanan Hayati, Tim Teknis Keamanan Hayati, dan *Biosafety Clearing House* yang berperan dalam pengkajian dan pengawasan PRG secara berjenjang (Al-Kauniyah, 2017).

Proses regulasi PRG di Indonesia mengikuti tahapan berjenjang yang ketat, dimulai dari penelitian laboratorium, uji terbatas lapangan, pengkajian keamanan hayati secara komprehensif, pelepasan varietas

resmi, hingga pengawasan dan pengendalian pascapelepasan ke pasar. Kerangka regulasi ini diperkuat lebih lanjut melalui sejumlah regulasi turunan, antara lain Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 25 Tahun 2012 tentang Keamanan Lingkungan, Peraturan Menteri Pertanian Nomor 36 Tahun 2016 tentang Keamanan Pakan, Peraturan Kepala BPOM Nomor 6 Tahun 2018 mengenai inspeksi pangan GMO, serta Peraturan Menteri Pertanian Nomor 38 Tahun 2019 dan Nomor 50 Tahun 2020 mengenai pelepasan dan pengawasan varietas GMO (Tabloid Sinar Tani, 2023, mengutip Konsorsium Bioteknologi Indonesia). Hingga saat kerangka ini disusun, Pusat Perlindungan Varietas Tanaman dan Perizinan Pertanian (PVTTP) telah melepas sekitar sepuluh varietas PRG untuk keperluan komersial maupun penelitian lanjutan di Indonesia.

Meskipun Indonesia telah memiliki kerangka regulasi yang mengatur keamanan hayati, keamanan pangan, serta pelabelan produk hasil rekayasa genetika, implementasinya masih menghadapi berbagai tantangan. Salah satu isu yang sering menjadi perhatian adalah pemenuhan hak konsumen untuk memperoleh informasi yang jelas mengenai keberadaan bahan hasil rekayasa genetika dalam produk pangan. Pelabelan yang transparan dipandang penting agar konsumen dapat membuat keputusan yang sesuai dengan preferensi dan kebutuhannya, sekaligus meningkatkan kepercayaan publik terhadap penerapan bioteknologi modern. Tantangan tersebut juga terlihat pada pengawasan produk pangan impor, yang memerlukan sistem pengawasan dan penelusuran (*traceability*) yang efektif agar ketentuan pelabelan dapat diterapkan secara konsisten (Badan Pengawas Obat dan Makanan, 2023; Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 2021). Kondisi ini menunjukkan bahwa keberhasilan pemanfaatan teknologi rekayasa genetika tidak hanya ditentukan oleh keberadaan regulasi, tetapi juga oleh efektivitas implementasi, kapasitas pengawasan, transparansi informasi, serta komunikasi risiko kepada masyarakat.

Tabel 3.6 Kerangka Regulasi PRG/GMO di Indonesia Beserta Fokus Pengaturannya

Regulasi	Tahun	Fokus Pengaturan
PP No. 21/2005	2005	Keamanan hayati PRG (lingkungan, pangan, pakan)
Permen LH No. 25/2012	2012	Keamanan lingkungan PRG
Permentan No. 36/2016	2016	Keamanan pakan PRG
Perka BPOM No. 6/2018	2018	Inspeksi pangan GMO
Permentan No. 38/2019	2019	Pelepasan varietas PRG
Permentan No. 50/2020	2020	Pengawasan varietas GMO

Disarikan dari Estiati & Herman (2015) dan Tabloid Sinar Tani (2023)

6. Epigenetika dan Dampaknya pada Kesehatan Manusia

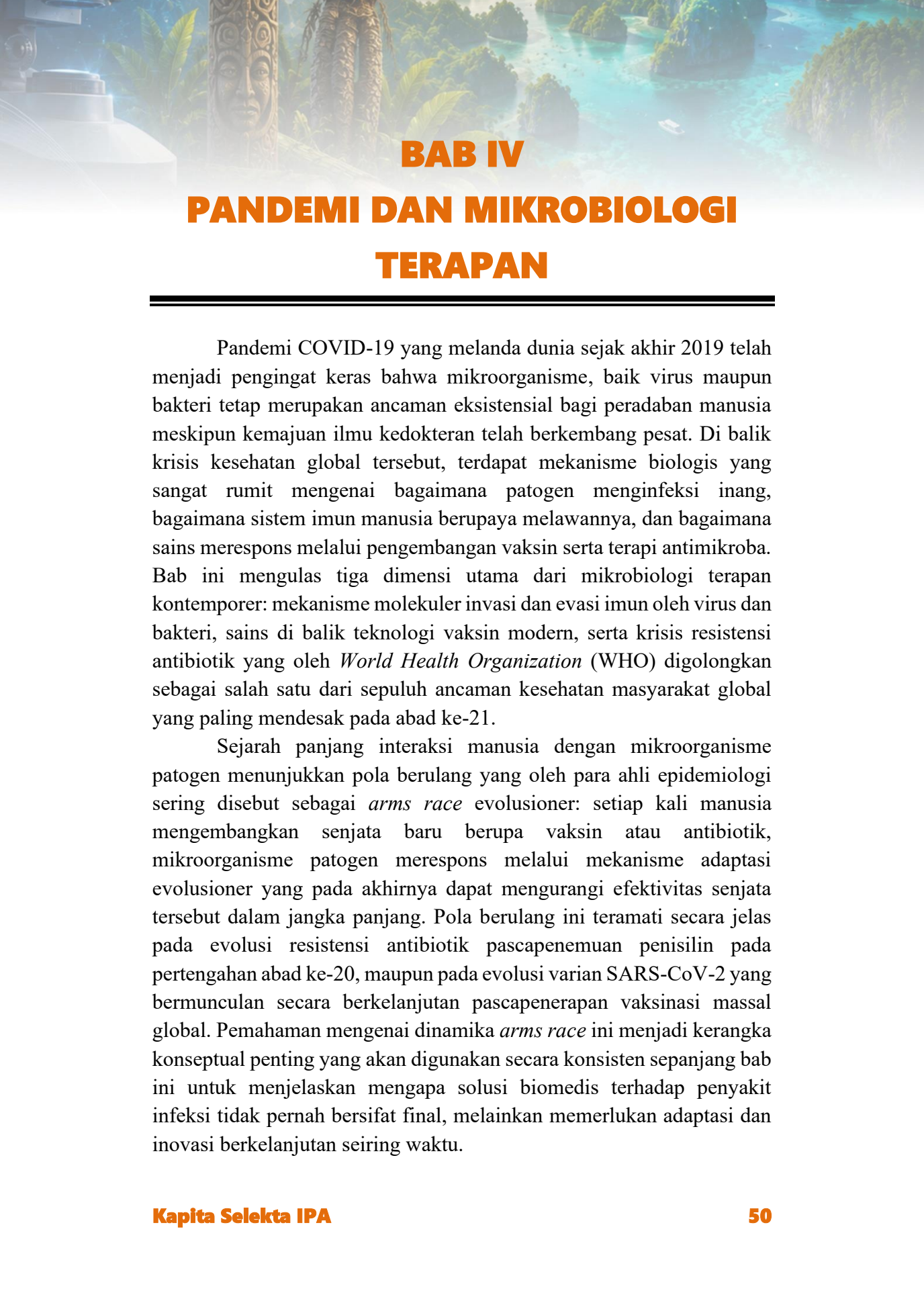
Epigenetika adalah studi tentang perubahan ekspresi gen yang tidak melibatkan perubahan pada urutan DNA itu sendiri. Mekanisme epigenetika, seperti metilasi DNA, modifikasi histon, dan RNA non-koding, memainkan peran penting dalam mengatur aktivitas gen. Perubahan epigenetik dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, gaya hidup, dan pengalaman individu, dan memiliki dampak signifikan pada kesehatan manusia.

Salah satu mekanisme epigenetik yang paling dikenal adalah metilasi DNA, di mana gugus metil ditambahkan ke molekul DNA, biasanya pada posisi sitosin dalam konteks CpG. Metilasi ini dapat menekan ekspresi gen dengan menghalangi faktor transkripsi untuk mengakses DNA. Modifikasi histon, yang melibatkan perubahan pada protein histon yang membantu mengemas DNA, juga mempengaruhi struktur kromatin dan aksesibilitas gen.

Dampak epigenetika pada kesehatan manusia sangat luas. Misalnya, perubahan epigenetik telah dikaitkan dengan perkembangan penyakit kronis seperti kanker, diabetes, dan penyakit kardiovaskular.

Dalam kasus kanker, pola metilasi DNA yang abnormal dapat mengaktifkan onkogen atau menonaktifkan gen penekan tumor, berkontribusi pada pertumbuhan dan penyebaran sel kanker.

Epigenetika dalam kanker payudara menunjukkan bahwa pola metilasi DNA, seperti hipermetilasi gen BRCA1, dapat digunakan sebagai biomarker untuk diagnosis dan prognosis. Memahami pola ini memungkinkan pengembangan terapi personal, seperti demetilasi, untuk memulihkan ekspresi gen normal dan mengurangi risiko perkembangan kanker.



BAB IV

PANDEMI DAN MIKROBIOLOGI TERAPAN

Pandemi COVID-19 yang melanda dunia sejak akhir 2019 telah menjadi pengingat keras bahwa mikroorganisme, baik virus maupun bakteri tetap merupakan ancaman eksistensial bagi peradaban manusia meskipun kemajuan ilmu kedokteran telah berkembang pesat. Di balik krisis kesehatan global tersebut, terdapat mekanisme biologis yang sangat rumit mengenai bagaimana patogen menginfeksi inang, bagaimana sistem imun manusia berupaya melawannya, dan bagaimana sains merespons melalui pengembangan vaksin serta terapi antimikroba. Bab ini mengulas tiga dimensi utama dari mikrobiologi terapan kontemporer: mekanisme molekuler invasi dan evasi imun oleh virus dan bakteri, sains di balik teknologi vaksin modern, serta krisis resistensi antibiotik yang oleh *World Health Organization* (WHO) digolongkan sebagai salah satu dari sepuluh ancaman kesehatan masyarakat global yang paling mendesak pada abad ke-21.

Sejarah panjang interaksi manusia dengan mikroorganisme patogen menunjukkan pola berulang yang oleh para ahli epidemiologi sering disebut sebagai *arms race* evolusioner: setiap kali manusia mengembangkan senjata baru berupa vaksin atau antibiotik, mikroorganisme patogen merespons melalui mekanisme adaptasi evolusioner yang pada akhirnya dapat mengurangi efektivitas senjata tersebut dalam jangka panjang. Pola berulang ini teramati secara jelas pada evolusi resistensi antibiotik pascapenemuan penisilin pada pertengahan abad ke-20, maupun pada evolusi varian SARS-CoV-2 yang bermunculan secara berkelanjutan pascapenerapan vaksinasi massal global. Pemahaman mengenai dinamika *arms race* ini menjadi kerangka konseptual penting yang akan digunakan secara konsisten sepanjang bab ini untuk menjelaskan mengapa solusi biomedis terhadap penyakit infeksi tidak pernah bersifat final, melainkan memerlukan adaptasi dan inovasi berkelanjutan seiring waktu.

Penyusunan bab ini mengikuti logika perjalanan infeksi: dimulai dari bagaimana patogen menyerang sel inang dan menghindari deteksi sistem imun, dilanjutkan dengan strategi pertahanan biomedis melalui vaksinasi, dan diakhiri dengan tantangan jangka panjang berupa evolusi resistensi mikroba terhadap senjata farmakologis yang telah dikembangkan manusia. Ketiga tema ini saling berkaitan erat karena keberhasilan maupun kegagalan dalam satu domain, misalnya tingkat cakupan vaksinasi yang rendah dapat memperburuk domain lain, seperti meningkatnya tekanan seleksi yang mendorong evolusi varian patogen baru atau penggunaan antibiotik yang tidak rasional akibat infeksi sekunder yang tidak tertangani secara optimal.

Konteks Indonesia menjadi perhatian khusus dalam bab ini, mengingat negara ini menghadapi beban ganda penyakit infeksi tropis yang kompleks sekaligus tantangan resistensi antimikroba yang signifikan pada sistem kesehatan dengan kapasitas surveilans yang masih terus dikembangkan. Sebagai negara kepulauan dengan populasi besar dan keragaman geografis-sosial yang tinggi, Indonesia menghadapi tantangan unik dalam memastikan pemerataan akses vaksinasi dan pengelolaan penggunaan antimikroba yang rasional di seluruh wilayah, sehingga studi kasus kebijakan domestik yang dibahas dalam bab ini diharapkan dapat memberikan perspektif kontekstual yang relevan bagi pembaca untuk memahami bagaimana prinsip-prinsip mikrobiologi terapan global diterjemahkan ke dalam kebijakan kesehatan masyarakat di tingkat nasional.

A. Mekanisme Virus dan Bakteri Menyerang Sistem Imun

1. Arsitektur Dasar Sistem Imun: Imunitas Bawaan dan Adaptif

Sebelum mengulas strategi spesifik patogen dalam menyerang inang, penting untuk memahami arsitektur dasar sistem pertahanan tubuh yang dihadapi oleh virus dan bakteri. Sistem imun manusia secara konvensional dibagi menjadi dua lapisan utama, yakni imunitas bawaan (*innate immunity*) dan imunitas adaptif (*adaptive immunity*), yang bekerja secara terintegrasi namun memiliki karakteristik kinetik dan spesifisitas yang berbeda. Imunitas bawaan merupakan lini pertahanan pertama yang bersifat non-spesifik dan merespons dalam hitungan menit hingga jam setelah infeksi, melibatkan komponen seperti sel fagosit

(makrofag dan neutrofil), sel *natural killer* (NK), sistem komplemen, serta produksi sitokin inflamasi dan interferon yang membatasi penyebaran patogen pada fase awal infeksi sebelum respons adaptif yang lebih spesifik terbentuk secara penuh.

Imunitas adaptif, sebaliknya, memerlukan waktu beberapa hari hingga terbentuk secara optimal namun menawarkan spesifisitas tinggi terhadap antigen tertentu serta kemampuan memori jangka panjang. Komponen utama imunitas adaptif mencakup limfosit B yang memproduksi antibodi spesifik terhadap antigen, serta limfosit T yang terbagi menjadi sel T sitotoksik (CD8+) yang mampu membunuh sel terinfeksi secara langsung, dan sel T penolong (CD4+) yang mengoordinasikan respons imun secara keseluruhan melalui produksi sitokin regulasi. Interaksi antara kedua sistem ini terjadi melalui mekanisme presentasi antigen oleh molekul *Major Histocompatibility Complex* (MHC) pada permukaan sel, yang memungkinkan sel T mengenali sel yang terinfeksi patogen intraseluler seperti virus, sehingga pemahaman mengenai arsitektur dasar ini menjadi prasyarat penting untuk memahami secara mendalam berbagai strategi evasi imun yang akan dibahas pada sub-bab selanjutnya.

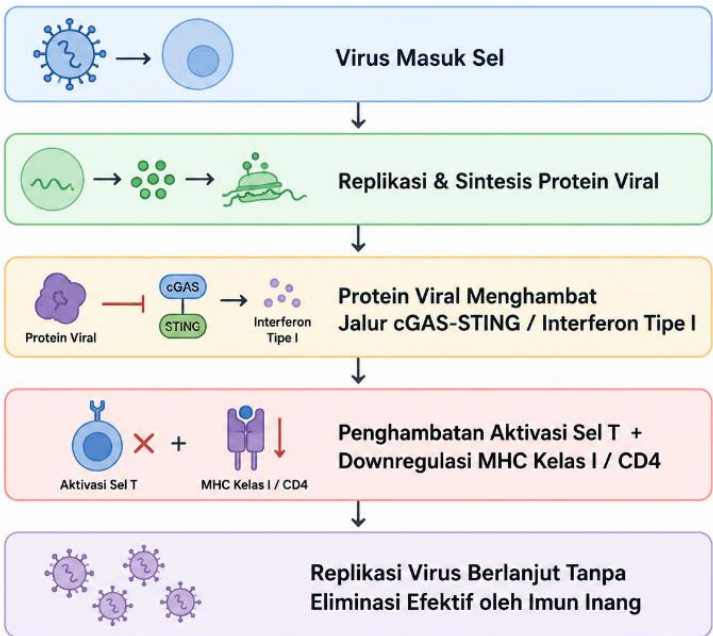
2. Siklus Infeksi Virus dan Strategi Evasi Imun Bawaan

Virus merupakan parasit intraseluler obligat yang sepenuhnya bergantung pada mesin molekuler sel inang untuk bereplikasi. Selama proses infeksi, virus telah berevolusi dengan berbagai mekanisme untuk menghindari pengenalan dan eliminasi oleh sistem imun inang. Salah satu sasaran utama mekanisme tersebut adalah jalur pensinyalan interferon tipe I (*type I interferon signaling*), yang merupakan komponen penting respons imun bawaan terhadap infeksi virus. Sebagai contoh, virus *African swine fever virus* (ASFV) menghasilkan berbagai protein yang menghambat aktivasi jalur cGAS–STING, sehingga menekan produksi interferon tipe I. Salah satu protein tersebut adalah pI215L, yang menghambat aktivasi TBK1 melalui mekanisme yang melibatkan degradasi RNF128 oleh RNF138, sehingga mengurangi ubiquitinasi K63 yang diperlukan untuk mengaktifkan respons antivirus (Liu et al., 2026).

Mekanisme evasi imun pada virus poxvirus, termasuk virus *monkeypox* (MPXV) yang menyebabkan wabah global tahun 2022-2024, menunjukkan pola serupa namun dengan kompleksitas tambahan. Virus

ini memproduksi protein-protein homolog poxvirus yang secara simultan menekan baik imunitas bawaan (*innate immunity*) termasuk enam jalur sinyal imun bawaan utama dan strategi antivirus, khususnya jalur interferon maupun imunitas adaptif, sehingga mempersulit pengembangan vaksin dan obat. Selain menghambat respons imun bawaan, virus monkeypox (*Monkeypox virus* atau MPXV) juga mampu mengganggu aktivasi sistem imun adaptif. Penelitian menunjukkan bahwa sel yang terinfeksi MPXV dapat menghambat aktivasi sel T melalui reseptor sel T (*T-cell receptor* atau TCR) tanpa menurunkan ekspresi molekul *Major Histocompatibility Complex* (MHC) pada permukaan sel. Mekanisme yang bersifat independen terhadap MHC ini mengurangi aktivasi sel T serta produksi sitokin antivirus dan proinflamasi, sehingga diduga berkontribusi terhadap kemampuan MPXV untuk menghindari respons imun dan mempertahankan infeksi di dalam tubuh inang (Lum et al., 2022).

Gambar 4.1 Alur Umum Strategi Evasi Imun Virus Terhadap Sistem Imun Bawaan dan Adaptif Inang



3. Studi Kasus: Evasi Imun pada HIV-1

Infeksi HIV-1 merupakan salah satu contoh paling komprehensif mengenai kemampuan virus memanipulasi interaksi antara protein virus

dan protein inang untuk mempertahankan infeksi kronis. Protein aksesori HIV-1, seperti Nef, Vpu, Vif, dan Vpr, serta glikoprotein Env, bekerja secara terkoordinasi untuk melemahkan pertahanan imun inang. Protein-protein tersebut menurunkan ekspresi molekul CD4 dan *major histocompatibility complex* (MHC) kelas I pada permukaan sel, mendegradasi faktor restriksi antivirus seperti APOBEC3G dan SAMHD1, serta menghambat aktivitas BST-2/Tetherin dan SERINC5 yang berperan menghambat pelepasan dan infektivitas virus. Melalui berbagai mekanisme tersebut, HIV-1 mampu mempertahankan replikasi dan persistensinya sehingga menyebabkan infeksi kronis yang sulit dieliminasi meskipun terapi antiretroviral modern dapat menekan replikasi virus hingga berada di bawah batas deteksi (Klute et al., 2024; Malim & Bieniasz, 2012).

Menurut laporan UNAIDS, sekitar 39 juta orang hidup dengan HIV di seluruh dunia pada akhir tahun 2023, sehingga HIV tetap menjadi salah satu pandemi kronis terbesar secara global (UNAIDS, 2024). Sejalan dengan perkembangan pemahaman mengenai interaksi virus dan inang, strategi terapi mutakhir tidak hanya berfokus pada penghambatan enzim virus, tetapi juga berupaya memperkuat faktor restriksi alami sel inang atau menghambat protein virus yang menonaktifkannya. Pendekatan yang menargetkan jalur bergantung pada inang (*host-dependent pathways*) ini diharapkan mampu mengurangi munculnya resistensi obat, menekan reservoir virus laten, dan mendukung tercapainya remisi jangka panjang maupun *functional cure* pada infeksi HIV (Klute et al., 2024).

4. Mekanisme Invasi dan Evasi Imun oleh Bakteri Patogen

Berbeda dari virus yang sepenuhnya bergantung pada sel inang, bakteri patogen umumnya memiliki kapasitas metabolik mandiri namun tetap mengembangkan strategi canggih untuk menghindari eliminasi oleh sistem imun inang. Strategi tersebut mencakup pembentukan kapsul polisakarida yang menghambat fagositosis, produksi enzim yang mendegradasi komponen komplemen, modifikasi struktur permukaan antigenik untuk menghindari pengenalan antibodi, serta kemampuan invasi intraseluler yang memungkinkan bakteri bersembunyi dari sel imun yang bersirkulasi dalam darah. Selain itu, sejumlah bakteri patogen mampu membentuk biofilm yaitu komunitas mikroba yang terbungkus

matriks ekstraseluler pelindung yang secara signifikan meningkatkan resistensi terhadap fagositosis maupun penetrasi senyawa antimikroba, sehingga mempersulit baik respons imun alami maupun terapi antibiotik konvensional.

Pada konteks koinfeksi, interaksi antara infeksi virus dan bakteri turut memperburuk beban penyakit secara signifikan. Tinjauan sistematis dan meta-analisis mengenai resistensi antimikroba pada pasien COVID-19 mengidentifikasi bahwa infeksi bakteri sekunder yang resisten terhadap antibiotik merupakan komplikasi yang relatif sering terjadi pada pasien dengan infeksi virus pernapasan berat, sehingga memperpanjang masa rawat inap dan meningkatkan angka mortalitas. Fenomena ini menegaskan bahwa mekanisme invasi virus dan bakteri, meskipun berbeda secara molekuler, dapat berinteraksi secara sinergis dalam memperberat patogenesis penyakit infeksi pada inang yang sama, sehingga pendekatan tata laksana klinis perlu mempertimbangkan kemungkinan koinfeksi secara komprehensif.

Tabel 4.1 Perbandingan Strategi Evasi Imun Pada Virus dan Bakteri Patogen Beserta Konsekuensi Klinisnya

Aspek	Strategi Virus	Strategi Bakteri
Target utama	Jalur interferon, MHC, sel T	Komplemen, fagosit, antibodi
Mekanisme khas	Degradasi protein imun inang oleh protein viral	Kapsul, biofilm, modifikasi antigen permukaan
Contoh patogen	HIV-1, MPXV, ASFV	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i>
Konsekuensi klinis	Infeksi kronis/laten, kegagalan vaksin	Infeksi sulit diobati, resistensi antibiotik

5. Biofilm Bakteri: Benteng Pertahanan Mikroba Multiseluler

Biofilm merupakan komunitas mikroba kompleks yang melekat pada suatu permukaan dan terbungkus dalam matriks ekstraseluler yang sebagian besar tersusun dari polisakarida, protein, dan DNA ekstraseluler yang disekresikan oleh sel-sel bakteri penyusunnya. Pembentukan biofilm memberikan keunggulan adaptif yang signifikan

bagi populasi bakteri, karena matriks ekstraseluler tersebut berfungsi sebagai penghalang fisik yang menghambat penetrasi senyawa antimikroba maupun sel-sel imun fagositik inang, sehingga bakteri yang berada di dalam biofilm dapat bertahan pada konsentrasi antibiotik yang jauh lebih tinggi dibandingkan sel bakteri yang hidup secara planktonik (bebas) di luar struktur biofilm tersebut. Fenomena resistensi terhadap antibiotik pada biofilm ini bersifat fenotipik dan tidak selalu melibatkan mutasi genetik, melainkan lebih disebabkan oleh perubahan fisiologis sel bakteri dalam kondisi metabolisme rendah (*dormancy*) yang umum terjadi pada lapisan dalam struktur biofilm yang kekurangan oksigen dan nutrisi.

Relevansi klinis biofilm sangat signifikan dalam konteks infeksi terkait perangkat medis (*device-associated infections*), seperti infeksi pada kateter intravena, alat pacu jantung, prostesis sendi, dan ventilator mekanis, di mana permukaan benda asing tersebut menjadi substrat ideal bagi kolonisasi dan pembentukan biofilm oleh patogen seperti *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, dan berbagai spesies *Pseudomonas*. Infeksi terkait biofilm pada perangkat medis sering kali memerlukan pengangkatan fisik perangkat yang terkontaminasi sebagai bagian dari tata laksana klinis, karena terapi antibiotik sistemik semata umumnya tidak mampu mengeradikasi biofilm yang sudah terbentuk secara matang. Selain pada perangkat medis, biofilm juga berperan penting dalam patogenesis infeksi kronis seperti infeksi paru pada pasien fibrosis kistik yang terkolonisasi *Pseudomonas aeruginosa*, di mana biofilm yang persisten berkontribusi terhadap penurunan fungsi paru progresif meskipun pasien telah menerima terapi antibiotik intensif secara berkelanjutan.

Tabel 4.2 Perbandingan Karakteristik Bakteri dalam Bentuk Planktonik Versus Biofilm yang Relevan Secara Klinis

Karakteristik	Bakteri Planktonik (Bebas)	Bakteri dalam Biofilm
Sensitivitas antibiotik	Umumnya lebih tinggi	Secara signifikan menurun (fenotipik)
Metabolisme sel	Aktif, pertumbuhan cepat	Bervariasi, sebagian dorman di lapisan dalam

Perlindungan dari imun inang	Minimal	Tinggi (matriks ekstraseluler sebagai barrier)
Strategi eradikasi klinis	Antibiotik sistemik umumnya efektif	Sering memerlukan pengangkatan fisik perangkat/jaringan

6. Studi Kasus Komparatif: COVID-19 dan Mpox sebagai Pandemi Kontemporer

Perbandingan antara pandemi COVID-19 yang disebabkan oleh SARS-CoV-2 dan wabah global *mpox* (sebelumnya disebut *monkeypox*) memberikan ilustrasi instruktif mengenai bagaimana karakteristik biologis virus yang berbeda menghasilkan dinamika epidemiologi dan respons kesehatan masyarakat yang sangat berbeda pula. SARS-CoV-2, sebagai virus RNA dengan tingkat mutasi tinggi dan modus transmisi utama melalui droplet pernapasan serta aerosol, menyebar dengan kecepatan eksponensial yang menimbulkan tekanan luar biasa terhadap sistem kesehatan global dalam hitungan bulan, mendorong respons darurat berskala global termasuk pengembangan vaksin mRNA dalam waktu rekor kurang dari satu tahun. Sebaliknya, virus mpox sebagai virus DNA dari keluarga *Poxviridae* memiliki tingkat mutasi yang relatif lebih rendah, namun wabah 2022-2024 menunjukkan pergeseran epidemiologi signifikan dengan transmisi seksual dan penularan antarmanusia yang berkelanjutan, meluas ke berbagai belahan dunia lainnya.

Dari perspektif tata kelola kesehatan global, kedua pandemi ini sama-sama dideklarasikan sebagai *Public Health Emergency of International Concern* (PHEIC) oleh WHO, namun respons kebijakan yang dihasilkan menunjukkan perbedaan signifikan dalam hal skala mobilisasi sumber daya dan kecepatan pengembangan kontramedis. Ketersediaan vaksin cacar (*smallpox*) yang telah ada sebelumnya, seperti vaksin generasi ketiga MVA-BN, memberikan keunggulan strategis bagi respons mpox karena tidak memerlukan pengembangan platform vaksin baru dari awal sebagaimana yang terjadi pada COVID-19. Namun demikian, akses terhadap vaksin mpox tetap sangat tidak merata secara global, dengan ketersediaan dosis yang jauh lebih terbatas di wilayah endemik Afrika dibandingkan negara-negara berpendapatan tinggi yang

justru menghadapi beban kasus yang relatif lebih rendah, mengulangi pola ketimpangan akses yang teramati selama pandemi COVID-19.

Tabel 4.3 Perbandingan Karakteristik Biologis dan Epidemiologis SARS-Cov-2 dan Virus Mpox Klade Ib sebagai Dua Pandemi Kontemporer

Karakteristik	SARS-CoV-2 (COVID-19)	Mpox Virus (Clade Ib)
Jenis materi genetik	RNA untai tunggal	DNA untai ganda
Modus transmisi utama	Droplet/aerosol pernapasan	Kontak dekat, transmisi seksual
Tingkat mutasi	Relatif tinggi (varian cepat muncul)	Relatif lebih rendah, namun klade baru muncul
Ketersediaan vaksin sebelum wabah	Tidak ada platform spesifik	Vaksin cacar generasi sebelumnya tersedia
Status PHEIC WHO	Dideklarasikan 2020	Dideklarasikan 2022 dan 2024

B. Sains di Balik Vaksin dan Antibiotik: Tantangan Resistensi Bakteri

1. Prinsip Immunologi Vaksinasi

Vaksinasi bekerja berdasarkan prinsip memori imunologis (*immunological memory*), yakni kemampuan sistem imun adaptif untuk mengenali dan merespons lebih cepat serta lebih efektif terhadap patogen yang telah dikenal sebelumnya. Ketika tubuh terpapar antigen melalui vaksin, sel B dan sel T akan teraktivasi dan berdiferensiasi, sebagian menjadi sel efektor yang segera melawan ancaman, dan sebagian lainnya menjadi sel memori yang dapat bertahan dalam tubuh selama bertahun-tahun, bahkan seumur hidup pada beberapa kasus. Pada paparan berikutnya terhadap patogen yang sesungguhnya, sel memori ini memungkinkan respons imun sekunder yang jauh lebih cepat dan kuat dibandingkan respons primer, sehingga mampu mencegah

perkembangan penyakit klinis atau setidaknya mengurangi keparahannya secara signifikan.

Secara lebih spesifik, sel memori yang terbentuk pascavaksinasi terdiri atas beberapa subpopulasi dengan fungsi dan lokasi anatomis yang berbeda, termasuk sel B memori yang bersirkulasi dalam darah dan siap berdiferensiasi menjadi sel plasma penghasil antibodi saat terpapar ulang antigen, sel T memori sentral (*central memory T cells*) yang berlokasi di organ limfoid sekunder dan memberikan respons proliferasi cepat, serta sel T memori residen jaringan (*tissue-resident memory T cells*) yang menetap secara permanen pada jaringan perifer seperti paru-paru atau kulit dan memberikan pertahanan lini pertama yang sangat cepat pada lokasi infeksi awal. Heterogenitas subpopulasi sel memori ini menjelaskan mengapa durasi dan kualitas proteksi vaksin dapat bervariasi signifikan antarpatogen dan antarplatform vaksin, sehingga strategi vaksinasi booster pada interval waktu tertentu sering diperlukan untuk mempertahankan titer antibodi protektif dan memperkuat populasi sel memori, khususnya untuk patogen dengan tingkat mutasi tinggi seperti virus influenza dan SARS-CoV-2 yang terus menghasilkan varian baru yang dapat sebagian menghindari respons imun yang terbentuk dari infeksi atau vaksinasi sebelumnya.

2. Teknologi mRNA: Revolusi Platform Vaksin Modern

Pengembangan vaksin berbasis *messenger RNA* (mRNA) merupakan salah satu pencapaian paling transformatif dalam bioteknologi modern. Kontribusi mendasar terhadap pengembangan platform ini diakui melalui penganugerahan Hadiah Nobel Fisiologi atau Kedokteran tahun 2023 kepada Katalin Karikó dan Drew Weissman atas penemuan modifikasi nukleosida yang memungkinkan pengembangan vaksin mRNA yang efektif dan aman (The Nobel Assembly at Karolinska Institutet, 2023). Berbeda dengan vaksin konvensional yang menggunakan virus hidup yang dilemahkan, virus yang diinaktivasi, atau protein antigen, vaksin mRNA memanfaatkan molekul RNA hasil transkripsi *in vitro* yang dikemas dalam *lipid nanoparticles* (LNP). Setelah memasuki sel, mRNA diterjemahkan oleh ribosom menjadi protein antigen yang kemudian memicu respons imun adaptif tanpa memasukkan materi genetik ke dalam genom sel inang (Pardi et al., 2018).

Keunggulan utama platform mRNA terletak pada kecepatan desain dan fleksibilitas produksinya. Setelah sekuens genom patogen diketahui, kandidat vaksin dapat dikembangkan hanya dalam beberapa minggu. Uji klinis fase III menunjukkan bahwa vaksin mRNA-1273 dan BNT162b2 memiliki efikasi sekitar 94–95% terhadap COVID-19 simptomatik pada awal pandemi (Baden et al., 2021; Polack et al., 2020). Selanjutnya, meta-analisis yang mencakup puluhan penelitian menunjukkan bahwa vaksin mRNA tetap memberikan efektivitas tinggi terhadap penyakit berat dan rawat inap, meskipun efektivitas terhadap infeksi menurun seiring munculnya varian baru dan berjalannya waktu (Wu et al., 2024). Penelitian kohort terbaru terhadap vaksin mRNA yang diperbarui untuk varian JN.1 juga menunjukkan perlindungan yang tinggi terhadap rawat inap dan kematian pada kelompok lanjut usia dengan profil keamanan yang tetap baik (Link-Gelles et al., 2025).

Meskipun demikian, teknologi mRNA masih menghadapi sejumlah tantangan, antara lain imunogenisitas bawaan yang tidak diinginkan, stabilitas molekul RNA yang rendah, serta efisiensi sistem penghantaran agar molekul mRNA dapat mencapai sel target sebelum mengalami degradasi. Oleh karena itu, berbagai inovasi terus dikembangkan, termasuk platform *self-amplifying RNA* (saRNA), optimalisasi struktur *cap* dan daerah *untranslated regions* (UTRs), serta pengembangan sistem penghantaran generasi baru berbasis nanopartikel lipid untuk meningkatkan efisiensi translasi dan menurunkan kebutuhan dosis vaksin (Hou et al., 2021; Kitandwe et al., 2024). Selain digunakan untuk penyakit infeksi, platform mRNA kini juga berkembang pesat dalam imunoterapi kanker, dan beberapa kandidat vaksin kanker berbasis mRNA telah memasuki uji klinis fase III, menandai perluasan aplikasi teknologi ini menuju kedokteran presisi (Deng et al., 2025).

Tabel 4.4 Perbandingan Generasi Teknologi Vaksin Beserta Kelebihan dan Keterbatasan Utamanya

Generasi/Jenis Vaksin	Mekanisme Kerja	Kelebihan Utama	Keterbatasan Utama
Vaksin inaktif/ dilemahkan	Patogen utuh yang dilemahkan/dimati-kan	Respons imun luas, teknologi mapan	Waktu produksi lama, risiko reversi

Generasi/Jenis Vaksin	Mekanisme Kerja	Kelebihan Utama	Keterbatasan Utama
			(<i>live attenuated</i>)
Vaksin subunit protein	Antigen protein murni	Profil keamanan baik	Imunogenisitas sering lebih rendah
Vaksin vektor virus	Vektor virus membawa gen antigen	Respons imun seluler kuat	Imunitas terhadap vektor dapat menurunkan efikasi booster
Vaksin mRNA (LNP)	mRNA sintetik diterjemahkan jadi antigen	Pengembangan cepat, fleksibel terhadap varian baru	Stabilitas suhu, biaya rantai dingin, riset jangka panjang masih berlanjut

Imunitas Kawanan dan Tantangan Keraguan Vaksin (*Vaccine Hesitancy*)

Konsep imunitas kawanan (*herd immunity*) merujuk pada kondisi ketika proporsi individu yang kebal terhadap suatu patogen dalam suatu populasi telah cukup tinggi sehingga rantai penularan terputus secara efektif, sehingga turut melindungi individu yang belum atau tidak dapat divaksinasi, misalnya bayi yang terlalu muda untuk menerima vaksin atau individu dengan kontraindikasi medis tertentu. Pencapaian ambang imunitas kawanan bergantung pada dua variabel utama, yakni efikasi vaksin dan tingkat kepatuhan masyarakat dalam mengikuti program vaksinasi; model matematis menunjukkan bahwa apabila efikasi vaksin sebesar 80%, maka cakupan vaksinasi minimal sebesar 75% pada populasi umum diperlukan untuk mencapai ambang imunitas kawanan terhadap COVID-19 (Popa *et al.*, 2022). Heterogenitas demografis dalam cakupan vaksinasi, termasuk kelompok usia yang belum memenuhi syarat vaksinasi maupun kelompok yang menunjukkan keraguan tinggi, secara signifikan meningkatkan kompleksitas pencapaian ambang imunitas kawanan pada tingkat populasi.

Keraguan vaksin (*vaccine hesitancy*) didefinisikan oleh *WHO Strategic Advisory Group of Experts* (SAGE) sebagai penundaan penerimaan atau penolakan vaksinasi meskipun vaksin tersedia secara memadai, suatu fenomena yang bersifat kompleks, bervariasi, dan sangat bergantung pada konteks waktu, tempat, serta jenis vaksin yang bersangkutan. Tinjauan sistematis terhadap determinan kognitif keraguan vaksin COVID-19 yang menganalisis 91 artikel dari 1.171 rekaman awal menemukan tingkat keraguan vaksinasi rata-rata sebesar 29,72%, dengan kurangnya kepercayaan (*lack of confidence*) dan rasa puas diri berlebihan (*complacency*) teridentifikasi sebagai faktor prediktif paling sering muncul. Determinan keraguan vaksin yang lain mencakup kekhawatiran mengenai keamanan dan efek samping vaksin, penyebaran misinformasi dan teori konspirasi, rendahnya kepercayaan terhadap pemerintah atau sistem layanan kesehatan, serta keyakinan budaya atau religius tertentu yang bertentangan dengan praktik vaksinasi.

Implikasi keraguan vaksin terhadap kesehatan masyarakat tidak bersifat hipotetis, melainkan telah terbukti secara empiris melalui penurunan cakupan imunisasi global untuk penyakit yang dapat dicegah dengan vaksin. Data terbaru menunjukkan bahwa cakupan vaksinasi campak dosis ganda global menurun sebesar 3,7% dari tahun 2019 hingga 2023, dengan rata-rata cakupan dua dosis global hanya mencapai 65,3% pada tahun 2023, jauh di bawah ambang 95% yang direkomendasikan WHO untuk mencegah penularan virus campak yang sangat menular. Akibatnya, tingkat imunitas kawanan anti-campak yang memadai untuk menghentikan penularan virus dengan tingkat penularan tinggi (*basic reproduction number/R₀ ≥ 15*) hanya tercapai di kawasan WHO Pasifik Barat dan Eropa, sementara kawasan lain berisiko mengalami wabah campak berulang akibat akumulasi populasi rentan yang tidak terlindungi secara memadai.

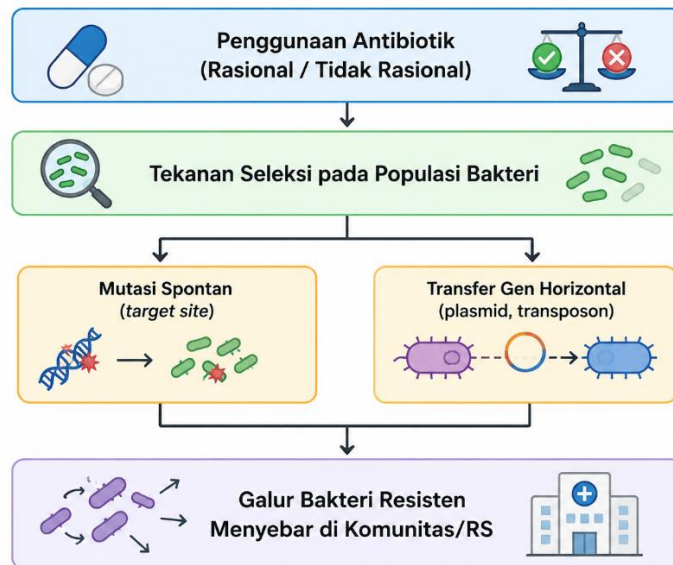
3. Mekanisme Kerja Antibiotik dan Munculnya Resistensi

Antibiotik bekerja melalui berbagai mekanisme yang menargetkan proses biologis esensial bakteri, seperti penghambatan sintesis dinding sel (misalnya antibiotik β -laktam), penghambatan sintesis protein melalui ikatan dengan subunit ribosom bakteri (misalnya makrolida dan aminoglikosida), penghambatan sintesis asam nukleat

(misalnya fluorokuinolon), serta gangguan integritas membran sel (misalnya polimiksin). Namun, penggunaan antibiotik yang luas dan berkepanjangan telah menciptakan tekanan seleksi yang mendorong evolusi resistensi pada berbagai spesies bakteri. Tinjauan ilmiah menunjukkan bahwa mekanisme resistensi utama meliputi modifikasi target antibiotik, inaktivasi antibiotik melalui enzim seperti β -laktamase, penurunan akumulasi obat akibat berkurangnya permeabilitas membran atau peningkatan aktivitas *efflux pump*, serta penyebaran gen resistensi melalui transfer gen horizontal yang dimediasi oleh plasmid, transposon, maupun integron (Murray et al., 2022; Hernando-Amado et al., 2019).

Resistensi antimikroba (*antimicrobial resistance* atau AMR) telah menjadi salah satu ancaman kesehatan masyarakat terbesar di dunia. Analisis *Global Burden of Disease* memperkirakan bahwa sekitar 1,27 juta kematian pada tahun 2019 secara langsung disebabkan oleh infeksi bakteri yang resisten terhadap antibiotik, sedangkan hampir 5 juta kematian berkaitan dengan AMR secara keseluruhan (Murray et al., 2022). Berbagai proyeksi menunjukkan bahwa tanpa intervensi yang efektif, jumlah kematian akibat AMR dapat meningkat secara substansial dalam beberapa dekade mendatang (World Health Organization, 2023). Laporan *Global Antimicrobial Resistance and Use Surveillance System* (GLASS) menunjukkan tingginya tingkat resistensi pada berbagai patogen prioritas, termasuk *Escherichia coli* yang resisten terhadap sefalosporin generasi ketiga dan *Staphylococcus aureus* resisten metisilin (*methicillin-resistant Staphylococcus aureus* atau MRSA), yang menjadi tantangan besar bagi pelayanan kesehatan di berbagai negara (World Health Organization, 2023).

Gambar 4.2 Alur Umum Mekanisme Evolusi dan Penyebaran Resistensi Antimikroba (AMR) Pada Populasi Bakteri



4. Faktor Pendorong dan Strategi Mitigasi Resistensi Antimikroba

Faktor pendorong krisis resistensi antimikroba (*antimicrobial resistance* atau AMR) bersifat multidimensional dan melibatkan sektor kesehatan manusia, kesehatan hewan, pertanian, akuakultur, serta lingkungan dalam kerangka pendekatan *One Health*. Penggunaan antimikroba pada sektor peternakan dan akuakultur, baik untuk terapi, profilaksis, metaflaksis, maupun sebagai pemacu pertumbuhan di beberapa negara, meningkatkan tekanan seleksi terhadap bakteri resisten yang dapat menyebar melalui rantai pangan maupun lingkungan (World Health Organization, 2023; Van Boeckel et al., 2019). Pada sektor kesehatan manusia, tinjauan sistematis global menunjukkan bahwa penjualan antibiotik tanpa resep masih sangat tinggi, terutama di negara berpendapatan rendah dan menengah (*low- and middle-income countries* atau LMICs). Praktik ini dipengaruhi oleh tingginya permintaan masyarakat, keterbatasan akses terhadap layanan kesehatan formal, lemahnya pengawasan regulasi, serta belum optimalnya implementasi program *antimicrobial stewardship* (Auta et al., 2019).

Selain faktor pada sisi permintaan, berbagai faktor struktural pada sisi pasokan turut memperburuk situasi, antara lain distribusi antibiotik yang kurang terkendali, keterbatasan fasilitas diagnostik mikrobiologi untuk mendukung terapi berbasis kultur dan uji kepekaan, serta lemahnya pengawasan terhadap residu antimikroba pada produk pangan asal hewan. Kombinasi faktor-faktor tersebut menyebabkan penggunaan antibiotik spektrum luas secara empiris menjadi lebih sering, sementara akses antibiotik tanpa pengawasan memperbesar peluang terjadinya penggunaan yang tidak rasional. Oleh karena itu, pengendalian AMR memerlukan pendekatan sistemik yang mencakup penguatan tata kelola antibiotik, peningkatan kapasitas diagnostik, edukasi masyarakat, serta pengawasan lintas sektor dalam kerangka *One Health* (WHO, 2023).

Di sisi lain, penelitian dan pengembangan antibiotik baru menghadapi tantangan ekonomi yang besar karena keuntungan finansial yang relatif rendah dibandingkan obat untuk penyakit kronis. Laporan WHO menunjukkan bahwa antara tahun 2017 hingga 2023 hanya sejumlah kecil antibiotik baru yang memperoleh persetujuan regulator, dan sangat sedikit yang memiliki aktivitas terhadap patogen prioritas kritis seperti *carbapenem-resistant Acinetobacter baumannii* (CRAB). Di antara antibiotik tersebut, *cefiderocol* dan kombinasi *sulbactam–durlobactam* merupakan dua agen yang menunjukkan efektivitas terhadap CRAB (WHO, 2023). Untuk mengatasi kesenjangan tersebut, WHO bersama *Global Antibiotic Research and Development Partnership* (GARDP) dan berbagai mitra internasional mengembangkan mekanisme insentif *push* dan *pull* guna mendorong inovasi antibiotik baru sekaligus memastikan akses yang berkelanjutan, terutama di negara berpendapatan rendah dan menengah yang menanggung beban AMR paling tinggi (WHO, 2023).

Studi Kasus: Strategi Pengendalian AMR di Indonesia

Pemerintah Indonesia merespons krisis AMR global melalui Peraturan Menteri Koordinator Bidang Pembangunan Manusia dan Kebudayaan Nomor 7 Tahun 2021 tentang Rencana Aksi Nasional Pengendalian Resistensi Antimikroba (RAN-PRA) periode 2020-2024, yang mengatur koordinasi lintas sektor dalam pelaksanaan rencana aksi pengendalian AMR dengan pendekatan *One Health* (Kemenko PMK,

2024). RAN-PRA disusun untuk memberikan arah kebijakan perencanaan, pelaksanaan, komunikasi, koordinasi, dan kerja sama program pengendalian resistensi antimikroba antarpemangku kepentingan di tingkat pusat dan daerah, dengan kegiatan yang mencakup peningkatan pengetahuan dan kesadaran masyarakat, penguatan surveilans dan penelitian, serta pencegahan dan pengendalian infeksi secara komprehensif (WHO SEARO, 2022). Pelaksanaan kebijakan ini melibatkan kolaborasi lintas kementerian, termasuk Kementerian Kesehatan, Kementerian Pertanian, dan Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM), yang masing-masing memiliki peta jalan implementasi spesifik sesuai kewenangan sektoral mereka.

Data surveilans nasional mengungkap tantangan signifikan dalam implementasi RAN-PRA, misalnya angka keberhasilan pengobatan tuberkulosis resisten obat (TB RO) di Indonesia yang hanya mencapai 19,23%, jauh tertinggal dibandingkan angka keberhasilan pengobatan tuberkulosis sensitif obat (TB SO) yang mencapai 76,74% (RAN-PRA, 2022). Selain pada manusia, resistensi antimikroba termasuk pada bakteri *Escherichia coli* juga terdeteksi pada hewan ternak seperti unggas, babi, dan sapi, menegaskan relevansi pendekatan *One Health* yang mengintegrasikan sektor kesehatan manusia, hewan, pangan, dan lingkungan secara simultan. Kolaborasi internasional melalui proyek *Multi-Partner Trust Fund* (MPTF) yang melibatkan Organisasi Pangan dan Pertanian (FAO), WHO, dan Organisasi Kesehatan Hewan Dunia (WOAH) sejak tahun 2021 hingga 2023 telah membantu memperkuat sistem penggunaan antimikroba yang bijak melalui program penatagunaan antimikroba (*antimicrobial stewardship*) serta pencegahan dan pengendalian infeksi berbasis air, sanitasi, dan kebersihan.

Sebagai kelanjutan RAN-PRA 2020-2024, Kementerian Kesehatan meluncurkan Strategi Nasional (Stranas) Pengendalian Resistensi Antimikroba pada Agustus 2024 yang dibangun atas empat pilar utama: pencegahan penyakit infeksi, akses terhadap layanan kesehatan esensial, diagnosis tepat waktu dan akurat, serta pengobatan yang tepat dan terjamin kualitasnya (Indonesia.go.id, 2024). Stranas ini memuat empat belas intervensi utama yang akan menjadi masukan bagi penyusunan rencana aksi nasional pengendalian AMR lintas sektor periode 2025-2029, dengan pendekatan berorientasi manusia yang

secara langsung menjawab hambatan-hambatan yang dihadapi masyarakat dalam mengakses layanan pencegahan, diagnosis, dan pengobatan infeksi resistan obat. Studi kasus Indonesia ini menggambarkan bahwa penanganan AMR memerlukan komitmen kebijakan jangka panjang yang konsisten, didukung oleh data surveilans yang akurat dan kolaborasi multisektor yang berkelanjutan, bukan sekadar intervensi jangka pendek yang bersifat reaktif terhadap krisis kesehatan tertentu.

Gambar 4.3 Struktur Koordinasi Kebijakan Pengendalian AMR di Indonesia dari RAN-PRA 2020-2024 Menuju Stranas AMR 2024 dan Rencana Lanjutan 2025-2029



5. Terapi Fag (*Phage Therapy*): Alternatif di Tengah Krisis Resistensi

Di tengah terbatasnya ketersediaan antibiotik baru dan meningkatnya resistensi terhadap antibiotik lini terakhir, terapi bakteriofag (*phage therapy*) kembali memperoleh perhatian sebagai alternatif maupun pelengkap terapi antibiotik konvensional. Bakteriofag merupakan virus yang secara spesifik menginfeksi dan melisis bakteri tanpa menginfeksi sel eukariotik manusia. Karena memiliki mekanisme kerja yang berbeda dari antibiotik, bakteriofag berpotensi digunakan untuk mengatasi infeksi yang disebabkan oleh bakteri multiresisten (*multidrug-resistant* atau MDR) yang tidak lagi responsif terhadap terapi antibiotik standar. Tinjauan sistematis terhadap penggunaan klinis terapi fag melaporkan tingginya tingkat keberhasilan eradikasi bakteri pada berbagai infeksi sulit diobati, terutama pada pasien yang sebelumnya mengalami kegagalan terapi antibiotik (Uyttebroek et al., 2022).

Meskipun demikian, bukti dari uji klinis acak terkontrol (*randomized controlled trials*) masih terbatas. Tantangan utama meliputi pemilihan fag yang sesuai dengan isolat bakteri pasien, optimasi dosis dan rute pemberian, serta waktu terapi yang tepat. Selain itu, bakteri

dapat mengembangkan resistensi terhadap fag melalui perubahan reseptor permukaan maupun sistem pertahanan seperti CRISPR–Cas. Menariknya, resistensi terhadap fag sering disertai *fitness cost* yang menyebabkan berkurangnya virulensi atau meningkatnya kembali sensitivitas bakteri terhadap antibiotik tertentu. Fenomena ini membuka peluang penggunaan kombinasi fag dan antibiotik sebagai strategi terapi sinergis untuk mengatasi infeksi bakteri resisten (Kortright et al., 2019; Gordillo Altamirano & Barr, 2019).

Pengembangan terapi fag terus mengalami kemajuan, ditandai dengan meningkatnya jumlah uji klinis yang sedang berlangsung di berbagai negara untuk mengevaluasi keamanan dan efektivitasnya pada berbagai jenis infeksi bakteri. Selain penggunaan fag alami, perhatian juga semakin besar diarahkan pada bakteriofag hasil rekayasa genetika (*engineered phages*) yang dirancang untuk meningkatkan aktivitas antibakteri, memperluas spektrum inang, atau menghantarkan muatan genetik tertentu. Potensi teknologi ini diakui secara internasional ketika *engineered phages* dimasukkan ke dalam daftar *Top 10 Emerging Technologies of 2023* oleh *World Economic Forum*, mencerminkan harapan bahwa pendekatan tersebut dapat menjadi salah satu strategi penting dalam menghadapi krisis resistensi antimikroba, terutama terhadap patogen Gram-negatif multiresisten seperti *Klebsiella pneumoniae* dan *Pseudomonas aeruginosa* (*World Economic Forum*, 2023).

Tabel 4.5 Perbandingan Karakteristik Utama Antibiotik Konvensional dan Terapi Fag sebagai Alternatif Penanganan Infeksi Bakteri Resistensi

Aspek	Antibiotik Konvensional	Terapi Fag (<i>Bacteriophage</i>)
Spektrum aksi	Umumnya luas (<i>broad-spectrum</i>)	Sangat spesifik per galur bakteri
Dampak pada mikrobiota normal	Sering mengganggu signifikan	Minimal, karena spesifisitas tinggi
Risiko resistensi	Tinggi, lintas kelas obat	Ada, namun sering disertai <i>fitness cost</i>

Aspek	Antibiotik Konvensional	Terapi Fag (<i>Bacteriophage</i>)
Status regulasi	Mapan, disetujui luas	Umumnya akses terbatas/ <i>compassionate use</i>

6. Mekanisme Evasi Imun oleh Patogen

Patogen memiliki berbagai strategi untuk menghindari deteksi dan penghancuran oleh sistem imun inang. Salah satu contoh adalah virus influenza, yang menghindari sistem imun melalui mutasi antigenik yang cepat, memungkinkan virus ini untuk mengubah protein permukaannya dan menghindari respons antibodi yang sudah ada. Bakteri seperti *Mycobacterium tuberculosis* menggunakan mekanisme lain dengan bertahan hidup dan bereplikasi di dalam makrofag, sel yang biasanya menghancurkan patogen.

Protozoa penyebab malaria, *Plasmodium falciparum*, menghindari sistem imun dengan mengubah protein permukaannya secara berkala, suatu strategi yang dikenal sebagai variasi antigenik. Selain itu, patogen seperti HIV menggunakan strategi penghindaran dengan menyerang dan menetap dalam sel T, komponen kunci dari sistem imun adaptif, sehingga melemahkan respons imun secara keseluruhan.

7. Implikasi bagi Pendidikan Sains dan Kebijakan Publik

Pemahaman terintegrasi mengenai mekanisme infeksi, vaksinasi, dan resistensi antimikroba memberikan landasan penting bagi literasi sains kesehatan masyarakat yang krusial di era pascapandemi. Pendidikan sains pada jenjang sekolah maupun perguruan tinggi perlu menekankan bahwa keberhasilan pengendalian penyakit infeksi tidak hanya bergantung pada kemajuan teknologi biomedis semata, melainkan juga pada perilaku rasional individu dan kebijakan publik yang berbasis bukti ilmiah, termasuk kepatuhan terhadap regimen pengobatan, partisipasi dalam program vaksinasi, serta dukungan terhadap regulasi penggunaan antimikroba yang lebih ketat. Tanpa kesadaran kolektif semacam ini, kemajuan ilmiah dalam mikrobiologi terapan berisiko tidak dimanfaatkan secara optimal, sementara ancaman terus berkembang.



BAB V

NANOTEKNOLOGI: KETIKA UKURAN MENJADI PENTING

Richard Feynman, dalam ceramah klasiknya pada tahun 1959 berjudul "*There's Plenty of Room at the Bottom*", pertama kali mengajukan gagasan bahwa manusia suatu saat akan mampu memanipulasi materi pada skala atom dan molekul, sebuah visi yang kini telah terwujud melalui bidang nanoteknologi modern. Nanoteknologi merujuk pada ilmu dan rekayasa material pada skala nanometer, yakni rentang ukuran antara 1 hingga 100 nanometer, di mana satu nanometer setara dengan sepersemiliar meter atau kira-kira seperseratus ribu diameter rambut manusia. Pada skala inilah, material menunjukkan perilaku fisik, kimia, dan biologis yang secara fundamental berbeda dari perilaku material yang sama pada skala makroskopik (*bulk*), sebuah fenomena yang menjadi inti pembahasan bab ini dan yang menjustifikasi mengapa ukuran, dalam konteks nanoteknologi, menjadi parameter yang benar-benar menentukan.

Penting dicatat bahwa istilah "nanoteknologi" sebagaimana digunakan dalam konsepsi modern pertama kali dipopulerkan oleh fisikawan Norio Taniguchi pada tahun 1974, dan kemudian dikembangkan lebih lanjut menjadi visi "manufaktur molekuler" oleh K. Eric Drexler pada dekade 1980-an, yang menekankan pendekatan deterministik dalam manipulasi atom dan molekul secara presisi, berbeda dari proses stokastik yang mendominasi kimia sintesis konvensional. Perkembangan definisi ini penting untuk dipahami karena nanoteknologi kontemporer kini mencakup spektrum yang jauh lebih luas dibandingkan visi awal manufaktur molekuler Drexler, meliputi tidak hanya manipulasi atom secara deterministik, tetapi juga sintesis material berstruktur nano melalui pendekatan kimia dan fisika konvensional yang dioptimalkan untuk menghasilkan sifat-sifat unik pada skala nano, sebagaimana akan dibahas secara mendalam pada sub-bab berikutnya.

Bab ini disusun untuk mengulas dua dimensi utama nanoteknologi kontemporer: pertama, fondasi ilmiah mengenai mengapa dan bagaimana material pada skala nano memperoleh sifat-sifat unik yang tidak dijumpai pada skala besar, termasuk fenomena kuantum, peningkatan rasio luas permukaan terhadap volume, dan efek permukaan/tepi yang dominan; kedua, aplikasi praktis nanoteknologi pada dua sektor yang paling transformatif yakni pengobatan (nanomedis) dan elektronik (nanoelektronik), lengkap dengan tantangan keamanan dan etika yang menyertai adopsi teknologi ini secara luas di masyarakat. Pendekatan yang digunakan berupaya menjembatani pemahaman konseptual fisika dan kimia material dengan implikasi praktis yang dapat dirasakan langsung dalam kehidupan sehari-hari, mulai dari pengobatan kanker presisi hingga perangkat elektronik yang semakin kecil dan bertenaga tinggi.

Relevansi nanoteknologi bagi Indonesia juga menjadi perhatian khusus dalam bab ini, mengingat negara ini memiliki potensi besar sumber daya mineral yang relevan bagi industri nanomaterial, sekaligus kebutuhan mendesak untuk meningkatkan kapasitas riset dan pengembangan teknologi tinggi guna mendukung transformasi ekonomi berbasis inovasi. Pemahaman yang kokoh mengenai prinsip dasar nanoteknologi menjadi prasyarat penting bagi generasi ilmuwan dan insinyur Indonesia untuk berpartisipasi secara kompetitif dalam revolusi material abad ke-21 ini, sekaligus memungkinkan masyarakat awam mengevaluasi secara kritis klaim-klaim pemasaran produk "nano" yang semakin marak beredar di pasar konsumen tanpa landasan ilmiah yang memadai.

A. Sifat Unik Material pada Skala Nano

1. Mengapa Ukuran Menjadi Penting: Rasio Luas Permukaan terhadap Volume

Salah satu prinsip paling fundamental yang menjelaskan perilaku unik material nano adalah peningkatan drastis rasio luas permukaan terhadap volume (*surface-area-to-volume ratio*) seiring pengecilan ukuran partikel. Secara matematis, ketika suatu partikel berbentuk bola dibagi menjadi partikel-partikel yang lebih kecil dengan volume total yang sama, luas permukaan total partikel-partikel kecil tersebut

meningkat secara signifikan, sehingga proporsi atom yang berada pada atau dekat permukaan partikel menjadi jauh lebih besar dibandingkan proporsi atom pada partikel berukuran besar. Implikasi fundamental dari fenomena ini adalah bahwa pada skala nano, perilaku material semakin didominasi oleh karakteristik atom-atom permukaan yang memiliki ikatan kimia tidak lengkap (*dangling bonds*) dan energi permukaan tinggi, alih-alih oleh karakteristik atom-atom dalam (*bulk*) yang mendominasi perilaku material pada skala makroskopik konvensional.

Konsekuensi praktis dari peningkatan rasio luas permukaan ini sangat signifikan bagi reaktivitas kimia material. Partikel nano umumnya menunjukkan reaktivitas katalitik yang jauh lebih tinggi dibandingkan material curah dengan komposisi kimia identik, karena lebih banyak atom yang tersedia untuk berinteraksi dengan molekul reaktan di lingkungan sekitarnya. Fenomena ini dimanfaatkan secara luas dalam katalisis heterogen industri, di mana nanopartikel logam mulia seperti platinum dan paladium digunakan sebagai katalis dalam konverter katalitik kendaraan bermotor maupun proses sintesis kimia industri, dengan efisiensi yang jauh lebih tinggi per gram material dibandingkan penggunaan logam dalam bentuk curah. Selain reaktivitas kimia, peningkatan rasio luas permukaan juga memengaruhi sifat mekanik, termal, dan optik material secara signifikan, menciptakan dasar fisik bagi hampir seluruh aplikasi nanoteknologi.

Gambar 5.1 Ilustrasi Konseptual Peningkatan Rasio Luas Permukaan Terhadap Volume Saat Material dibagi Menjadi Partikel Skala Nano dengan Volume Total yang Sama



2. Efek Kurungan Kuantum (*Quantum Confinement*)

Fenomena fisika kedua yang menjadi inti keunikan material nano adalah efek kurungan kuantum (*quantum confinement effect*), yang muncul ketika dimensi spasial suatu material mendekati atau lebih kecil dari panjang gelombang de Broglie elektron di dalamnya. Pada material curah, elektron dan lubang elektron (*electron-hole pair*, atau eksiton) dapat bergerak relatif bebas dalam pita energi yang kontinu; namun, ketika dimensi material dikecilkan hingga skala nano, pergerakan elektron menjadi terbatas secara spasial, sehingga tingkat energi yang semula kontinu berubah menjadi tingkat energi diskret yang terkuantisasi. Fenomena ini paling jelas teramati pada titik kuantum (*quantum dot*), yakni nanokristal semikonduktor berukuran nol-dimensi (0D) dengan diameter biasanya berkisar antara 2 hingga 10 nanometer.

Manifestasi paling dikenal dari efek kurungan kuantum (*quantum confinement effect*) adalah perubahan warna emisi cahaya yang bergantung pada ukuran titik kuantum (*quantum dots*). Ketika ukuran kristal semikonduktor diperkecil hingga berada pada skala nanometer, tingkat energi elektron menjadi terkuantisasi sehingga celah pita energi (*bandgap*) meningkat. Akibatnya, titik kuantum berukuran lebih kecil memancarkan foton dengan energi yang lebih tinggi dan panjang

gelombang yang lebih pendek, menghasilkan emisi berwarna biru. Sebaliknya, titik kuantum yang berukuran lebih besar memiliki *bandgap* yang lebih kecil sehingga memancarkan cahaya dengan panjang gelombang lebih panjang, menghasilkan emisi yang bergeser ke arah merah (Bawendi et al., 1990; Brus, 1984). Penemuan dan pengembangan titik kuantum merupakan tonggak penting dalam ilmu material modern dan diakui melalui penganugerahan Hadiah Nobel Kimia 2023 kepada Mounji G. Bawendi, Louis E. Brus, dan Alexei I. Ekimov atas penemuan serta sintesis titik kuantum. Saat ini, titik kuantum telah dimanfaatkan secara luas pada layar *Quantum-dot Light Emitting Diode* (QLED), pencitraan biologis berbasis fluoresensi, sensor optik, dan berbagai aplikasi fotonik serta komputasi kuantum (Bawendi et al., 1990).

Tabel 5.1 Klasifikasi Material Nano Berdasarkan Dimensi Kurungan Kuantum dan Karakteristik Energi Elektroniknya

Dimensi Material	Contoh	Tingkat Kurungan Elektron	Karakteristik Energi
3D (<i>Bulk</i> /curah)	Logam atau semikonduktor curah konvensional	Tidak ada kurungan	Pita energi kontinu
2D (Lapisan tipis/nanolayer)	Graphene, monolayer WS ₂	Kurungan satu arah	Energi terkuantisasi pada satu sumbu
1D (Nanotube/nanowire)	Carbon nanotube, nanowire SiC	Kurungan dua arah	Pita energi seperti kawat kuantum
0D (Titik kuantum/quantum dot)	Nanokristal CdSe, PbS	Kurungan tiga arah penuh	Tingkat energi diskret penuh

3. Sifat Mekanik, Optik, dan Termal Material Nano

Selain efek kuantum dan rasio permukaan, material nano juga menunjukkan keunggulan sifat mekanik yang luar biasa dibandingkan material curah dengan komposisi sama, terutama pada material karbon

berstruktur nano seperti graphene dan *carbon nanotube*. Graphene, sebagai lembaran karbon setebal satu atom yang tersusun dalam kisi heksagonal dua dimensi, memiliki modulus Young setinggi 1 terapascal (TPa), transmitansi optik tinggi mencapai 97,7%, konduktivitas termal sebesar $5 \times 10^3 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, serta mobilitas pembawa muatan listrik mencapai $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, menjadikannya salah satu material terkuat sekaligus paling konduktif yang pernah ditemukan manusia. Kombinasi sifat mekanik, optik, dan elektrik yang luar biasa ini menjadikan graphene sebagai kandidat material masa depan untuk berbagai aplikasi mulai dari elektroda transparan fleksibel hingga komposit struktural ultra-ringan namun sangat kuat.

Sifat termal material nano juga menunjukkan anomali menarik dibandingkan prediksi berdasarkan hukum fisika klasik untuk material curah. Pada skala nano, fonon (kuantum getaran kisi kristal yang membawa energi termal) mengalami pembatasan jalur bebas rata-rata (*mean free path*) akibat ukuran partikel yang sangat kecil, sehingga konduktivitas termal material nano dapat berbeda signifikan, baik meningkat maupun menurun tergantung struktur spesifiknya dibandingkan material curah dengan komposisi kimia identik. Fenomena ini dimanfaatkan dalam pengembangan material termoelektrik nano yang dirancang khusus untuk memiliki konduktivitas termal rendah namun konduktivitas listrik tinggi, suatu kombinasi sifat yang sulit dicapai pada material curah konvensional namun sangat diinginkan untuk aplikasi pemanenan energi termal (*thermoelectric energy harvesting*) dari panas buangan industri maupun otomotif.

4. Metode Sintesis Nanomaterial: Pendekatan *Top-Down* dan *Bottom-Up*

Sintesis nanomaterial pada dasarnya dapat dikelompokkan ke dalam dua pendekatan fundamental yang berbeda secara filosofis, yakni pendekatan dari atas ke bawah (*top-down*) dan pendekatan dari bawah ke atas (*bottom-up*). Pendekatan *top-down* bersifat subtraktif, di mana material curah berukuran besar dipotong, digiling, atau diukir secara bertahap hingga mencapai dimensi nano, analog dengan seorang pematung yang mengukir patung dari balok batu utuh; teknik representatif pendekatan ini mencakup *ball milling* mekanis, litografi berbasis templat, dan deposisi uap fisik (*Physical Vapor*

Deposition/PVD). Sebaliknya, pendekatan *bottom-up* bersifat aditif, merakit struktur nano dari komponen yang lebih kecil seperti atom, molekul, atau klaster, dengan memanfaatkan gaya antarmolekul jarak pendek seperti gaya *van der Waals* dan interaksi elektrostatik untuk mendorong penggabungan spontan komponen-komponen tersebut menjadi partikel berukuran nanometer.

Pendekatan *bottom-up* umumnya lebih disukai baik untuk sintesis skala laboratorium maupun industri karena menawarkan kontrol yang lebih presisi terhadap ukuran dan sifat material melalui pengaturan kondisi reaksi secara cermat, menghasilkan distribusi ukuran partikel yang lebih homogen dibandingkan metode *top-down*. Teknik *bottom-up* yang umum digunakan mencakup sintesis sol-gel yang memungkinkan kontrol presisi terhadap komposisi dan struktur material melalui pembentukan gel dari larutan prekursor, deposisi uap kimia (*Chemical Vapor Deposition*/CVD) yang menghasilkan nanomaterial pada permukaan substrat melalui reaksi kimia antara prekursor gas, sintesis hidrotermal yang memanfaatkan lingkungan bertekanan dan bersuhu tinggi untuk menghasilkan nanomaterial dengan morfologi khas, serta *electrospinning* yang menciptakan nanoserat berluas permukaan besar melalui penerapan medan listrik pada larutan polimer (Mahmud, 2023). Pemilihan metode sintesis yang tepat sangat bergantung pada aplikasi target, mengingat struktur dan morfologi nanomaterial yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh mekanisme pertumbuhan spesifik teknik yang digunakan, sehingga material yang cocok untuk satu aplikasi belum tentu optimal jika disintesis menggunakan teknik berbeda untuk aplikasi lain.

Perkembangan terbaru juga menunjukkan tren menarik berupa kombinasi kedua pendekatan secara sekuensial dalam satu alur sintesis tunggal, yang dikenal sebagai strategi *bottom-up-then-top-down* (BUTTONS). Sebagai ilustrasi, penelitian sintesis nanostruktur emas memanfaatkan nanorod emas yang dilapisi silika berpori (disintesis melalui pendekatan *bottom-up*) yang kemudian dietsa secara selektif untuk menghasilkan duabelas jenis nanostruktur emas berbeda (modifikasi *top-down*), menunjukkan bahwa kombinasi kedua strategi dapat menghasilkan keragaman morfologi nanomaterial yang jauh lebih luas dibandingkan penggunaan satu pendekatan saja secara terisolasi. Tren riset kontemporer juga semakin menekankan prinsip sintesis hijau (*green synthesis*) yang memanfaatkan agen pereduksi alami dari ekstrak

tumbuhan atau mikroorganisme sebagai alternatif terhadap bahan kimia toksik konvensional, sejalan dengan kebutuhan mendesak akan keberlanjutan lingkungan dalam pengembangan industri nanoteknologi skala besar di masa mendatang.

Tabel 5.2 Perbandingan Pendekatan Sintesis Nanomaterial *Top-Down*, *Bottom-Up*, dan *Hibrida*

Pendekatan	Filosofi Dasar	Contoh Teknik	Keunggulan Utama
<i>Top-down</i>	Subtraktif (material besar dipotong kecil)	<i>Ball milling</i> , litografi, PVD	Cocok produksi massal skala besar, biaya relatif rendah
<i>Bottom-up</i>	Aditif (atom/molekul dirakit jadi besar)	Sol-gel, CVD, hidrotermal, <i>electrospinning</i>	Kontrol ukuran presisi, distribusi homogen
<i>Hibrida</i> (BUTTONS)	Kombinasi sekuensial keduanya	Sintesis <i>bottom-up</i> diikuti etsa <i>top-down</i>	Keragaman morfologi sangat luas

Disarikan dari Mahmud (2023)

5. Material Karbon Nano: Dari *Fullerena* hingga *Graphene*

Karbon, sebagai salah satu unsur paling serbaguna dalam tabel periodik, menunjukkan keragaman alotrop nano yang luar biasa, masing-masing dengan sifat fisik dan kimia yang sangat berbeda meskipun tersusun dari atom yang identik. Fullerena, sebagai alotrop karbon nano pertama yang ditemukan pada tahun 1985 dan dianugerahi Hadiah Nobel Kimia 1996, berstruktur bola berongga menyerupai bola sepak yang tersusun dari 60 atom karbon (C₆₀) dalam konfigurasi heksagonal dan pentagonal, menunjukkan stabilitas kimia tinggi dan kemampuan menangkap elektron yang menjadikannya kandidat menjanjikan untuk aplikasi fotovoltaiik dan penghantaran obat. *Carbon nanotube* (CNT), yang dapat dibayangkan sebagai lembaran graphene yang digulung menjadi struktur silinder berongga, menunjukkan kekuatan tarik luar biasa tinggi sekaligus konduktivitas listrik yang dapat bervariasi dari bersifat logam hingga semikonduktor tergantung pada kiralitas (sudut

penggulangan) struktur tabungnya, suatu fenomena unik yang tidak dijumpai pada material curah konvensional manapun.

Graphene, sebagai alotrop karbon nano paling mutakhir yang berhasil diisolasi pertama kali pada tahun 2004 oleh Andre Geim dan Konstantin Novoselov yang dianugerahi Hadiah Nobel Fisika 2010 atas penemuan tersebut, merepresentasikan bentuk karbon dua dimensi paling sederhana sekaligus paling revolusioner, terdiri dari satu lapisan atom karbon tunggal yang tersusun dalam kisi heksagonal sempurna. Sejak ditemukan, graphene telah menjadi katalis bagi eksplorasi keluarga material dua dimensi yang lebih luas (*graphene-based materials*/GBM), mendorong perkembangan turunan seperti graphene oksida, oksida graphene tereduksi, dan berbagai material heterostruktur dua dimensi lain yang masing-masing menawarkan kombinasi sifat optik, elektrik, dan mekanik yang dapat disesuaikan untuk aplikasi spesifik mulai dari elektronika fleksibel hingga teknologi energi. Perkembangan riset terkini bahkan telah mengeksplorasi alotrop karbon dua dimensi baru di luar graphene, termasuk *graphyne*, *biphenylene*, dan jaringan fulleren dua dimensi, yang masing-masing menjanjikan sifat elektronik dan optik unik yang berpotensi melampaui keterbatasan graphene konvensional pada aplikasi tertentu seperti transistor berkecepatan tinggi.

Tabel 5.3 Ringkasan Alotrop Karbon Nano Utama Beserta Dimensi, Tahun Penemuan, dan Sifat Khasnya

Alotrop Karbon Nano	Dimensi	Tahun Ditemukan/ Diisolasi	Sifat Khas Utama
<i>Fullerena</i> (C60)	0D (bola berongga)	1985	Stabilitas kimia tinggi, afinitas elektron
<i>Carbon nanotube</i> (CNT)	1D (silinder berongga)	1991	Kekuatan tarik sangat tinggi, konduktivitas bervariasi
<i>Graphene</i>	2D (lembaran satu atom)	2004	Konduktivitas & kekuatan mekanik luar biasa

<i>Graphyne/ Biphenylene</i>	2D (varian baru)	2020-an	Potensi bandgap dapat disetel, sifat elektronik unik
----------------------------------	---------------------	---------	--

6. Teknik Karakterisasi Material Nano

Verifikasi dan karakterisasi sifat material pada skala nano memerlukan instrumentasi khusus yang mampu menyelesaikan struktur pada resolusi jauh melampaui batas difraksi mikroskop optik konvensional, yang terbatas pada resolusi sekitar 200 nanometer akibat panjang gelombang cahaya tampak. Mikroskop elektron transmisi (*Transmission Electron Microscope/TEM*) memanfaatkan berkas elektron berenergi tinggi yang ditransmisikan melalui sampel ultratipis untuk menghasilkan citra dengan resolusi hingga skala sub-angstrom, memungkinkan visualisasi langsung struktur kristal dan bahkan posisi atom individual pada material nano. Mikroskop elektron payaran (*Scanning Electron Microscope/SEM*), sebagai komplemen TEM, memindai permukaan sampel dengan berkas elektron terfokus untuk menghasilkan citra topografi tiga dimensi dengan resolusi pada orde nanometer, sangat berguna untuk mengamati morfologi permukaan dan distribusi ukuran partikel nano secara statistik pada area pengamatan yang luas.

Selain mikroskopi elektron, mikroskop gaya atom (*Atomic Force Microscope/AFM*) menawarkan pendekatan berbeda dengan memindai permukaan sampel menggunakan probe mekanis berujung sangat tajam yang mendeteksi gaya interaksi antara probe dan permukaan sampel pada skala piko-newton, memungkinkan pemetaan topografi permukaan dengan resolusi vertikal sub-nanometer tanpa memerlukan kondisi vakum tinggi sebagaimana diperlukan mikroskopi elektron, sehingga AFM dapat digunakan untuk mengamati sampel biologis dalam kondisi cair yang mendekati lingkungan fisiologis alaminya. Untuk karakterisasi sifat optik material nano, khususnya titik kuantum dan nanopartikel plasmonik, spektroskopi UV-Vis dan spektroskopi fotoluminesensi menjadi teknik standar untuk mengukur spektrum serapan dan emisi cahaya yang secara langsung mencerminkan celah pita energi material akibat efek kurungan kuantum yang telah dibahas pada sub-bab sebelumnya, sementara teknik difraksi sinar-X (*X-Ray Diffraction/XRD*)

digunakan untuk mengonfirmasi struktur kristal dan fase material nano yang disintesis.

Tabel 5.4 Ringkasan Teknik Karakterisasi Utama Untuk Material Nano Beserta Parameter yang Diukur dan Keterbatasannya

Teknik Karakterisasi	Parameter yang Diukur	Resolusi Tipikal	Keterbatasan Utama
TEM	Struktur internal, morfologi, kristalinitas	Sub-angstrom hingga atomik	Memerlukan sampel ultratipis, vakum tinggi
SEM	Topografi permukaan, distribusi ukuran	1-10 nm	Umumnya hanya informasi permukaan
AFM	Topografi 3D, gaya mekanik permukaan	Sub-nanometer (vertikal)	Area pemindaian relatif kecil, lambat
UV-Vis/Fotoluminensi	Spektrum serapan & emisi optik	Bergantung instrumen, bukan spasial	Tidak memberi info morfologi langsung
XRD	Struktur kristal, fase material	Bergantung ukuran kristalit	Memerlukan sampel kristalin terkumpul

B. Aplikasi Nanoteknologi dalam Pengobatan dan Alat Elektronik

1. Nanomedis: Sistem Penghantaran Obat Bertarget (*Targeted Drug Delivery*)

Salah satu aplikasi nanoteknologi yang paling berkembang dalam bidang kedokteran adalah sistem penghantaran obat bertarget (*targeted drug delivery system*) menggunakan nanopartikel sebagai pembawa molekul terapeutik. Enkapsulasi obat di dalam nanopartikel dapat melindungi obat dari degradasi enzimatik dan eliminasi dini di dalam sirkulasi, meningkatkan stabilitasnya, memperpanjang waktu paruh,

serta memungkinkan penghantaran obat secara lebih selektif ke jaringan target. Selain itu, nanopartikel dapat dirancang untuk melepaskan obat secara terkendali sehingga meningkatkan efektivitas terapi sekaligus mengurangi toksisitas sistemik yang sering dijumpai pada kemoterapi konvensional (Mitragotri et al., 2021). Berbagai jenis nanopartikel telah dikembangkan, termasuk liposom, nanopartikel polimerik, nanopartikel logam seperti emas dan perak, serta nanopartikel silika berpori (*mesoporous silica nanoparticles*) yang memiliki kapasitas pemuatan obat yang tinggi.

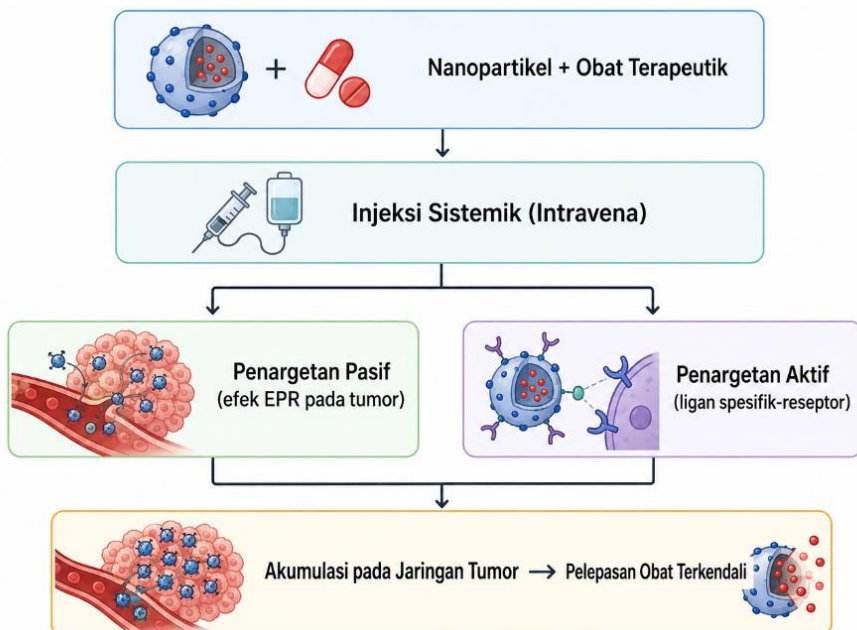
Penghantaran obat ke jaringan tumor dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu penargetan pasif (*passive targeting*) dan penargetan aktif (*active targeting*). Penargetan pasif memanfaatkan efek *enhanced permeability and retention* (EPR), yaitu kecenderungan nanopartikel untuk terakumulasi pada jaringan tumor akibat permeabilitas pembuluh darah tumor yang tinggi dan drainase limfatik yang buruk. Sementara itu, penargetan aktif dicapai melalui modifikasi permukaan nanopartikel dengan antibodi, peptida, aptamer, atau ligan lain yang mampu mengenali reseptor spesifik yang diekspresikan berlebihan oleh sel kanker (Danhier, 2010; Mitchell et al., 2021). Sejumlah formulasi nanomedisin telah memperoleh persetujuan klinis, termasuk doksorubisin liposomal untuk kanker payudara dan *nanoparticle albumin-bound paclitaxel (nab-paclitaxel)* untuk kanker payudara metastatik dan kanker pankreas, yang menunjukkan peningkatan penghantaran obat dan penurunan toksisitas dibandingkan formulasi konvensional (Barenholz, 2012; Gradishar et al., 2005).

Sebagai contoh, berbagai uji klinis menunjukkan bahwa doksorubisin liposomal mampu mempertahankan efektivitas antitumor dengan risiko kardi toksisitas yang lebih rendah dibandingkan doksorubisin konvensional (Barenholz, 2012). Di bidang diagnostik, pengembangan nanopartikel polimerik berlabel zirkonium-89 (^{89}Zr -CPC634) memungkinkan visualisasi distribusi obat secara *in vivo* menggunakan positron emission tomography (PET). Studi klinis oleh Shinde et al. (2026) menunjukkan bahwa sistem tersebut mampu mengidentifikasi akumulasi nanopartikel pada sebagian besar lesi tumor, sehingga mendukung pengembangan pendekatan *theranostics* yang mengintegrasikan fungsi diagnostik dan terapi dalam satu platform untuk mendukung pengobatan kanker yang lebih presisi.

Tabel 5.5 Jenis-Jenis Nanopartikel Utama Dalam Sistem Penghantaran Obat Beserta Keunggulan Dan Contoh Aplikasi Klinisnya

Jenis Nanopartikel	Contoh Material	Keunggulan Utama	Contoh Aplikasi Klinis
Liposom	<i>Fosfolipid bilayer</i>	Biokompatibilitas tinggi, sudah disetujui FDA	Doksorubisin liposomal (kanker payudara)
Nanopartikel polimerik	PLGA, kitosan	Pelepasan obat terkendali	<i>Nab-paclitaxel</i> (kanker pankreas)
Nanopartikel logam	Emas, perak	Sifat optik & termal unik, mudah difungsionalisasi	Terapi fototermal, biosensor
Silika berpori (<i>mesoporous</i>)	SiO ₂ berpori nano	Luas permukaan internal sangat tinggi	Pemuatan obat kapasitas tinggi

Gambar 5.2 Alur Umum Mekanisme Penargetan Nanopartikel Pembawa Obat Terhadap Jaringan Tumor Melalui Jalur Pasif (Efek EPR) dan Aktif (Ligan-Reseptor)



2. Nanomedis di Luar Onkologi: Diagnostik dan Pencitraan

Di luar aplikasi terapeutik pada kanker, nanoteknologi juga merevolusi bidang diagnostik medis melalui pengembangan biosensor berbasis nanomaterial yang menawarkan sensitivitas dan spesifisitas deteksi jauh lebih tinggi dibandingkan metode diagnostik konvensional. Biosensor berbasis graphene dan nanopartikel logam, misalnya, telah dikembangkan untuk mendeteksi biomarker kanker dalam konsentrasi sangat rendah pada sampel darah pasien, memanfaatkan sifat elektrokimia unik nanomaterial untuk menghasilkan sinyal terukur yang proporsional dengan konsentrasi analit target. Sebagai contoh, biosensor DNA elektrokimia tiga dimensi berbasis graphene-nanopartikel perak telah dikembangkan untuk deteksi sensitif biomarker CYFRA21-1 pada kanker paru bukan sel kecil, menunjukkan potensi besar nanoteknologi untuk mendukung deteksi dini kanker yang masih menjadi tantangan klinis signifikan secara global (Ayoib, 2024).

Inovasi lebih lanjut menggabungkan teknologi CRISPR dengan biosensor nanomaterial untuk menciptakan platform deteksi yang sangat sensitif terhadap DNA tumor yang bersirkulasi (*circulating tumor DNA/ctDNA*), suatu pendekatan yang memanfaatkan presisi pemotongan CRISPR-Cas9 yang dipicu oleh sekuens target spesifik, dikombinasikan dengan sinyal elektrokimia yang diperkuat oleh struktur nanoflower graphene-emas-platinum-paladium (Chen *et al.*, 2021). Konvergensi antara bioteknologi genetika dan nanoteknologi material semacam ini menggambarkan tren penting dalam riset biomedis kontemporer, di mana batas antara disiplin ilmu yang sebelumnya terpisah yaitu biologi molekuler, ilmu material, dan elektronik, semakin kabur, menghasilkan platform diagnostik hibrida yang lebih canggih dibandingkan pendekatan tunggal disiplin manapun.

3. Nanoelektronika: Mengatasi Batas Hukum Moore

Pada ranah elektronik, nanoteknologi menjadi solusi krusial bagi industri semikonduktor yang menghadapi tantangan saturasi Hukum Moore, yakni prediksi empiris bahwa jumlah transistor pada sebuah chip akan berlipat ganda setiap dua tahun. Seiring transistor konvensional mendekati batas fisik miniaturisasi pada skala beberapa nanometer, di mana efek kuantum seperti *tunneling* elektron mulai mengganggu fungsi

transistor sebagai saklar biner yang andal, industri elektronik beralih ke material dan arsitektur nano alternatif untuk melanjutkan tren peningkatan kinerja komputasi. Material dua dimensi seperti graphene dan *transition metal dichalcogenides* (TMD) menawarkan jalur potensial untuk melampaui keterbatasan silikon konvensional, berkat mobilitas elektron tinggi dan kemampuan mempertahankan sifat semikonduktor bahkan pada ketebalan satu lapisan atom.

Selain transistor berbasis material 2D, pendekatan nanofabrikasi berbasis DNA (*DNA-based nanofabrication*) muncul sebagai metode alternatif yang menjanjikan untuk konstruksi struktur nanoelektronik dengan presisi atom, memanfaatkan kemampuan untai DNA untuk melipat diri secara terprogram (*DNA origami*) menjadi templat struktural bagi penempatan komponen elektronik pada posisi yang sangat presisi (Hui *et al.*, 2022). Pada skala aplikasi yang lebih dekat dengan kebutuhan medis, konsep "nanoelektronika untuk kanker" (*nanoelectronics aiming at cancer*) telah dieksplorasi sejak satu dekade lalu dan terus berkembang, di mana perangkat nanoelektronik diintegrasikan dengan biosensor untuk pemantauan biomarker penyakit secara *real-time* dan minim invasif, menggambarkan konvergensi yang semakin erat antara nanoelektronika dan nanomedis dalam ekosistem teknologi kesehatan masa depan.

Tabel 5.6 Perbandingan Material Nanoelektronik Kandidat Penerus Silikon Konvensional Beserta Keunggulan dan Tantangannya

Material Nanoelektronik	Struktur Dimensi	Keunggulan Utama	Tantangan Utama
Silikon nano (FinFET, GAA)	3D bertekstur	Kompatibel manufaktur eksisting	Mendekati batas fisik miniaturisasi
<i>Graphene</i>	2D (monolayer)	Mobilitas elektron sangat tinggi	Tidak memiliki bandgap intrinsik
TMD (mis. MoS ₂ , WS ₂)	2D (monolayer)	Memiliki bandgap, cocok untuk transistor	Sintesis skala besar masih menantang

Struktur DNA origami	Templat 3D presisi atom	Presisi penempatan luar biasa tinggi	Stabilitas & skalabilitas produksi
----------------------	-------------------------	--------------------------------------	------------------------------------

4. Nanotoksikologi dan Tantangan Keamanan

Di balik potensi transformatif nanoteknologi, kemunculan bidang nanotoksikologi menegaskan bahwa sifat-sifat unik material nano yang menguntungkan untuk aplikasi industri dan medis, terutama reaktivitas tinggi dan kemampuan menembus membran biologis juga dapat menimbulkan risiko kesehatan dan lingkungan yang memerlukan kajian mendalam. Nanotoksikologi didefinisikan sebagai disiplin ilmu yang berkembang dari studi partikel ultrahalus (*ultrafine particles*), yang mengkaji secara sistematis bagaimana nanomaterial berinteraksi dengan sistem biologis pada tingkat seluler dan molekuler, termasuk potensi induksi stres oksidatif, inflamasi, dan kerusakan DNA akibat paparan nanopartikel (Oberdörster *et al.*, 2005). Studi pertama-kalinya pada manusia mengenai inhalasi terkontrol nanosheet graphene oksida tipis menunjukkan adanya respons kardiorespiratori akut yang terukur, menegaskan perlunya kehati-hatian dalam menilai keamanan paparan inhalasi nanomaterial karbon sebelum aplikasi komersial skala besar (Andrews *et al.*, 2024).

Tantangan regulasi nanomaterial turut menjadi perhatian badan-badan internasional, sebagaimana tercermin dalam laporan *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD) yang secara berkala memantau perkembangan kebijakan keamanan nanomaterial rekayasa di berbagai negara anggota. Laporan tersebut mencatat berbagai inisiatif kolaboratif antara akademisi dan badan pemerintah, termasuk platform nasional seperti *SweNanoSafe* di Swedia yang berfungsi sebagai jembatan dialog antara komunitas riset dan regulator kebijakan publik mengenai penanganan aman nanomaterial (OECD, 2024). Tantangan regulasi ini diperumit oleh fakta bahwa toksisitas nanomaterial sangat bergantung pada karakteristik spesifik seperti ukuran, bentuk, muatan permukaan, dan fungsionalisasi kimiawi, sehingga pendekatan regulasi "satu ukuran untuk semua" (*one-size-fits-all*) dinilai tidak memadai, dan diperlukan kerangka penilaian risiko berbasis karakteristik fisikokimia spesifik setiap jenis nanomaterial secara individual.

Tabel 5.7 Ringkasan Risiko Nanotoksikologi Utama Beserta Mekanisme dan Contoh Material yang Relevan

Aspek Risiko	Mekanisme Potensial	Contoh Material Terdampak
Stres oksidatif seluler	Produksi radikal bebas berlebih akibat reaktivitas permukaan tinggi	Nanopartikel logam, graphene oksida
Inflamasi paru (inhalasi)	Deposisi nanopartikel pada saluran napas dalam	Graphene oksida, carbon nanotube
Penembusan sawar biologis	Ukuran sangat kecil memudahkan translokasi	Nanopartikel <10 nm, quantum dot
Akumulasi lingkungan	Persistensi dan bioakumulasi pada ekosistem	Nanopartikel logam berat, nanoplastik

5. Studi Kasus: Tren Riset Nanoteknologi dan Peluang bagi Indonesia

Perkembangan riset nanoteknologi global menunjukkan pertumbuhan eksponensial dalam jumlah publikasi dan paten sejak awal dekade 2000-an, dengan fokus yang terus bergeser dari karakterisasi dasar material nano menuju aplikasi praktis yang siap pasar pada sektor energi, kesehatan, dan elektronik. Indonesia, sebagai negara dengan kekayaan sumber daya mineral yang relevan bagi industri nanomaterial termasuk cadangan nikel terbesar di dunia yang krusial bagi pengembangan material baterai nano untuk kendaraan listrik memiliki posisi strategis untuk berpartisipasi dalam rantai nilai global teknologi nano, asalkan disertai investasi yang memadai dalam kapasitas riset dasar dan terapan di tingkat domestik. Pengembangan pusat-pusat unggulan riset nanoteknologi di perguruan tinggi dan lembaga penelitian nasional menjadi prasyarat penting untuk memastikan Indonesia tidak hanya menjadi eksportir bahan mentah, tetapi juga mampu mengembangkan kapasitas hilirisasi teknologi nano bernilai tambah tinggi secara mandiri.

Tantangan utama yang dihadapi Indonesia dalam pengembangan kapasitas nanoteknologi domestik mencakup keterbatasan infrastruktur karakterisasi material canggih seperti mikroskop elektron transmisi

resolusi tinggi, kelangkaan sumber daya manusia terlatih dalam sintesis dan karakterisasi nanomaterial, serta belum optimalnya kolaborasi antara institusi riset akademik dengan industri untuk mempercepat hilirisasi temuan riset menjadi produk komersial. Pembelajaran dari negara-negara yang telah berhasil membangun ekosistem nanoteknologi yang kompetitif, seperti Korea Selatan dan Singapura, menunjukkan pentingnya kebijakan insentif riset jangka panjang yang konsisten, pembangunan fasilitas riset bersama (*shared research facilities*) yang dapat diakses oleh berbagai institusi, serta program beasiswa terarah untuk mencetak generasi ilmuwan material nano yang kompeten, sebagai elemen kunci yang perlu direplikasi secara kontekstual sesuai kondisi dan prioritas pembangunan Indonesia.

6. Nanoteknologi untuk Energi: Baterai dan Sel Surya

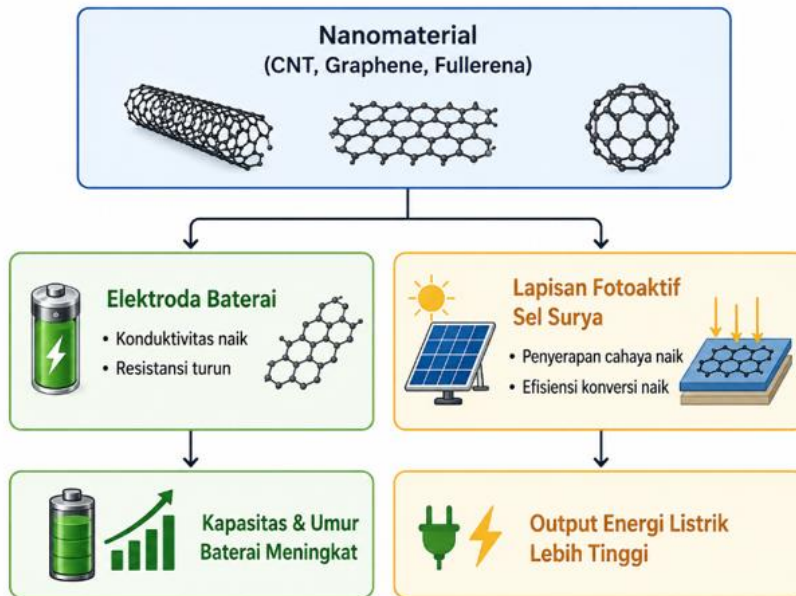
Mengingat tema sentral Bagian III buku ini yang menghubungkan materi dan energi, aplikasi nanoteknologi dalam sistem penyimpanan dan konversi energi layak mendapat perhatian khusus sebagai pelengkap pembahasan nanomedis dan nanoelektronika. Nanomaterial karbon seperti *carbon nanotube*, graphene, dan fulleren telah terbukti secara signifikan meningkatkan konduktivitas listrik, menurunkan resistansi internal, serta mencegah degradasi yang umum terjadi pada baterai konvensional selama penggunaan berkepanjangan, sehingga secara langsung meningkatkan kapasitas penyimpanan energi dan masa pakai baterai. Elektroda berbasis nanopartikel menunjukkan luas permukaan, porositas, dan konduktivitas yang jauh lebih unggul dibandingkan elektroda konvensional, berkontribusi terhadap peningkatan densitas energi dan densitas daya baterai generasi terbaru, sekaligus memperpanjang masa operasional melalui sinergi antara nanomaterial dengan elektrolit-elektrolit inovatif yang dikembangkan secara paralel (Mahmud, 2023).

Pada bidang energi surya, pemanfaatan nanomaterial membuka peluang untuk meningkatkan efisiensi konversi energi melalui berbagai mekanisme, seperti peningkatan penyerapan cahaya, pengurangan refleksi permukaan, pengendalian transport muatan, serta penguatan medan elektromagnetik lokal melalui efek plasmonik. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa integrasi nanostruktur pada sel surya dapat meningkatkan kemampuan penyerapan radiasi matahari dan

memperbaiki efisiensi perangkat dibandingkan desain konvensional (Green et al., 2022). Beragam nanostruktur telah dikembangkan untuk tujuan tersebut, termasuk nanopartikel plasmonik pada sel surya perovskit, nanorod seng oksida (ZnO) berlapis titanium dioksida (TiO₂) pada *dye-sensitized solar cells* (DSSC), serta struktur semikonduktor *intermediate band* berbasis GaSb/AlGaAs yang dirancang untuk memanfaatkan spektrum foton yang lebih luas dibandingkan sel surya silikon sambungan tunggal (Nozik, 2002; Green et al., 2022). Berkat berbagai pendekatan tersebut, sejumlah teknologi sel surya berbasis nanomaterial telah mencapai efisiensi konversi daya lebih dari 30% pada konfigurasi tertentu, melampaui batas efisiensi teoritis sel surya silikon sambungan tunggal yang dikenal sebagai batas *Shockley–Queisser* (Green et al., 2022).

Meskipun menawarkan prospek yang menjanjikan, adopsi komersial nanomaterial pada teknologi fotovoltaik masih menghadapi berbagai tantangan. Material perovskit yang mengandung timbal menimbulkan kekhawatiran mengenai toksisitas lingkungan, sementara stabilitas jangka panjang perangkat, proses daur ulang, serta produksi nanomaterial dalam skala industri dengan mutu yang konsisten masih menjadi kendala penting. Oleh karena itu, penelitian terkini semakin diarahkan pada pengembangan material yang lebih stabil, bebas timbal, mudah didaur ulang, dan diproduksi menggunakan proses yang berkelanjutan agar manfaat teknologi nanomaterial dapat dicapai tanpa menimbulkan dampak lingkungan yang baru (Correa-Baena et al., 2017).

Gambar 5.3. Alur Umum Kontribusi Nanomaterial Terhadap Peningkatan Kinerja Sistem Penyimpanan Energi (Baterai) dan Konversi Energi (Sel Surya)



7. Nanoteknologi pada Produk Konsumen: Studi Kasus Tabir Surya

Di luar aplikasi medis dan elektronik berteknologi tinggi, nanoteknologi juga telah merambah produk konsumen sehari-hari secara luas, dengan tabir surya (*sunscreen*) berbasis nanopartikel menjadi salah satu contoh paling mapan dan paling banyak digunakan masyarakat global. Tabir surya konvensional berbasis filter UV anorganik seperti seng oksida (*zinc oxide/ZnO*) dan titanium dioksida (*titanium dioxide/TiO₂*) dalam bentuk partikel berukuran mikro umumnya meninggalkan lapisan putih (*whitish hue*) pada kulit akibat hamburan cahaya tampak, suatu kelemahan estetika yang secara signifikan menurunkan kepatuhan pengguna terhadap rekomendasi penggunaan tabir surya secara rutin. Nanoteknologi mengatasi masalah ini dengan mereduksi ukuran partikel *ZnO* dan *TiO₂* hingga skala nano, yang secara fundamental mengubah perilaku optiknya: partikel nano tetap secara efektif menghamburkan dan menyerap radiasi UV berbahaya, namun menjadi transparan terhadap cahaya tampak karena ukurannya jauh lebih kecil dibandingkan panjang gelombang cahaya tampak, sehingga

menghasilkan formulasi tabir surya yang estetik tanpa meninggalkan residu putih pada kulit (Chavda *et al.*, 2023).

Selain perbaikan estetika, enkapsulasi filter UV dalam berbagai sistem nano termasuk nanopartikel polimerik, liposom, *nanostructured lipid carrier*, nanopartikel lipid padat, dan nanoemulsi menawarkan keunggulan fungsional tambahan berupa perlindungan terhadap degradasi fotokimia bahan aktif akibat paparan sinar matahari berkepanjangan, peningkatan retensi pada lapisan kulit terluar untuk memperpanjang durasi perlindungan, serta kemampuan menggabungkan berbagai bahan aktif dalam satu formulasi tunggal untuk perlindungan spektrum luas terhadap radiasi UVA maupun UVB. Pasar global tabir surya berbasis nanoteknologi telah mengalami pertumbuhan eksponensial, didorong oleh meningkatnya insidensi kanker kulit secara global serta kesadaran konsumen yang semakin tinggi mengenai dampak buruk paparan sinar matahari berkepanjangan, dengan produk yang kini tersedia melalui beragam kanal ritel mulai dari toko daring hingga apotek dan gerai kosmetik khusus (Jabeen *et al.*, 2025).

Meskipun demikian, adopsi nanoteknologi pada produk tabir surya tidak lepas dari kontroversi dan kekhawatiran keamanan yang memerlukan kajian berkelanjutan. Organisasi advokasi konsumen seperti *Environmental Working Group* (EWG) di Amerika Serikat menyatakan kekhawatiran mendalam mengenai kurangnya pengawasan regulasi yang memadai terhadap nanoteknologi secara umum, serta risiko terkait yang mungkin dihadapi konsumen, pekerja dengan paparan okupasional, dan lingkungan, sehingga merekomendasikan pengawasan regulasi yang lebih ketat terhadap produksi, penggunaan, dan pembuangan nanomaterial (EWG, 2024). Penelitian lingkungan turut mengungkap bahwa konsentrasi filter UV pada perairan, meskipun umumnya berada di bawah ambang toksisitas yang dilaporkan, secara sporadis dapat melampaui 10 mikrogram per liter pada beberapa lokasi, dengan efek toksik seperti pemutihan karang (*coral bleaching*) dan penurunan pertumbuhan organisme akuatik teramati pada kondisi laboratorium, meskipun toksisitas tersebut umumnya hanya bermanifestasi pada konsentrasi jauh lebih tinggi dibandingkan yang lazim terdeteksi di lingkungan alami. Studi kasus tabir surya ini mengilustrasikan secara konkret pola umum yang berlaku pada hampir seluruh aplikasi nanoteknologi konsumen: manfaat fungsional yang

nyata harus senantiasa diimbangi dengan kewaspadaan berkelanjutan terhadap risiko keamanan jangka panjang yang belum sepenuhnya dipahami secara ilmiah.

Tabel 5.8 Perbandingan Karakteristik Tabir Surya Berbasis Mikropartikel Konvensional dan Nanopartikel

Aspek	Tabir Surya Konvensional (Mikropartikel)	Tabir Surya Nano
Tampilan pada kulit	Meninggalkan lapisan putih (<i>whitish hue</i>)	Transparan, kosmetik lebih disukai
Mekanisme proteksi UV	Hamburan dominan	Hamburan + penyerapan, tetap efektif
Stabilitas fotokimia	Lebih rentan degradasi	Lebih stabil dengan enkapsulasi
Kekhawatiran keamanan	Risiko penetrasi kulit relatif rendah	Memerlukan kajian penetrasi & ekotoksitas lanjutan

Disarikan dari Chavda *et al.* (2023)

8. Memahami Efek Kurungan Kuantum melalui Analogi Sederhana

Efek kurungan kuantum adalah fenomena yang terjadi ketika partikel, seperti elektron, terkurung dalam ruang yang sangat kecil, biasanya pada skala nanometer. Dalam konteks nanoteknologi, efek ini mempengaruhi sifat optik dan elektronik material, seperti titik kuantum, yang digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi.

Untuk memahami efek ini, kita dapat menggunakan analogi sederhana dari bola pingpong dalam kotak. Bayangkan sebuah bola pingpong yang dapat bergerak bebas dalam sebuah ruangan besar. Ketika ruangan tersebut diperkecil menjadi sebuah kotak kecil, gerakan bola menjadi terbatas, dan hanya dapat berada pada posisi tertentu. Dalam fisika kuantum, hal ini mirip dengan bagaimana elektron hanya dapat menempati tingkat energi tertentu ketika terkurung dalam ruang kecil, seperti dalam titik kuantum.

Efek kurungan kuantum menyebabkan perubahan signifikan dalam sifat material. Misalnya, titik kuantum dapat memancarkan cahaya dengan warna berbeda tergantung pada ukuran partikel. Semakin kecil ukurannya, semakin tinggi energi foton yang dipancarkan, mengubah panjang gelombang cahaya yang dihasilkan. Ini memungkinkan titik kuantum digunakan dalam aplikasi seperti layar tampilan dan biolabeling.



BAB VI

DILEMA ENERGI: ANTARA FOSIL DAN TERBARUKAN

Energi merupakan tulang punggung peradaban modern, namun sumber utama yang menggerakkan ekonomi global selama lebih dari dua abad terakhir, bahan bakar fosil berupa batu bara, minyak bumi, dan gas alam kini berada di persimpangan jalan kritis akibat dua tekanan simultan: krisis iklim global yang semakin nyata dampaknya, serta sifat sumber daya fosil yang pada dasarnya tidak terbarukan (*non-renewable*). Dilema energi yang dihadapi umat manusia abad ke-21 bukanlah pertanyaan sederhana mengenai pilihan teknologi semata, melainkan persoalan kompleks yang melibatkan hukum-hukum fisika fundamental mengenai konversi energi, keterbatasan teknis dan ekonomi berbagai teknologi energi terbarukan, serta pertimbangan geopolitik dan sosial-ekonomi yang membentuk lanskap transisi energi global secara keseluruhan.

Skala tantangan ini sangat signifikan secara global: menurut estimasi *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), sektor produksi listrik berkontribusi sekitar 37% dari total emisi gas rumah kaca global yang mencapai sekitar 27 gigaton CO₂ ekuivalen per tahun, sementara permintaan listrik global diproyeksikan meningkat sebesar 43% dalam dua dekade mendatang seiring elektrifikasi sektor transportasi, industri, dan rumah tangga di berbagai belahan dunia (*World Nuclear Association*, 2024, mengutip data IPCC). Pertumbuhan permintaan energi yang masif ini menghadirkan dilema ganda: di satu sisi, kapasitas pembangkit baru harus dibangun dalam skala besar dan cepat untuk memenuhi kebutuhan yang terus meningkat, sementara di sisi lain, pembangunan kapasitas baru tersebut idealnya harus didominasi sumber energi rendah karbon agar tidak memperparah krisis iklim yang sudah berlangsung, sebuah tantangan rekayasa dan kebijakan publik berskala raksasa yang menjadi konteks utama pembahasan bab ini.

Bab ini disusun untuk mengulas dilema energi tersebut melalui dua pendekatan yang saling melengkapi: pertama, fondasi

termodinamika yang menjelaskan batasan fundamental dan tak terhindarkan dalam setiap proses konversi energi, baik pada pembangkit listrik berbasis fosil maupun teknologi energi terbarukan; kedua, evaluasi mendalam terhadap tiga teknologi energi masa depan yang paling banyak diperbincangkan yaitu panel surya, energi nuklir, dan sel bahan bakar hidrogen (*hydrogen fuel cell*) beserta peluang, keterbatasan teknis, dan tantangan implementasinya pada skala global maupun nasional. Pendekatan ini dipilih agar pembaca memperoleh pemahaman yang tidak hanya bersifat normatif mengenai "energi terbarukan itu baik," melainkan pemahaman kuantitatif dan kritis mengenai mengapa transisi energi global berjalan jauh lebih lambat dan lebih rumit dibandingkan yang sering digambarkan dalam wacana publik populer.

Relevansi bab ini bagi konteks Indonesia sangat signifikan, mengingat negara ini masih sangat bergantung pada energi fosil sekaligus memiliki potensi energi terbarukan yang luar biasa besar namun belum dimanfaatkan secara optimal. Pemahaman yang kokoh mengenai prinsip termodinamika dan karakteristik teknis berbagai teknologi energi menjadi prasyarat penting bagi generasi pembuat kebijakan, insinyur, dan masyarakat umum Indonesia untuk berpartisipasi secara konstruktif dalam perdebatan kebijakan energi nasional, alih-alih terjebak dalam polarisasi sederhana antara optimisme berlebihan terhadap energi terbarukan atau pesimisme yang mengabaikan urgensi transisi energi sama sekali.

A. Termodinamika dalam Konversi Energi

1. Hukum Pertama dan Kedua Termodinamika: Fondasi Konversi Energi

Termodinamika merupakan cabang fisika yang mempelajari hubungan antara kalor, kerja, dan energi serta menetapkan batas fundamental bagi seluruh proses konversi energi. Hukum pertama termodinamika menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, melainkan hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lain. Prinsip kekekalan energi ini menjadi dasar analisis neraca energi pada berbagai sistem pembangkit, baik yang memanfaatkan bahan bakar fosil maupun sumber energi terbarukan (Çengel & Boles, 2019). Namun, hukum pertama tidak menjelaskan mengapa seluruh energi

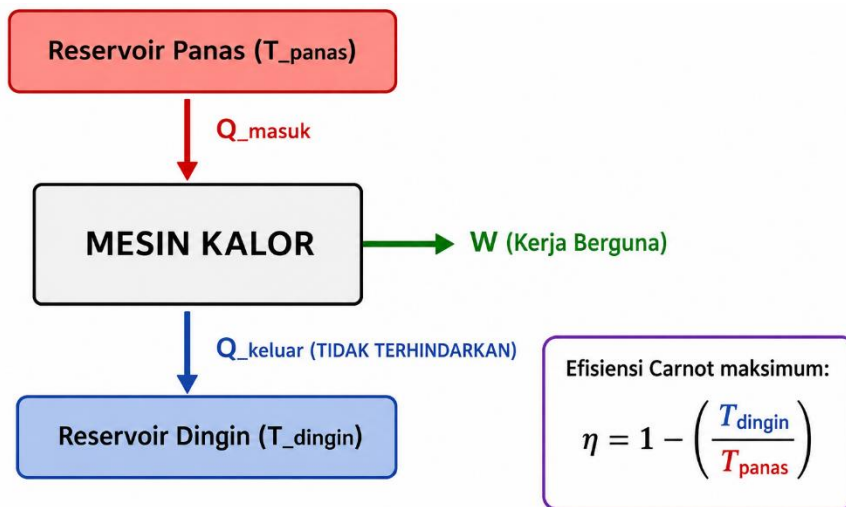
masukannya tidak dapat dikonversi menjadi kerja yang berguna. Penjelasan tersebut diberikan oleh hukum kedua termodinamika, yang menyatakan bahwa setiap proses nyata berlangsung dengan peningkatan entropi sehingga sebagian energi selalu terdegradasi menjadi kalor yang tidak lagi dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan kerja. Oleh karena itu, tidak ada mesin kalor yang mampu mencapai efisiensi konversi energi sebesar 100% (Çengel & Boles, 2019).

Implikasi hukum kedua termodinamika ini dirumuskan secara matematis melalui konsep siklus Carnot, yang dikembangkan oleh insinyur Prancis Sadi Carnot pada tahun 1824, sebuah karya yang baru-baru ini diperingati dua abad sejak penerbitannya, menegaskan relevansinya yang tak lekang waktu bagi rekayasa energi modern (Feidt & Costea, 2024). Siklus Carnot menetapkan batas efisiensi maksimum teoretis bagi setiap mesin kalor (*heat engine*) yang beroperasi antara dua reservoir panas pada temperatur berbeda, dirumuskan sebagai:

$$\eta = 1 - \frac{T_{dingin}}{T_{panas}}$$

di mana temperatur dinyatakan dalam skala absolut Kelvin. Formula ini menunjukkan implikasi praktis yang sangat penting: semakin besar perbedaan temperatur antara sumber panas dan lingkungan pembuangan panas, semakin tinggi pula batas efisiensi teoretis yang dapat dicapai, sebuah prinsip yang menjelaskan mengapa pembangkit listrik tenaga uap konvensional terus berupaya meningkatkan temperatur operasional boiler mereka demi mendekati batas efisiensi Carnot, meskipun batas tersebut secara fundamental tidak pernah dapat tercapai sepenuhnya dalam praktik nyata.

Gambar 6.1 Skema Umum Mesin Kalor (*Heat Engine*) dan Batas Efisiensi Carnot sebagai Konsekuensi Hukum Kedua Termodinamika



2. Efisiensi Aktual versus Efisiensi Teoretis pada Pembangkit Energi

Dalam praktiknya, efisiensi aktual setiap pembangkit energi senantiasa berada jauh di bawah batas Carnot teoretis, akibat berbagai sumber irreversibilitas tambahan seperti gesekan mekanis, kehilangan panas ke lingkungan melalui konduksi dan radiasi, serta ketidaksempurnaan proses pembakaran maupun transfer panas pada peralatan nyata. Riset kontemporer mengenai siklus Carnot terus mengeksplorasi strategi optimasi untuk mendekati batas teoretis tersebut, termasuk pengembangan mesin kalor elektrokimia berbasis siklus Carnot yang menunjukkan pendekatan baru terhadap konversi energi kimia-ke-listrik dengan irreversibilitas yang lebih rendah dibandingkan mesin kalor konvensional berbasis pembakaran (Chen *et al.*, 2021). Pada ranah termodinamika waktu-hingga (*finite-time thermodynamics*), penelitian terbaru menunjukkan bahwa optimasi kekuatan keluaran (*power output*) suatu mesin kalor sering kali memerlukan kompromi terhadap efisiensi maksimum Carnot, karena pencapaian efisiensi Carnot murni secara teoretis hanya mungkin tercapai pada proses yang berlangsung dalam waktu tak hingga, suatu kondisi yang jelas tidak praktis bagi aplikasi rekayasa nyata yang memerlukan keluaran daya dalam waktu terbatas.

Konsep efisiensi pada daya maksimum (*efficiency at maximum power*) menjadi kerangka analitis yang lebih relevan secara praktis dibandingkan efisiensi Carnot murni, karena mempertimbangkan trade-off fundamental antara kecepatan ekstraksi kerja dan efisiensi termodinamika suatu sistem. Studi eksperimental menggunakan sistem partikel Brownian yang terperangkap secara optik telah memvalidasi prediksi teoretis mengenai efisiensi pada daya maksimum, menunjukkan nilai efisiensi sekitar 25% pada kondisi rasio temperatur reservoir dingin-panas tertentu, jauh di bawah efisiensi Carnot teoretis pada kondisi yang sama namun mencerminkan kompromi praktis yang harus diterima sistem nyata untuk dapat menghasilkan daya dalam waktu terbatas. Prinsip ini berlaku universal pada seluruh teknologi konversi energi yang akan dibahas pada sub-bab berikutnya, baik pembangkit fosil, surya, nuklir, maupun sel bahan bakar hidrogen, sehingga pemahaman mengenai kompromi mendasar ini menjadi prasyarat penting untuk mengevaluasi klaim efisiensi teknologi energi secara kritis dan berbasis bukti ilmiah.

Tabel 6.1 Perbandingan Efisiensi Teoretis dan Aktual Berbagai Teknologi Pembangkit Energi

Jenis Pembangkit	Efisiensi Carnot Teoretis (Estimasi)	Efisiensi Aktual Tipikal	Sumber Utama Kehilangan
PLTU batu bara superkritis	~60-65%	38-45%	Gesekan turbin, kehilangan panas boiler
Turbin gas siklus gabungan (combined cycle)	~65-70%	55-62%	Kehilangan panas gas buang
Sel surya silikon (PV)	~85% (limit Shockley-Queisser ~32% untuk <i>single-junction</i>)	20-24%	Rekombinasi elektron-hole, refleksi
Sel bahan bakar hidrogen (PEMFC)	Tidak terikat Carnot (proses elektrokimia)	40-60%	Overpotential aktivasi, resistansi ohmik

3. Eksergi: Mengukur Kualitas Energi, Bukan Hanya Kuantitas

Sementara hukum pertama termodinamika hanya memperhatikan kuantitas energi melalui prinsip kekekalan, konsep eksergi (*exergy*) memberikan kerangka analitis yang lebih kaya dengan mengukur kualitas energi, yakni kapasitas maksimum suatu bentuk energi untuk melakukan kerja berguna ketika dibawa ke kesetimbangan dengan lingkungan referensinya. Analisis eksergi menjadi sangat relevan dalam evaluasi sistem energi kompleks seperti baterai Carnot (*Carnot battery*), yang menyimpan energi listrik dalam bentuk energi termal pada saat surplus produksi (misalnya dari sumber terbarukan intermiten) dan mengonversinya kembali menjadi listrik saat dibutuhkan. Penelitian terbaru mengenai sistem baterai Carnot multi-energi berbasis siklus Joule-Brayton menunjukkan bahwa efisiensi konversi listrik dapat ditingkatkan hingga 68,8-78,0% ketika sistem hanya mengintegrasikan sumber panas, dan bahkan dapat melampaui 100% (mencapai 113,9-115,2%) ketika sistem mengintegrasikan sumber panas dan dingin secara simultan dengan memanfaatkan pompa kalor sebagai komponen tambahan.

Sensitivitas tinggi terhadap kualitas insulasi termal pada sistem penyimpanan energi semacam ini menjadi pelajaran penting bagi rekayasa sistem energi praktis: penelitian menunjukkan bahwa penurunan kualitas insulasi sebesar hanya 2,5% dapat menyebabkan penurunan efisiensi siklus balik (*round-trip efficiency*) hingga 10 poin persentase, menggambarkan betapa krusialnya detail rekayasa termal dalam menentukan kelayakan ekonomi teknologi penyimpanan energi berbasis termodinamika. Analisis eksergi juga memberikan wawasan penting mengenai mengapa konversi panas suhu rendah, seperti pada sistem konversi energi termal lautan (*Ocean Thermal Energy Conversion/OTEC*) yang memanfaatkan perbedaan temperatur kecil antara air laut permukaan dan air laut dalam, menghasilkan efisiensi neto yang sangat rendah, hanya sekitar 3,5%, setelah memperhitungkan konsumsi daya internal untuk memompa air laut hangat dan dingin serta kebutuhan operasional lainnya, sebuah ilustrasi konkret bagaimana prinsip Carnot membatasi secara fundamental kelayakan teknis berbagai skema konversi energi alternatif yang memanfaatkan gradien temperatur kecil.

4. Emisi Gas Rumah Kaca Siklus Hidup: Melampaui Efisiensi Termodinamika

Efisiensi termodinamika semata tidak cukup untuk mengevaluasi kelayakan suatu teknologi energi secara komprehensif; analisis siklus hidup (*life cycle assessment*) emisi gas rumah kaca memberikan dimensi evaluasi tambahan yang krusial, mencakup emisi dari seluruh tahapan mulai dari ekstraksi bahan baku, konstruksi fasilitas, operasional, hingga pembongkaran pascapakai. *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) Amerika Serikat, melalui tinjauan sistematis terhadap lebih dari 2.100 studi analisis siklus hidup terpublikasi mengenai pembangkit listrik skala utilitas dari berbagai sumber termasuk angin, surya fotovoltaik, surya termal terkonsentrasi, biopower, panas bumi, energi laut, tenaga air, nuklir, gas alam, dan batu bara menerapkan metodologi harmonisasi statistik dua tahap untuk mengatasi variabilitas estimasi emisi antarstudi, menghasilkan basis data emisi yang lebih dapat diperbandingkan secara adil (NREL, 2025).

Hasil analisis komprehensif menunjukkan hierarki emisi yang jelas antarsumber energi: pembangkit batu bara menempati posisi tertinggi dengan emisi siklus hidup mencapai ratusan hingga lebih dari seribu gram CO₂ ekuivalen per kilowatt-jam (kWh), diikuti oleh gas alam yang meskipun lebih bersih dibandingkan batu bara tetap menghasilkan emisi signifikan terutama akibat kebocoran metana (*fugitive emissions*) sepanjang rantai pasok; sementara sumber energi rendah karbon seperti tenaga air, angin, surya, dan nuklir menunjukkan emisi siklus hidup yang jauh lebih rendah, dengan nuklir secara konsisten tercatat sebagai salah satu sumber energi dengan emisi siklus hidup terendah di antara seluruh teknologi pembangkit yang dievaluasi, diperkirakan berkisar 5,1 hingga 6,4 gram CO₂ ekuivalen per kWh menurut estimasi *United Nations Economic Commission for Europe* (UNECE) tahun 2022 (*World Nuclear Association*, 2024). Laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) tahun 2023 bahkan menegaskan bahwa pembangkit gas alam hanya masuk akal sebagai bagian dari strategi dekarbonisasi dalam kondisi sangat spesifik yang disertai teknologi penangkapan karbon (*carbon capture*) dan pencegahan kebocoran gas, mempertanyakan validitas narasi gas alam sebagai "bahan bakar jembatan" (*bridge fuel*) menuju energi terbarukan yang telah lama

dipromosikan dalam kebijakan energi banyak negara, termasuk Indonesia dan Vietnam.

Tabel 6.2 Estimasi Median Emisi Gas Rumah Kaca Siklus Hidup Berbagai Sumber Pembangkit Listrik. Disarikan dari NREL (2025), *World Nuclear Association* (2024), dan IPCC AR6 (2023)

Sumber Energi	Emisi Siklus Hidup (gram CO ₂ eq/kWh, estimasi median)	Kategori
Batu bara (tanpa CCS)	~800-1.000+	Sangat tinggi
Gas alam (tanpa CCS)	~400-500	Tinggi
Surya fotovoltaik	~40-50	Rendah
Tenaga angin	~10-15	Sangat rendah
Tenaga air (hydropower)	~10-20 (bervariasi signifikan)	Sangat rendah, bergantung jenis bendungan
Nuklir	~5-12	Terendah di antara sumber utama

5. Pompa Kalor dan Koefisien Performa: Membalik Arah Mesin Kalor

Prinsip termodinamika yang membatasi efisiensi mesin kalor juga berlaku, dengan arah terbalik, pada perangkat pompa kalor (*heat pump*) dan sistem refrigerasi, yang menggunakan kerja input untuk memindahkan panas dari reservoir bertemperatur rendah ke reservoir bertemperatur tinggi, proses yang secara spontan tidak akan pernah terjadi tanpa input kerja eksternal, sesuai pernyataan hukum kedua termodinamika dalam formulasi Clausius. Kinerja pompa kalor diukur menggunakan Koefisien Performa (*Coefficient of Performance/COP*), yang didefinisikan sebagai rasio panas yang dipindahkan terhadap kerja input yang diperlukan; menariknya, nilai COP pompa kalor modern dapat melampaui angka satu, bahkan mencapai tiga hingga lima pada kondisi operasional optimal, yang pada pandangan sekilas tampak

melanggar hukum kekekalan energi namun sebenarnya konsisten sepenuhnya dengan hukum pertama termodinamika karena energi panas yang dipindahkan berasal dari reservoir dingin di sekitarnya, bukan diciptakan dari kerja input semata.

Relevansi pompa kalor terhadap dilema energi yang dibahas dalam bab ini sangat signifikan, mengingat teknologi ini menawarkan salah satu jalur dekarbonisasi paling efisien untuk sektor pemanasan dan pendinginan bangunan, yang secara global berkontribusi signifikan terhadap konsumsi energi total dan emisi gas rumah kaca terkait. Dengan COP tipikal tiga hingga empat, pompa kalor listrik dapat menghasilkan tiga hingga empat unit energi panas berguna untuk setiap unit energi listrik yang dikonsumsi, jauh melampaui efisiensi 100% maksimum teoretis pemanas resistif konvensional, sehingga elektrifikasi sistem pemanasan menggunakan pompa kalor yang dikombinasikan dengan listrik dari sumber rendah karbon merepresentasikan strategi dekarbonisasi ganda yang sangat efisien secara termodinamika sekaligus signifikan secara lingkungan, menjadikannya komponen penting dalam strategi transisi energi banyak negara maju saat ini, meskipun penerapannya di negara tropis lebih relevan aplikasi pendinginan dibanding pemanasan ruangan.

B. Masa Depan Panel Surya, Energi Nuklir, dan *Hydrogen Fuel Cell*

1. Panel Surya: Dari Silikon Konvensional hingga Sel Tandem Perovskit

Teknologi fotovoltaik berbasis silikon kristal, yang hingga kini masih mendominasi pasar panel surya, menghadapi batas efisiensi fundamental yang dikenal sebagai batas Shockley–Queisser. Batas ini menyatakan bahwa efisiensi maksimum teoritis sel surya sambungan tunggal (*single-junction*) berada pada kisaran sekitar 33%, karena hanya foton dengan energi yang sesuai terhadap celah pita (*bandgap*) semikonduktor yang dapat dikonversi secara efisien menjadi energi listrik. Foton dengan energi di bawah *bandgap* tidak dapat diserap, sedangkan kelebihan energi dari foton yang memiliki energi lebih tinggi akan hilang sebagai panas melalui proses termalisasi pembawa muatan (Shockley & Queisser, 1961; Green, 2022). Untuk melampaui batas

tersebut, penelitian mutakhir berfokus pada sel surya berbasis perovskit yang memiliki struktur kristal menyerupai kalsium titanat (CaTiO_3) dan memungkinkan pengaturan *bandgap* melalui rekayasa komposisi kimia. Fleksibilitas ini memungkinkan pengembangan sel surya tandem perovskit–silikon yang mampu memanfaatkan spektrum cahaya matahari secara lebih efisien dibandingkan sel silikon sambungan tunggal (Snaith, 2013; Green et al., 2022).

Dalam beberapa tahun terakhir, efisiensi sel surya tandem perovskit–silikon meningkat dengan sangat cepat. Rekor efisiensi tersertifikasi oleh National Renewable Energy Laboratory (NREL) telah melampaui 34% pada perangkat tandem, menunjukkan bahwa teknologi tersebut berhasil melampaui batas teoritis sel surya silikon sambungan tunggal (*National Renewable Energy Laboratory*, 2025). Sementara itu, sel surya perovskit sambungan tunggal telah mencapai efisiensi laboratorium lebih dari 27%, sedangkan modul perovskit berukuran besar telah melampaui 23%, meskipun masih terdapat kesenjangan kinerja antara sel skala laboratorium dan modul komersial. Berbagai penelitian terkini berfokus pada rekayasa antarmuka, optimasi lapisan transpor muatan, pengendalian proses kristalisasi, serta pemanfaatan kecerdasan buatan dan *machine learning* untuk mempercepat penemuan material dan optimasi desain perangkat fotovoltaik generasi berikutnya (Green et al., 2025).

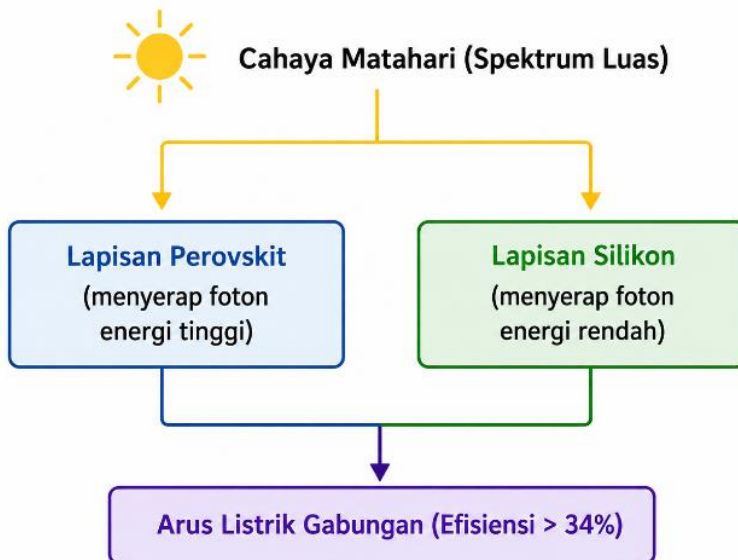
Tabel 6.3 Perbandingan Efisiensi dan Status Komersialisasi Teknologi Sel Surya Utama

Teknologi Sel Surya	Efisiensi Rekor Tersertifikasi (2025-2026)	Limit Teoretis	Status Komersialisasi
Silikon kristal tunggal (<i>single-junction</i>)	~27%	~29-32% (Shockley-Queisser)	Matang, dominan pasar global
Perovskit sambungan tunggal	~27% (lab kecil), ~23% (modul)	~30%	Pra-komersial, tantangan stabilitas
Tandem perovskit-silikon	34,85% (LONGi, 2025)	~43% (<i>multi-junction</i>)	Mulai memasuki produksi pilot skala besar

Kesterit (CZTS)	Rekor dunia baru diumumkan 2025	~32%	Riset awal, potensi bebas elemen langka
-----------------	---------------------------------	------	---

Disarikan dari Green et al., (2025)

Gambar 6.2 Skema Konseptual Sel Surya Tandem Perovskit-Silikon yang Memanfaatkan Dua Lapisan Penyerap Untuk Menangkap Spektrum Cahaya Matahari yang Lebih Luas



2. Tantangan Stabilitas dan Keberlanjutan Sel Surya Perovskit

Sel surya perovskit merupakan salah satu teknologi fotovoltaik generasi baru yang mengalami perkembangan sangat pesat dalam satu dekade terakhir karena memiliki efisiensi konversi daya (*power conversion efficiency*/PCE) yang telah melampaui 26% pada perangkat sambungan tunggal (*single-junction*) dan lebih dari 34% pada konfigurasi tandem silikon-perovskit. Selain memiliki efisiensi tinggi, material perovskit juga menawarkan berbagai keunggulan, seperti biaya produksi yang relatif rendah, proses fabrikasi pada suhu rendah, sifat optik yang dapat direkayasa (*tunable bandgap*), serta kemampuan menyerap cahaya yang sangat baik. Namun demikian, sebelum teknologi ini dapat diimplementasikan secara luas dalam skala komersial, masih terdapat tantangan besar yang berkaitan dengan stabilitas material dan keberlanjutan lingkungan.

Salah satu kelemahan utama sel surya perovskit adalah rendahnya stabilitas kimia dan struktural. Struktur kristal perovskit,

khususnya yang berbasis metilamonium timbal iodida ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$), sangat sensitif terhadap faktor lingkungan seperti kelembapan, oksigen, panas, dan paparan sinar ultraviolet. Ketika terpapar uap air, material perovskit mengalami proses hidrolisis yang menyebabkan dekomposisi menjadi timbal iodida (PbI_2), metilamonium iodida, dan senyawa volatil lainnya. Proses degradasi ini mengakibatkan penurunan kemampuan material dalam menyerap cahaya serta meningkatnya rekombinasi pembawa muatan, sehingga efisiensi sel surya menurun secara signifikan.

Selain kelembapan, temperatur tinggi juga mempercepat degradasi material perovskit. Dalam kondisi operasi nyata, suhu permukaan modul surya dapat mencapai lebih dari 70°C , terutama di wilayah tropis dengan intensitas radiasi matahari tinggi. Pada temperatur tersebut, ion-ion dalam struktur perovskit menjadi lebih mudah bermigrasi sehingga memicu perubahan fase kristal dan pembentukan cacat (*defects*). Migrasi ion ini juga menyebabkan terjadinya histeresis pada kurva arus-tegangan (*current-voltage hysteresis*), yang menjadi salah satu karakteristik khas sel surya perovskit dan dapat memengaruhi akurasi pengukuran efisiensi maupun kestabilan performa jangka panjang.

Paparan sinar ultraviolet turut memperburuk stabilitas perangkat. Radiasi UV dapat menghasilkan reaksi fotokimia pada lapisan transport elektron, khususnya yang menggunakan titanium dioksida (TiO_2), sehingga mempercepat degradasi antarmuka antara lapisan aktif perovskit dengan material transport muatan. Kerusakan antarmuka ini meningkatkan laju rekombinasi elektron dan hole, mengurangi tegangan rangkaian terbuka (*open-circuit voltage*), serta mempercepat penurunan efisiensi selama penggunaan.

Tantangan berikutnya adalah migrasi ion di dalam material perovskit. Berbeda dengan silikon kristal yang memiliki struktur atom relatif stabil, material perovskit mengandung ion-ion halida dan kation organik yang relatif mudah bergerak ketika diberikan medan listrik atau mengalami pemanasan. Migrasi ion ini menyebabkan perubahan distribusi medan listrik internal, ketidakstabilan karakteristik listrik, serta mempercepat degradasi antarmuka antar lapisan dalam perangkat. Fenomena tersebut menjadi salah satu penyebab utama rendahnya umur

operasional sel surya perovskit dibandingkan teknologi silikon konvensional.

Dari aspek keberlanjutan, isu terbesar adalah penggunaan timbal (Pb) sebagai komponen utama dalam sebagian besar material perovskit berkinerja tinggi. Timbal merupakan logam berat yang bersifat toksik terhadap manusia maupun lingkungan. Apabila modul mengalami kerusakan akibat benturan, kebakaran, atau pembuangan yang tidak tepat, terdapat potensi pelepasan ion timbal ke lingkungan yang dapat mencemari tanah dan sumber air. Oleh karena itu, aspek keselamatan dan sistem daur ulang (*recycling*) menjadi bagian penting dalam pengembangan teknologi perovskit menuju komersialisasi yang berkelanjutan.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengurangi dampak toksisitas tersebut, salah satunya melalui pengembangan material perovskit bebas timbal (*lead-free perovskites*) dengan mengganti Pb menggunakan unsur seperti timah (Sn), germanium (Ge), bismut (Bi), atau antimon (Sb). Akan tetapi, hingga saat ini material alternatif tersebut masih menghadapi berbagai kendala, antara lain efisiensi yang lebih rendah, stabilitas yang belum memadai, serta kecenderungan mengalami oksidasi lebih cepat, terutama pada perovskit berbasis timah.

Untuk mengatasi permasalahan stabilitas, berbagai strategi rekayasa material terus dikembangkan. Salah satunya adalah penggunaan perovskit multi-kation dan multi-halida yang menggabungkan kation formamidinium (FA), sesium (Cs), rubidium (Rb), atau metilamonium (MA) untuk meningkatkan kestabilan fase kristal. Selain itu, teknik pasivasi cacat (*defect passivation*) menggunakan molekul organik, garam halida, atau material dua dimensi (*2D perovskite*) terbukti mampu mengurangi jumlah cacat kristal sehingga memperpanjang umur perangkat.

Strategi lain yang sangat penting adalah enkapsulasi (*encapsulation*). Lapisan pelindung berbahan kaca, polimer multilapis, atau penghalang kelembapan (*moisture barrier*) digunakan untuk mencegah masuknya air dan oksigen ke dalam struktur sel surya. Teknologi enkapsulasi modern telah mampu mempertahankan lebih dari 90% efisiensi awal setelah ribuan jam pengujian pada kondisi temperatur dan kelembapan tinggi sesuai standar internasional, sehingga memberikan harapan terhadap peningkatan umur operasional perangkat.

Pendekatan lain yang berkembang pesat adalah penerapan konfigurasi tandem silikon-perovskit. Dalam sistem ini, lapisan perovskit ditempatkan di atas sel silikon sehingga kedua material dapat memanfaatkan bagian spektrum matahari yang berbeda secara lebih efisien. Selain meningkatkan efisiensi konversi energi, konfigurasi tandem juga memungkinkan pengurangan ketebalan lapisan perovskit sehingga dapat membantu meningkatkan stabilitas perangkat apabila dikombinasikan dengan teknik enkapsulasi dan rekayasa antarmuka yang tepat.

3. Energi Nuklir: Kebangkitan Reaktor Modular Kecil (*Small Modular Reactor*)

Energi nuklir merupakan salah satu sumber energi yang menghasilkan emisi karbon sangat rendah selama proses pembangkitan listrik. Berbeda dengan pembangkit listrik tenaga surya dan angin yang bergantung pada kondisi cuaca, pembangkit listrik tenaga nuklir dapat beroperasi selama 24 jam sehari secara terus-menerus sehingga mampu menyediakan pasokan listrik yang stabil. Kemampuan ini dikenal sebagai *baseload power*, yaitu kemampuan menyediakan daya dasar yang selalu tersedia untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat. Karena alasan tersebut, energi nuklir kembali mendapat perhatian di berbagai negara sebagai salah satu solusi untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sekaligus mencapai target penurunan emisi gas rumah kaca.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, pembangunan pembangkit listrik tenaga nuklir konvensional menghadapi berbagai kendala. Reaktor nuklir berukuran besar umumnya memiliki kapasitas lebih dari 1.000 megawatt listrik (MWe), membutuhkan investasi puluhan miliar dolar, serta memerlukan waktu pembangunan antara 8 hingga 15 tahun. Selain itu, proses perizinan, konstruksi, dan pengujian keselamatan yang sangat ketat menyebabkan banyak proyek mengalami keterlambatan dan pembengkakan biaya. Tantangan tersebut mendorong para ilmuwan dan industri energi mengembangkan konsep reaktor nuklir yang lebih kecil, lebih sederhana, dan lebih fleksibel, yaitu Reaktor Modular Kecil (*Small Modular Reactor* atau SMR).

a. Pengertian *Small Modular Reactor* (SMR)

Small Modular Reactor adalah reaktor nuklir yang memiliki kapasitas pembangkitan listrik relatif kecil, umumnya kurang dari 300 megawatt listrik (MWe) per unit. Disebut *modular* karena sebagian besar komponen reaktor diproduksi di pabrik menggunakan proses manufaktur yang terstandarisasi, kemudian diangkut ke lokasi pembangkit untuk dirakit. Pendekatan ini berbeda dengan pembangkit nuklir konvensional yang hampir seluruh proses konstruksinya dilakukan di lokasi proyek. Konsep modular memberikan berbagai keuntungan. Produksi di pabrik memungkinkan kualitas komponen lebih terkontrol, mengurangi kesalahan konstruksi di lapangan, mempercepat waktu pembangunan, serta menekan biaya produksi melalui pembuatan dalam jumlah besar. Selain itu, apabila kebutuhan listrik meningkat, operator dapat menambahkan modul reaktor baru tanpa harus membangun pembangkit berkapasitas sangat besar sejak awal.

b. Mengapa SMR Menjadi Tren Baru?

Kebangkitan minat terhadap SMR dipengaruhi oleh beberapa faktor penting. Pertama, dunia sedang berupaya mengurangi emisi karbon untuk mengatasi perubahan iklim. Banyak negara berkomitmen mencapai target *net zero emission* sehingga membutuhkan sumber energi yang bersih sekaligus mampu menyediakan listrik secara stabil. Kedua, kebutuhan listrik global terus meningkat akibat pertumbuhan penduduk, perkembangan industri, elektrifikasi kendaraan, serta meningkatnya penggunaan pusat data (*data center*) dan teknologi kecerdasan buatan (*artificial intelligence*). Semua sektor tersebut memerlukan pasokan listrik yang besar dan andal. Ketiga, banyak pembangkit listrik berbahan bakar batu bara mulai memasuki masa pensiun sehingga dibutuhkan sumber energi pengganti yang mampu menghasilkan listrik secara terus-menerus tanpa menghasilkan emisi karbon dalam jumlah besar. Keempat, teknologi manufaktur modern memungkinkan komponen reaktor diproduksi secara lebih cepat dan lebih presisi dibandingkan beberapa dekade sebelumnya.

c. Cara Kerja SMR

Prinsip kerja SMR pada dasarnya sama dengan pembangkit listrik tenaga nuklir konvensional. Di dalam inti reaktor terdapat bahan bakar nuklir, umumnya uranium. Atom uranium mengalami proses fisi, yaitu pembelahan inti atom menjadi inti yang lebih kecil. Proses fisi menghasilkan energi panas dalam jumlah sangat besar. Panas tersebut digunakan untuk memanaskan pendingin reaktor, yang dapat berupa air, gas, logam cair, atau garam cair tergantung jenis reaktornya. Energi panas kemudian dimanfaatkan untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi yang memutar turbin. Turbin menggerakkan generator sehingga menghasilkan energi listrik yang selanjutnya disalurkan ke jaringan listrik nasional. Walaupun prinsip kerjanya sama, ukuran reaktor yang lebih kecil membuat sistem SMR lebih sederhana dan lebih mudah dikendalikan dibandingkan reaktor konvensional.

d. Jenis-Jenis Teknologi SMR

Berbagai negara mengembangkan teknologi SMR dengan pendekatan yang berbeda sesuai kebutuhan dan tujuan penggunaannya.

1) Reaktor Berpendingin Air (*Water-cooled Reactor*)

Jenis ini merupakan pengembangan langsung dari reaktor air bertekanan (*Pressurized Water Reactor* atau PWR) yang telah digunakan selama puluhan tahun. Air berfungsi sebagai pendingin sekaligus moderator neutron. Keunggulan teknologi ini adalah pengalaman operasional yang sangat panjang sehingga tingkat kepercayaannya tinggi. Sebagian besar desain SMR yang sedang dikembangkan menggunakan teknologi ini karena relatif mudah memperoleh izin keselamatan.

2) Reaktor Berpendingin Gas Bertemperatur Tinggi (*High Temperature Gas-cooled Reactor* atau HTGR)

HTGR menggunakan gas helium sebagai pendingin sehingga mampu menghasilkan temperatur hingga sekitar 750–950°C. Temperatur yang sangat tinggi memungkinkan reaktor ini tidak hanya menghasilkan listrik, tetapi juga menyediakan panas untuk industri baja, semen, petrokimia, serta produksi hidrogen melalui proses elektrolisis suhu tinggi.

3) Reaktor Cepat Berpendingin Logam Cair (*Liquid Metal Cooled Fast Reactor*)

Reaktor ini menggunakan logam cair, seperti natrium atau timbal cair, sebagai pendingin. Keunggulannya adalah efisiensi termal yang lebih tinggi serta kemampuan memanfaatkan bahan bakar nuklir secara lebih optimal. Bahkan beberapa desain mampu menggunakan kembali limbah bahan bakar nuklir sebagai sumber energi.

4) Reaktor Garam Cair (*Molten Salt Reactor*)

Pada jenis ini, bahan bakar nuklir dicampurkan ke dalam garam cair yang sekaligus berfungsi sebagai pendingin. Teknologi ini menawarkan tingkat keselamatan tinggi karena tekanan operasinya rendah serta memiliki mekanisme keselamatan pasif yang mampu menghentikan reaksi fisi secara otomatis apabila terjadi kenaikan temperatur berlebihan.

5) Pembangkit Nuklir Terapung (*Floating Nuclear Power Plant*)

Reaktor dipasang pada kapal atau platform terapung sehingga dapat menyediakan listrik untuk daerah pesisir, pulau-pulau kecil, wilayah pertambangan, maupun kawasan terpencil yang sulit dijangkau jaringan listrik.

6) Mikroreaktor (*Microreactor*)

Mikroreaktor memiliki kapasitas sangat kecil, umumnya hanya beberapa megawatt. Reaktor jenis ini dirancang untuk menyediakan listrik bagi pangkalan militer, daerah terpencil, rumah sakit, pusat penelitian, hingga daerah yang terdampak bencana ketika pasokan listrik utama terputus.

SMR menawarkan berbagai kelebihan dibandingkan pembangkit nuklir konvensional. Ukuran reaktor yang lebih kecil membuat investasi awal menjadi lebih rendah sehingga risiko finansial proyek dapat dikurangi. Waktu pembangunan juga lebih singkat karena sebagian besar komponen telah diproduksi di pabrik sebelum dikirim ke lokasi pemasangan. Dari sisi keselamatan, banyak desain SMR menggunakan sistem keselamatan pasif (*passive safety system*). Sistem ini memanfaatkan hukum alam, seperti gravitasi, sirkulasi alami, dan konveksi panas, sehingga reaktor tetap dapat didinginkan meskipun terjadi pemadaman listrik atau kegagalan sistem aktif.

SMR juga lebih fleksibel dalam memenuhi kebutuhan listrik. Beberapa modul dapat dioperasikan secara bersamaan sehingga

kapasitas pembangkit dapat ditingkatkan secara bertahap sesuai pertumbuhan permintaan energi. Selain menghasilkan listrik, panas yang dihasilkan SMR dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan industri, seperti desalinasi air laut, produksi hidrogen, pemanasan distrik (*district heating*), dan penyediaan panas proses industri.

Walaupun menawarkan banyak keunggulan, pengembangan SMR masih menghadapi sejumlah tantangan. Sebagian besar desain masih berada pada tahap pengembangan, pengujian, atau demonstrasi sehingga pengalaman operasional jangka panjang masih terbatas. Biaya produksi juga masih relatif tinggi karena jumlah unit yang diproduksi belum banyak. Keuntungan ekonomi dari konsep modular baru akan benar-benar tercapai apabila produksi dilakukan secara massal. Tantangan lainnya adalah proses perizinan yang sangat ketat. Setiap desain baru harus melalui evaluasi keselamatan yang komprehensif sebelum memperoleh izin operasi dari otoritas pengawas nuklir.

Pengelolaan limbah radioaktif juga tetap menjadi perhatian utama. Walaupun volume limbah relatif kecil dibandingkan energi yang dihasilkan, limbah tersebut tetap memerlukan penyimpanan dan pengelolaan yang aman dalam jangka panjang. Selain itu, penerimaan masyarakat terhadap teknologi nuklir masih menjadi tantangan di banyak negara akibat kekhawatiran terhadap risiko kecelakaan dan limbah radioaktif. Oleh karena itu, edukasi publik serta transparansi dalam pengelolaan keselamatan menjadi faktor yang sangat penting.

Saat ini berbagai negara berlomba mengembangkan teknologi SMR. Amerika Serikat mengembangkan berbagai desain melalui perusahaan swasta dan lembaga penelitian nasional. Kanada menjadikan SMR sebagai bagian dari strategi transisi energi bersih, terutama untuk memasok listrik di wilayah utara yang terpencil. Rusia telah mengoperasikan pembangkit nuklir terapung pertama di dunia, sedangkan Tiongkok mengembangkan HTGR yang telah memasuki tahap operasi komersial. Inggris, Prancis, Korea Selatan, Jepang, dan beberapa negara Eropa lainnya juga sedang mengembangkan desain SMR untuk memenuhi kebutuhan energi masa depan. Menurut *International Atomic Energy Agency* (IAEA), hingga tahun 2024 terdapat lebih dari 80 desain SMR yang sedang dikembangkan di berbagai negara. Meskipun belum semuanya memasuki tahap komersialisasi, perkembangan tersebut menunjukkan besarnya perhatian

dunia terhadap teknologi ini sebagai salah satu solusi penyediaan energi bersih.

4. SMR dan Sinergi Produksi Hidrogen: Kogenerasi Industri

Salah satu aplikasi paling menjanjikan SMR yang relevan langsung dengan pembahasan sel bahan bakar hidrogen pada sub-bab berikutnya adalah potensi kogenerasi industri, di mana panas bertemperatur tinggi yang dihasilkan reaktor khususnya tipe HTGR dan reaktor garam cair dimanfaatkan langsung untuk proses industri energi-intensif, termasuk produksi hidrogen melalui elektrolisis bersuhu tinggi atau reformasi uap metana terintegrasi nuklir. Sebagai ilustrasi skala industrial, sebuah instalasi SMR NuScale dengan enam modul reaktor diperkirakan mampu menghasilkan antara 250 hingga 270 ton hidrogen per hari ketika dikombinasikan dengan fasilitas produksi hidrogen, mendukung upaya transisi energi bersih dalam skala yang signifikan secara industrial (*International Atomic Energy Agency*, 2022; *World Nuclear Association*, 2024). Integrasi semacam ini menawarkan solusi elegan terhadap tantangan utama produksi hidrogen hijau konvensional, yakni kebutuhan listrik dalam jumlah sangat besar untuk proses elektrolisis, karena panas proses nuklir dapat secara langsung menurunkan kebutuhan energi listrik untuk memecah molekul air dibandingkan elektrolisis konvensional pada suhu kamar.

Meskipun prospek teknis SMR cukup menjanjikan, tantangan signifikan tetap menghambat adopsi komersial skala besar, termasuk kebutuhan SMR untuk mencapai skala ekonomi yang cukup agar kompetitif secara biaya dibandingkan sumber energi lain termasuk reaktor besar konvensional, energi terbarukan, dan bahan bakar fosil (*International Atomic Energy Agency*, 2022). Tantangan pengelolaan limbah radioaktif turut menjadi perhatian serius, mengingat limbah aktivitas rendah dari reaktor canggih termasuk SMR memerlukan fasilitas pembuangan dekat permukaan yang memadai, sementara terdapat oposisi politik signifikan terhadap pembangunan fasilitas pembuangan baru di sejumlah wilayah, menggambarkan bahwa tantangan energi nuklir tidak semata bersifat teknis, melainkan juga sangat dipengaruhi oleh faktor sosial-politik dan penerimaan publik yang kompleks. Badan Energi Nuklir merekomendasikan pengembangan kapabilitas asesmen independen oleh badan regulasi energi untuk

memastikan jalur menuju paritas harga dan kinerja (*price and performance parity/P3*) antara SMR dengan teknologi energi alternatif lainnya, sebuah pendekatan realistis yang menghindari ekspektasi berlebihan terhadap kecepatan adopsi SMR pada dekade mendatang.

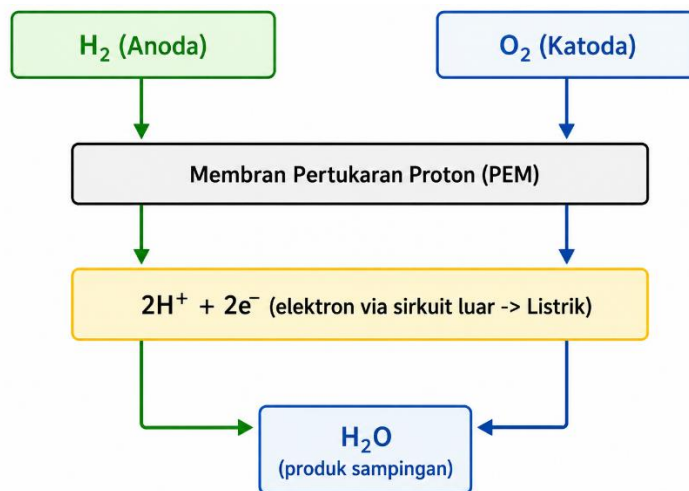
5. *Hydrogen Fuel Cell: Prinsip Kerja dan Tantangan Rantai Pasok*

Sel bahan bakar hidrogen (*hydrogen fuel cell*) bekerja berdasarkan prinsip elektrokimia yang secara fundamental berbeda dari mesin kalor konvensional, karena tidak terikat oleh batasan efisiensi Carnot sebagaimana dijelaskan pada sub-bab 6.1 sel bahan bakar secara langsung mengonversi energi kimia hidrogen menjadi energi listrik melalui reaksi elektrokimia terkontrol antara hidrogen dan oksigen, menghasilkan air sebagai satu-satunya produk sampingan tanpa emisi gas rumah kaca pada titik penggunaan. Jenis sel bahan bakar yang paling banyak dikembangkan untuk aplikasi transportasi dan portabel adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), yang menawarkan kerapatan daya tinggi, waktu respons cepat, dan operasi pada temperatur relatif rendah dibandingkan jenis sel bahan bakar lain, dengan efisiensi konversi tipikal berkisar antara 40 hingga 60% jauh lebih tinggi dibandingkan mesin pembakaran internal konvensional yang umumnya hanya mencapai efisiensi 20-35%, meskipun masih menghadapi tantangan signifikan terkait overpotential aktivasi dan resistansi ohmik internal yang membatasi efisiensi maksimum praktisnya.

Tantangan terbesar dalam pengembangan ekosistem hidrogen sebagai vektor energi bersih bukan terletak pada teknologi sel bahan bakar itu sendiri, melainkan pada produksi hidrogen yang benar-benar rendah karbon (*green hydrogen*) serta infrastruktur distribusi dan penyimpanannya. Produksi hidrogen konvensional melalui elektrolisis air menggunakan elektroliser basa (*alkaline electrolyzer*) maupun elektroliser membran pertukaran proton (*PEM electrolyzer*) umumnya menunjukkan efisiensi konversi listrik-ke-hidrogen yang relatif rendah, sehingga produksi hidrogen hijau skala besar memerlukan input listrik terbarukan dalam jumlah sangat besar (Buttler & Spliethoff, 2018). Integrasi sumber panas nuklir bersuhu tinggi sebagaimana dibahas pada sub-bab sebelumnya, ditambah inovasi pada desain katalis, reaktor membran, dan teknologi mikroreaktor, menjadi arah riset aktif untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan rantai produksi hidrogen, mengingat

tantangan teknis dan ekonomi sistem terintegrasi ini masih memerlukan pengembangan lebih lanjut sebelum dapat bersaing secara biaya dengan hidrogen abu-abu (*grey hydrogen*) yang diproduksi dari gas alam tanpa penangkapan karbon (Dash et al., 2024).

Gambar 6.3. Skema Umum Prinsip Kerja *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) yang Mengonversi Hidrogen dan Oksigen Menjadi Listrik dan Air



6. Studi Kasus: Transisi Energi Indonesia dan Tantangan Pencapaian Target Bauran Energi Terbarukan

Indonesia menetapkan target ambisius melalui Kebijakan Energi Nasional (KEN) yang diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014, menargetkan pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) setidaknya mencapai 23% dari bauran energi primer nasional pada tahun 2025, meningkat menjadi 31% pada tahun 2050 (Renewable Energy Indonesia, 2025). Namun, realisasi di lapangan menunjukkan kesenjangan signifikan antara target dan capaian aktual: hingga akhir tahun 2024, bauran EBT Indonesia baru mencapai sekitar 14%, jauh tertinggal dari trayektori yang seharusnya mencapai 21% pada tahun yang sama, dengan suplai energi primer nasional tahun 2023 masih didominasi energi fosil sebesar 86,71%, terdiri dari 39,69% batu bara, 29,91% minyak bumi, dan 17,11% gas alam (Coaction Indonesia, 2025; Tempo, 2025). Direktur Eksekutif *Institute for Essential Services Reform* (IESR) Fabby Tumiwa menggambarkan kesenjangan ini secara tegas, menyatakan bahwa pencapaian target 23% pada akhir 2025 setara

dengan kebutuhan pembangunan sembilan gigawatt kapasitas pembangkit terbarukan dalam waktu satu tahun saja, sebuah target yang secara realistis sudah tidak lagi dapat tercapai mengingat keterlambatan eksekusi proyek sejak beberapa tahun sebelumnya (Tempo, 2025).

Analisis *Institute for Essential Services Reform* mengidentifikasi sejumlah faktor sistemik yang menghambat akselerasi transisi energi Indonesia, termasuk keterlambatan lelang pembangkit energi terbarukan oleh perusahaan listrik negara sejak 2019, kendala kelayakan pembiayaan (*bankability*) proyek-proyek yang telah berkontrak, kenaikan suku bunga yang memperberat struktur pembiayaan proyek energi terbarukan, serta proses revisi regulasi PLTS atap yang berbelarut-larut sehingga menghambat realisasi target pembangkit listrik tenaga surya atap sebesar 3,6 gigawatt (IESR, 2024). Komposisi EBT Indonesia saat ini juga masih sangat didominasi oleh biofuel, khususnya program biodiesel B35 yang berkontribusi sekitar 4,54% dari bauran energi primer, jauh melampaui kontribusi sumber EBT non-biomassa seperti tenaga surya yang hanya menyumbang 0,16% dan tenaga angin sebesar 0,06%, menggambarkan ketimpangan eksploitasi yang sangat besar terhadap potensi energi surya dan angin Indonesia yang sebenarnya melimpah secara geografis namun masih jauh dari dimanfaatkan secara optimal (Coaction Indonesia, 2025).

Kapasitas fiskal daerah turut menjadi kendala struktural signifikan dalam akselerasi transisi energi subnasional, dengan sekitar 39% provinsi di Indonesia memiliki kapasitas fiskal rendah yang sering menimbulkan konflik antara target bauran energi daerah dengan kemampuan anggaran riil untuk merealisasikannya; rata-rata alokasi anggaran provinsi untuk energi terbarukan pada tahun 2023 hanya berkisar Rp1 miliar, atau sekitar 5% dari total anggaran sektor energi daerah (IESR, 2025). Secara keseluruhan, Indonesia diperkirakan memerlukan investasi sebesar USD 18 miliar per tahun untuk dekarbonisasi sektor energi dan transportasi guna mencapai target net zero emission pada 2030, sebuah angka investasi yang jauh melampaui realisasi investasi EBTK saat ini dan menggambarkan skala tantangan pembiayaan yang harus diatasi pemerintah Indonesia apabila benar-benar berkomitmen mencapai visi 100% energi terbarukan dalam jangka waktu satu dekade sebagaimana dinyatakan dalam forum internasional (IESR, 2025).

Tabel 6.4 Perbandingan Target dan Realisasi Bauran Energi Terbarukan Indonesia. Disarikan dari Coaction Indonesia (2025), Tempo (2025), dan IESR (2024-2025)

Indikator	Target KEN/RUEN	Realisasi Akhir 2024	Kesenjangan
Bauran EBT nasional	23% (2025)	~14%	~9 poin persentase
PLTS atap	3,6 GW	~100-200 MW (kumulatif awal)	Sangat jauh dari target
Kontribusi biofuel terhadap EBT	Mendominasi sesuai program B35/B40	~4,5% dari bauran energi primer	Realisasi relatif sesuai rencana
Kontribusi surya terhadap bauran primer	Berpotensi besar (3,6 TW potensi)	~0,16%	Eksplorasi sangat minim dari potensi

7. Sintesis: Tidak Ada Solusi Tunggal bagi Dilema Energi

Pembahasan menyeluruh mengenai panel surya, energi nuklir, dan sel bahan bakar hidrogen pada sub-bab ini menegaskan satu kesimpulan penting yang sering diabaikan dalam wacana publik populer: tidak terdapat satu pun teknologi energi tunggal yang mampu menyelesaikan dilema energi global secara menyeluruh dalam waktu dekat. Panel surya menawarkan biaya yang terus menurun dan skalabilitas tinggi namun menghadapi keterbatasan intermitensi yang memerlukan solusi penyimpanan energi komplementer; energi nuklir menawarkan daya dasar rendah karbon yang konsisten namun menghadapi tantangan biaya modal, waktu pembangunan, dan penerimaan publik yang kompleks; sementara sel bahan bakar hidrogen menawarkan fleksibilitas penyimpanan energi jangka panjang dan aplikasi sektor sulit-dekarbonisasi seperti transportasi berat dan industri, namun masih terkendala efisiensi rantai produksi-distribusi yang belum optimal secara ekonomi pada skala besar.

Pendekatan yang paling realistis bagi transisi energi global, sebagaimana tercermin dalam strategi banyak negara maju maupun berkembang termasuk Indonesia, adalah portofolio energi terdiversifikasi yang mengombinasikan berbagai teknologi sesuai karakteristik geografis, kebutuhan beban listrik, dan kapasitas fiskal masing-masing wilayah, alih-alih bertaruh secara eksklusif pada satu teknologi tunggal sebagai solusi universal. Prinsip termodinamika yang dibahas pada sub-bab 6.1 memberikan kerangka analitis yang konsisten untuk mengevaluasi seluruh teknologi ini secara objektif, menegaskan bahwa setiap teknologi konversi energi tanpa terkecuali tunduk pada batasan fisika fundamental yang sama, sehingga klaim mengenai teknologi energi "sempurna" tanpa kompromi efisiensi maupun keberlanjutan perlu disikapi dengan kehati-hatian ilmiah yang memadai oleh pembuat kebijakan maupun masyarakat umum.

8. Tantangan Intermitensi dan Penyimpanan Energi Skala Jaringan

Karakteristik intermitensi sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin yang produksinya bergantung pada kondisi cuaca dan siklus siang-malam yang tidak dapat dikendalikan manusia menimbulkan tantangan teknis signifikan bagi stabilitas jaringan listrik yang memerlukan keseimbangan permanen antara pasokan dan permintaan daya setiap saat. Berbeda dengan pembangkit fosil maupun nuklir yang dapat menghasilkan daya dasar konsisten sesuai kebutuhan, penetrasi tinggi energi terbarukan intermiten pada bauran energi nasional memerlukan investasi besar pada sistem penyimpanan energi skala jaringan (*grid-scale energy storage*) untuk menjembatani periode produksi rendah, baik berupa baterai elektrokimia skala besar, sistem penyimpanan energi termal seperti baterai Carnot, maupun teknologi penyimpanan hidrogen yang memanfaatkan kelebihan produksi listrik terbarukan untuk elektrolisis air pada periode surplus produksi.

Konsep *Power-to-Gas-to-Power* (P2G2P), yang mengonversi kelebihan listrik terbarukan menjadi hidrogen melalui elektrolisis untuk kemudian dikonversi kembali menjadi listrik melalui sel bahan bakar pada saat dibutuhkan, menawarkan solusi penyimpanan energi jangka panjang yang tidak dapat ditandingi baterai elektrokimia konvensional yang umumnya optimal untuk penyimpanan jangka pendek berdurasi

jam hingga hari. Namun demikian, efisiensi siklus balik (*round-trip efficiency*) sistem P2G2P umumnya jauh lebih rendah dibandingkan baterai litium-ion akibat kerugian energi kumulatif pada setiap tahap konversi elektrolisis, kompresi/penyimpanan hidrogen, dan konversi kembali melalui sel bahan bakar sehingga teknologi ini secara ekonomi lebih cocok untuk skenario penyimpanan energi musiman (*seasonal storage*) berdurasi minggu hingga bulan, di mana kerugian efisiensi per siklus menjadi kurang signifikan dibandingkan manfaat fleksibilitas penyimpanan jangka panjang yang ditawarkannya.

Tabel 6.5 Perbandingan Karakteristik Teknologi Penyimpanan Energi Skala Jaringan Beserta Durasi Optimal dan Efisiensi Siklus Baliknya

Teknologi Penyimpanan	Durasi Optimal	Efisiensi Siklus Balik Tipikal	Keterbatasan Utama
Baterai litium-ion	Jam hingga hari	85-95%	Biaya tinggi untuk durasi panjang, degradasi siklus
Pumped-hydro storage	Jam hingga hari/minggu	70-85%	Memerlukan topografi geografis spesifik
Baterai Carnot (termal)	Jam hingga hari	60-80% (hingga >100% dengan pompa kalor)	Sensitif terhadap kualitas insulasi
Power-to-Gas-to-Power (H ₂)	Minggu hingga musiman	30-45%	Efisiensi rendah, infrastruktur baru diperlukan

9. Tantangan dan Peluang dalam Transisi ke Energi Terbarukan

Transisi dari energi fosil ke energi terbarukan merupakan langkah penting dalam mengatasi perubahan iklim dan mencapai keberlanjutan lingkungan. Namun, perjalanan menuju transisi ini dihadapkan pada berbagai tantangan dan peluang yang perlu dipahami secara mendalam.

Salah satu tantangan utama adalah hambatan ekonomi. Investasi awal yang tinggi untuk infrastruktur energi terbarukan, seperti panel surya dan turbin angin, menjadi penghalang signifikan bagi banyak negara, terutama yang sedang berkembang. Selain itu, biaya penyimpanan energi, seperti baterai untuk menyimpan energi dari sumber yang tidak selalu tersedia (seperti matahari dan angin), masih relatif tinggi. Ini mempengaruhi daya saing energi terbarukan dibandingkan dengan energi fosil yang sudah mapan.

Dari sisi teknologi, keterbatasan dalam efisiensi konversi energi dan penyimpanan menjadi tantangan besar. Teknologi penyimpanan energi yang lebih efisien dan murah masih dalam tahap pengembangan. Selain itu, integrasi energi terbarukan ke dalam jaringan listrik yang ada memerlukan sistem manajemen yang canggih untuk menangani fluktuasi pasokan energi.

Namun, peluang dalam transisi ini juga sangat besar. Kemajuan teknologi terus mendorong penurunan biaya produksi dan peningkatan efisiensi energi terbarukan. Misalnya, biaya produksi listrik dari energi surya dan angin telah mengalami penurunan drastis dalam dekade terakhir. Selain itu, transisi ini membuka peluang ekonomi baru dalam bentuk pekerjaan di sektor energi terbarukan dan pengembangan teknologi hijau.

Secara global, kebijakan pemerintah yang mendukung, seperti insentif pajak dan subsidi untuk energi terbarukan, dapat mempercepat transisi ini. Kerjasama internasional juga penting untuk berbagi pengetahuan dan teknologi, serta membantu negara-negara berkembang dalam mengatasi hambatan ekonomi dan teknologi.



BAB VII

PERUBAHAN IKLIM DALAM LENSEA SAINS MULTIDISIPLIN

Perubahan iklim merupakan fenomena yang tidak dapat dipahami secara utuh melalui kacamata satu disiplin ilmu tunggal, melainkan menuntut pendekatan multidisiplin yang mengintegrasikan kimia atmosfer, fisika radiasi, ekologi, oseanografi, hingga ilmu kebencanaan dan kebijakan publik. Laporan Sintesis Keenam *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC AR6)* tahun 2023 menegaskan secara tegas bahwa aktivitas manusia telah secara tidak terbantahkan menyebabkan pemanasan global, dengan dampak luas yang telah teramati pada sistem manusia maupun perubahan ekosistem terestrial, air tawar, dan lautan di seluruh dunia (IPCC, 2023). Bab ini disusun untuk membawa pembaca menyusuri rantai kausal perubahan iklim secara sistematis: dimulai dari mekanisme kimia dan fisika yang mendasari efek rumah kaca pada tingkat molekuler dan radiatif, dilanjutkan dengan dampak ekologis nyata yang telah dan akan terus terjadi pada berbagai skala ekosistem, dan diakhiri dengan strategi mitigasi serta pengurangan risiko bencana yang menjadi respons kolektif umat manusia terhadap krisis ini.

Pendekatan multidisiplin yang digunakan dalam bab ini mencerminkan kebutuhan epistemologis nyata: memahami mengapa karbon dioksida menyerap radiasi inframerah memerlukan prinsip fisika kuantum mengenai vibrasi molekuler; memahami mengapa terumbu karang mengalami pemutihan massal memerlukan prinsip kimia kelautan mengenai kesetimbangan karbonat; sementara memahami mengapa suatu kebijakan mitigasi berhasil atau gagal diimplementasikan memerlukan pemahaman mengenai ekonomi politik dan tata kelola kelembagaan. Tanpa integrasi lintas-disiplin semacam ini, pemahaman publik mengenai perubahan iklim berisiko terjebak dalam generalisasi dangkal yang tidak mampu menjelaskan kompleksitas nyata persoalan, maupun mengevaluasi secara kritis efektivitas berbagai solusi yang diusulkan oleh pembuat kebijakan di berbagai tingkatan.

Relevansi bab ini bagi Indonesia sangat signifikan, mengingat negara kepulauan terbesar di dunia ini menghadapi kerentanan iklim multidimensional: garis pantai sepanjang lebih dari 99.000 kilometer yang rentan terhadap kenaikan muka laut, ekosistem mangrove dan terumbu karang terluas di dunia yang menyimpan cadangan karbon biru (*blue carbon*) sangat besar namun terus terdegradasi, serta paparan tinggi terhadap bencana hidrometeorologi seperti banjir, longsor, dan kekeringan yang intensitasnya diproyeksikan meningkat seiring pemanasan global berlanjut. Pemahaman yang kokoh mengenai sains multidisiplin perubahan iklim menjadi prasyarat penting bagi generasi pembuat kebijakan, ilmuwan, dan masyarakat umum Indonesia untuk merumuskan strategi adaptasi dan mitigasi yang efektif, berbasis bukti ilmiah yang kuat, sekaligus kontekstual terhadap kerentanan geografis dan sosial-ekonomi spesifik Indonesia.

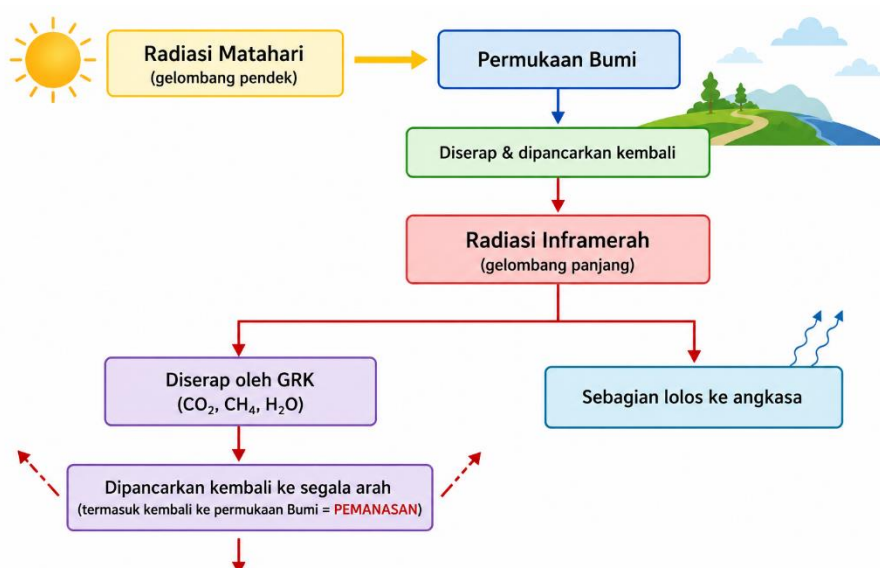
A. Kimia Lingkungan (Gas Rumah Kaca) dan Fisika Radiasi

1. Mekanisme Fisika Dasar Efek Rumah Kaca

Efek rumah kaca merupakan fenomena fisika atmosfer yang fundamental bagi kelayakhunian Bumi, namun intensifikasinya akibat aktivitas manusia menjadi akar penyebab perubahan iklim kontemporer. Secara mekanistik, radiasi gelombang pendek dari matahari (terutama spektrum cahaya tampak dan ultraviolet) menembus atmosfer relatif tidak terhalang dan diserap oleh permukaan Bumi, yang kemudian memancarkan kembali energi tersebut sebagai radiasi inframerah gelombang panjang sesuai hukum radiasi benda hitam Planck. Molekul gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan uap air (H_2O) memiliki struktur molekuler asimetris yang memungkinkan mode vibrasi tertentu, peregangan dan pembengkokan ikatan kimiawi beresonansi tepat dengan frekuensi radiasi inframerah, sehingga molekul-molekul tersebut menyerap sebagian radiasi inframerah yang dipancarkan permukaan Bumi alih-alih membiarkannya lolos langsung ke luar angkasa, kemudian memancarkan kembali sebagian energi tersebut ke segala arah termasuk kembali ke permukaan Bumi, menciptakan efek pemanasan tambahan yang dikenal sebagai efek rumah kaca.

Penting dipahami bahwa tidak seluruh gas di atmosfer berperilaku sebagai gas rumah kaca; molekul diatomik simetris seperti nitrogen (N_2) dan oksigen (O_2) yang bersama-sama membentuk lebih dari 99% komposisi atmosfer Bumi tidak memiliki momen dipol yang berubah selama vibrasi molekuler, sehingga molekul-molekul tersebut transparan terhadap radiasi inframerah dan tidak berkontribusi terhadap efek rumah kaca sama sekali, betapapun melimpah konsentrasinya di atmosfer. Sebaliknya, gas-gas dengan struktur molekuler asimetris atau poliatomik meskipun konsentrasinya di atmosfer jauh lebih kecil, bahkan pada orde bagian per juta (ppm) atau bagian per miliar (ppb) justru menjadi kontributor utama efek rumah kaca, sebuah ironi fisika yang menjelaskan mengapa peningkatan konsentrasi CO_2 dari sekitar 280 ppm pada era praindustri menjadi lebih dari 420 ppm saat ini dapat menimbulkan dampak pemanasan global yang begitu signifikan meskipun secara proporsional gas tersebut tetap merupakan komponen minor atmosfer.

Gambar 7.1 Mekanisme Dasar Efek Rumah Kaca: Interaksi Radiasi Gelombang Pendek dan Gelombang Panjang dengan Gas Rumah Kaca di Atmosfer



2. Radiative Forcing dan Global Warming Potential (GWP)

Untuk mengukur secara kuantitatif kontribusi masing-masing gas rumah kaca terhadap pemanasan global, ilmuwan iklim menggunakan

konsep *Effective Radiative Forcing* (ERF), yang didefinisikan sebagai perubahan fluks energi neto pada batas atas atmosfer (*Top of Atmosphere*/TOA) akibat suatu gangguan tertentu, seperti perubahan konsentrasi gas rumah kaca, setelah memperhitungkan penyesuaian suhu troposfer dan stratosfer, uap air, awan, serta beberapa sifat permukaan yang tidak berkaitan langsung dengan perubahan suhu rata-rata global (IPCC AR6 WGI Chapter 7, 2023). ERF dinyatakan dalam satuan watt per meter persegi (W/m^2), dengan nilai positif menunjukkan efek pemanasan neto dan nilai negatif menunjukkan efek pendinginan neto terhadap sistem iklim Bumi. Kontribusi pemanasan dari emisi periode 2010-2019 relatif terhadap baseline praindustri 1850-1900, berdasarkan studi radiative forcing, diperkirakan sebesar $0,8^\circ\text{C}$ [rentang $0,5$ hingga $1,2^\circ\text{C}$] dari CO_2 saja, dengan kontribusi tambahan signifikan dari metana dan gas rumah kaca lainnya (IPCC AR6 SYR, 2023).

Karena setiap gas rumah kaca memiliki kapasitas penyerapan radiasi dan masa hidup atmosferik (*atmospheric lifetime*) yang berbeda-beda, ilmuwan mengembangkan metrik *Global Warming Potential* (GWP) untuk membandingkan dampak pemanasan relatif berbagai gas terhadap CO_2 sebagai referensi standar, dihitung dalam cakrawala waktu tertentu umumnya 20, 100, atau 500 tahun. Metana, misalnya, memiliki GWP yang jauh lebih tinggi dibandingkan CO_2 pada cakrawala waktu pendek karena kapasitas penyerapan radiasinya yang sangat kuat per molekul, meskipun masa hidup atmosferiknya relatif singkat (sekitar 12 tahun) dibandingkan CO_2 yang dapat bertahan di atmosfer selama berabad-abad; revisi signifikan terhadap perhitungan radiative forcing metana dalam dekade terakhir telah mendorong pembaruan estimasi GWP metana pada laporan-laporan IPCC terbaru (*Geophysical Research Letters*, dalam EGU sphere, 2025). Implikasi praktis dari perbedaan GWP dan masa hidup atmosferik ini sangat penting bagi strategi mitigasi: pengurangan emisi metana menawarkan potensi pengereman laju pemanasan jangka pendek yang lebih cepat dibandingkan pengurangan CO_2 semata, meskipun stabilisasi suhu jangka panjang tetap memerlukan pengurangan emisi CO_2 kumulatif secara mendalam.

Tabel 7.1 Karakteristik Utama Gas Rumah Kaca Dominan: Konsentrasi, Potensi Pemanasan Global (GWP-100), dan Masa Hidup Atmosferik

Gas Rumah Kaca	Konsentrasi Atmosfer Terkini (perkiraan)	GWP-100 (relatif terhadap CO ₂ =1)	Masa Hidup Atmosferik
Karbon dioksida (CO ₂)	~420 ppm	1 (referensi)	Ratusan hingga ribuan tahun
Metana (CH ₄)	~1.900 ppb	~28-30	~12 tahun
Dinitrogen oksida (N ₂ O)	~335 ppb	~265-298	~114 tahun
Gas halogen (mis. HFC, SF ₆)	Bervariasi, ppt	Ratusan hingga puluhan ribu	Bervariasi luas, dapat ribuan tahun

3. Siklus Karbon dan Sumber Emisi Antropogenik

Siklus karbon global menggambarkan pergerakan karbon antara empat reservoir utama: atmosfer, lautan, daratan (biosfer terestrial dan tanah), serta litosfer (batuan dan bahan bakar fosil), dengan pertukaran karbon antarreservoir berlangsung secara alami dalam kesetimbangan dinamis selama ribuan tahun sebelum era industri. Aktivitas manusia, terutama pembakaran bahan bakar fosil dan perubahan tata guna lahan, telah secara fundamental mengganggu kesetimbangan ini dengan memindahkan karbon yang sebelumnya terkunci dalam litosfer selama jutaan tahun ke dalam atmosfer dalam rentang waktu yang sangat singkat secara geologis hanya dua abad terakhir. Sumber emisi CO₂ antropogenik utama mencakup pembakaran batu bara, minyak bumi, dan gas alam untuk pembangkit listrik, transportasi, dan industri; deforestasi dan perubahan tata guna lahan yang melepaskan karbon tersimpan dalam biomassa dan tanah; serta proses industri tertentu seperti produksi semen yang melepaskan CO₂ melalui reaksi kimia kalsinasi batu kapur, terlepas dari sumber energi yang digunakan untuk menggerakkan proses tersebut.

Lautan dan biosfer terestrial berfungsi sebagai penyerap karbon (*carbon sink*) alami yang menyerap sekitar separuh dari total emisi CO₂ antropogenik setiap tahunnya, memberikan jasa ekosistem krusial yang memperlambat laju akumulasi CO₂ atmosfer dibandingkan apabila seluruh emisi tetap berada di atmosfer. Namun, kapasitas penyerapan alami ini bukan tanpa batas dan menunjukkan tanda-tanda penurunan efisiensi seiring pemanasan global berlanjut, baik akibat penurunan kelarutan CO₂ dalam air laut yang lebih hangat maupun stres iklim pada ekosistem hutan yang mengurangi kapasitas fotosintesis dan penyimpanan karbon biomassa. Para ilmuwan dari kerangka *Planetary Boundaries* menegaskan bahwa aktivitas manusia kini telah mendorong sistem Bumi keluar dari "ruang operasi aman" (*safe operating space*) bagi kemanusiaan pada beberapa batas planet sekaligus, termasuk perubahan iklim, sebuah peringatan tegas mengenai risiko sistemik yang dihadapi peradaban manusia apabila tren emisi saat ini terus berlanjut tanpa intervensi mendalam.

4. Aerosol Atmosferik: Efek Pendinginan yang Menutupi Sebagian Pemanasan

Selain gas rumah kaca, atmosfer Bumi juga mengandung aerosol yang berasal dari sumber alami, seperti letusan gunung berapi dan debu mineral, maupun dari aktivitas manusia, seperti pembakaran bahan bakar fosil, biomassa, dan proses industri. Secara keseluruhan, sebagian besar aerosol antropogenik memberikan efek pendinginan bersih terhadap sistem iklim melalui dua mekanisme utama. Pertama, interaksi aerosol-radiasi (*aerosol-radiation interactions*, ARI), yaitu ketika aerosol penghambur seperti sulfat memantulkan sebagian radiasi Matahari kembali ke angkasa sehingga mengurangi energi yang mencapai permukaan Bumi. Kedua, interaksi aerosol-awan (*aerosol-cloud interactions*, ACI), yaitu ketika aerosol bertindak sebagai inti kondensasi awan (*cloud condensation nuclei*, CCN), menghasilkan tetesan awan yang lebih banyak tetapi berukuran lebih kecil, meningkatkan albedo awan, dan dalam kondisi tertentu memperpanjang umur awan (IPCC, 2021; Bellouin et al., 2020). Berdasarkan *Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (AR6)*, gabungan *Effective Radiative Forcing* akibat interaksi aerosol-radiasi dan aerosol-awan sejak era praindustri diperkirakan sekitar $-1,3 \text{ W m}^{-2}$, sehingga menutupi

sebagian pemanasan yang disebabkan oleh gas rumah kaca antropogenik (IPCC, 2021).

Implikasi penting dari efek pendinginan aerosol ini adalah bahwa kebijakan pengendalian polusi udara yang umumnya bertujuan utama melindungi kesehatan masyarakat dari partikulat berbahaya dapat secara tidak sengaja mempercepat laju pemanasan global jangka pendek dengan mengurangi efek pendinginan aerosol yang selama ini menutupi sebagian pemanasan akibat gas rumah kaca, sebuah fenomena yang dikenal sebagai "*unmasking*" pemanasan tersembunyi. Fenomena ini telah teramati secara empiris pada beberapa kawasan yang berhasil menerapkan kebijakan udara bersih secara agresif, di mana penurunan polusi aerosol berkontribusi terhadap percepatan kenaikan suhu lokal yang terukur. Peluncuran satelit *EarthCARE* pada tahun 2024 menandai babak baru dalam observasi presisi tinggi interaksi aerosol-awan-radiasi, diharapkan dapat mengurangi ketidakpastian signifikan yang masih menyelimuti estimasi *radiative forcing* aerosol hingga saat ini, mengingat aerosol tetap menjadi salah satu komponen dengan ketidakpastian terbesar dalam pemodelan iklim global kontemporer (Bellouin et al., 2020).

Tabel 7.2 Estimasi Komponen Utama *Effective Radiative Forcing* (ERF) Global Periode Praindustri Hingga Modern. Disarikan dari IPCC AR6 WGI Chapter 7 (2023)

Komponen Radiative Forcing	Estimasi ERF (W/m ² , 1750-2014/2019)	Arah Efek
Gas rumah kaca (well-mixed)	~+2,5 hingga +3,5	Pemanasan (positif)
Ozon troposfer & stratosfer	~+0,2 hingga +0,5	Pemanasan (positif, bervariasi)
Aerosol (ARI+ACI gabungan)	~-1,3	Pendinginan (negatif)
Perubahan albedo permukaan (land-use)	~-0,1 hingga -0,2	Pendinginan ringan (negatif)
Total ERF netto	~+2,0 hingga +2,7	Pemanasan netto (positif)

5. Observasi Historis: Konsentrasi GRK dan Rekor Suhu Global

Catatan observasi langsung konsentrasi CO₂ atmosfer, yang dimulai secara sistematis di Observatorium Mauna Loa, Hawaii, sejak tahun 1958, memberikan bukti empiris paling kuat dan tidak terbantahkan mengenai peningkatan konsentrasi gas rumah kaca akibat aktivitas manusia, menunjukkan tren kenaikan konsisten dari sekitar 315 ppm pada awal pengukuran menjadi lebih dari 420 ppm pada pertengahan dekade 2020-an, jauh melampaui rentang variasi alami 180-300 ppm yang tercatat dalam data inti es (*ice core*) selama 800.000 tahun terakhir sebelum era industri. Data historis konsentrasi gas rumah kaca dan *effective radiative forcing* yang dikompilasi secara komprehensif dalam Lampiran V Laporan AR6 IPCC memberikan basis kuantitatif yang sangat rinci bagi pemodelan iklim, mencakup data konsentrasi berbagai spesies gas dalam satuan bagian per juta, bagian per miliar, maupun bagian per triliun untuk gas-gas halogen dengan konsentrasi sangat rendah namun GWP sangat tinggi (IPCC AR6 WGI Annex V, 2023).

Konsistensi antara tren peningkatan konsentrasi gas rumah kaca dengan tren kenaikan suhu rata-rata global permukaan memberikan validasi empiris kuat terhadap teori efek rumah kaca yang telah dirumuskan secara teoretis sejak akhir abad ke-19 oleh ilmuwan seperti Svante Arrhenius. Laporan Sintesis IPCC AR6 menegaskan dengan tingkat keyakinan sangat tinggi bahwa pengaruh manusia telah menghangatkan atmosfer, lautan, dan daratan tanpa keraguan ilmiah yang berarti, dengan suhu permukaan global rata-rata pada dekade 2011-2020 sekitar 1,1°C lebih tinggi dibandingkan periode 1850-1900 (IPCC, 2023). Tren peningkatan emisi global yang diimplikasikan oleh komitmen *Nationally Determined Contributions* (NDC) yang diumumkan negara-negara hingga Oktober 2021 sangat mungkin menyebabkan pemanasan melampaui ambang batas 1,5°C yang ditetapkan dalam Perjanjian Paris selama abad ke-21, mempersempit jendela peluang untuk mencegah dampak iklim yang lebih parah dan berpotensi tidak dapat dipulihkan (IPCC AR6 SYR, 2023).

6. Skenario Emisi Masa Depan (*Shared Socioeconomic Pathways*)

Untuk memproyeksikan lintasan iklim masa depan di bawah berbagai asumsi pembangunan sosial-ekonomi, komunitas ilmiah iklim

mengembangkan kerangka *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), yang mencakup rentang lebih luas mengenai masa depan gas rumah kaca dan polutan udara dibandingkan kerangka *Representative Concentration Pathways* (RCP) generasi sebelumnya, meskipun keduanya serupa namun tidak identik, dengan perbedaan signifikan pada lintasan konsentrasi gas rumah kaca yang dihasilkan (IPCC AR6 SYR, 2023). Skenario SSP1-1.9 dan SSP1-2.6 merepresentasikan lintasan pembangunan berkelanjutan dengan emisi rendah yang konsisten dengan pencapaian target Perjanjian Paris, sementara skenario SSP5-8.5 merepresentasikan lintasan pembangunan intensif bahan bakar fosil dengan emisi sangat tinggi yang akan menghasilkan pemanasan global jauh melampaui ambang batas aman yang ditetapkan komunitas internasional, menggambarkan rentang luas kemungkinan masa depan iklim yang sangat bergantung pada pilihan kebijakan kolektif umat manusia dalam dekade-dekade mendatang.

Pentingnya pemilihan metrik dan cakrawala waktu yang tepat dalam analisis skenario emisi ditegaskan oleh riset metodologis terkini yang mengusulkan penggunaan metrik *radiative forcing* kumulatif dan perubahan suhu global dinamis sebagai pendekatan yang lebih komprehensif dibandingkan metrik tunggal seperti GWP-100 konvensional, terutama untuk analisis produk dan kebijakan yang memerlukan pemahaman dampak iklim pada berbagai skala waktu mulai dari dekade hingga abad (EGUsphere, 2025). Pendekatan analitis yang lebih canggih ini merekomendasikan visualisasi profil temporal *radiative forcing* kumulatif dan perubahan suhu hingga periode 600 tahun ke depan untuk memberikan gambaran lebih transparan mengenai jejak iklim jangka panjang suatu sistem produk atau kebijakan tertentu, sebuah pendekatan yang semakin relevan bagi sektor swasta yang berkomitmen terhadap target netralitas karbon (*carbon neutrality*) dan diperlukan ketelitian metodologis tinggi dalam pengukuran serta pelaporan jejak karbon produk dan korporasi mereka.

Penerapan praktis kerangka skenario SSP meluas jauh melampaui pemodelan iklim akademik semata, menjadi rujukan standar bagi pemerintah, lembaga keuangan, dan korporasi multinasional dalam menyusun analisis skenario risiko iklim (*climate scenario analysis*) sebagaimana direkomendasikan oleh kerangka kerja pengungkapan finansial terkait iklim global, termasuk *Task Force on Climate-related*

Financial Disclosures (TCFD) yang mensyaratkan perusahaan mengevaluasi ketahanan strategi bisnis mereka terhadap berbagai lintasan iklim masa depan. Penggunaan skenario SSP yang konsisten dan tervalidasi secara ilmiah memungkinkan perbandingan yang lebih bermakna antarlembaga dan antarsektor mengenai eksposur risiko fisik (*physical risk*) maupun risiko transisi (*transition risk*) terkait perubahan iklim, sebuah praktik yang semakin diadopsi secara luas oleh sektor perbankan dan asuransi Indonesia seiring meningkatnya kesadaran regulator keuangan domestik mengenai pentingnya integrasi pertimbangan risiko iklim ke dalam kerangka manajemen risiko institusi keuangan nasional, sejalan dengan tren global menuju keuangan berkelanjutan (*sustainable finance*) yang semakin tidak terelakkan bagi stabilitas sistem keuangan jangka panjang.

7. Titik Kritis Iklim (*Climate Tipping Points*): Ambang Batas Perubahan Tak Terbalikkan

Konsep titik kritis iklim (*climate tipping point*) merujuk pada ambang batas dalam sistem iklim Bumi yang, apabila dilampaui, memicu perubahan keadaan yang bersifat mempertahankan diri sendiri (*self-sustaining*) dan secara umum tidak dapat dipulihkan kembali pada skala waktu manusia, bahkan apabila pemicu awal yakni peningkatan suhu global kemudian diturunkan. Riset komprehensif terbaru mengidentifikasi enam belas elemen kritis (*tipping elements*) dalam sistem Bumi, dengan sintesis estimasi ambang batas menunjukkan bahwa lima elemen telah berada di atas estimasi minimum ambang batasnya pada tingkat pemanasan global saat ini sekitar 1,2°C menjadikan pelampauan ambang batas "mungkin terjadi" sementara empat elemen diproyeksikan mencapai estimasi sentral ambang batasnya begitu pemanasan melampaui 1,5°C, menjadikan pelampauan tersebut "kemungkinan besar terjadi": lapisan es Greenland dan Antartika Barat, pencairan permafrost lokal yang tiba-tiba dan meluas, serta kematian massal terumbu karang air hangat (Armstrong McKay, 2024). Temuan ini merepresentasikan revisi signifikan ke bawah dibandingkan estimasi awal tahun 2008 yang memperkirakan sebagian besar ambang batas baru akan terlampaui pada pemanasan 3-5°C, mencerminkan kemajuan pemahaman ilmiah yang justru mengkhawatirkan seiring waktu.

Mekanisme pencairan lapisan es (*ice sheet collapse*) Greenland dan Antartika Barat memberikan ilustrasi konkret konsekuensi jangka sangat panjang dari pelampauan titik kritis: meskipun proses keruntuhan berlangsung lambat pada skala waktu manusia, total keruntuhan kedua lapisan es tersebut berpotensi mengunci kenaikan muka laut hingga 12 meter selama milenium mendatang, dengan ketidakstabilan Antartika di bawah skenario emisi menengah diperkirakan dapat memaparkan tambahan 120 juta orang terhadap banjir tahunan pada tahun 2100 (Armstrong McKay, 2024). Riset terbaru juga mengungkapkan konsensus ilmiah yang berkembang bahwa pencairan lapisan es Greenland dan Antartika dapat memperlambat arus laut penting di kedua kutub, termasuk *Atlantic Meridional Overturning Circulation* (AMOC), dengan konsekuensi potensial yang sangat serius berupa pendinginan drastis Eropa Utara dan percepatan kenaikan muka laut sepanjang Pantai Timur Amerika Serikat, sebuah skenario yang menggambarkan bagaimana pemanasan global pada satu kawasan dapat memicu efek pendinginan regional tampak paradoks di kawasan lain melalui gangguan sirkulasi laut global.

Berbeda dengan anggapan bahwa pencairan permafrost akan dipicu oleh satu titik kritis global, penelitian pemodelan terbaru menunjukkan bahwa sistem permafrost terdiri atas banyak ambang batas (*tipping thresholds*) yang bekerja pada skala lokal dan regional. Dengan menggunakan model permukaan daratan beresolusi tinggi, Nico Nitzbon dan kolega menunjukkan bahwa pencairan permafrost tidak terjadi sebagai satu peristiwa global yang mendadak, melainkan sebagai akumulasi berbagai transisi lokal yang berlangsung pada waktu berbeda-beda seiring meningkatnya suhu global. Temuan ini menunjukkan bahwa degradasi permafrost merupakan proses bertahap namun terus berlangsung, sehingga kehilangan karbon tanah beku akan meningkat secara progresif seiring pemanasan iklim (Nitzbon et al., 2024).

Meskipun demikian, implikasi perubahan tersebut tetap sangat serius. Permafrost di kawasan Arktik menyimpan cadangan karbon yang sangat besar, dan peningkatan pencairan diperkirakan akan meningkatkan pelepasan karbon dioksida (CO₂) dan metana (CH₄) ke atmosfer sehingga memperkuat umpan balik positif terhadap pemanasan global (Schuur et al., 2022; Armstrong McKay et al., 2022). Selain dampak terhadap iklim, pencairan permafrost juga mengancam

infrastruktur di wilayah lintang tinggi. Analisis spasial menunjukkan bahwa hingga sekitar 70% infrastruktur yang dibangun di atas permafrost berpotensi terdampak oleh degradasi tanah beku pada pertengahan abad ini, sehingga meningkatkan risiko kerusakan bangunan, jalan, jaringan pipa, dan fasilitas publik di kawasan Arktik (Hannele Hjort et al., 2022).

Tabel 7.3 Sebagian Elemen Kritis (*Tipping Elements*) Sistem Iklim Bumi dan Estimasi Ambang Batas Pemanasannya. Disarikan dari Armstrong Mckay (2024)

Elemen Kritis (Tipping Element)	Estimasi Ambang Batas Pemanasan	Konsekuensi Utama
Lapisan es Greenland	~1,5°C (kemungkinan besar)	Hingga 7 m kenaikan muka laut (skala milenium)
Lapisan es Antartika Barat	~1,5°C (kemungkinan besar)	Hingga 5 m kenaikan muka laut (skala milenium)
Kematian massal terumbu karang air hangat	~1,5°C (kemungkinan besar)	Hilangnya ekosistem terumbu secara luas
Pencairan permafrost tiba-tiba (lokal/regional)	~1,5°C (kemungkinan besar)	Pelepasan karbon tambahan, kerusakan infrastruktur
AMOC (sirkulasi Atlantik)	Belum pasti, diperkirakan >2°C namun berisiko	Pendinginan regional Eropa Utara, gangguan iklim global

8. Revolusi Pemantauan Satelit: Deteksi Real-Time Emisi Metana

Kemajuan teknologi penginderaan jauh satelit dalam satu dekade terakhir telah merevolusi kemampuan ilmuwan dan regulator dalam memantau emisi gas rumah kaca secara langsung dengan resolusi spasial

yang semakin tinggi, terutama untuk metana (CH_4), yang diperkirakan bertanggung jawab terhadap sekitar seperempat pemanasan global akibat aktivitas manusia sejak era praindustri (Ocko et al., 2021; IPCC, 2021). Konstelasi satelit khusus metana, seperti GHGSat, menggunakan spektrometer pencitraan inframerah beresolusi tinggi sehingga mampu mendeteksi gumpalan (*plume*) metana dari sumber titik, seperti fasilitas minyak dan gas, tempat pembuangan akhir sampah, maupun tambang batu bara. Evaluasi kinerja instrumen menunjukkan bahwa satelit GHGSat mampu mendeteksi emisi metana hingga kisaran ratusan kilogram per jam, memungkinkan identifikasi sumber emisi individual yang sebelumnya sulit diamati menggunakan satelit resolusi menengah.

Integrasi kecerdasan buatan dan pembelajaran mendalam (*deep learning*) semakin mempercepat dan mengotomatisasi proses deteksi emisi metana dari citra satelit, dengan model berbasis *vision transformer* yang divalidasi terhadap pengukuran udara terbukti mampu mendeteksi sumber titik metana sekecil 0,01 kilometer persegi yang memancarkan sekitar 200-300 kilogram metana per jam (Rouet-Leduc & Hulbert, 2024). Inisiatif *Methane Alert and Response System* (MARS) yang dikembangkan *United Nations Environment Programme International Methane Emissions Observatory* (UNEP IMEO) memanfaatkan beragam citra satelit publik untuk mengidentifikasi gumpalan metana, memberi notifikasi kepada pemangku kepentingan terkait, dan memantau sumber emisi secara global dari waktu ke waktu, merepresentasikan model tata kelola lingkungan berbasis data terbuka yang semakin penting bagi akuntabilitas emisi gas rumah kaca lintas batas negara. Pada tingkat kebijakan domestik, negara bagian California di Amerika Serikat menjadi yurisdiksi pertama yang secara resmi memanfaatkan data satelit metana komersial untuk menargetkan pemilik fasilitas penghasil emisi besar (*super-emitter*) guna mendukung pencapaian target pengurangan emisi metana sebesar 40% dari tingkat 2013 pada tahun 2030, sebuah preseden kebijakan yang berpotensi direplikasi oleh yurisdiksi lain di seluruh dunia.

B. Dampak Ekologis Perubahan Iklim

1. Risiko Kepunahan Spesies dan Hilangnya Biodiversitas

Perubahan iklim merupakan salah satu ancaman terbesar terhadap biodiversitas global karena memengaruhi distribusi geografis spesies, fenologi (waktu berbagai tahap siklus hidup), dinamika populasi, serta struktur komunitas ekologi di hampir seluruh ekosistem dunia (IPCC, 2022; IPBES, 2019). Berbagai pemodelan ekologis menunjukkan bahwa meningkatnya suhu global secara signifikan meningkatkan risiko kepunahan spesies, meskipun besarnya dampak berbeda-beda bergantung pada wilayah, kelompok organisme, dan skenario perubahan iklim yang digunakan. Sebagai contoh, Chris D. Thomas dan kolega memperkirakan bahwa sekitar 15–37% spesies pada sejumlah kawasan biodiversitas dapat mengalami *committed to extinction* pada pertengahan abad ini apabila perubahan iklim berlangsung sesuai skenario emisi menengah hingga tinggi (Thomas et al., 2004). Kajian sintesis yang lebih mutakhir juga menunjukkan bahwa risiko kepunahan meningkat secara tajam seiring kenaikan suhu global, terutama pada spesies dengan kemampuan adaptasi dan dispersal yang terbatas (Urban, 2015). Selaras dengan temuan tersebut, *Intergovernmental Panel on Climate Change* dalam *Sixth Assessment Report* (AR6) menyimpulkan bahwa peningkatan pemanasan global akan meningkatkan risiko hilangnya biodiversitas secara permanen pada berbagai ekosistem, termasuk hutan, terumbu karang, dan kawasan Arktik (IPCC, 2022).

Mekanisme yang mendasari peningkatan risiko kepunahan tersebut sangat beragam. Perubahan iklim menyebabkan pergeseran habitat yang sesuai (*habitat range shift*), memaksa banyak spesies bermigrasi menuju wilayah yang lebih dingin atau lebih tinggi, tetapi proses tersebut sering terhambat oleh fragmentasi habitat akibat aktivitas manusia. Selain itu, perubahan iklim dapat mengganggu sinkronisasi fenologis antarspesies, misalnya antara waktu berbunga tanaman dan aktivitas penyerbuk, sehingga menurunkan keberhasilan reproduksi dan stabilitas ekosistem. Dampak perubahan iklim juga berinteraksi secara sinergis dengan tekanan lain, seperti kehilangan habitat, eksploitasi berlebihan, pencemaran, dan invasi spesies asing, sehingga meningkatkan kerentanan populasi terhadap kepunahan (IPBES, 2019;

IPCC, 2022). Sebagai contoh, kombinasi gelombang panas dan kekeringan berkepanjangan telah dilaporkan memengaruhi kualitas habitat, ketersediaan air dan pakan, serta kelangsungan hidup berbagai satwa liar, termasuk populasi *African bush elephant* yang sangat bergantung pada ketersediaan sumber daya air di habitat sabana Afrika (Ogutu & Owen-Smith, 2003).

Tabel 7.4 Tingkat Risiko Kepunahan Spesies/Hilangnya Biodiversitas Pada Berbagai Tingkat Pemanasan Global Menurut Penilaian IPCC AR6

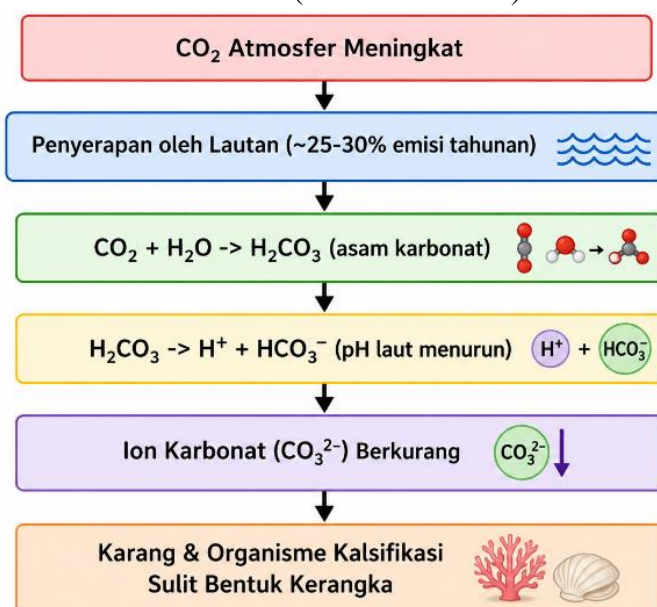
Tingkat Pemanasan Global	Risiko Ekosistem Hutan	Risiko Terumbu Karang	Risiko Kawasan Arktik
1,5°C	Rendah-Menengah	Sangat Tinggi	Tinggi
2°C	Menengah	Sangat Tinggi (hampir total)	Sangat Tinggi
3°C+	Tinggi-Sangat Tinggi	Hilangnya hampir seluruh terumbu	Sangat Tinggi/Kritis

2. Asidifikasi Laut dan Krisis Ekosistem Terumbu Karang

Lautan menyerap sekitar seperempat hingga sepertiga total emisi CO₂ antropogenik tahunan, sebuah jasa ekosistem penting yang memperlambat akumulasi CO₂ di atmosfer, namun proses penyerapan ini menimbulkan konsekuensi kimiawi serius berupa asidifikasi laut (*ocean acidification*). Ketika CO₂ terlarut dalam air laut, ia bereaksi membentuk asam karbonat yang kemudian terdisosiasi, meningkatkan konsentrasi ion hidrogen dan menurunkan pH air laut, sekaligus mengurangi ketersediaan ion karbonat yang dibutuhkan organisme laut pembentuk cangkang dan kerangka kalsium karbonat, termasuk karang, moluska, dan beberapa jenis plankton. Studi terbaru menegaskan bahwa asidifikasi laut kini telah melampaui batas planet yang aman (*planetary boundary*) yang ditetapkan komunitas ilmiah, menjadikannya batas keenam dari sembilan batas planet yang telah dilampaui akibat aktivitas manusia, sebuah tonggak yang menggarisbawahi urgensi krisis kimia kelautan ini (Mongabay, 2025).

Dampak asidifikasi laut terhadap ekosistem terumbu karang bersifat ganda dan saling memperkuat dengan tekanan pemanasan suhu laut: penurunan pH menghambat kemampuan karang membangun kerangka kalsium karbonat, sementara peningkatan suhu air laut memicu fenomena pemutihan karang (*coral bleaching*) melalui pengusiran alga simbiotik *zooxanthellae* yang menyediakan nutrisi dan warna bagi karang. Penelitian eksperimental menunjukkan bahwa respons biologis dan geokimia organisme pembentuk mineral laut (*marine biomineralisers*) terhadap pengayaan CO₂ bersifat sangat bervariasi dan kompleks, dengan struktur alga berkapur (*coralline algae*) yang berperan penting menstabilkan struktur terumbu dan menyediakan habitat keanekaragaman hayati tinggi terbukti lebih sensitif terhadap laju perubahan pCO₂ dibandingkan magnitudo absolutnya, menunjukkan bahwa variabilitas kimia karbonat laut yang semakin tidak stabil dapat memperburuk dampak terhadap organisme laut dibandingkan skenario perubahan bertahap yang lebih dapat diadaptasi secara biologis.

Gambar 7.2 Alur Kimia Kelautan dari Peningkatan CO₂ Atmosfer Hingga Dampaknya Pada Organisme Pembentuk Kerangka Kalsium Karbonat (Asidifikasi Laut)



3. Kenaikan Muka Laut dan Ancaman terhadap Ekosistem Pesisir

Kenaikan muka air laut global, yang didorong oleh dua mekanisme utama yaitu ekspansi termal air laut akibat pemanasan dan penambahan massa air dari pencairan gletser serta lapisan es kutub merepresentasikan salah satu dampak perubahan iklim dengan konsekuensi jangka sangat panjang yang paling sulit dipulihkan (*irreversible*). Proyeksi IPCC menunjukkan bahwa dalam dua ribu tahun mendatang, muka laut global rata-rata akan naik sekitar 2 hingga 3 meter apabila pemanasan dibatasi pada 1,5°C, dan 2 hingga 6 meter apabila pemanasan mencapai 2°C, sebuah proyeksi jangka sangat panjang yang menggambarkan inersia sistem iklim Bumi terhadap perubahan yang telah terjadi maupun akan terjadi dalam beberapa dekade mendatang (UNDRR, 2025, mengutip IPCC 2023). Dalam jangka pendek hingga menengah, kejadian banjir pesisir akibat kombinasi kenaikan muka laut, gelombang badai, dan pasang surut ekstrem diproyeksikan dapat mengancam aset bernilai hingga 20% dari produk domestik bruto global pada tahun 2100, sebuah angka yang menggambarkan skala kerugian ekonomi potensial yang sangat besar terkonsentrasi pada kawasan pesisir bernilai ekonomi tinggi di seluruh dunia.

Ekosistem pesisir seperti hutan mangrove, padang lamun, dan rawa garam memainkan peran ganda yang sangat penting dalam konteks perubahan iklim: di satu sisi, ekosistem ini berfungsi sebagai penyangga alami (*natural buffer*) yang meredam energi gelombang dan mengurangi risiko banjir pesisir bagi masyarakat yang tinggal di belakangnya; di sisi lain, ekosistem ini menyimpan cadangan karbon biru (*blue carbon*) dalam jumlah sangat besar per satuan luas dibandingkan ekosistem terestrial, menjadikannya komponen krusial dalam strategi mitigasi berbasis alam (*nature-based solutions*). Namun, ekosistem pesisir ini sendiri sangat rentan terhadap perubahan iklim, mengalami tekanan ganda dari kenaikan muka laut yang dapat menenggelamkan habitat mangrove yang tidak mampu beradaptasi cukup cepat, serta dari aktivitas pembangunan pesisir dan konversi lahan yang terus mendegradasi ekosistem ini di banyak kawasan tropis termasuk Indonesia.

Gangguan Sirkulasi Laut Global: Risiko Pelemahan AMOC

Selain dampak langsung kenaikan muka laut, perubahan iklim turut mengancam stabilitas sistem sirkulasi laut global yang berperan

krusial dalam mendistribusikan panas dan mengatur iklim regional di berbagai belahan dunia. *Atlantic Meridional Overturning Circulation* (AMOC) sistem arus laut raksasa yang membawa air hangat permukaan dari kawasan tropis menuju Atlantik Utara sebelum tenggelam dan kembali sebagai arus dalam yang dingin, telah lama diidentifikasi sebagai salah satu elemen kritis sistem iklim Bumi yang berisiko mengalami pelemahan signifikan akibat pemanasan global dan pencairan lapisan es Greenland yang menambahkan air tawar dalam jumlah besar ke Atlantik Utara, mengganggu gradien densitas yang menjadi penggerak utama sirkulasi termohalin tersebut. Riset terbaru menegaskan adanya konsensus ilmiah yang berkembang bahwa pencairan lapisan es kutub berkontribusi terhadap pelemahan arus laut penting di kedua kutub, dengan konsekuensi potensial yang sangat serius mencakup pendinginan drastis kawasan Eropa Utara, sebuah ironi pendinginan regional di tengah pemanasan global secara keseluruhan serta percepatan kenaikan muka laut di sepanjang Pantai Timur Amerika Serikat akibat perubahan pola sirkulasi yang memengaruhi distribusi massa air laut secara regional.

Implikasi pelemahan AMOC tidak terbatas pada kawasan Atlantik Utara semata, melainkan berpotensi memicu efek riak (*ripple effect*) terhadap pola sirkulasi atmosfer global, termasuk pergeseran posisi Zona Konvergensi Antar-Tropis (*Intertropical Convergence Zone/ITCZ*) yang dapat memengaruhi pola curah hujan di kawasan tropis termasuk Afrika dan Amazon, dengan implikasi tidak langsung namun signifikan terhadap kawasan tropis lain termasuk Indonesia yang sangat bergantung pada stabilitas pola muson dan curah hujan musiman untuk mendukung produktivitas pertanian dan ketersediaan air. Meskipun ambang batas pasti pelemahan dramatis AMOC masih diperdebatkan dalam komunitas ilmiah dan umumnya diperkirakan memerlukan pemanasan global melampaui 2°C, ketidakpastian signifikan yang masih menyelimuti proyeksi ini justru menjadi alasan kuat bagi penerapan prinsip kehati-hatian (*precautionary principle*) dalam kebijakan iklim global, mengingat konsekuensi pelemahan AMOC, apabila benar-benar terjadi akan bersifat sangat luas, lintas-regional, dan secara praktis tidak dapat dipulihkan dalam skala waktu hidup manusia.

4. Dampak terhadap Sistem Pangan, Air, dan Kesehatan Manusia

Perubahan iklim memberikan tekanan multidimensional terhadap sistem pendukung kehidupan manusia yang paling fundamental: ketersediaan air dan pangan. Proyeksi IPCC mengenai kelangkaan air fisik menunjukkan bahwa antara 800 juta hingga 3 miliar orang diproyeksikan mengalami kelangkaan air pada tingkat pemanasan 2°C, meningkat hingga 4 miliar orang pada tingkat pemanasan 4°C, sebuah peningkatan eksponensial yang menggambarkan betapa kritisnya ambang batas pemanasan dalam menentukan skala krisis air global di masa depan (Optimised, 2025). Pada sisi pangan, gangguan terhadap pola curah hujan, peningkatan frekuensi kekeringan ekstrem yang diproyeksikan dapat menggandakan jumlah orang yang menderita kekeringan ekstrem dalam waktu kurang dari delapan dekade serta peningkatan suhu yang melampaui ambang batas toleransi tanaman pangan utama secara kolektif mengancam stabilitas produksi pangan global, terutama di kawasan yang sudah menghadapi kerentanan pangan struktural.

Dimensi kesehatan manusia turut menghadapi tekanan signifikan akibat perubahan iklim, mencakup ancaman langsung berupa stres panas ekstrem yang diproyeksikan dapat memengaruhi 1,2 miliar orang secara tahunan pada tahun 2100 akibat kombinasi suhu dan kelembapan ekstrem yang melampaui batas toleransi fisiologis manusia, serta ancaman tidak langsung berupa perluasan jangkauan geografis vektor penyakit tropis. Proyeksi menunjukkan bahwa pada tahun 2050, nyamuk pembawa penyakit tular vektor seperti malaria berpotensi menjangkau wilayah geografis baru yang sebelumnya tidak sesuai secara iklim bagi perkembangbiakan vektor tersebut, memperluas paparan risiko penyakit menular ke populasi yang sebelumnya relatif terlindungi oleh kondisi iklim yang tidak mendukung (UNDRR, 2025). Interaksi sinergis antara berbagai dampak kesehatan ini, stres panas, perluasan vektor penyakit, gangguan keamanan pangan dan air, serta dampak kesehatan mental akibat perpindahan paksa (*displacement*) terkait iklim menggambarkan bahwa perubahan iklim pada hakikatnya merupakan ancaman kesehatan masyarakat multidimensional yang memerlukan respons lintas sektor yang terintegrasi.

5. Studi Kasus: Dampak Ekologis dan Karbon Biru di Indonesia

Indonesia, sebagai pemilik ekosistem mangrove terluas di dunia, menghadapi dilema khusus terkait pengelolaan ekosistem karbon biru yang sangat berharga secara ekologis namun terus mengalami degradasi signifikan. Analisis kebijakan menunjukkan bahwa *Nationally Determined Contribution* (NDC) terbaru Indonesia yang diperbarui (*Enhanced NDC*) tidak memuat target spesifik untuk karbon biru secara eksplisit, meskipun ekosistem mangrove tercakup dalam sektor Kehutanan dan Tata Guna Lahan Lainnya (*Forestry and Other Land Use/FOLU*) melalui manfaat adaptasi, sementara tidak terdapat target terkait iklim sama sekali untuk ekosistem padang lamun yang juga memiliki kapasitas penyimpanan karbon signifikan (ClimateWorks Centre, 2023). Ketiadaan target spesifik dan terukur untuk ekosistem karbon biru ini menjadi celah kebijakan yang patut diperhatikan, mengingat ekosistem karbon biru Indonesia yang terus terdegradasi berpotensi menghancurkan cadangan karbon penting sekaligus berkontribusi terhadap profil emisi nasional Indonesia apabila tidak dikelola secara berkelanjutan.

Di luar kerangka NDC, Indonesia telah memperkuat komitmen pelestarian mangrove secara progresif melalui penetapan target rehabilitasi hingga tahun 2024, serta komitmen perluasan kawasan konservasi perairan (*Marine Protected Area/MPA*) hingga mencapai 10% dari total wilayah perairan teritorial, atau setara 32,5 juta hektare pada tahun 2030, sebuah komitmen yang ditetapkan Kementerian Kelautan dan Perikanan pada tahun 2020 dan akan menambahkan 9,16 juta hektare perairan Indonesia di bawah perlindungan MPA (ClimateWorks Centre, 2023). Peluang signifikan terbuka bagi Indonesia untuk memanfaatkan komitmen perluasan MPA ini secara strategis dengan memprioritaskan perlindungan ekosistem bernilai karbon tinggi seperti mangrove dan padang lamun, mengingat hampir dua pertiga ekosistem mangrove dan separuh padang lamun Indonesia saat ini belum berada di bawah perlindungan formal yang memadai, sebuah peluang kebijakan yang apabila dimanfaatkan secara optimal dapat menjadikan Indonesia pemimpin global dalam konservasi karbon biru sekaligus berkontribusi signifikan terhadap pencapaian target iklim nasional dan global.

Tabel 7.5 Status dan Target Pengelolaan Ekosistem Karbon Biru Indonesia. Disarikan dari Climateworks Centre (2023)

Indikator	Status/Target
Kepemilikan ekosistem mangrove global	Terluas di dunia (Indonesia)
Target perluasan kawasan konservasi perairan (MPA)	10% wilayah perairan teritorial (32,5 juta ha) pada 2030
Cakupan perlindungan mangrove saat ini	~sepertiga (belum optimal, ~dua pertiga belum terlindungi formal)
Target karbon biru eksplisit dalam Enhanced NDC	Belum ada target spesifik (tercakup tidak langsung via FOLU)

6. Gelombang Panas Laut dan Kandungan Panas Lautan

Selain asidifikasi, lautan menghadapi tekanan termal yang semakin intensif berupa gelombang panas laut (*marine heatwave*), yang didefinisikan sebagai periode ketika suhu permukaan laut berada pada 10% suhu terpanas dari seluruh data historis tercatat pada lokasi tertentu selama setidaknya lima hari berturut-turut. Data observasi *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) mengungkapkan bahwa sekitar 94% permukaan lautan global mengalami setidaknya satu kali gelombang panas laut sepanjang tahun 2023, sebuah angka yang menggambarkan betapa meluasnya fenomena ini secara global, bersamaan dengan rekor tertinggi kandungan panas lautan (*ocean heat content*) dan muka laut global pada tahun yang sama (NOAA/AOML, 2024). Lautan telah menyerap lebih dari 90% kelebihan energi yang terperangkap dalam sistem Bumi akibat gas rumah kaca dan faktor lainnya selama setengah abad terakhir, menjadikan lautan sebagai penyangga termal utama yang memperlambat laju pemanasan atmosfer permukaan, namun dengan konsekuensi serius berupa akumulasi panas dalam jumlah masif pada kolom air laut yang terus meningkat dari tahun ke tahun.

Analisis kuantitatif terbaru mengonfirmasi bahwa kandungan panas lautan global penuh kedalaman (*full-depth ocean heat content*) pada tahun 2023 mencapai peningkatan rekor sebesar 464 ± 55 zettajoule (ZJ) sejak tahun 1960, dengan peningkatan 16 ± 10 ZJ dibandingkan tahun 2022 saja, mencerminkan perolehan panas yang sangat kuat

terutama di kawasan Samudra Selatan dan Atlantik (NASA GISS, mengutip Cheng *et al.*, 2024). Studi terbaru yang dipublikasikan di jurnal *Science* mengidentifikasi gelombang panas laut Atlantik Utara tahun 2023 yang berlangsung selama 525 hari sebagai salah satu yang paling persisten dalam catatan, sementara gelombang panas Pasifik Barat Daya melampaui rekor sebelumnya dalam hal cakupan spasial dan durasi, dengan mekanisme penyebab yang mencakup berkurangnya tutupan awan yang memungkinkan lebih banyak radiasi matahari mencapai permukaan laut, serta melemahnya angin yang menyebabkan lapisan permukaan laut menjadi lebih tipis dan lebih cepat memanaskan.

Dampak gelombang panas laut terhadap ekosistem terumbu karang bersifat dramatis dan terdokumentasi dengan baik melalui teknologi penginderaan jauh satelit kontemporer. Pada musim panas 2023, kawasan Florida Keys dan Karibia mengalami peristiwa pemutihan karang massal akibat gelombang panas laut yang memecahkan rekor, dengan suhu laut melampaui 38°C jauh di atas ambang batas toleransi termal sebagian besar spesies karang pembentuk terumbu. Teknologi satelit penginderaan jauh resolusi tinggi, seperti sensor SuperDove dari Planet Labs yang divalidasi menggunakan data fotomosaik NOAA dan citra udara fluida-lensing NASA, kini memungkinkan deteksi dan pemantauan peristiwa pemutihan karang massal secara hampir-langsung pada skala spasial yang sebelumnya tidak mungkin dicapai melalui survei lapangan konvensional, membuka peluang sistem peringatan dini berbasis satelit untuk mendukung respons pengelolaan terumbu karang yang lebih cepat dan tepat sasaran di masa mendatang.

Tabel 7.6 Indikator Utama Gelombang Panas Laut dan Kandungan Panas Lautan Tahun 2023. Disarikan dari NOAA/AOML (2024) Dan NASA GISS (2024)

Indikator Panas Laut	Data 2023	Tren Jangka Panjang
Persentase permukaan laut mengalami gelombang panas	~94%	Meningkat dibanding dekade sebelumnya
Kandungan panas lautan (full-depth, kumulatif sejak 1960)	464±55 ZJ	Rekor tertinggi, terus meningkat

Durasi gelombang panas laut Atlantik Utara	525 hari	Salah satu durasi terpanjang tercatat
Suhu laut puncak Florida Keys/Karibia	>38°C	Memicu pemutihan karang massal

7. Studi Kasus: Ketahanan Pangan dan Pertanian Adaptif Iklim di Indonesia

Sektor pertanian Indonesia, yang menopang penghidupan puluhan juta petani sekaligus menjadi pilar utama ketahanan pangan nasional, menghadapi tekanan signifikan dari perubahan iklim melalui pergeseran pola curah hujan, peningkatan frekuensi kekeringan dan banjir yang mengganggu siklus tanam, serta intrusi air asin pada lahan pertanian pesisir akibat kenaikan muka laut. Sebagai negara kepulauan tropis dengan variabilitas iklim regional yang tinggi, perubahan pola musim hujan dan kemarau yang semakin tidak menentu termasuk pergeseran waktu mulainya musim tanam dan peningkatan frekuensi kejadian iklim ekstrem seperti El Niño dan La Niña yang semakin intens menciptakan ketidakpastian signifikan bagi petani dalam merencanakan kalender tanam, sebuah tantangan yang berpotensi mengancam stabilitas produksi pangan pokok seperti padi, jagung, dan kedelai yang menjadi tumpuan utama konsumsi domestik.

Respons adaptif terhadap tantangan ini mencakup pengembangan varietas tanaman pangan yang lebih tahan terhadap cekaman iklim, sebagaimana telah disinggung pada Bab 3 mengenai teknologi mutasi gen untuk meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman air, baik kekeringan maupun genangan berlebih. Selain pemuliaan varietas, strategi adaptasi pertanian Indonesia turut mencakup penerapan sistem irigasi hemat air, diversifikasi pola tanam untuk mengurangi risiko gagal panen akibat ketergantungan pada satu jenis komoditas, serta pemanfaatan teknologi prediksi cuaca dan iklim untuk mendukung pengambilan keputusan petani yang lebih presisi mengenai waktu tanam dan panen optimal. Pendekatan pertanian cerdas iklim (*climate-smart agriculture*) menjadi semakin relevan dalam konteks Indonesia, di mana integrasi praktik agroforestri, konservasi tanah dan air, serta diversifikasi sumber pendapatan petani dapat secara simultan meningkatkan resiliensi terhadap guncangan iklim sekaligus

berkontribusi terhadap tujuan mitigasi nasional melalui peningkatan penyerapan karbon pada lanskap pertanian.

C. Strategi Mitigasi dan Pengurangan Risiko Bencana

1. Mitigasi Sisi Penawaran: Dekarbonisasi Sistem Energi

Strategi mitigasi perubahan iklim secara fundamental dapat dikelompokkan menjadi intervensi sisi penawaran (*supply-side*) dan sisi permintaan (*demand-side*). Intervensi sisi penawaran berfokus pada transformasi sistem produksi energi menuju sumber rendah karbon, sebagaimana telah dibahas secara mendalam pada Bab 6 mengenai dilema energi antara fosil dan terbarukan, mencakup transisi menuju panel surya, energi nuklir, dan teknologi hidrogen yang menjadi pilar utama dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan global. IPCC AR6 menegaskan bahwa perubahan pada sisi permintaan energi termasuk perubahan infrastruktur, adopsi teknologi pengguna akhir, serta perubahan perilaku sosio-kultural memiliki potensi mereduksi emisi pada sektor pengguna akhir sebesar 40 hingga 70% pada pertengahan abad, sebuah potensi mitigasi yang sering kali kurang mendapat perhatian dibandingkan fokus dominan pada transformasi sisi penawaran energi (Carbon Brief, 2023, mengutip IPCC AR6 Figure 4.4a).

Sinergi antara strategi mitigasi dan adaptasi menjadi semakin diakui sebagai pendekatan paling efektif dibandingkan memandang keduanya sebagai domain kebijakan yang terpisah. Pada sistem pangan global, misalnya, praktik pertanian cerdas iklim (*climate-smart agriculture*) seperti pergeseran menuju agroforestri dapat secara simultan meningkatkan ketahanan terhadap dampak iklim sekaligus memajukan tujuan mitigasi melalui peningkatan penyerapan karbon pada biomassa pohon dan tanah, menggambarkan bahwa solusi-solusi transformatif sering kali menawarkan manfaat ganda yang saling memperkuat antara pengurangan emisi dan peningkatan resiliensi (World Resources Institute, 2023). Namun, IPCC juga menegaskan bahwa dekarbonisasi mendalam pada seluruh sistem semata tidak akan cukup untuk mencapai tujuan iklim global tanpa disertai pembangunan resiliensi yang setara, menggarisbawahi perlunya pendekatan transformasional yang melampaui sekadar penggantian teknologi

menuju perubahan sistemik pada pola produksi, konsumsi, dan tata kelola sumber daya secara menyeluruh.

2. Penangkapan dan Penyimpanan Karbon (*Carbon Capture and Storage*)

Mengingat kompleksitas dan kecepatan transformasi sistem energi yang diperlukan untuk mencapai target iklim global, teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (*Carbon Capture and Storage/CCS*) menjadi komponen pelengkap penting dalam portofolio strategi mitigasi, terutama untuk sektor industri yang sulit didekarbonisasi sepenuhnya melalui elektrifikasi maupun substitusi bahan bakar. CCS umumnya melibatkan penangkapan CO₂ langsung dari sumber industri atau pembangkit listrik berbahan bakar fosil sebelum dilepaskan ke atmosfer, diikuti dengan transportasi dan penyimpanan jangka panjang pada reservoir geologis bawah permukaan, baik di daratan maupun di bawah dasar laut (NOAA, 2024). Secara global, sekitar tujuh puluh fasilitas CCS kini beroperasi, menyimpan sekitar 61,5 juta metrik ton CO₂ per tahun menurut data *Global CCS Institute*, dengan mayoritas fasilitas berlokasi di daratan, meskipun proyek CCS lepas pantai (*offshore*) mulai berkembang di sejumlah negara termasuk Norwegia, yang mengoperasikan fasilitas penyimpanan geologis bawah dasar laut pertamanya di Laut Utara pada Maret 2023 sebagai bukti konsep penting bagi pengembangan CCS skala besar di masa depan (Mongabay, 2025).

Selain CCS konvensional berbasis geologi daratan dan lepas pantai, riset penghilangan karbon berbasis laut (*marine Carbon Dioxide Removal/mCDR*) berkembang pesat sebagai pendekatan komplementer yang memanfaatkan kapasitas alami lautan sebagai penyimpan karbon, mencakup metode peningkatan alkalinitas laut (*ocean alkalinity enhancement*), restorasi ekosistem karbon biru, serta mineralisasi karbon melalui reaksi dengan mineral seperti magnesium hidroksida untuk membentuk senyawa stabil jangka panjang (PBB, 2024). Meskipun menjanjikan, tinjauan ilmiah komprehensif menegaskan bahwa belum ada satu pun pendekatan mCDR yang benar-benar siap untuk diterapkan dalam skala besar, mengingat masih terdapat kesenjangan signifikan dalam pengetahuan ilmiah maupun rekayasa, termasuk kebutuhan riset lebih lanjut mengenai efikasi, permanensi, dan tambahan manfaat

(*additionality*) dari setiap teknik, serta metode validasi yang andal untuk pengukuran, pemantauan, pelaporan, dan verifikasi (*Measurement, Monitoring, Reporting, and Verification/MMRV*) yang esensial untuk membuktikan keamanan dan efektivitas penghilangan serta penyimpanan CO₂ jangka panjang.

Tabel 7.7 Perbandingan Pendekatan Penangkapan dan Penyimpanan/Penghilangan Karbon. Disarikan dari NOAA (2024), Mongabay (2025)

Pendekatan CCS/CDR	Mekanisme Utama	Status Kesiapan	Tantangan Utama
CCS geologis daratan	Injeksi CO ₂ ke formasi batuan dalam	Mapan, ~70 fasilitas aktif global	Biaya tinggi, lokasi terbatas
CCS geologis lepas pantai	Injeksi CO ₂ bawah dasar laut	Awal komersialisasi (Norwegia dll.)	Risiko kebocoran, biaya infrastruktur
Peningkatan alkalinitas laut	Penambahan mineral basa ke air laut	Riset awal/pilot	Risiko ekologis, skalabilitas
Restorasi karbon biru	Pemulihan mangrove/padang lamun	Sebagian operasional, perlu perluasan	Pembiayaan jangka panjang, MMRV

Konteks Indonesia dalam pengembangan teknologi CCS menjadi semakin relevan mengingat negara ini memiliki potensi kapasitas penyimpanan geologis yang signifikan pada cekungan-cekungan migas yang telah habis produksi maupun akuifer salin dalam, terutama di kawasan Sumatra dan Kalimantan yang memiliki sejarah panjang industri minyak dan gas bumi. Pemerintah Indonesia telah menerbitkan kerangka regulasi awal untuk mendukung pengembangan proyek CCS dan *Carbon Capture, Utilization, and Storage* (CCUS), dengan beberapa proyek percontohan mulai dikembangkan oleh perusahaan energi nasional maupun internasional yang beroperasi di Indonesia, meskipun skala implementasi saat ini masih jauh dari memadai untuk memberikan

kontribusi signifikan terhadap target dekarbonisasi nasional. Tantangan utama pengembangan CCS di Indonesia mencakup kebutuhan investasi infrastruktur yang sangat besar, ketidakpastian regulasi mengenai kepemilikan dan tanggung jawab jangka panjang atas CO₂ yang disimpan, serta kebutuhan kerangka insentif fiskal yang memadai untuk menjadikan CCS kompetitif secara ekonomi dibandingkan alternatif mitigasi lain, sebuah tantangan yang sejalan dengan pola umum yang dihadapi negara berkembang lain dalam upaya mengadopsi teknologi mitigasi iklim berbiaya modal tinggi.

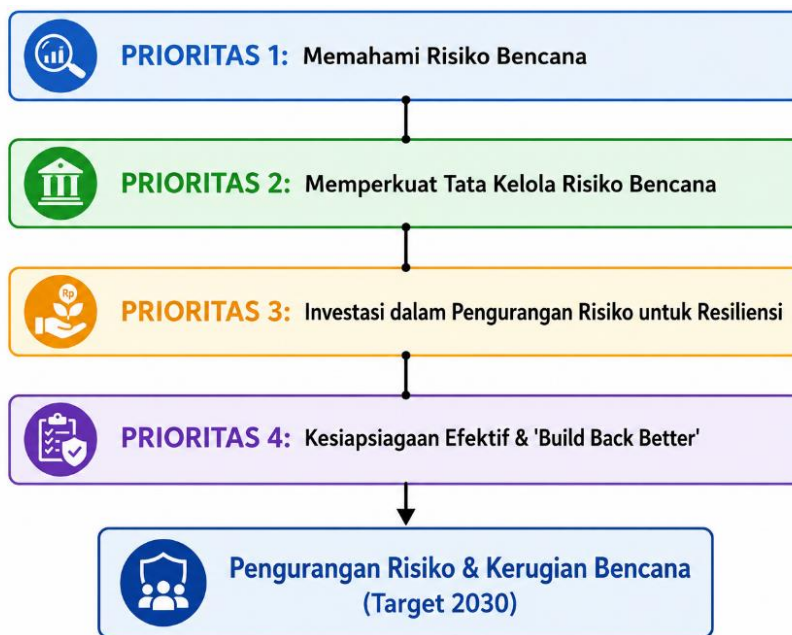
3. Kerangka Sendai untuk Pengurangan Risiko Bencana

Dampak ekologis perubahan iklim yang dibahas pada sub-bab 7.2 secara langsung memperbesar frekuensi dan intensitas bencana terkait iklim, menjadikan kerangka kerja pengurangan risiko bencana (*Disaster Risk Reduction/DRR*) sebagai komponen integral strategi adaptasi iklim global. Kerangka Sendai untuk Pengurangan Risiko Bencana 2015-2030, yang diadopsi negara-negara anggota PBB pada Konferensi Dunia Ketiga mengenai Pengurangan Risiko Bencana di Sendai, Jepang, merupakan penerus Kerangka Aksi Hyogo dan menetapkan empat prioritas aksi utama: memahami risiko bencana, memperkuat tata kelola risiko bencana untuk mengelola risiko bencana, berinvestasi dalam pengurangan risiko bencana untuk resiliensi, serta meningkatkan kesiapsiagaan bencana untuk respons efektif dan "membangun kembali dengan lebih baik" (*Build Back Better*) dalam tahap pemulihan, rehabilitasi, dan rekonstruksi pascabencana (UNDRR, 2025).

Kerangka Sendai menetapkan tujuh target global dan tiga puluh delapan indikator untuk mengukur kemajuan implementasi pengurangan risiko bencana di seluruh dunia hingga tahun 2030, dengan fokus mengatasi tiga dimensi fundamental risiko bencana secara simultan: paparan terhadap bahaya (*exposure to hazards*), kerentanan dan kapasitas (*vulnerability and capacity*), serta karakteristik bahaya itu sendiri, guna mencegah terciptanya risiko baru sekaligus mengurangi risiko yang sudah ada dan meningkatkan resiliensi masyarakat secara keseluruhan (UNDRR, 2025). Laporan Tinjauan Tengah Waktu (*Mid-Term Review*) Kerangka Sendai pada tahun 2023, yang menandai titik tengah periode implementasi, mengidentifikasi capaian signifikan sejak

2015 sekaligus mengungkap kesenjangan implementasi yang masih substansial, termasuk perlunya integrasi yang lebih erat dengan perjanjian internasional terkait lainnya seperti Perjanjian Paris mengenai perubahan iklim dan Kerangka Keanekaragaman Hayati Global, guna membangun tata kelola pasca-2030 yang benar-benar mengintegrasikan pengurangan risiko sebagai determinan utama pembangunan berkelanjutan.

Gambar 7.3 Empat Prioritas Aksi dalam Kerangka Sendai Untuk Pengurangan Risiko Bencana 2015-2030 (UNDRR, 2025)



4. Sistem Peringatan Dini: Studi Kasus Indonesia

Sistem peringatan dini (*early warning system*) merupakan salah satu intervensi pengurangan risiko bencana yang paling efektif karena mampu menurunkan jumlah korban jiwa dan kerugian ekonomi melalui penyampaian informasi bahaya secara cepat kepada masyarakat. Pentingnya sistem ini ditegaskan dalam Prioritas 4 *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*, yang menekankan peningkatan kesiapsiagaan, penguatan sistem peringatan dini multibahaya, serta pengembangan kapasitas masyarakat dalam merespons bencana secara efektif (*United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2015*). Indonesia, yang mengalami dampak sangat besar akibat 2004 Indian

Ocean *earthquake* and tsunami, menjadikan pengembangan sistem peringatan dini sebagai salah satu prioritas nasional dalam kebijakan pengurangan risiko bencana (Badan Nasional Penanggulangan Bencana, 2020). Sebagai contoh, Universitas Gadjah Mada bersama Badan Standardisasi Nasional dan Badan Nasional Penanggulangan Bencana mengembangkan standar sistem peringatan dini longsor berbasis masyarakat (*community-based landslide early warning system*) yang kemudian diusulkan kepada International Organization for Standardization sebagai upaya memperluas penerapan sistem yang sederhana, berbiaya rendah, dan mudah diimplementasikan pada masyarakat yang rentan terhadap bencana (Fathani et al., 2023).

Meskipun demikian, berbagai evaluasi menunjukkan bahwa implementasi Kerangka Sendai masih menghadapi tantangan pada tingkat daerah. Kajian mengenai implementasi Kerangka Sendai di Provinsi Aceh menunjukkan adanya kesenjangan antara kebijakan nasional dan pelaksanaan di tingkat lokal, termasuk keterbatasan pelaporan berbasis bukti, dominasi perspektif pemerintah pusat dalam pelaporan kemajuan, serta belum optimalnya integrasi informasi dari pemerintah daerah dan masyarakat terdampak (Sufri et al., 2025). Temuan tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan sistem peringatan dini tidak hanya bergantung pada kecanggihan teknologi, tetapi juga pada kapasitas kelembagaan, tata kelola yang transparan, koordinasi antarlembaga, dan partisipasi aktif masyarakat dalam seluruh tahapan pengurangan risiko bencana, mulai dari pemantauan bahaya hingga respons darurat (UNDRR, 2015).

5. Bencana Hidrometeorologi dan Tren Peningkatan Frekuensi

Perubahan iklim telah meningkatkan frekuensi dan intensitas berbagai bencana hidrometeorologi di berbagai belahan dunia. Laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Assessment Report* menyimpulkan bahwa perubahan iklim akibat aktivitas manusia telah meningkatkan kejadian cuaca ekstrem, termasuk gelombang panas, hujan lebat, kekeringan, serta kebakaran hutan di banyak wilayah dunia dengan tingkat keyakinan yang tinggi (IPCC, 2021). Sejalan dengan itu, *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* melaporkan bahwa jumlah bencana yang dipicu oleh bahaya terkait iklim telah meningkat secara signifikan selama beberapa dekade terakhir, terutama banjir,

badai, dan kekeringan, sehingga perubahan iklim dipandang sebagai salah satu faktor utama yang meningkatkan risiko bencana global (UNDRR, 2025). Berdasarkan prinsip fisika hubungan Clausius-Clapeyron, setiap kenaikan suhu udara sekitar 1°C memungkinkan atmosfer menyimpan sekitar 7% lebih banyak uap air, sehingga meningkatkan potensi terjadinya hujan dengan intensitas ekstrem apabila kondisi atmosfer mendukung pembentukan presipitasi (IPCC, 2021).

Di Indonesia, dampak perubahan iklim diperparah oleh kondisi geografis, curah hujan yang tinggi, serta perubahan tata guna lahan yang meningkatkan kerentanan terhadap banjir, tanah longsor, kekeringan, dan cuaca ekstrem. Menurut Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, bencana hidrometeorologi meliputi banjir, tanah longsor, puting beliung, kekeringan, serta cuaca ekstrem lainnya yang dipengaruhi oleh faktor meteorologi dan klimatologi. Data Badan Nasional Penanggulangan Bencana menunjukkan bahwa lebih dari 90% kejadian bencana yang tercatat setiap tahun di Indonesia merupakan bencana hidrometeorologi, sehingga penguatan adaptasi perubahan iklim perlu diintegrasikan dengan strategi pengurangan risiko bencana untuk meningkatkan ketahanan masyarakat terhadap ancaman yang terus meningkat akibat perubahan iklim (BNPB, 2024; BMKG, 2023).

6. Sinergi Kebijakan: Integrasi Adaptasi, Mitigasi, dan Pengurangan Risiko Bencana

Komunitas kebijakan internasional semakin mengakui pentingnya integrasi tiga kerangka kerja global pascaagenda 2015. Kerangka Sendai untuk Pengurangan Risiko Bencana, Perjanjian Paris mengenai Perubahan Iklim, dan Agenda 2030 untuk Pembangunan Berkelanjutan sebagai pendekatan yang saling memperkuat alih-alih bersaing untuk mendapatkan sumber daya dan perhatian kebijakan yang terbatas. Pendekatan interdisipliner yang mengintegrasikan adaptasi perubahan iklim dengan pengurangan risiko bencana mencakup spektrum luas intervensi, mulai dari perencanaan tata ruang berbasis risiko iklim, infrastruktur tahan iklim (*climate-resilient infrastructure*), sistem pertanian adaptif terhadap perubahan pola curah hujan, hingga skema perlindungan sosial yang responsif terhadap guncangan iklim bagi populasi rentan, menggambarkan bahwa solusi efektif terhadap

krisis iklim memerlukan pendekatan yang jauh melampaui sekadar pengurangan emisi gas rumah kaca semata.

Hambatan struktural terhadap integrasi kebijakan semacam ini sering kali berakar pada fragmentasi kelembagaan, di mana kementerian atau lembaga yang menangani perubahan iklim, pengurangan risiko bencana, dan pembangunan berkelanjutan beroperasi secara relatif terpisah dengan anggaran, mandat, dan jalur pelaporan yang berbeda, menciptakan duplikasi upaya sekaligus kesenjangan koordinasi yang menghambat efektivitas respons kolektif terhadap krisis iklim yang pada hakikatnya bersifat lintas sektor. Reformasi tata kelola yang mendorong koordinasi horizontal antarlembaga melalui mekanisme seperti gugus tugas lintas kementerian, kerangka anggaran terintegrasi, atau badan koordinasi tingkat tinggi yang memiliki kewenangan memadai menjadi prasyarat penting bagi keberhasilan implementasi kebijakan iklim yang benar-benar terintegrasi, sebuah pelajaran yang relevan tidak hanya bagi Indonesia tetapi bagi hampir seluruh negara yang berupaya menyelaraskan komitmen iklim internasional dengan realitas birokrasi domestik yang kompleks dan sering kali terfragmentasi.

Indikator 13.1.2 dari Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDG) 13 mengenai aksi iklim secara eksplisit melacak "jumlah negara yang mengadopsi dan mengimplementasikan strategi pengurangan risiko bencana nasional yang selaras dengan Kerangka Sendai", menggambarkan pengakuan formal komunitas internasional terhadap keterkaitan erat antara agenda pengurangan risiko bencana dan aksi iklim global (Wikipedia, 2026, mengutip kerangka SDG). Penyelarasan pelacakan adaptasi dengan pelaporan yang sudah ada di bawah Kerangka Sendai memungkinkan negara-negara memanfaatkan data risiko dan dampak bersama untuk memantau kemajuan secara lebih efisien, mengurangi duplikasi pelaporan, dan memastikan bahwa aksi iklim secara nyata menghasilkan pengurangan terukur terhadap kerugian, kerusakan, dan kerentanan masyarakat (UNDRR, 2025). Bagi Indonesia, integrasi semacam ini menjadi semakin krusial mengingat negara ini telah secara resmi menyelaraskan kebijakan domestiknya termasuk Peraturan Presiden Nomor 87 Tahun 2020 dengan ketiga komitmen global tersebut secara simultan, menunjukkan keseriusan dalam mencapai tujuan pengelolaan bencana yang adaptif dan berkelanjutan, meskipun tantangan implementasi di tingkat operasional dan subnasional

tetap memerlukan perhatian berkelanjutan (*Implementation of DRR Policy in Indonesia, 2024*).

Tabel 7.8 Tiga Kerangka Kerja Global Pascaagenda 2015 yang Saling Terintegrasi dalam Konteks Perubahan Iklim dan Pengurangan Risiko Bencana

Kerangka Kerja Global	Periode	Fokus Utama
Kerangka Sendai DRR	2015-2030	Pengurangan risiko & kerugian bencana
Perjanjian Paris (UNFCCC)	2015-berkelanjutan	Pembatasan pemanasan global <2°C, idealnya 1,5°C
Agenda 2030/SDGs	2015-2030	17 tujuan pembangunan berkelanjutan terintegrasi

7. Pendanaan Iklim: Dana Kerugian dan Kerusakan (*Loss and Damage Fund*)

Dimensi keadilan iklim (*climate justice*) menjadi semakin sentral dalam negosiasi iklim internasional, mengingat negara-negara yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim umumnya negara berkembang dan negara kepulauan kecil, secara historis berkontribusi paling sedikit terhadap emisi gas rumah kaca kumulatif yang menyebabkan krisis iklim. Setelah lebih dari satu dekade advokasi oleh negara-negara rentan, Konferensi Para Pihak ke-28 (COP28) di Dubai pada akhir 2023 mencapai tonggak bersejarah dengan secara resmi mengoperasikan Dana untuk Merespons Kerugian dan Kerusakan (*Fund for Responding to Loss and Damage/FRLD*) pada hari pertama konferensi, sebuah mekanisme pendanaan yang secara khusus dirancang untuk membantu negara-negara berkembang yang sangat rentan mengatasi kerugian ekonomi dan non-ekonomi akibat dampak iklim yang tidak dapat lagi diatasi melalui upaya mitigasi maupun adaptasi semata (*World Economic Forum, 2023*). Bank Dunia ditunjuk sebagai wali amanat sementara (*interim trustee*) dan tuan rumah sekretariat dana tersebut untuk periode empat tahun, dengan Filipina terpilih sebagai

negara tuan rumah Dewan FRLD dari tujuh negara kandidat yang mengajukan diri (World Bank, 2024).

Meskipun pembentukan FRLD merepresentasikan kemajuan signifikan secara kelembagaan, skala pendanaan aktual yang terkumpul masih jauh dari memadai dibandingkan kebutuhan riil negara-negara rentan. Hingga akhir Maret 2025, FRLD telah menerima komitmen pendanaan sebesar 768,4 juta dolar Amerika Serikat dari 27 negara, sebuah jumlah yang tampak signifikan secara nominal namun hanya merepresentasikan sebagian kecil dari estimasi kebutuhan riil; empat belas negara berkembang anggota Dewan FRLD memperkirakan setidaknya dibutuhkan 100 miliar dolar per tahun untuk pendanaan kerugian dan kerusakan pada tahun 2030, sementara estimasi kerusakan terkait iklim yang dihadapi negara berkembang secara keseluruhan dapat mencapai 580 miliar dolar pada tahun yang sama (NRDC Climate Funds Pledge Tracker, 2025; CGIAR, 2024). Kesenjangan besar antara janji pendanaan dan kebutuhan aktual ini menggambarkan tantangan struktural mendasar dalam arsitektur keuangan iklim global, di mana sifat sukarela (*voluntary*) kontribusi pendanaan tanpa kewajiban hukum berbasis tanggung jawab historis emisi terus menjadi sumber friksi politik dalam negosiasi internasional, sebagaimana tercermin dalam penolakan eksplisit sejumlah negara maju, dipimpin Amerika Serikat, terhadap kewajiban kompensasi formal terkait kerugian dan kerusakan iklim (Heinrich Böll Stiftung, 2024).

Perundingan lanjutan pada COP29 di Baku, Azerbaijan tahun 2024 yang dijuluki sebagai "COP keuangan" berfokus pada penetapan Tujuan Kuantitatif Kolektif Baru (*New Collective Quantified Goal/NCQG*) untuk pendanaan iklim yang akan menggantikan target sebelumnya sebesar 100 miliar dolar per tahun yang telah ditetapkan sejak 2009, meskipun kesepakatan mengenai skala ambisi NCQG yang memadai tetap menjadi titik perdebatan sengit antara negara maju dan berkembang (Heinrich Böll Stiftung, 2024). Bagi Indonesia dan negara berkembang lainnya yang menghadapi beban ganda, kerentanan tinggi terhadap dampak iklim sekaligus kebutuhan pembiayaan transisi energi, perkembangan arsitektur pendanaan iklim global ini memiliki implikasi langsung terhadap kapasitas fiskal nasional untuk secara simultan mendanai program adaptasi, mitigasi, dan pemulihan pascabencana, menggarisbawahi pentingnya keterlibatan aktif dan strategis Indonesia

dalam forum negosiasi iklim internasional guna memastikan akses yang adil terhadap sumber daya pendanaan global yang sangat dibutuhkan.

Tabel 7.9 Kronologi Pembentukan dan Perkembangan Dana untuk Merespons Kerugian dan Kerusakan (FRLD) 2022-2025. Disarikan dari World Economic Forum (2023), World Bank (2024), dan NRDC (2025)

Peristiwa/Tonggak	Tahun	Capaian Utama
COP27, Sharm El-Sheikh	2022	Kesepakatan membentuk Dana Kerugian dan Kerusakan (FRLD)
COP28, Dubai	2023	FRLD resmi dioperasikan; janji awal ~USD 700 juta
COP29, Baku	2024	Negosiasi NCQG; FRLD capai struktur kelembagaan penuh
Status per Maret 2025	2025	USD 768,4 juta terkumpul dari 27 negara (jauh di bawah kebutuhan)

8. Migrasi dan Pengungsian Akibat Bencana Terkait Iklim

Perubahan iklim tidak hanya memengaruhi kondisi lingkungan, tetapi juga memberikan dampak yang semakin besar terhadap kehidupan sosial, ekonomi, kesehatan, dan keamanan manusia. Salah satu konsekuensi yang paling nyata adalah meningkatnya migrasi dan pengungsian akibat bencana terkait iklim. Peningkatan suhu global menyebabkan perubahan pola curah hujan, kenaikan permukaan laut, serta meningkatnya frekuensi dan intensitas bencana seperti banjir, kekeringan, badai tropis, kebakaran hutan, dan gelombang panas. Kondisi tersebut menyebabkan kerusakan permukiman, lahan pertanian, infrastruktur, serta sumber mata pencaharian sehingga banyak masyarakat terpaksa meninggalkan tempat tinggalnya untuk mencari wilayah yang lebih aman. Berbeda dengan migrasi yang didorong oleh faktor ekonomi atau pendidikan, perpindahan akibat perubahan iklim umumnya terjadi karena lingkungan tidak lagi mampu mendukung kehidupan secara layak atau karena adanya ancaman langsung terhadap keselamatan jiwa.

Migrasi akibat perubahan iklim dapat berlangsung secara sementara maupun permanen. Pada bencana yang bersifat mendadak, seperti banjir atau badai, masyarakat biasanya mengungsi hingga kondisi kembali aman, kemudian kembali ke daerah asal setelah proses pemulihan selesai. Sebaliknya, apabila kerusakan lingkungan berlangsung secara terus-menerus, seperti akibat kenaikan permukaan laut, abrasi pantai, intrusi air laut, atau kekeringan berkepanjangan, perpindahan penduduk dapat bersifat permanen karena wilayah tersebut tidak lagi layak dihuni maupun dimanfaatkan sebagai sumber penghidupan. Sebagian besar perpindahan ini terjadi di dalam wilayah suatu negara sehingga masyarakat yang terdampak umumnya dikategorikan sebagai pengungsi internal (*internally displaced persons* atau IDPs). Hingga saat ini, hukum internasional belum secara khusus mengakui status "pengungsi iklim", karena Konvensi Pengungsi Tahun 1951 hanya memberikan perlindungan kepada orang yang melarikan diri akibat perang, konflik bersenjata, atau penganiayaan.

Berbagai jenis bencana yang dipengaruhi perubahan iklim menjadi penyebab utama meningkatnya migrasi penduduk. Curah hujan yang semakin ekstrem meningkatkan risiko banjir dan tanah longsor yang merusak rumah, sekolah, fasilitas kesehatan, serta jaringan transportasi. Kekeringan yang berlangsung lebih lama mengurangi ketersediaan air bersih, menurunkan produktivitas pertanian, dan menyebabkan hilangnya mata pencaharian masyarakat pedesaan. Di wilayah pesisir, kenaikan permukaan laut mengakibatkan abrasi, banjir rob, dan intrusi air laut yang merusak lahan pertanian maupun sumber air tawar sehingga masyarakat harus direlokasi ke wilayah yang lebih aman. Selain itu, meningkatnya intensitas badai tropis dan kebakaran hutan turut memperbesar risiko kerusakan infrastruktur serta memaksa masyarakat melakukan evakuasi untuk menghindari ancaman terhadap keselamatan jiwa.

Migrasi akibat bencana terkait iklim membawa dampak yang luas terhadap berbagai aspek kehidupan. Daerah asal sering mengalami penurunan aktivitas ekonomi akibat berkurangnya tenaga kerja dan rusaknya lahan produktif, sedangkan daerah tujuan menghadapi peningkatan kebutuhan akan perumahan, air bersih, sanitasi, pendidikan, layanan kesehatan, dan lapangan pekerjaan. Apabila tidak dikelola dengan baik, kondisi tersebut dapat meningkatkan angka pengangguran,

kemiskinan, dan potensi konflik sosial akibat persaingan dalam memperoleh sumber daya. Pemerintah juga harus mengalokasikan anggaran yang besar untuk penanganan darurat, pembangunan kembali infrastruktur, bantuan sosial, serta program relokasi masyarakat terdampak.

Dampak migrasi akibat perubahan iklim juga terlihat pada sektor kesehatan. Tempat pengungsian yang padat sering kali memiliki keterbatasan fasilitas sanitasi dan air bersih sehingga meningkatkan risiko penyebaran penyakit menular, seperti diare, infeksi saluran pernapasan akut, penyakit kulit, dan penyakit berbasis lingkungan lainnya. Selain gangguan kesehatan fisik, korban bencana juga rentan mengalami masalah kesehatan mental berupa stres, kecemasan, depresi, hingga trauma berkepanjangan akibat kehilangan anggota keluarga, rumah, pekerjaan, maupun harta benda. Anak-anak, lansia, ibu hamil, penyandang disabilitas, serta masyarakat berpenghasilan rendah merupakan kelompok yang paling rentan karena memiliki kemampuan yang lebih terbatas dalam menghadapi maupun memulihkan diri setelah bencana.

Sektor pendidikan juga mengalami dampak yang signifikan. Kerusakan gedung sekolah atau penggunaannya sebagai tempat pengungsian menyebabkan proses belajar mengajar terhenti dalam waktu yang tidak menentu. Anak-anak yang berpindah tempat tinggal sering menghadapi kesulitan melanjutkan pendidikan akibat keterbatasan fasilitas, perpindahan sekolah, maupun kondisi ekonomi keluarga yang memburuk. Apabila berlangsung dalam jangka panjang, kondisi tersebut dapat menurunkan kualitas pendidikan dan meningkatkan risiko putus sekolah, terutama pada kelompok masyarakat yang rentan.

Untuk mengurangi risiko migrasi akibat bencana terkait iklim, diperlukan berbagai upaya mitigasi dan adaptasi yang dilakukan secara terpadu. Mitigasi dilakukan melalui pengurangan emisi gas rumah kaca, pemanfaatan energi terbarukan, perlindungan hutan, rehabilitasi ekosistem, dan pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan. Sementara itu, adaptasi dilakukan melalui pembangunan infrastruktur tahan iklim, seperti tanggul pantai, sistem drainase yang lebih baik, restorasi hutan mangrove, konservasi daerah aliran sungai, pengelolaan sumber daya air, serta penerapan sistem pertanian yang lebih tahan

terhadap kekeringan maupun banjir. Pengembangan sistem peringatan dini, penyusunan tata ruang berbasis risiko bencana, peningkatan kapasitas masyarakat dalam kesiapsiagaan menghadapi bencana, dan pelaksanaan program relokasi yang terencana juga menjadi langkah penting dalam mengurangi dampak perpindahan penduduk.

Ilmu biologi memiliki peran penting dalam memahami hubungan antara perubahan iklim, kerusakan ekosistem, dan kesejahteraan manusia. Kajian biologi dan ekologi membantu menjelaskan bagaimana perubahan iklim memengaruhi keanekaragaman hayati, produktivitas pertanian, ketersediaan sumber daya air, serta penyebaran berbagai penyakit. Pengetahuan tersebut menjadi dasar dalam penyusunan strategi konservasi, restorasi ekosistem, dan pengelolaan lingkungan yang mampu meningkatkan ketahanan masyarakat terhadap perubahan iklim. Melalui pendidikan biologi, peserta didik juga dapat mengembangkan literasi lingkungan sehingga memahami pentingnya menjaga keseimbangan ekosistem, mengurangi emisi karbon, dan menerapkan gaya hidup berkelanjutan sebagai bagian dari upaya mengurangi risiko bencana serta migrasi akibat perubahan iklim.

Migrasi dan pengungsian akibat bencana terkait iklim diperkirakan akan terus meningkat seiring berlanjutnya pemanasan global apabila upaya mitigasi dan adaptasi tidak dilakukan secara efektif. Oleh karena itu, penanganan isu ini memerlukan kerja sama antara pemerintah, masyarakat, lembaga internasional, dunia usaha, dan kalangan akademisi untuk membangun sistem yang lebih tangguh terhadap perubahan iklim. Dengan perencanaan yang tepat, perlindungan terhadap kelompok rentan, serta pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan, risiko perpindahan penduduk dapat dikurangi sehingga masyarakat memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menghadapi perubahan iklim tanpa kehilangan kualitas hidup dan kesejahteraannya.

Bagi Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan kerentanan tinggi terhadap bencana hidrometeorologi, dinamika migrasi dan pengungsian terkait iklim memerlukan perhatian kebijakan yang serius, terutama mengingat proyeksi jangka panjang kenaikan muka laut yang dapat memaksa relokasi permanen komunitas pesisir di berbagai wilayah kepulauan Indonesia. Kasus relokasi ibu kota negara dari Jakarta, kota yang menghadapi laju penurunan permukaan tanah (*land subsidence*) tercepat di dunia akibat kombinasi ekstraksi air tanah berlebihan dan

kenaikan muka laut ke Ibu Kota Nusantara di Kalimantan Timur dapat sebagai salah satu contoh bagaimana pertimbangan risiko iklim jangka panjang kini memengaruhi keputusan perencanaan tata ruang dan kependudukan berskala nasional, meskipun kompleksitas penuh keputusan tersebut juga melibatkan pertimbangan ekonomi, politik, dan pembangunan wilayah yang jauh melampaui faktor iklim semata.



BAB VIII

EKSPLORASI ANTARIKSA DAN ASTROBIOLOGI

Upaya manusia untuk memahami dan menjelajahi alam semesta di luar Bumi adalah salah satu manifestasi paling sublim dari rasa ingin tahu saintifik yang menjadi ciri khas spesies *Homo sapiens*. Sejak Yuri Gagarin mengorbit Bumi pada 12 April 1961, lebih dari 600 manusia telah melakukan perjalanan ke luar angkasa. Robot-robot penjelajah ini telah mendarat di Bulan, Mars, Venus, Titan (bulan Saturnus), dan misi *Voyager 1* telah melampaui heliopause, batas pengaruh angin matahari memasuki ruang antarbintang sejak 2012. Teleskop *James Webb Space Telescope* (JWST) yang diluncurkan pada Desember 2021 sedang mengungkap galaksi-galaksi yang terbentuk hanya beberapa ratus juta tahun setelah Big Bang, memotret atmosfer eksoplanet, dan memperdalam pemahaman tentang pembentukan bintang dan tata surya.

Namun eksplorasi antariksa bukan hanya tentang petualangan dan prestise nasional. Ia memiliki dimensi ilmiah yang mendalam: memahami pembentukan dan evolusi tata surya dan galaksi; mencari kehidupan di luar Bumi (*astrobiology*) pertanyaan paling mendasar dan paling universal yang dapat diajukan ilmu pengetahuan; mengembangkan teknologi yang kemudian memiliki aplikasi luas di Bumi; dan pada akhirnya, mungkin mempersiapkan spesies manusia untuk menjadi *multi-planetary species* sebagai 'asuransi eksistensial' terhadap bencana global. Bab ini mengeksplorasi fisika orbit yang menentukan batas-batas apa yang mungkin dalam perjalanan antariksa, pencarian eksoplanet yang telah merevolusi pemahaman kita tentang tempat Bumi dalam alam semesta, ilmu astrobiologi yang menjawab pertanyaan tentang kehidupan kosmis, dan tantangan ilmiah serta rekayasa yang harus diatasi untuk memungkinkan kolonisasi Mars.

1. Hukum Gravitasi Newton dan Mekanika Orbital Dasar

Mekanika orbital yaitu ilmu yang mempelajari gerakan benda-benda langit dan wahana antariksa di bawah pengaruh gravitasi dimulai dari hukum gravitasi universal Newton yang dirumuskan pada 1687 dalam *Principia Mathematica*. Gaya gravitasi antara dua benda bermassa m_1 dan m_2 yang berjarak r adalah:

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

di mana $G = 6,674 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-2}$ adalah konstanta gravitasi universal. Hukum sederhana ini, dikombinasikan dengan hukum kedua Newton ($F = ma$), sepenuhnya menentukan gerak orbit planet, bulan, asteroid, dan wahana antariksa menjadikan mekanika orbital salah satu teori fisika yang paling tepat dan prediktif yang pernah dikembangkan manusia.

Hukum Kepler merupakan tiga hukum empiris yang dikembangkan oleh Johannes Kepler pada awal abad ke-17 berdasarkan pengamatan teliti Tycho Brahe adalah konsekuensi langsung dari gravitasi Newton untuk sistem dua benda:

- Hukum Pertama Kepler (Hukum Elips): Setiap planet bergerak mengelilingi Matahari dalam lintasan berbentuk elips, dengan Matahari berada di salah satu titik fokus elips. Ini adalah hasil geometris dari hukum kuadrat terbalik gravitasi. Eksentrisitas orbit Bumi sangat rendah ($e \approx 0,0167$), menjadikan orbitnya hampir lingkaran. Mars memiliki eksentrisitas lebih tinggi ($e \approx 0,093$), sehingga jaraknya ke Matahari bervariasi antara 1,38 AU (perihelion) dan 1,67 AU (aphelion).
- Hukum Kedua Kepler (Hukum Luas): Garis yang menghubungkan planet ke Matahari menyapu luas yang sama dalam selang waktu yang sama. Ini adalah pernyataan geometris dari kekekalan momentum sudut. Konsekuensinya: planet bergerak lebih cepat saat mendekati Matahari (perihelion) dan lebih lambat saat menjauh (aphelion).
- Hukum Ketiga Kepler (Hukum Harmonik): Kuadrat periode orbit (T^2) berbanding lurus dengan pangkat tiga sumbu semi-mayor orbit (a^3): $T^2 \propto a^3$, atau lebih spesifik $T^2 = (4\pi^2/GM)a^3$. Ini

memungkinkan perhitungan massa bintang atau planet jika periode dan jarak orbitnya diketahui ialah metode astrofisika.

Gambar 8.1 Parameter Orbital Planet Tata Surya (Verifikasi Hukum III Kepler)

Planet	a (AU)	T (tahun)	e	Inklinasi	R (km)
 Merkuri	0,387	0,241	0,206	7,00°	2.440
 Venus	0,723	0,615	0,007	3,39°	6.052
 Bumi	1,000	1,000	0,017	0,00°	6.371
 Mars	1,524	1,881	0,093	1,85°	3.390
 Jupiter	5,203	11,862	0,049	1,31°	71.492
 Saturnus	9,537	29,457	0,057	2,49°	60.268
 Uranus	19,19	84,013	0,046	0,77°	25.559
 Neptunus	30,07	164,800	0,010	1,77°	24.764



Verifikasi Hukum III Kepler:

$T^2/a^3 \approx \text{konstan untuk semua planet}$

Contoh Mars:

$(1,881)^2/(1,524)^3 = 3,54/3,54 = 1,00 \checkmark$

2. Kecepatan Kosmik: Syarat Meloloskan Diri dari Gravitasi

Kecepatan kosmik merupakan konsep dasar dalam mekanika orbit yang menjelaskan kecepatan minimum yang harus dimiliki suatu benda agar dapat bergerak sesuai lintasan tertentu di bawah pengaruh gravitasi. Konsep ini menjadi landasan utama dalam perancangan peluncuran satelit, wahana antariksa, maupun misi eksplorasi ke planet lain. Besarnya kecepatan yang diperlukan bergantung pada massa dan jari-jari benda langit yang menjadi pusat gravitasi. Semakin besar massa suatu planet, semakin besar pula gaya gravitasinya sehingga diperlukan kecepatan yang lebih tinggi untuk mempertahankan orbit atau bahkan melepaskan diri dari pengaruh gravitasinya.

Kecepatan kosmik pertama (v_1), atau disebut juga kecepatan orbital, adalah kecepatan minimum yang diperlukan agar sebuah benda dapat bergerak mengelilingi Bumi dalam orbit sirkular tanpa jatuh kembali ke permukaan. Kecepatan ini diperoleh ketika gaya gravitasi yang menarik benda ke arah pusat Bumi tepat sama dengan gaya sentripetal yang dibutuhkan untuk mempertahankan gerak melingkar. Secara matematis, kecepatan orbital dinyatakan sebagai:

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

dengan G adalah konstanta gravitasi universal ($6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$), M adalah massa Bumi, dan R adalah jarak dari pusat Bumi ke wahana. Untuk satelit yang berada pada orbit rendah Bumi atau *Low Earth Orbit* (LEO) dengan ketinggian sekitar 200 km, kecepatan orbital yang diperlukan sekitar 7,8 km/s, atau setara dengan 28.080 km/jam. Pada kecepatan ini, satelit sebenarnya terus-menerus "jatuh" menuju Bumi, tetapi karena memiliki kecepatan horizontal yang sangat tinggi, lintasan jatuhnya selalu mengikuti kelengkungan permukaan Bumi sehingga satelit tetap berada di orbit.

Apabila suatu wahana ingin meninggalkan Bumi sepenuhnya dan tidak lagi terikat oleh gravitasi planet, maka diperlukan kecepatan yang lebih besar, yaitu kecepatan kosmik kedua atau kecepatan lepas (*escape velocity*). Kecepatan ini merupakan batas minimum agar energi kinetik benda sama dengan energi potensial gravitasinya sehingga benda dapat bergerak menjauh tanpa harus terus-menerus menggunakan tenaga pendorong. Persamaan kecepatan lepas dituliskan sebagai:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2} \times v_1$$

Untuk Bumi, nilai kecepatan lepas sekitar 11,2 km/s, sedangkan pada Mars hanya sekitar 5,0 km/s karena massa Mars lebih kecil dan gravitasinya lebih lemah dibandingkan Bumi. Perbedaan ini menjadi salah satu alasan mengapa peluncuran wahana dari Mars membutuhkan energi yang lebih sedikit dibandingkan dari Bumi.

Dalam praktiknya, roket tidak cukup hanya mencapai kecepatan orbital teoritis sebesar 7,8 km/s. Selama proses peluncuran, roket harus melawan hambatan atmosfer, kehilangan energi akibat gaya gravitasi selama pendakian (*gravity losses*), serta melakukan berbagai manuver untuk mencapai lintasan orbit yang diinginkan. Oleh karena itu, total perubahan kecepatan (Δv) yang harus disediakan sistem propulsi untuk mencapai orbit rendah Bumi berkisar 9,4 km/s. Nilai ini merupakan salah satu parameter terpenting dalam perencanaan misi antariksa karena menentukan jumlah bahan bakar yang harus dibawa.

Hubungan antara kebutuhan Δv dengan massa roket dijelaskan oleh Persamaan Roket Tsiolkovsky, yang menjadi dasar seluruh rekayasa propulsi antariksa modern:

$$\Delta v = v_e \ln \left(\frac{m_0}{m_f} \right)$$

Pada persamaan tersebut, Δv adalah perubahan kecepatan yang dapat dicapai roket, v_e adalah kecepatan gas buang dari mesin roket (yang bergantung pada *specific impulse* atau impuls spesifik mesin), m_0 adalah massa awal roket saat peluncuran yang mencakup struktur, muatan, dan propelan, sedangkan m_f adalah massa akhir setelah sebagian besar propelan habis terbakar. Persamaan ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan bergantung secara logaritmik terhadap rasio massa awal dan massa akhir. Artinya, untuk memperoleh tambahan kecepatan yang relatif kecil sekalipun, roket harus membawa propelan dalam jumlah yang sangat besar.

Konsekuensi dari hukum tersebut adalah sebagian besar massa roket sebenarnya terdiri atas bahan bakar, sedangkan muatan yang diangkut hanya merupakan sebagian kecil dari keseluruhan massa peluncuran. Inilah yang dikenal sebagai *mass fraction problem*, yaitu keterbatasan mendasar dalam teknologi propulsi kimia. Sebagai contoh, roket Saturn V yang digunakan dalam program Apollo program memiliki massa peluncuran sekitar 2.970 ton, tetapi hanya mampu mengirim modul komando (*Command Module*) bermassa sekitar 6 ton menuju Bulan. Perbandingan yang tampak sangat besar ini bukanlah pemborosan desain, melainkan konsekuensi langsung dari persamaan Tsiolkovsky dan keterbatasan energi yang dapat dihasilkan oleh bahan bakar kimia.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, para insinyur mengembangkan berbagai strategi, seperti penggunaan roket bertingkat (*multistage rockets*), peningkatan efisiensi mesin melalui nilai *specific impulse* yang lebih tinggi, serta pemanfaatan lintasan gravitasi (*gravity assist*) ketika melakukan perjalanan ke planet-planet jauh. Dengan membuang tahap roket yang telah kehabisan bahan bakar, massa roket berkurang secara signifikan sehingga tahap berikutnya dapat memberikan percepatan yang lebih efisien. Strategi ini memungkinkan wahana antariksa mencapai kecepatan yang diperlukan tanpa harus membawa propelan dalam jumlah yang tidak realistis.

3. Transfer Hohmann: Rute Paling Efisien ke Planet Lain

Transfer Hohmann merupakan lintasan orbital yang paling efisien dari segi konsumsi propelan untuk memindahkan wahana antariksa dari satu orbit sirkular ke orbit sirkular lainnya. Metode ini diperkenalkan oleh insinyur Jerman Walter Hohmann pada tahun 1925 dan hingga kini masih menjadi dasar perencanaan banyak misi antariksa. Meskipun bukan merupakan lintasan tercepat, transfer Hohmann memberikan kebutuhan perubahan kecepatan (Δv) yang paling kecil sehingga sangat menguntungkan bagi misi yang mengandalkan propulsi kimia dengan persediaan bahan bakar terbatas.

Prinsip dasar transfer Hohmann adalah memanfaatkan lintasan berbentuk elips yang menghubungkan dua orbit sirkular. Titik terdekat elips terhadap benda pusat gravitasi disebut periapsis, yang berimpit dengan orbit awal, sedangkan titik terjauh disebut apoapsis, yang berimpit dengan orbit tujuan. Dengan demikian, wahana antariksa hanya memerlukan dua kali penyalaan mesin roket (*orbital burns*) untuk berpindah dari satu orbit ke orbit lainnya. Di antara kedua manuver tersebut, wahana bergerak secara pasif mengikuti hukum gravitasi tanpa memerlukan tenaga pendorong tambahan, sehingga penggunaan propelan menjadi sangat efisien.

Pada misi dari Bumi menuju Mars, transfer Hohmann dimulai ketika wahana berada di *Low Earth Orbit* (LEO). Manuver pertama dilakukan untuk meningkatkan kecepatan wahana sehingga keluar dari orbit Bumi dan memasuki lintasan transfer menuju Mars. Dari kecepatan orbit rendah sekitar 7,8 km/s, wahana harus memperoleh tambahan perubahan kecepatan sekitar $\Delta v_1 \approx 3,5$ km/s, sehingga kecepatan totalnya mencapai sekitar 11,3 km/s relatif terhadap Bumi. Setelah manuver ini selesai, mesin roket dapat dimatikan dan wahana akan bergerak mengikuti lintasan elips yang mengelilingi Matahari menuju orbit Mars.

Ketika wahana mencapai lingkungan gravitasi Mars, dilakukan manuver kedua untuk mengurangi kecepatan relatif sehingga dapat ditangkap oleh gravitasi Mars. Manuver ini memerlukan perubahan kecepatan sekitar $\Delta v_2 \approx 0,9$ km/s apabila tujuan misi adalah memasuki orbit Mars. Untuk misi pendaratan, diperlukan tambahan sistem pengereman, baik menggunakan atmosfer Mars (*aerobraking* atau *aerocapture*), mesin roket, maupun kombinasi keduanya agar wahana dapat mendarat dengan aman di permukaan.

Salah satu karakteristik penting transfer Hohmann adalah waktu tempuhnya yang relatif panjang. Perjalanan dari Bumi ke Mars melalui lintasan ini membutuhkan waktu sekitar 259 hari, atau sekitar 8,5 bulan. Waktu tersebut merupakan konsekuensi dari pemilihan lintasan yang mengutamakan efisiensi energi dibandingkan kecepatan. Oleh karena itu, metode ini sangat sesuai untuk misi pengiriman satelit, wahana robotik, maupun logistik, tetapi menjadi tantangan tersendiri untuk misi berawak yang membawa astronaut.

Transfer Hohmann juga hanya dapat dilakukan ketika posisi geometris kedua planet berada pada konfigurasi yang tepat. Karena Bumi dan Mars mengelilingi Matahari dengan periode orbit yang berbeda, kesempatan peluncuran yang optimal hanya muncul sekitar setiap 26 bulan, yang dikenal sebagai jendela peluncuran (*launch window*) atau periode sinodis Mars (*Mars synodic period*). Jika peluncuran dilakukan di luar jendela ini, kebutuhan energi akan meningkat secara signifikan atau waktu perjalanan menjadi jauh lebih lama. Oleh sebab itu, seluruh misi ke Mars harus direncanakan mengikuti siklus jendela peluncuran tersebut.

Meskipun sangat hemat propelan, transfer Hohmann memiliki keterbatasan untuk misi eksplorasi manusia jangka panjang. Selama sekitar delapan hingga sembilan bulan berada dalam kondisi mikrogravitasi, astronaut mengalami berbagai perubahan fisiologis, seperti penurunan massa otot (*muscle atrophy*), berkurangnya kepadatan tulang (*bone demineralization*), redistribusi cairan tubuh, gangguan keseimbangan, serta perubahan pada sistem kardiovaskular dan kekebalan tubuh. Paparan radiasi kosmik dalam perjalanan antariksa juga meningkatkan risiko kesehatan jangka panjang. Oleh karena itu, pengembangan sistem propulsi yang lebih cepat, seperti propulsi nuklir termal (*nuclear thermal propulsion*) maupun propulsi listrik (*electric propulsion*), menjadi salah satu fokus utama penelitian eksplorasi antariksa modern untuk mengurangi durasi perjalanan menuju Mars (Patel et al., 2020).

Gambar 8.2 Perbandingan Metode Propulsi untuk Perjalanan Bumi-Mars

Metode	Waktu Perjalanan	Δv Total	Status
 Hohmann Transfer (kimia)	~ 259 hari	~ 5,6 km/s	Terbukti (Mars Odyssey, MRO)
 Fast Transfer (kimia, boost)	~ 100–150 hari (lebih cepat)	~ 8–10 km/s (lebih byk)	Teoretis; propellan >>
 Ion Propulsion (SEP)	~ 250–400 hari (hemat propeln)	rendah	Dawn, Hayabusa asteroid
 Nuclear Thermal Propulsion (NTP)	~ 90–120 hari	moderat Isp ~900s	Konseptual; R&D aktif NASA
 Laser Sail (Breakthrough Starshot concept)	~ 80 hari (Starlight)	N/A (diakseler)	Spekulatif; terlalu kecil utk manusia
 Fusion Propulsion (NIF-based)	~ 45–90 hari	sangat tinggi Isp	Spekulatif; fusi komersial belum terbukti

4. Efek *Slingshot* Gravitasi dan Bantuan Planet

Gravitational slingshot atau *gravity assist* adalah teknik navigasi inovatif yang memanfaatkan momentum planet yang bergerak untuk mempercepat (atau memperlambat) wahana antariksa tanpa menghabiskan propellan. Konsep ini dieksploitasi oleh hampir semua misi antariksa jarak jauh. Ketika wahana memasuki bidang pengaruh gravitasi planet yang bergerak, ia dipercepat saat mendekati dan diperlambat saat menjauh, namun karena planet bergerak dalam referensi kerangka Matahari, wahana mendapatkan atau kehilangan kecepatan relatif terhadap Matahari.

Voyager 2 menggunakan empat *gravity assists* berturutan (Jupiter, Saturnus, Uranus, Neptunus) dalam perjalanan '*Grand Tour*'nya, sebuah konfigurasi planet langka yang hanya terjadi setiap ~175 tahun. Tanpa manuver ini, bahan bakar yang diperlukan akan menjadi tidak praktis. Misi *Cassini-Huygens* ke Saturnus menggunakan dua *gravity assists* di Venus, satu di Bumi, dan satu di Jupiter untuk mencapai kecepatan yang diperlukan. Teknik ini adalah demonstrasi brilian bahwa kecerdikan fisika dan matematis dapat mengimbangi keterbatasan propulsi kimia, prinsip yang akan terus menjadi inti desain misi antariksa masa depan (Longuski et al., 2014; Koon et al., 2001).

5. *Lagrange Points* dan Tempat Parkir Antariksa

Titik *Lagrange* (L1–L5) adalah lima titik dalam ruang di mana gaya gravitasi dari dua benda masif (misalnya Matahari dan Bumi) dan gaya sentrifugal dari rotasi sistem bersatu menghasilkan titik keseimbangan, di mana benda ketiga yang lebih kecil dapat 'diam' relatif terhadap dua benda masif tersebut tanpa menghabiskan propellan untuk menjaga posisi. Titik L1, L2, dan L3 secara dinamis tidak stabil (seperti bola di atas punuk) gangguan kecil akan menyebabkan benda melayang menjauh, sehingga wahana di sini memerlukan koreksi orbit berkala kecil (*station-keeping*). L4 dan L5 bersifat stabil dan mengandung awan asteroid *Trojan* yang mengorbit bersama Yupiter.

Titik L2 Bumi-Matahari pada jarak $\sim 1,5$ juta km dari Bumi ke arah menjauhi Matahari telah menjadi lokasi favorit teleskop luar angkasa karena dari sana, teleskop dapat menjaga Bumi, Bulan, dan Matahari di satu sisi, memberikan bayangan termal yang stabil dan pandangan bebas gangguan ke alam semesta. *James Webb Space Telescope* (JWST), Gaia, Planck, dan Herschel semuanya beroperasi di sekitar L2. Titik L4 dan L5 adalah kandidat untuk stasiun luar angkasa masa depan atau depot bahan bakar yang dapat menjadi 'jembatan' menuju eksplorasi lebih jauh. Badan Antariksa Eropa (ESA) dan NASA dalam *Moon to Mars Architecture* mempertimbangkan *Gateway*, stasiun luar angkasa di orbit lunar yang distabilkan oleh titik Lagrange Bumi-Bulan sebagai batu loncatan menuju eksplorasi Mars (Lo et al., 2001; Koon et al., 2011; Zimovan-Spreen et al., 2020).

B. Pencarian Planet Layak Huni: Eksoplanet dan Zona Habitable

1. Revolusi Eksoplanet: Dari Spekulasi ke Konfirmasi

Hingga 1995, tidak ada satupun planet di luar tata surya yang terkonfirmasi. Pertanyaan apakah Bumi adalah satu-satunya dunia berbatu yang mengorbit bintang adalah pertanyaan yang tidak dapat dijawab, hanya dispekulasikan. Semua itu berubah pada 6 Oktober 1995, ketika Michel Mayor dan Didier Queloz mengumumkan penemuan *51 Pegasi b*, planet raksasa yang mengorbit bintang seperti Matahari dengan periode hanya 4,2 hari, jauh lebih dekat dari Merkurius ke Matahari kita. Penemuan ini yang dianugerahi Nobel Fisika 2019 kepada Mayor dan

Queloz membuka era baru astronomi dan menjawab pertanyaan paling fundamental: ya, planet-planet memang biasa di alam semesta.

Teleskop *Kepler* NASA (2009–2018) mentransformasi bidang ini dari penemuan sporadik menjadi statistik ilmiah. Dalam misi sembilan tahunnya, Kepler mengidentifikasi lebih dari 2.700 eksoplanet yang terkonfirmasi dari sekitar 156.000 bintang yang diamatinya. Analisis statistik data Kepler menunjukkan bahwa planet-planet adalah hal yang biasa, rata-rata setiap bintang di galaksi kita memiliki setidaknya satu planet yang mengorbitnya. Diperkirakan terdapat $\sim 10^{11}$ (100 miliar) bintang di Bima Sakti, yang berarti setidaknya 100 miliar planet. Jika bahkan sebagian kecil dari planet ini memiliki kondisi yang mendukung kehidupan, implikasinya untuk pertanyaan 'apakah kita sendirian?' sangat mendalam. (Mayor & Queloz, 1995; Bryson et al., 2021)

Penerus Kepler, teleskop TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*), diluncurkan pada April 2018 dan dalam beberapa tahun pertama operasinya telah mengidentifikasi lebih dari 5.000 kandidat eksoplanet dengan cakupan langit yang jauh lebih luas dari Kepler namun dengan waktu observasi yang lebih singkat per bintang. Yang membuat TESS istimewa adalah fokusnya pada bintang-bintang terdekat dan paling terang, planet yang ditemukan TESS adalah kandidat terbaik untuk follow-up spektroskopi atmosfer dengan JWST dan teleskop berbasis darat generasi berikutnya (ELT, TMT, GMT). Total eksoplanet yang terkonfirmasi per akhir 2023 telah melampaui 5.500, sebuah database yang mengubah planet dari entitas tunggal Tata Surya menjadi populasi statistik yang dapat dipelajari (Ricker et al., 2015; Jenkins et al., 2020; NASA Exoplanet Archive, 2023).

2. Metode Deteksi Eksoplanet: Prisma Fisika

Eksoplanet tidak dapat dilihat langsung (kecuali dalam kondisi sangat khusus) karena jauh terlalu redup dibandingkan cahaya bintang induknya, bayangkan mencoba melihat lilin yang dipegang seseorang di samping lampu mercusuar dari jarak ratusan kilometer. Oleh karena itu, para astronom menggunakan berbagai metode deteksi tidak langsung, masing-masing mengeksploitasi efek fisika yang berbeda dari kehadiran planet:

- a. Metode Transit: Metode transit adalah cara mendeteksi exoplanet ketika sebuah planet melintas di depan bintang induknya jika dilihat dari Bumi. Saat transit terjadi, sebagian kecil cahaya bintang akan berkurang secara periodik karena tertutup oleh planet. Besarnya penurunan cahaya ini bergantung pada perbandingan ukuran planet dan bintang, yang dapat dituliskan sebagai

$$\frac{\Delta F}{F} \approx \left(\frac{R_p}{R_\star} \right)^2$$

Artinya, semakin besar planet dibandingkan bintangnya, semakin besar pula penurunan cahaya yang terdeteksi. Metode ini sangat sukses digunakan oleh misi seperti Kepler Space Telescope dan Transiting Exoplanet Survey Satellite, yang berhasil menemukan ribuan kandidat planet di luar Tata Surya. Dari metode transit, ilmuwan dapat memperoleh informasi penting seperti ukuran planet (R_p), periode orbit (T), dan kemiringan orbit (inklasi). Namun, metode ini memiliki keterbatasan utama: hanya planet dengan orientasi orbit yang tepat sehingga benar-benar melintas di depan bintangnya dari sudut pandang kita yang bisa terdeteksi. Akibatnya, jumlah planet yang teramati hanya sebagian kecil dari total planet yang sebenarnya ada.

- b. Metode Kecepatan Radial (*Doppler*): Metode kecepatan radial, atau sering disebut metode *Doppler*, bekerja dengan mendeteksi “goyangan” kecil pada bintang akibat tarikan gravitasi planet yang mengorbitnya. Meskipun planet mengelilingi bintang, sebenarnya keduanya bergerak mengelilingi titik pusat massa bersama (*barycenter*). Gerakan bintang ini sangat kecil, biasanya hanya beberapa meter per detik hingga ratusan meter per detik, tetapi bisa diukur melalui perubahan panjang gelombang cahaya bintang. Perubahan ini muncul sebagai pergeseran *Doppler* pada garis spektrum bintang: saat bintang bergerak mendekati kita, spektrumnya bergeser ke arah biru, dan saat menjauh bergeser ke arah merah. Salah satu keberhasilan awal metode ini adalah penemuan planet *51 Pegasi b* oleh Michel Mayor dan Didier Queloz. Dari metode ini, ilmuwan dapat memperkirakan massa minimum planet ($m_p \sin i$) serta periode orbitnya. Metode ini sangat efektif untuk mendeteksi planet besar yang berada dekat

dengan bintangnya, karena efek gravitasinya lebih kuat dan lebih mudah diamati, tetapi kurang sensitif untuk planet kecil atau yang berada jauh dari bintang induknya.

- c. Metode *Direct Imaging*: Memotret planet secara langsung memisahkan cahayanya dari cahaya bintang. Sangat sulit karena kontras cahaya ($\sim 10^{-9}$ untuk eksoplanet seperti Bumi vs bintangnya) dan kedekatan sudut. Kronograf dan *starshade* digunakan untuk menghalau cahaya bintang. Berhasil untuk planet raksasa yang jauh dari bintang muda (sehingga masih panas dan memancarkan inframerah sendiri). Contoh: HR 8799 system, empat planet raksasa yang difoto langsung oleh Keck Observatory.
- d. *Microensing* Gravitasi: Ketika sebuah bintang (dengan atau tanpa planet) lewat di depan bintang latar, gravitasinya membelokkan dan memperbesar cahaya bintang latar, efek gravitational lensing Einstein. Planet di sekitar bintang pelens menghasilkan puncak tambahan dalam kurva cahaya amplifikasi. Metode ini unik karena sensitif terhadap planet di 'jalur salju' (*snow line*) dan planet bebas (planet yang tidak mengorbit bintang). Misi *Roman Space Telescope* (akan diluncurkan ~ 2027) diharapkan menemukan ribuan planet menggunakan microlensing.
- e. Astrometri: Mengukur pergeseran posisi bintang di langit akibat goyahan gravitasi planet yang serupa dengan kecepatan radial namun diukur dalam bidang tegak lurus garis pandang. Satelit Gaia ESA memiliki presisi astrometri cukup untuk mendeteksi planet Jupiter-ukuran di banyak bintang terdekat. Data Gaia DR3 dan DR4 diperkirakan akan mengkonfirmasi ribuan planet menggunakan metode ini.

Tabel 8.1 Metode Deteksi Eksoplanet: Fisika, Kemampuan, dan Produksi

Metode	Fisika Dasar	Jenis Planet Terbaik Dideteksi	Informasi yang Diperoleh	Misi Utama	Jumlah Eksoplanet (2023)
Transit	Pemadaman berkala cahaya bintang	Planet besar yang dekat bintang (Hot Jupiter, Sub-Neptune)	Radius, periode, inklinasi	Kepler, TESS, CHEOPS, PLATO	>3.800
Kecepatan Radial	Pergeseran Doppler garis spektral	Planet masif yang dekat (Hot Jupiter)	Massa minimum ($m \sin i$), periode	HARPS, ESPRESSO, HIRES	>1.000
Direct Imaging	Deteksi cahaya planet langsung	Planet raksasa yang jauh dari bintang muda	Suhu, komposisi atmosfer, orbit langsung	GPI, SPHERE, futur: HWO	~50
Micro-lensing	Amplifikasi gravitasi cahaya latar	Planet dingin di snowline, planet bebas	Massa planet, jarak orbital	OGLE, KMTNet, Roman (2027)	~200
Astrometri	Gerakan bintang di langit	Planet masif di orbit lebar	Massa planet, inklinasi orbit	Gaia ESA	Dalam proses (Gaia DR4)

Sumber: NASA Exoplanet Archive, 2023; Perryman, 2018

3. Zona Habitable: Goldilocks Zone dan Kompleksitasnya

Konsep *Habitable Zone* (HZ) atau '*Goldilocks Zone*' adalah wilayah di sekitar sebuah bintang di mana kondisi memungkinkan air cair berada di permukaan planet berbatu (jika planet tersebut memiliki atmosfer yang tepat). Air cair adalah prasyarat yang paling sering diasumsikan untuk kehidupan sebagaimana kita kenal karena sifat pelarutnya yang unik, kapasitas membawa molekul organik kompleks, dan perannya dalam metabolisme biologis. HZ konvensional didefinisikan berdasarkan luminositas bintang dan diukur dalam unit *Astronomical Unit* (AU) dari bintang.

HZ Matahari diperkirakan antara $\sim 0,95$ – $1,67$ AU berdasarkan model iklim (Kopparapu *et al.*, 2013) batas dalam ditentukan oleh efek *greenhouse* tidak terkontrol (*moist greenhouse*) yang terjadi ketika air di stratosfer menguap dan terfotodissosiasi, kehilangan hidrogen ke angkasa; batas luar ditentukan oleh kondensasi CO₂ yang mencegah efek rumah kaca memadai. Bumi, pada 1 AU, berada di dekat tepi dalam HZ ini. Mars, pada 1,52 AU, sedikit di luar HZ konvensional namun dianggap bisa layak huni lebih hangat dengan atmosfer tebal CO₂ yang mungkin pernah dimilikinya 3–4 miliar tahun lalu. (Kopparapu *et al.*, 2013; Ramirez & Kaltenegger, 2017).

Namun HZ konvensional sangat menyederhanakan kondisi habitabilitas. Habitabilitas sejati bergantung pada banyak faktor lain yang berinteraksi secara kompleks:

- a. Komposisi atmosfer: Tekanan parsial CO₂ dan H₂O sangat menentukan kemampuan atmosfer mempertahankan air cair di permukaan. Planet di tepi luar HZ masih bisa layak huni dengan atmosfer CO₂ tebal. Nitrogen, oksigen, dan trace gas lainnya juga berperan.
- b. Geologi aktif dan daur karbon-silikat: Vulkanisme yang meregulasi CO₂ atmosfer melalui daur karbon-silikat (*carbonate-silicate cycle*) sangat penting untuk menjaga kestabilan iklim jangka panjang. Tanpa ini, Bumi mungkin sudah menjadi 'Snowball' atau 'Venus' tergantung kondisi awalnya.
- c. Medan magnet: Melindungi atmosfer dari erosi oleh angin bintang (terutama penting untuk bintang aktif tipe M) dan melindungi permukaan dari radiasi kosmik dan partikel energetik. Mars kehilangan medan magnetnya ~ 4 miliar tahun lalu, menyebabkan atmosfernya habis terkikis.
- d. Kehadiran bulan besar: Bulan Bumi menstabilkan kemiringan sumbu rotasi Bumi ($\sim 23,5^\circ$) dalam rentang yang relatif sempit. Tanpa Bulan, kemiringan bisa berosilasi liar (0 – 85°) dalam ratusan juta tahun, menyebabkan perubahan iklim yang ekstrem. Mars, tanpa bulan besar, mengalami variasi kemiringan yang lebih besar dari waktu ke waktu.
- e. Jenis bintang induk: Bintang tipe M (bintang merah kecil, paling umum di galaksi) memiliki HZ yang sangat dekat dan sering mengeluarkan flare UV ekstrem yang berpotensi mensterilkan

planet berbatu yang jauh lebih dekat dibanding Bumi ke Matahari.

4. TRAPPIST-1 dan Sistem Bintang Terdekat

Sistem *TRAPPIST-1* adalah salah satu penemuan eksoplanet paling menarik dalam sejarah astronomi. Ditemukan pada 2016–2017, sistem ini terdiri dari tujuh planet berbatu yang semuanya berukuran mirip Bumi, mengorbit bintang M kerdil berdimensi sedikit lebih besar dari Yupiter, berjarak hanya ~40 tahun cahaya dari kita. Yang membuat sistem ini luar biasa adalah bahwa tiga dari tujuh planet (TRAPPIST-1e, f, g) berada dalam HZ bintang induknya, jumlah terbanyak dari sistem bintang manapun yang diketahui. TRAPPIST-1e khususnya sering disebut sebagai kandidat terbaik untuk planet layak huni yang pernah ditemukan berdasarkan parameter fisiknya.

JWST telah mengamati TRAPPIST-1b dan 1c untuk mendeteksi atmosfer, hasilnya menunjukkan kemungkinan bahwa TRAPPIST-1c tidak memiliki atmosfer CO₂ yang tebal (Zieba *et al.*, 2023), meski ini tidak sepenuhnya menyingkirkan semua jenis atmosfer. Pengamatan lanjutan terhadap TRAPPIST-1e dan 1f akan memberikan data atmosfer yang lebih relevan untuk pertanyaan habitabilitas. Tantangan utama untuk TRAPPIST-1: bintang M ini jauh lebih aktif (dalam hal flare UV dan sinar-X) dibanding Matahari, dan semua planet berada begitu dekat sehingga kemungkinan *tidally locked*, satu sisi selalu menghadap bintang (permanen siang) dan satu sisi selalu membelakangi (permanen malam). Apakah sirkulasi atmosfer dapat mendistribusikan panas cukup untuk menjaga kestabilan iklim adalah pertanyaan terbuka yang aktif diteliti (Gillon *et al.*, 2017; Turbet *et al.*, 2020; Zieba *et al.*, 2023).

Tabel 8.2 Parameter Planet Sistem TRAPPIST-1 vs Bumi

Planet	Massa (M_Bumi)	Radius (R_Bumi)	Periode (hari)	Jarak dari Bintang (AU)	Zona Habitable ?
TRAPP IST-1b	1,374 ± 0,069	1,116 ± 0,014	1,511	0,01154	Tidak (terlalu panas)

Planet	Massa (M_Bumi)	Radius (R_Bumi)	Periode (hari)	Jarak dari Bintang (AU)	Zona Habitable ?
TRAPP IST-1c	$1,308 \pm 0,056$	$1,097 \pm 0,014$	2,422	0,01580	Tidak (terlalu panas)
TRAPP IST-1d	$0,388 \pm 0,012$	$0,788 \pm 0,011$	4,049	0,02227	Tepi dalam HZ
TRAPP IST-1e	$0,692 \pm 0,022$	$0,920 \pm 0,013$	6,101	0,02925	Ya (HZ optimum)
TRAPP IST-1f	$1,039 \pm 0,031$	$1,045 \pm 0,013$	9,206	0,03849	Ya (HZ tengah)
TRAPP IST-1g	$1,321 \pm 0,038$	$1,129 \pm 0,015$	12,352	0,04683	Ya (tepi luar HZ)
TRAPP IST-1h	$0,326 \pm 0,020$	$0,775 \pm 0,014$	18,767	0,06189	Tidak (terlalu dingin)
Bumi (refere nsi)	1,000	1,000	365,25	1,000	Ya (HZ optimum)

Sumber: De Wit et al., (2018); Agol et al., 2021

5. Spektroskopi Atmosfer Eksoplanet dan Pencarian Biosignatures

Langkah revolusioner berikutnya dalam pencarian eksoplanet layak huni adalah karakterisasi atmosfer mereka mencari *biosignatures* (tanda-tanda kimia yang mengindikasikan kehidupan). Ketika planet transit di depan bintangnya, sebagian cahaya bintang melewati tepian atmosfer planet, panjang gelombang tertentu diserap oleh molekul-molekul atmosfer. Spektrum transmisi yang dihasilkan mengungkapkan komposisi atmosfer. JWST mampu mendeteksi molekul atmosfer seperti H₂O, CO₂, CH₄, N₂O, dan O₃ pada eksoplanet yang cukup besar dan dekat bintangnya, revolusi dalam kemampuan observasi yang belum pernah ada sebelumnya.

Biosignatures yang paling menarik adalah kombinasi: (1) Oksigen (O₂) atau ozon (O₃) karena O₂ adalah sangat reaktif dan akan cepat hilang dari atmosfer tanpa produksi biologis terus-menerus

(fotosintesis). Di Bumi, hampir seluruh O_2 atmosfer adalah produk biologis. Namun ada jalur abiotis yang dapat menghasilkan O_2 , UV photodissociation H_2O pada bintang aktif dapat menghasilkan O_2 , demikian pula kondisi geologi tertentu. (2) Metana + oksigen bersama-sama CH_4 dan O_2 secara termodinamika tidak dapat coexist dalam keseimbangan; kehadiran keduanya bersama-sama dalam atmosfer sangat mengindikasikan proses biologis yang terus memperbarui kedua gas (fotosintesis menghasilkan O_2 ; metanogenesis menghasilkan CH_4). (3) Fosfor fosfin (PH_3) deteksi yang diklaim (namun sangat diperdebatkan) di atmosfer Venus pada 2020 memicu diskusi besar tentang biosignature di lingkungan ekstrem. (4) Nitrogen oksida (N_2O) diproduksi terutama oleh aktivitas biologis (denitrifikasi bakteri); berpotensi menjadi biosignature yang lebih definitif dari O_2 (Schwieterman et al., 2018; Meadows et al., 2018; Seager, 2014).

Deteksi biosignature meyakinkan masih merupakan tantangan teknis yang luar biasa bahkan untuk JWST memerlukan ratusan jam observasi per planet. Teleskop generasi berikutnya seperti *Habitable Worlds Observatory* (HWO, konseptual, NASA) dengan diameter cermin ~6 meter dan kemampuan direct imaging eksoplanet Earth-analog sekitar bintang seperti Matahari adalah yang diharapkan dapat memberikan deteksi biosignature yang lebih definitif pada 2040an. Misi *PLATO* ESA (diluncurkan 2026) akan mencari eksoplanet berbatu di HZ bintang tipe G dan K terang yang kemudian dapat dikarakterisasi atmosfernya oleh JWST dan instrumen ELT (LUVOIR Team, 2019; Rauer et al., 2014; Turbet et al., 2022).

C. Kolonisasi Mars: Tinjauan Biologi dan Fisika

1. Mengapa Mars? Perbandingan dengan Bumi

Mars adalah kandidat terdepan untuk kolonisasi manusia di tata surya karena beberapa alasan fundamental: jarak relatif yang terjangkau (~55–401 juta km bergantung posisi orbital), periode hari yang hampir sama dengan Bumi (~24,6 jam nyaman secara sirkadian), suhu yang lebih ekstrem namun dalam jangkauan teknologi, sumber air yang signifikan dalam bentuk es di kutub dan bawah permukaan, dan sumber daya material yang tersedia (besi, silikon, karbon, oksigen dalam bentuk CO_2). Gravitasi permukaan Mars adalah $3,72 \text{ m/s}^2$ (~38% gravitasi

Bumi) lebih rendah dari yang ideal untuk kesehatan manusia jangka panjang, namun jauh lebih tinggi dari kondisi mikrogravitasi di ruang angkasa yang terbukti sangat merusak.

Namun perbandingan langsung Bumi-Mars mengungkapkan tantangan yang sangat besar yang harus diatasi untuk menjadikan Mars layak huni manusia:

Tabel 8.4 Perbandingan Parameter Kunci Bumi dan Mars: Implikasi untuk Kolonisasi

Parameter	Bumi	Mars	Implikasi untuk Kolonisasi
Jarak dari Matahari	1,00 AU	1,52 AU	Radiasi surya ~43% lebih lemah; energi surya lebih terbatas
Gravitasi permukaan	9,81 m/s ²	3,72 m/s ² (38%)	Atrofi otot dan tulang; dampak fisiologi jangka panjang belum diketahui
Tekanan atmosfer	101,3 kPa	~0,6 kPa (0,6%)	Jauh di bawah garis Armstrong (~6,3 kPa); manusia tanpa baju tekanan akan meninggal
Komposisi atmosfer	78% N ₂ , 21% O ₂	95% CO ₂ , 3% N ₂ , 1,6% Ar, 0,13% O ₂	Tidak dapat bernapas; harus diproduksi O ₂ (MOXIE telah membuktikan konsep)
Suhu rata-rata	+15°C	-60°C (rerata); -125°C hingga +20°C	Butuh habitat tertutup berpemanas; baju luar kritis untuk EVA

Parameter	Bumi	Mars	Implikasi untuk Kolonisasi
Medan magnet	25–65 μT	Sisa lokal; tidak ada global	Tidak ada perlindungan radiasi matahari dan kosmik; risiko kanker meningkat
Radiasi permukaan	~2,4 mSv/tahun	~300 mSv/tahun (permukaan)	125× lebih tinggi dari Bumi; perlu shielding regolith atau bawah tanah
Hari sidereal	23 jam 56 menit	24 jam 37 menit	Kompatibel dengan ritme sirkadian manusia
Kelimpahan air	Sangat melimpah	Es di kutub; kemungkinan bawah tanah	Harus diekstraksi dari es atau regolith; tidak ada air cair permukaan saat ini
Badai debu	Jarang; lokal	Badai debu global yang menutupi seluruh planet (beberapa bulan)	Panel surya dapat diblokir total selama berbulan-bulan

Sumber: Zurek & Smrekar, 2022; MEPAG, 2020; Hassler et al., 2014

2. Tantangan Biologi dan Fisiologi Manusia di Mars

Kesehatan manusia dalam perjalanan dan tinggal di Mars adalah tantangan medis multidimensi yang belum sepenuhnya dipahami karena ketiadaan data dari misi jangka panjang ke Mars (atau lingkungan analog yang sempurna). Data yang tersedia berasal dari misi ISS (*International Space Station*) jangka panjang, dan studi analog Mars di Bumi (Haughton Mars Project, MARS-500 simulation). Misi ISS dengan durasi 6–12 bulan memberikan gambaran terbaik tentang adaptasi tubuh manusia terhadap mikrogravitasi, kondisi yang relatif lebih ekstrem dari gravitasi Mars namun setidaknya memberikan *baseline*.

- a. Degradasi Tulang dan Otot: Dalam mikrogravitasi ISS, astronaut kehilangan rata-rata 1–2% massa tulang per bulan, setara dengan atrofi tulang yang dialami pasien osteoporosis selama beberapa tahun. Di gravitasi Mars (38% Bumi), laju kehilangan diperkirakan lebih lambat namun tetap signifikan. Setelah 18 bulan di Mars, penurunan densitas tulang bisa sangat substansial, meningkatkan risiko fraktur saat kembali ke gravitasi Bumi (atau bahkan di Mars sendiri). Program latihan fisik intensif wajib dilakukan di ISS (~2 jam/hari) namun belum dapat sepenuhnya mengkompensasi kehilangan, dan konsistensi latihan di lingkungan Mars yang penuh tantangan operasional akan sulit dijaga (Scott *et al.*, 2019).
- b. Radiasi: Radiasi yang diterima di permukaan Mars sekitar 300 mSv/tahun dibandingkan batas paparan radiasi untuk pekerja nuklir di banyak negara adalah 20 mSv/tahun, dan batas karir astronaut NASA adalah 600 mSv. Perjalanan transit ke Mars (8,5 bulan) menambahkan ~300 mSv radiasi dari *galactic cosmic rays* (GCR) dan potensi *solar energetic particle* (SEP) events yang tidak dapat diprediksi. Total radiasi selama misi Mars pulang-pergi (~2,5 tahun) diperkirakan ~1.000 mSv meningkatkan risiko kanker seumur hidup sekitar 5% dibandingkan populasi umum. SPE (*Solar Particle Events*) selama badai matahari besar dapat memberikan dosis fatal dalam hitungan jam jika tidak ada shielding, cadangan air atau regolith tebal adalah shielding terbaik yang tersedia (Zeitlin *et al.*, 2013).
- c. Psikologi dan Kesehatan Mental: Isolasi, konfiner dalam ruang terbatas, jarak komunikasi Bumi-Mars (4–24 menit sekali jalan tergantung posisi orbital, tidak ada komunikasi *realtime*), dan tekanan operasional yang sangat tinggi adalah tantangan psikologis yang sangat serius. Simulasi MARS-500 (sebuah 'misi' yang disimulasikan di Moskow selama 520 hari pada 2010–2011) mengungkapkan masalah sedasi yang meningkat, gangguan tidur, motivasi yang menurun, dan ketegangan interpersonal pada anggota kru. Komposisi kru yang beragam (jenis kelamin, kepribadian, budaya) dan mekanisme pemilihan serta pelatihan psikologis yang optimal menjadi area penelitian aktif dalam persiapan misi Mars (Stuster, 2010; Kanas & Manzey, 2008).

3. *Terraforming Mars*: Antara Sains dan Fiksi

Terraforming Mars, mengubah kondisi Mars secara menyeluruh agar menyerupai Bumi hingga dapat dihuni tanpa baju tekanan adalah visi jangka panjang yang menarik namun penuh kontroversi ilmiah dan etis. Secara teknis, *terraforming Mars* melibatkan beberapa tahap besar: (1) pemanasan planet untuk melepaskan CO₂ dari es kutub dan tanah, meningkatkan tekanan atmosfer; (2) penambahan gas rumah kaca buatan (seperti perfluorokarbon, CF₄) untuk mempertahankan dan mempercepat pemanasan; (3) setelah suhu dan tekanan memadai, introduksi tumbuhan fotosintetik yang dapat menghasilkan O₂ dari CO₂ (*bioengineered organisms*); (4) pembangunan atmosfer O₂ yang cukup untuk pernapasan manusia tanpa baju; dan (5) membangun kembali sirkulasi air dan ekosistem.

Analisis oleh Jakosky & Edwards (2018) yang dipublikasikan di *Nature Astronomy* menunjukkan bahwa Mars tidak memiliki cadangan karbon dioksida (CO₂) yang cukup pada reservoir yang diketahui, seperti es kutub, regolit, dan mineral karbonat, untuk meningkatkan tekanan atmosfer hingga mendekati kondisi yang dibutuhkan bagi kelayakhunian manusia melalui skenario *terraforming*. Studi tersebut memperkirakan bahwa jika seluruh CO₂ yang secara realistis dapat dilepaskan dari reservoir Mars dimobilisasi, tekanan atmosfer yang dihasilkan hanya akan berada pada kisaran sekitar puluhan milibar hingga sekitar 1–2% tekanan atmosfer Bumi, jauh di bawah ambang minimum yang diperlukan untuk mendukung kehidupan manusia tanpa perlindungan tekanan tambahan. Bahkan dalam skenario ekstrem yang mengasumsikan pelepasan hampir seluruh CO₂ yang dapat diakses, tekanan maksimum tetap jauh di bawah 1 atm, sehingga Mars tidak dapat dibuat “mirip Bumi” hanya dengan memanfaatkan sumber karbon dioksida lokal yang ada.

Selain keterbatasan inventaris CO₂, Mars juga tidak memiliki medan magnet global yang kuat, sehingga atmosfer buatan apa pun akan rentan terhadap erosi oleh angin matahari dalam skala waktu geologis. Kombinasi keterbatasan ini membuat konsep *terraforming Mars* menjadi sangat tidak realistis dengan teknologi dan sumber daya yang tersedia saat ini, dan lebih bersifat hipotetis jangka sangat panjang dibandingkan rencana teknis yang dapat diimplementasikan (Jakosky & Edwards, 2018; McKay et al., 1991; Fogg, 1998).

Kontroversi etis terraforming juga sangat relevan: jika Mars mengandung kehidupan mikrobial yang masih aktif (bahkan di bawah permukaan) kemungkinan yang belum dapat dikesampingkan, *terraforming* yang mengubah kondisi Mars secara radikal dapat memusnahkan kehidupan Martian tersebut sebelum kita sempat menemukannya. Prinsip *planetary protection* yang dikembangkan COSPAR (*Committee on Space Research*) membagi benda langit ke dalam kategori berdasarkan risiko kontaminasi biologis, Mars termasuk dalam kategori IV/V yang memerlukan sterilisasi ketat pada wahana lander dan, untuk misi sample return, karantina ketat di Bumi. Ekspedisi manusia yang membawa beban mikroba alami mereka membuat kontaminasi hampir tidak terhindarkan, memaksa kita untuk memutuskan apakah sains (menemukan kehidupan Mars asli) atau eksplorasi manusia (yang merupakan prioritas bagi banyak pihak) yang harus didahulukan (Rummel & Billings, 2004; McKay, 2009).

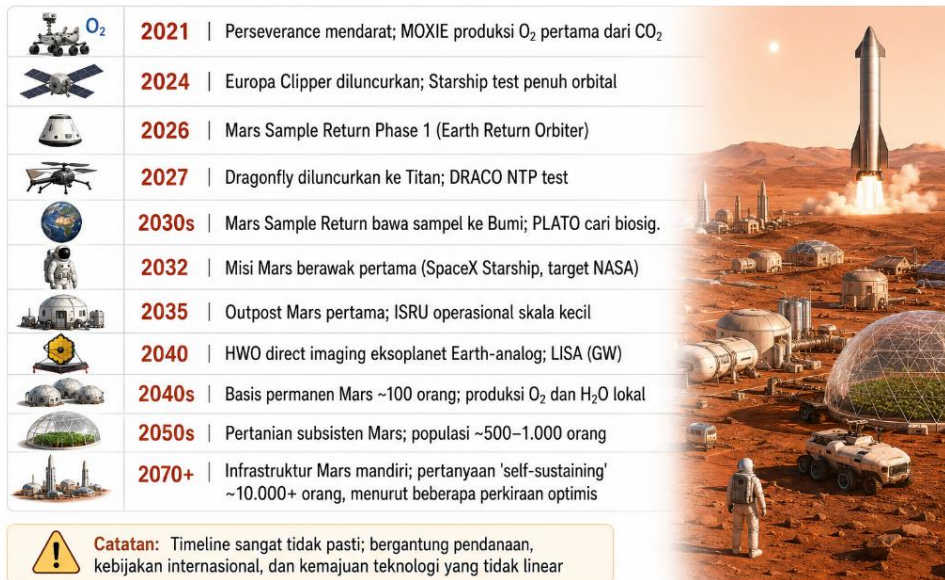
4. Teknologi Pendukung Kolonisasi Mars

Dalam skenario kolonisasi Mars yang realistis dalam beberapa dekade ke depan, manusia tidak akan 'mengubah Mars' tetapi 'membawa Bumi ke Mars' menciptakan habitat tertutup yang mempertahankan kondisi seperti Bumi sambil memanfaatkan sumber daya Mars untuk keberlanjutan. Beberapa teknologi kunci yang diperlukan:

- a. ISRU (*In-Situ Resource Utilization*): Memanfaatkan sumber daya yang ada di Mars untuk mengurangi kebutuhan pengiriman dari Bumi. CO₂ Mars dapat dikonversi menjadi O₂ menggunakan MOXIE (*Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment*) teknologi yang telah diuji berhasil oleh Perseverance pada April 2021, menghasilkan O₂ pertama dari CO₂ Mars (sekitar 5 gram, cukup untuk astronaut bernapas ~10 menit). Es air di Mars (terutama di kutub dan bawah permukaan) dapat diekstraksi, dimurnikan, dan digunakan untuk minum, pertanian, dan pembuatan propelan (H₂ + O₂ dari elektrolisis air). *Regolith Mars* (tanah) dapat disintering atau 3D-printed menjadi bata bangunan atau digunakan sebagai shielding radiasi.
- b. Sistem Pendukung Kehidupan Tertutup (BLSS): *Bioregenerative Life Support System* yang mengintegrasikan pertanian dalam ruang tertutup untuk produksi makanan lokal, pemrosesan

- limbah biologis, dan regenerasi udara dan air. Sistem Ecological Life Support (MELISSA) yang dikembangkan ESA menggunakan mikroba dan tanaman dalam sistem sirkulasi tertutup untuk memproses limbah manusia menjadi makanan, air bersih, dan O₂. Untuk misi panjang ke Mars, setidaknya sebagian kebutuhan pangan harus diproduksi secara lokal, membawa semua makanan dari Bumi tidak feasible untuk koloni permanen.
- c. Sistem Propulsi Canggih: Untuk mengurangi waktu perjalanan (dan karenanya paparan radiasi serta dampak kesehatan mikrogravitasi), propulsi nuklir termal (*Nuclear Thermal Propulsion, NTP*) dapat menyediakan specific impulse $\sim 2\times$ roket kimia, memangkas waktu transit ke Mars menjadi $\sim 90\text{--}120$ hari. NASA dan DARPA memiliki program pengembangan NTP aktif (*DRACO, Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations*, uji coba direncanakan 2027). Propulsi ion tenaga nuklir (*Nuclear Electric Propulsion, NEP*) menawarkan efisiensi lebih tinggi namun dengan daya dorong rendah, cocok kargo bukan kru.
 - d. Pertanian Mars: Produksi pangan di Mars menghadapi tantangan unik: regolith Mars mengandung perklorat (ClO_4^-) pada konsentrasi $\sim 0,1\text{--}1\%$ yang toksik bagi tanaman dan manusia, harus dihilangkan sebelum regolith dapat digunakan sebagai media tanam. Gravitasi rendah dan cahaya matahari yang 43% lebih lemah juga mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Studi di ISS menunjukkan beberapa tanaman (selada, lobak, cabai) dapat tumbuh di mikrogravitasi dengan modifikasi sistem penyiraman. Rekayasa genetika tanaman untuk toleransi kekeringan, salinitas, cahaya rendah, dan bahkan radiasi adalah area penelitian aktif.

Gambar 8.3 Timeline Perkiraan Eksplorasi dan Kolonisasi Mars
(Proyeksi Optimis)



5. Etika Eksplorasi Antariksa dan Hak Tata Surya

Eksplorasi dan kolonisasi antariksa menimbulkan pertanyaan etis yang mendalam yang sering diabaikan dalam diskusi teknis dan geopolitik. Siapa yang memiliki Mars? Perjanjian Antariksa Luar (*Outer Space Treaty*) 1967 yang ditandatangani 110 negara termasuk AS, Rusia, dan Cina menyatakan bahwa antariksa luar 'bukan subjek klaim kedaulatan nasional' dan tidak dapat dimiliki oleh satu negara. Namun perjanjian ini tidak melarang pemanfaatan sumber daya antariksa oleh entitas komersial, celah yang dieksploitasi oleh Undang-Undang Komersial Sumber Daya Antariksa AS (2015) yang mengizinkan perusahaan AS mengklaim kepemilikan sumber daya yang mereka tambang di antariksa, bahkan jika tidak dapat mengklaim wilayah.

Jika manusia menemukan kehidupan di Mars sebelum kolonisasi, apakah etis untuk mengkolonisasi Mars dan potensial memusnahkan kehidupan tersebut demi kepentingan manusia? *Philosophical debate* ini tidak mudah diselesaikan: beberapa argumen menyatakan bahwa kehidupan mikrobial Mars (jika ada) memiliki nilai intrinsik dan hak untuk keberadaan yang tidak dapat dibatalkan demi ekspansi manusia; yang lain berargumen bahwa kelangsungan hidup dan ekspansi manusia (termasuk asuransi eksistensial menjadi *multi-planetary species*)

mengutamakan kepentingan manusia. Perdebatan tentang *planetary protection* dan apa yang harus dilakukan jika kita menemukan kehidupan di Mars sebelum kita mengkolonisasinya adalah salah satu debat etis paling penting yang perlu diputuskan oleh komunitas ilmiah dan masyarakat internasional sebelum misi berawak pertama mendarat (Rummel, 2019; Schwartz, 2020; Billings & Race, 2002).

Dimensi keadilan dan akses juga sangat relevan: siapa yang mendapat manfaat dari sumber daya dan pengetahuan yang diperoleh dari eksplorasi Mars? Apakah program antariksa yang menelan biaya miliaran dolar adalah penggunaan sumber daya yang dapat dibenarkan ketika masalah mendasar seperti kemiskinan, malnutrisi, dan perubahan iklim belum terselesaikan di Bumi? Argumen sebaliknya menyatakan bahwa teknologi yang dikembangkan untuk antariksa memiliki spin-off yang sangat luas (internet, GPS, MRI, CMOS kamera, dan ratusan inovasi lain berasal dari program antariksa), dan bahwa investasi dalam eksplorasi antariksa dan sains dasar adalah investasi dalam kapasitas manusia secara keseluruhan. Pertanyaan-pertanyaan ini tidak memiliki jawaban mudah namun perlu didiskusikan secara terbuka, demokratis, dan lintas budaya (Launius, 2020; Schwartz, 2020; Peoples & Herber, 2022).

D. Teleskop Generasi Terkini dan Masa Depan Astronomi

1. *James Webb Space Telescope*: Revolusi Inframerah

James Webb Space Telescope (JWST) adalah salah satu instrumen ilmiah paling kompleks yang pernah dibangun manusia, dan sejak beroperasi penuh pada Juli 2022, telah merevolusi pemahaman kita tentang alam semesta. Dibangun selama lebih dari dua dekade dengan biaya ~\$10 miliar oleh konsorsium NASA/ESA/CSA, JWST ditempatkan di titik Lagrange L2 Bumi-Matahari, 1,5 juta km dari Bumi. Kelebihan utama JWST dibandingkan Hubble: cermin utama berdiameter 6,5 meter (vs 2,4 m Hubble) memberikan $6,25\times$ luas pengumpulan cahaya; dirancang untuk inframerah dekat dan tengah ($0,6\text{--}28\ \mu\text{m}$) memungkinkan pengamatan galaksi-galaksi yang bergeser ke merah jauh (*redshifted*); dan suhu operasi cermin ilmiah $\sim 40\ \text{K}$ (-233°C) yang didinginkan secara pasif oleh sunshield lima lapisan.

Pencapaian ilmiah JWST dalam dua tahun pertama operasinya sudah mengubah beberapa paradigma astronomi: (1) Deteksi galaksi-galaksi awal yang lebih masif dan lebih terbentuk sempurna dari yang diprediksi model alam semesta standar Λ CDM pada redshift $z > 10$ (usia alam semesta < 500 juta tahun) menantang model pembentukan galaksi awal; (2) Atmosfer eksoplanet: deteksi CO₂ pertama dalam atmosfer eksoplanet (WASP-39b) dan analisis kimia atmosfer WASP-43b yang menunjukkan distribusi panas dan dinamika atmosfer; (3) Formasi bintang dan tata surya dalam detail belum pernah ada (Pillars of Creation dalam resolusi spektakuler, piringan protoplanet Orion); (4) Analisis awal Jupiter dan bulan-bulannya termasuk deteksi geiser Io dan penyempurnaan data Europa (Gardner et al., 2023; Bell et al., 2023).

Untuk astrobiologi, kemampuan JWST dalam menganalisis atmosfer eksoplanet kecil melalui spektroskopi transmisi membuka era baru, meskipun untuk planet berukuran Bumi di sekitar bintang tipe-G, sensitivitasnya belum cukup. JWST dapat melakukan analisis atmosfer Bumi-ukuran di sekitar bintang M kerdil (seperti TRAPPIST-1) dalam ~ 100 jam observasi per planet, memberikan gambaran komposisi atmosfer yang pertama kali mungkin untuk planet di HZ. Data TRAPPIST-1 yang terakumulasi selama 2022–2025 akan memberikan dataset paling komprehensif tentang kemungkinan atmosfer planet HZ yang pernah ada.

2. Teleskop Generasi Berikutnya: ELT, SKA, dan Masa Depan

Jaringan observatoris dan teleskop generasi berikutnya yang sedang dibangun atau direncanakan akan memberikan kemampuan yang jauh melampaui instrumen yang ada saat ini, membuka pertanyaan-pertanyaan yang belum dapat dijawab saat ini:

- a. *Extremely Large Telescope* (ELT): Teleskop optik/inframerah berbasis darat dengan cermin utama segmented berdiameter 39,3 meter, sedang dibangun ESO di Cerro Armazones, Chili, dijadwalkan first light sekitar 2028. ELT akan $15\times$ lebih banyak mengumpulkan cahaya dibanding teleskop optik berbasis darat terbesar yang ada. Dengan sistem optik adaptif canggih yang mengkompensasi turbulensi atmosfer, ELT diharapkan mampu memotret langsung eksoplanet Bumi-analog di sekitar bintang

terdekat dan menganalisis atmosfer mereka, mungkin mendeteksi oksigen, air, dan metana.

- b. *Square Kilometre Array (SKA)*: Jaringan teleskop radio raksasa yang sedang dibangun di Afrika Selatan (SKA-Mid, frekuensi 350 MHz–15,4 GHz) dan Australia (SKA-Low, 50–350 MHz), dengan total luas pengumpulan lebih dari 1 km². Sensitivitas SKA akan memungkinkan pencarian SETI yang ribuan kali lebih dalam dari program sebelumnya, pemetaan distribusi hidrogen netral di galaksi-galaksi jauh, dan studi pulsar dengan presisi yang akan menguji teori relativitas umum pada level baru.
- c. *Teleskop Gravitasi LISA: Laser Interferometer Space Antenna (LISA)* ESA, yang direncanakan diluncurkan sekitar 2037, adalah interferometer gelombang gravitasi berbasis antariksa dengan lengan 2,5 juta km, ribuan kali lebih besar dari LIGO/Virgo berbasis darat. LISA akan mendeteksi gelombang gravitasi frekuensi rendah dari black hole supermassif yang bergabung, sistem bintang neutron, dan bahkan 'riak' gelombang gravitasi dari momen Big Bang membuka jendela observasi alam semesta yang sama sekali baru.
- d. *Roman Space Telescope: Nancy Grace Roman Space Telescope* NASA, dijadwalkan diluncurkan 2027, memiliki bidang pandang 100× lebih luas dari Hubble pada resolusi sama, memungkinkan survei galaksi skala besar yang belum pernah ada. Misi mikrolensing Roman diperkirakan menemukan ribuan eksoplanet baru termasuk planet-planet bebas (tidak mengorbit bintang) dan eksoplanet di orbit lebar yang tidak dapat ditemukan Kepler/TESS.

Bagi Indonesia dan negara-negara Asia Tenggara, relevansi perkembangan ini bukan hanya sebagai konsumen pengetahuan tetapi sebagai partisipan aktif. Indonesia memiliki kondisi geografis yang sangat baik untuk observasi astronomi: kawasan khatulistiwa dengan langit yang luas, situs-situs potensial di gunung-gunung dengan ketinggian memadai dan lokasi terpencil, dan populasi muda yang besar. Program astronomi nasional yang lebih ambisius dari teleskop nasional yang lebih besar, partisipasi dalam proyek internasional, dan program

beasiswa astronomi dapat memposisikan Indonesia sebagai kontributor yang lebih berarti dalam eksplorasi kosmik abad ke-21.

3. Misi Antariksa Komersial dan Era Baru Eksplorasi

Kebangkitan sektor antariksa komersial yang dipimpin oleh perusahaan seperti SpaceX, Blue Origin, Rocket Lab, dan puluhan startup lainnya telah mengubah lanskap eksplorasi antariksa secara mendasar sejak awal 2010-an. Biaya peluncuran per kilogram ke LEO telah turun dari ~\$65.000/kg (*era Space Shuttle*) menjadi ~\$2.700/kg (Falcon 9) dan berpotensi turun ke ~\$100–200/kg jika Starship SpaceX berhasil beroperasi penuh, pengurangan biaya lebih dari dua kali lipat logaritmik yang membuka kemungkinan-kemungkinan baru.

SpaceX Starship, roket dua tahap yang sepenuhnya dapat digunakan kembali, dengan payload ke LEO ~100–150 ton (vs Falcon 9 yang ~23 ton) dan kapasitas ke Mars ~50–100 ton, jika berhasil dikembangkan dan dioperasikan secara rutin, akan mengubah kalkulus ekonomi eksplorasi Mars secara radikal. Elon Musk memiliki target ambisius (sering dianggap terlalu optimis) untuk misi Mars berawak pada 2026 menggunakan Starship. NASA mengkontrak Starship sebagai *Human Landing System* (HLS) untuk program Artemis yang akan membawa astronaut kembali ke Bulan, tonggak menuju Mars. Sementara timeline SpaceX hampir selalu lebih lambat dari yang diumumkan, trajektori teknis Starship sudah menunjukkan kemajuan nyata yang konsisten.

Program *Artemis* NASA bertujuan membawa astronaut, termasuk perempuan dan astronaut warna pertama ke permukaan Bulan mulai dari sekitar 2026 (Artemis III). Bulan sebagai '*proving ground*' untuk teknologi Mars adalah salah satu argumen utama NASA: menguji habitat lunar, *sistem life support*, ISRU, spacesuits generasi baru, dan kendaraan permukaan dalam lingkungan lebih dekat sebelum komitmen perjalanan 8,5 bulan ke Mars. *Lunar Gateway*, stasiun luar angkasa kecil di orbit bulan akan berfungsi sebagai *base of operations* untuk eksplorasi lunar yang berkelanjutan dan sebagai *assembly point* untuk misi Mars. Program Artemis melibatkan mitra internasional (ESA, JAXA, CSA, UAE, dan lainnya) dalam semangat multilateral yang penting untuk norma-norma eksplorasi antariksa yang adil (NASA Artemis Plan, 2020; Jones, 2021).



BAB IX

BEDAH MISKONSEPSI IPA DI SEKOLAH MENENGAH

Persoalan miskonsepsi dalam pendidikan Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) bukan sekadar fenomena akademik yang bersifat marginal, ia merupakan tantangan epistemologis fundamental yang secara langsung memengaruhi kualitas pemahaman ilmiah siswa dari generasi ke generasi. Miskonsepsi, atau yang dalam literatur internasional sering disebut sebagai *alternative conceptions*, *naive theories*, atau *intuitive beliefs*, hadir jauh sebelum siswa memasuki ruang kelas formal dan terus bertahan bahkan setelah bertahun-tahun menjalani pendidikan sains yang terstruktur. Inilah yang membuat miskonsepsi menjadi salah satu problem paling persisten dan menantang dalam dunia pendidikan sains global.

Penelitian longitudinal yang dilakukan oleh Treagust et al. (2021) terhadap lebih dari 12.000 siswa di 14 negara Asia-Pasifik menunjukkan bahwa rata-rata 35-45% siswa SMP dan SMA memiliki miskonsepsi yang signifikan dalam setidaknya tiga dari empat bidang utama IPA (fisika, kimia, biologi, dan ilmu bumi). Angka yang mengkhawatirkan ini menjadi lebih problematik ketika diketahui bahwa tingkat persistensi miskonsepsi yakni bertahannya pemahaman keliru setelah pembelajaran berlangsung, mencapai 60-70% apabila tidak dilakukan intervensi yang tepat dan terstruktur. Fakta ini menegaskan bahwa pendekatan pembelajaran konvensional yang semata-mata menyampaikan informasi ilmiah yang benar tidaklah cukup untuk mengubah struktur kognitif siswa yang telah terbentuk sejak lama.

Di Indonesia, problematika miskonsepsi IPA mendapat sorotan serius dalam berbagai riset nasional. Studi yang dilakukan oleh Wahyudi dan Sulaiman (2022) pada 2.500 siswa SMP di Jawa dan Sumatra menemukan bahwa miskonsepsi tentang gaya dan gerak mencapai 52%, sementara miskonsepsi tentang sistem pernapasan pada biologi mencapai 48%. Tidak kalah mengkhawatirkan, hasil *Programme for*

International Student Assessment (PISA) 2022 menempatkan Indonesia pada posisi ke-69 dari 79 negara dalam kompetensi sains, yang sebagian besar disebabkan oleh pemahaman konseptual yang dangkal dan keberadaan miskonsepsi yang tidak tertangani. Data-data ini secara kolektif mengisyaratkan urgensi yang tidak dapat diabaikan untuk secara sistematis mengidentifikasi dan meremediasi miskonsepsi dalam kurikulum IPA sekolah menengah Indonesia.

Lebih jauh, miskonsepsi tidak hanya berdampak pada performa akademik semata. Kajian neurosains kognitif terkini yang dirangkum oleh Vosniadou (2022) dalam karyanya *Re-Framing the Classical Approach to Conceptual Change* mengungkapkan bahwa miskonsepsi yang tidak diremediasi cenderung menciptakan jaringan konseptual yang salah dalam struktur memori jangka panjang siswa. Jaringan yang keliru ini kemudian menjadi *prior knowledge* yang menghambat asimilasi konsep-konsep IPA baru yang lebih kompleks. Dengan kata lain, miskonsepsi yang dibiarkan pada jenjang SMP akan mempersulit pembelajaran fisika kuantum, kimia organik, atau genetika molekuler di jenjang berikutnya. Inilah mengapa remediasi miskonsepsi bukan sekadar kegiatan perbaikan parsial, melainkan investasi jangka panjang bagi kompetensi sains siswa secara menyeluruh.

GAMBARAN UMUM MISKONSEPSI IPA	
FAKTA KUNCI: SKALA MISKONSEPSI IPA DI SEKOLAH MENENGAH	
•	35-45% siswa SMP/SMA memiliki miskonsepsi signifikan dalam minimal 3 bidang IPA (Treagust et al., 2021)
•	60-70% miskonsepsi bertahan setelah pembelajaran konvensional tanpa intervensi khusus
•	52% siswa SMP Indonesia memiliki miskonsepsi tentang gaya dan gerak (Wahyudi & Sulaiman, 2022)
•	Indonesia peringkat 69/79 dalam literasi sains PISA 2022
•	Miskonsepsi pada jenjang SMP terbukti menghambat pembelajaran sains di jenjang SMA dan PT

A. Identifikasi Konsep Sulit dalam Kurikulum SMP/SMA

Identifikasi sistematis terhadap konsep-konsep IPA yang paling rentan terhadap pembentukan miskonsepsi merupakan langkah pertama dan paling krusial dalam upaya remediasi. Tanpa peta yang jelas tentang "medan miskonsepsi" dalam kurikulum, intervensi pedagogis cenderung bersifat reaktif dan sporadis daripada proaktif dan terencana. Kurikulum IPA Indonesia yang saat ini mengacu pada Kurikulum Merdeka 2022-2024 mencakup spektrum konsep yang sangat luas, mulai dari mekanika Newton di kelas VII hingga genetika molekuler di kelas XII, dan setiap domain memiliki pola miskonsepsinya sendiri yang khas.

Berdasarkan meta-analisis yang dilakukan oleh Hattie dan Timperley (2022) terhadap lebih dari 200 studi tentang miskonsepsi IPA di tingkat sekolah menengah Asia-Pasifik, ditemukan pola yang konsisten bahwa miskonsepsi paling sering muncul pada konsep-konsep yang: (1) tidak dapat diamati secara langsung oleh indera manusia (seperti atom, gen, atau gelombang elektromagnetik); (2) melibatkan proses yang berlangsung sangat lambat atau sangat cepat di luar skala persepsi sehari-hari; (3) menggunakan terminologi ilmiah yang memiliki makna berbeda dari bahasa sehari-hari; dan (4) membutuhkan abstraksi matematis yang tinggi untuk dipahami sepenuhnya. Pemahaman atas pola ini memungkinkan guru merancang strategi pembelajaran yang lebih tepat sasaran.

1. Miskonsepsi Bidang Fisika

Fisika merupakan bidang IPA yang paling banyak dikaji dalam penelitian miskonsepsi, sebagian karena konsep-konsep fisika yang abstrak seringkali bertentangan secara langsung dengan intuisi sehari-hari siswa. Survei internasional *Force Concept Inventory* (FCI) yang dikembangkan oleh Hestenes *et al.* dan telah digunakan secara global selama tiga dekade terus menunjukkan hasil yang konsisten: pemahaman intuitif siswa tentang gaya dan gerak sangat bertentangan dengan mekanika Newton (Hestenes & Halloun, diacu dalam Qian *et al.*, 2022).

Miskonsepsi Mekanika Newton

Hukum-hukum Newton, khususnya Hukum Pertama (inersia) dan Hukum Kedua (hubungan gaya, massa, dan percepatan), merupakan salah satu sumber miskonsepsi yang paling produktif dalam fisika sekolah menengah. Kajian Qian *et al.* (2022) yang melibatkan 3.400 siswa SMP di Indonesia, Malaysia, dan Filipina menemukan bahwa 67% siswa SMP memiliki setidaknya satu miskonsepsi mayor tentang hukum-hukum Newton.

Tabel 9.1 Prevalensi Miskonsepsi Mekanika Newton pada Siswa SMP/SMA

Miskonsepsi Umum	Konsep Ilmiah yang Benar	Prevalensi (%)
Benda yang bergerak pasti ada gaya yang mendorongnya	Benda bergerak konstan tidak memerlukan gaya net (Hukum I Newton)	71% siswa SMP (Qian et al., 2022)
Gaya lebih besar menghasilkan kecepatan lebih besar	Gaya net menghasilkan percepatan, bukan kecepatan	58% siswa SMP
Ketika benda jatuh bebas, hanya ada gaya gravitasi ke bawah	Benar secara teknis, namun sering disalahpahami untuk hambatan udara	44% salah memahami konteks
Benda berat jatuh lebih cepat dari benda ringan (tanpa hambatan udara)	Semua benda jatuh dengan percepatan g yang sama di ruang hampa	63% siswa SMA kelas X (Wahyudi & Sulaiman, 2022)
Gaya aksi dan reaksi saling meniadakan sehingga benda tidak bergerak	Gaya aksi-reaksi bekerja pada benda yang BERBEDA, tidak saling meniadakan	55% siswa SMA (Treagust et al., 2021)

Miskonsepsi tentang Listrik dan Magnet

Konsep kelistrikan dan kemagnetan merupakan area yang subur bagi berkembangnya miskonsepsi karena kedua fenomena ini tidak dapat diamati secara langsung yang terlihat hanyalah efek-efeknya. Penelitian yang dilakukan oleh Ekmekci dan Gulacar (2021) dalam *Physical*

Review Physics Education Research mengidentifikasi setidaknya 23 miskonsepsi distinktif dalam topik kelistrikan di kalangan siswa SMP, dengan miskonsepsi tentang aliran arus listrik menjadi yang paling dominan. Sebagian besar siswa memvisualkan arus listrik sebagai "zat" yang mengalir dari positif ke negatif dan "habis" di lampu atau resistor, alih-alih memahami arus sebagai aliran muatan yang konservatif dalam rangkaian tertutup.

Miskonsepsi tentang medan magnet juga menunjukkan pola yang khas. Survei yang dilakukan oleh Kaltakçı-Gürel *et al.* (2021) menemukan bahwa 61% siswa SMA meyakini bahwa magnet hanya menarik benda logam tanpa mempertimbangkan jenis logam spesifik (besi dan nikel yang termagnetisasi vs. tembaga atau aluminium yang tidak). Selain itu, konsep tentang induksi elektromagnetik, salah satu landasan teknologi modern hampir selalu menimbulkan kebingungan konseptual mendalam pada siswa yang pertama kali mempelajarinya.

Miskonsepsi tentang Optika dan Gelombang

Miskonsepsi dalam topik optika dan gelombang sering berkaitan erat dengan kebiasaan bahasa sehari-hari dan analogi yang tidak tepat. Studi komprehensif oleh Nurrenbern *et al.* (2020) menemukan bahwa siswa SMP hampir secara universal memiliki model mental yang keliru tentang "cahaya": mereka cenderung memandang cahaya sebagai kondisi ruangan ("ruangan terang") daripada sebagai gelombang atau partikel foton yang merambat. Model mental ini menyebabkan kesulitan besar ketika siswa harus memahami fenomena seperti pembentukan bayangan, pemantulan teratur dan difus, serta pembiasan.

Gambar 9.1 Peta Miskonsepsi Topik Optika Dan Gelombang



2. Miskonsepsi Bidang Kimia

Kimia sebagai ilmu yang beroperasi di tiga level representasi simultan, makroskopik (yang dapat diamati), submikroskopik (level atom dan molekul), dan simbolik (rumus dan persamaan kimia) menciptakan ladang yang sangat subur bagi berkembangnya miskonsepsi. Model trilevel representasi yang diperkenalkan oleh Johnstone ini menjadi kerangka analitik yang paling banyak digunakan dalam penelitian miskonsepsi kimia kontemporer (Chittleborough, 2021).

Penelitian yang dilakukan oleh Taber (2020) dalam *Chemical Education Research and Practice* mengidentifikasi bahwa mayoritas miskonsepsi kimia muncul karena kegagalan siswa untuk berpindah secara mulus antara tiga level representasi tersebut. Siswa yang melihat garam larut dalam air sering kali memiliki model mental bahwa "garam menghilang" (level makroskopik yang tidak dikaitkan dengan level submikroskopik), tanpa memahami bahwa ion Na^+ dan Cl^- masih ada dalam larutan sebagai partikel terdisosiasi.

Tabel 9.2 Peta Miskonsepsi Utama Bidang Kimia pada Jenjang SMP/SMA

Topik Kimia	Miskonsepsi Umum	Konsep yang Benar	Sumber/ Prevalensi
Ikatan Kimia	Elektron "berpindah" permanen dalam ikatan kovalen	Elektron digunakan bersama (shared) dalam pasangan ikatan	55% SMA (Taber, 2020)
Reaksi Kimia	Massa berkurang setelah pembakaran karena api memakan massa	Massa total reaktan = produk (Hukum Kekekalan Massa)	49% SMP (Chittleborough, 2021)
Struktur Atom	Elektron berputar dalam orbit melingkar pasti seperti planet	Elektron berada dalam orbital probabilistik (model kuantum)	78% SMA Kelas XII (Treagust et al., 2021)
Asam-Basa	Asam kuat selalu berbahaya; larutan netral selalu pH 7	pH netral bergantung pada konteks; keasaman = konsentrasi H^+	41% SMA (Orgill & Bodner, 2021)
Keseimbangan Kimia	Keseimbangan berarti reaksi telah berhenti total	Keseimbangan dinamis: reaksi maju dan balik berlangsung dengan laju sama	68% SMA Kelas XI (Taber, 2020)

Salah satu miskonsepsi kimia yang paling persisten dan paling sulit diremediasi adalah miskonsepsi tentang struktur atom. Meski model atom Bohr dengan orbit-orbit planet yang rapi dan teratur telah lama digantikan oleh model mekanika kuantum dalam sains modern, visualisasi "orbital" sebagai lingkaran-lingkaran melingkar terus

mendominasi representasi atom dalam sebagian besar buku teks IPA SMP bahkan SMA Indonesia. Akibatnya, 78% siswa SMA kelas XII masih memegang model Bohr yang ketinggalan zaman sebagai "kebenaran" tentang struktur atom, bahkan setelah mempelajari kimia selama tiga tahun (Treagust *et al.*, 2021).

3. Miskonsepsi Bidang Biologi

Biologi sebagai ilmu kehidupan menghadapi tantangan miskonsepsi yang unik: sebagian besar siswanya percaya bahwa mereka sudah "mengerti" biologi karena mereka sendiri adalah organisme hidup. Kepercayaan diri yang berlebihan ini, yang disebut oleh Barrantes-Salvatierra *et al.* (2022) sebagai *illusion of explanatory depth* dalam biologi, justru menjadi salah satu hambatan terbesar dalam pembelajaran biologi. Siswa sering kali merasa telah memahami konsep respirasi, fotosintesis, atau evolusi karena mereka dapat menyebutkan definisinya, padahal pemahaman mekanistik dan prosesus mereka masih sangat dangkal dan penuh dengan distorsi konseptual.

Miskonsepsi tentang evolusi merupakan salah satu topik biologi yang paling kompleks karena melibatkan persimpangan antara pemahaman ilmiah, keyakinan budaya, dan interpretasi filosofis. Studi komprehensif oleh Großschedl *et al.* (2021) di delapan negara, termasuk Indonesia, menemukan bahwa sekitar 72% siswa SMA memiliki konsepsi *teleologis* tentang evolusi, mereka meyakini bahwa evolusi adalah proses yang "bertujuan" dan terencana, di mana organisme berevolusi "karena membutuhkan" adaptasi tertentu untuk bertahan hidup. Konsepsi ini bertentangan mendasar dengan mekanisme seleksi alam Darwin yang bersifat acak dan tidak terarah.

Tabel 9.3 Miskonsepsi Utama Bidang Biologi dan Implikasi Pedagogisnya

Topik Biologi	Miskonsepsi Dominan	Implikasi untuk Pembelajaran
Fotosintesis	Tumbuhan mendapat makanan dari tanah/air; tidak membuat makanan sendiri	Siswa sulit memahami bahwa CO ₂ adalah bahan baku, bukan limbah, dalam fotosintesis

Topik Biologi	Miskonsepsi Dominan	Implikasi untuk Pembelajaran
Respirasi Sel	Respirasi = bernapas (hanya bertukar gas); terjadi hanya saat aktivitas fisik	Siswa mengabaikan dimensi kimia (glikolisis, siklus Krebs) dari respirasi seluler
Genetika	Gen adalah "kode" untuk satu sifat; karakteristik yang dipelajari bisa diwariskan	Miskonsepsi Lamarck tentang pewarisan sifat yang diperoleh masih sangat kuat
Evolusi	Evolusi bersifat teleologis dan linier dari "rendah" ke "tinggi"	Siswa memandang manusia sebagai "puncak" evolusi, bukan cabang dalam pohon kehidupan
Sistem Tubuh	Darah yang kaya CO ₂ berwarna biru; darah arteri selalu mengandung O ₂	Diagram dua warna (merah/biru) dalam buku teks menciptakan miskonsepsi warna darah

4. Miskonsepsi Bidang Ilmu Bumi dan Antariksa

Ilmu bumi dan antariksa menghadirkan tantangan miskonsepsi yang sangat spesifik: sebagian besar fenomena yang dipelajari beroperasi pada skala ruang dan waktu yang jauh di luar pengalaman langsung manusia. Musim terjadi dalam siklus tahunan, benua bergerak dalam jutaan tahun, dan bintang-bintang yang kita lihat mungkin telah mati ribuan tahun lalu. Ketidaksesuaian skala ini menciptakan celah kognitif yang sering diisi oleh miskonsepsi yang berbasis pengalaman sehari-hari dalam skala yang jauh lebih kecil.

Salah satu miskonsepsi yang paling terkenal dan paling persisten di bidang ini adalah tentang penyebab terjadinya musim. Studi klasik yang dilakukan oleh Schneps dan Sadler melalui film dokumenter *A Private Universe* menunjukkan bahwa bahkan mahasiswa Harvard pun meyakini bahwa musim disebabkan oleh perubahan jarak bumi ke matahari, bukan oleh kemiringan sumbu rotasi bumi. Miskonsepsi ini terus bertahan dalam penelitian-penelitian terbaru: Latal *et al.* (2023) menemukan bahwa 58% siswa SMA Indonesia kelas X masih

memegang miskonsepsi tentang penyebab musim, meskipun topik ini telah diajarkan secara eksplisit dalam kurikulum IPA SMP kelas VII.

B. Cara Mengoreksi Pemahaman Siswa melalui Model Inquiry

Setelah miskonsepsi berhasil diidentifikasi secara akurat melalui instrumen diagnostik yang tepat, langkah selanjutnya adalah merancang dan mengimplementasikan strategi remediasi yang efektif. Di antara berbagai pendekatan yang telah diteliti dan diuji, termasuk demonstrasi eksplisit, pembelajaran berbasis analogi, refutational text, dan program komputer adaptif, model pembelajaran berbasis inkuiri (*Inquiry-Based Learning* atau IBL) secara konsisten menunjukkan efektivitas paling tinggi dalam menginduksi perubahan konseptual yang mendalam dan tahan lama pada siswa. Meta-analisis yang dilakukan oleh Furtak et al. (2021) terhadap 37 studi eksperimental menemukan bahwa IBL menghasilkan efek size rata-rata $d = 0,65$ dalam remediasi miskonsepsi IPA, lebih tinggi secara signifikan dibandingkan pendekatan pembelajaran langsung ($d = 0,35$) atau pembelajaran berbasis demonstrasi pasif ($d = 0,28$).

1. Fondasi Teori *Inquiry Learning*

Model *Inquiry Learning* berakar pada tradisi konstruktivisme kognitif yang panjang dan kaya dalam filsafat pendidikan. Secara epistemologis, IBL berpijak pada keyakinan bahwa pengetahuan sejati termasuk pengetahuan ilmiah, tidak dapat secara langsung dipindahkan dari guru ke siswa, melainkan harus dikonstruksi secara aktif oleh pelajar melalui pengalaman, refleksi, dan rekonstruksi pemahaman. Dua tokoh utama yang menjadi fondasi IBL dalam pendidikan IPA adalah Jean Piaget dengan konsep *equilibration* (ketidakseimbangan kognitif yang mendorong rekonstruksi pengetahuan) dan Lev Vygotsky dengan konsep *Zone of Proximal Development* (ZPD) yang menekankan pentingnya bimbingan sosial dalam proses pembelajaran.

Dalam konteks remediasi miskonsepsi, mekanisme psikologis utama yang dimanfaatkan IBL adalah *cognitive conflict* atau konflik kognitif. Ketika siswa dihadapkan pada bukti atau pengalaman yang secara langsung bertentangan dengan miskonsepsi yang mereka pegang, terjadi ketidakseimbangan kognitif (*disequilibrium*) yang menciptakan motivasi intrinsik untuk mencari penjelasan yang lebih memuaskan.

Proses IBL yang terstruktur dengan baik kemudian membimbing siswa melalui konflik ini menuju restrukturisasi konseptual yang lebih sesuai dengan penjelasan ilmiah. Pine et al. (2020) dalam *Science Education* menunjukkan bahwa siswa yang mengalami konflik kognitif yang terkelola dengan baik dalam lingkungan IBL menunjukkan retensi konsep yang benar 73% lebih tinggi setelah enam bulan dibandingkan siswa yang belajar melalui instruksi langsung.

2. *Level-Level Inquiry* dalam Pembelajaran IPA

Penting untuk dipahami bahwa "*inquiry*" bukanlah entitas monolitik dengan satu format tunggal. Banchi dan Bell (2008) dalam klasifikasi mereka yang kini telah menjadi standar internasional dan terus dikutip dalam penelitian terkini (Cata *et al.*, 2023) mengidentifikasi empat level *inquiry* yang membentuk sebuah kontinum dari yang paling terbimbing hingga yang paling otonom:

Tabel 9.4 Empat *Level Inquiry* dan Kesesuaiannya untuk Remediasi Miskonsepsi

Level	Deskripsi	Peran Guru	Peran Siswa	Kesesuaian untuk Remediasi
Level 1: <i>Confirmation Inquiry</i>	Guru memberikan pertanyaan, prosedur, dan hasil yang diharapkan; siswa memverifikasi	Sangat dominan: memberikan semua komponen	Mengikuti prosedur yang telah ditentukan	Terbatas; kurang efektif untuk miskonsepsi yang mendalam
Level 2: <i>Structured Inquiry</i>	Guru memberikan pertanyaan dan prosedur; siswa mencari hasil/jawaban	Memberikan pertanyaan dan rancangan eksperimen	Melaksanakan dan menganalisis data	Baik untuk remediasi awal; memberikan struktur yang aman
Level 3: <i>Guided Inquiry</i>	Guru hanya memberikan pertanyaan; siswa	Fasilitator dan pembimbing; memberikan	Merancang metode dan menarik kesimpulan	Sangat efektif; keseimbangan antara

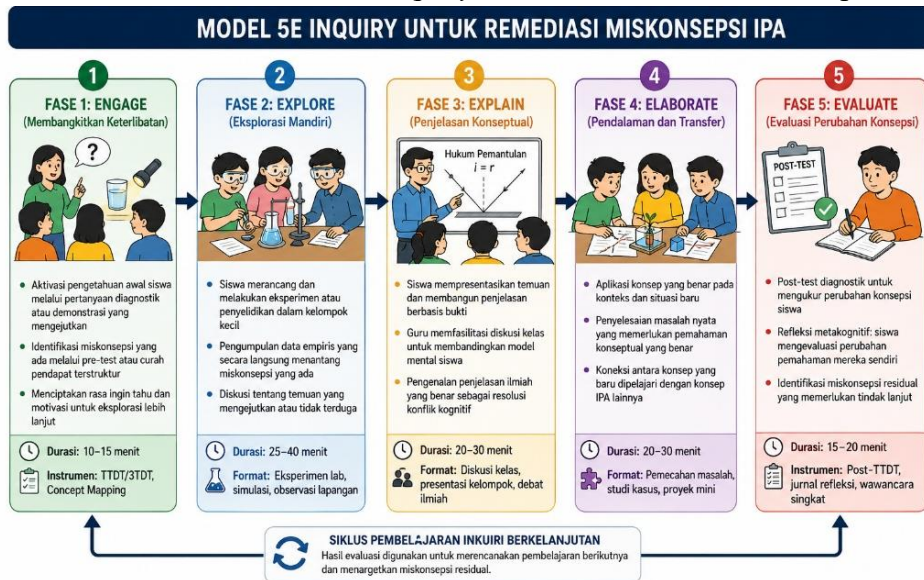
Level	Deskripsi	Peran Guru	Peran Siswa	Kesesuaian untuk Remediasi
	merancang prosedur dan mencari jawaban	scaffolding saat diperlukan		bimbingan dan otonomi
Level 4: <i>Open Inquiry</i>	Siswa merumuskan pertanyaan, prosedur, dan mencari jawaban secara mandiri	Konsultan ahli; intervensi minimal	Otonomi penuh layaknya ilmuwan	Ideal untuk siswa berpengalaman ; kurang sesuai untuk remediasi awal

Sumber: Banchi & Bell, 2008; diperbarui Cata et al., 2023

3. Langkah-Langkah Implementasi *Inquiry* untuk Remediasi Miskonsepsi

Implementasi model 5E yang digunakan untuk remediasi miskonsepsi berbasis Inquiry-Based Learning (IBL) terdiri dari lima fase yang terstruktur: Engage, Explore, Explain, Elaborate, dan Evaluate. Pada tahap Engage, perhatian siswa ditarik dan pengetahuan awal dihubungkan dengan topik yang akan dipelajari untuk mengidentifikasi miskonsepsi dan memotivasi pembelajaran lebih lanjut. Di fase Explore, siswa melakukan kegiatan hands-on dan eksperimen untuk menyelidiki konsep secara mandiri, mengungkap dan menantang miskonsepsi mereka. Kemudian, dalam fase Explain, siswa mendiskusikan temuan mereka, sementara guru memperkenalkan konsep ilmiah yang benar untuk membangun pemahaman akurat. Dalam fase Elaborate, siswa menerapkan pengetahuan baru dalam konteks berbeda untuk memperdalam dan memperluas pemahaman mereka, mengurangi kemungkinan kembalinya miskonsepsi. Akhirnya, fase Evaluate melibatkan penilaian pemahaman siswa melalui tes formatif dan refleksi diri untuk memastikan miskonsepsi telah berhasil diremediasi. Model ini telah dimodifikasi oleh Krajcik dan Shin (2022) untuk konteks pendidikan IPA kontemporer

Gambar 9.2 Alur Model *5e Inquiry* Untuk Remediasi Miskonsepsi



Gambar 9.2 menjelaskan model pembelajaran *5E Inquiry* untuk remediasi miskonsepsi IPA, yaitu pendekatan pembelajaran yang dirancang untuk membantu siswa memperbaiki pemahaman yang keliru melalui lima tahap yang saling berurutan dan berkesinambungan. Pada fase 1 (*Engage*), guru berupaya membangkitkan keterlibatan siswa. Kegiatan ini dilakukan melalui pertanyaan pemantik, demonstrasi sederhana, atau diagnosis awal untuk menggali pengetahuan yang sudah dimiliki siswa sekaligus mengidentifikasi miskonsepsi. Tujuannya adalah membuat siswa tertarik dan siap belajar lebih lanjut. Pada fase 2 (*Explore*), siswa diberi kesempatan untuk mengeksplorasi secara mandiri. Mereka melakukan eksperimen, simulasi, atau observasi dalam kelompok kecil untuk mengamati fenomena IPA secara langsung. Pada tahap ini siswa juga mulai menemukan adanya ketidaksesuaian antara pemahaman awal dan hasil pengamatan.

Selanjutnya pada fase 3 (*Explain*), siswa mempresentasikan hasil temuan mereka. Guru kemudian membantu memberikan penjelasan konseptual yang benar dan meluruskan miskonsepsi. Diskusi kelas menjadi penting untuk membandingkan model pemikiran siswa dengan konsep ilmiah yang tepat. Pada fase 4 (*Elaborate*), siswa menerapkan konsep yang telah dipahami ke situasi baru. Mereka menyelesaikan masalah nyata, studi kasus, atau proyek sederhana untuk memperdalam

pemahaman serta menghubungkan konsep IPA dengan kehidupan sehari-hari. Terakhir pada fase 5 (*Evaluate*), dilakukan evaluasi untuk melihat perubahan pemahaman siswa. Guru memberikan *post-test*, refleksi, atau wawancara singkat untuk memastikan miskonsepsi sudah berkurang dan konsep ilmiah sudah dipahami dengan benar. Kelima fase ini membentuk siklus pembelajaran yang berkelanjutan. Setelah evaluasi, hasilnya dapat digunakan untuk perbaikan pembelajaran berikutnya, terutama bagi siswa yang masih memiliki miskonsepsi.

4. Strategi Konflik Kognitif dalam Pembelajaran *Inquiry*

Konflik kognitif merupakan jantung dari proses remediasi miskonsepsi melalui IBL. Namun, tidak semua konflik kognitif bersifat produktif, konflik yang terlalu kuat dan tidak dikelola dapat mengakibatkan penolakan defensif (*defensive rejection*) di mana siswa menolak bukti empiris daripada merevisi keyakinan mereka, sementara konflik yang terlalu lemah tidak cukup untuk memotivasi rekonstruksi konseptual. Penelitian yang dilakukan oleh Limón (2022) dalam *Learning and Instruction* mengidentifikasi kondisi-kondisi yang membuat konflik kognitif menjadi produktif: (1) siswa harus percaya bahwa pemahaman mereka saat ini tidak memadai; (2) konsep alternatif yang ditawarkan harus dipahami dengan jelas; (3) konsep alternatif harus tampak lebih masuk akal (*plausible*); dan (4) konsep alternatif harus tampak berguna dan aplikatif (*fruitful*) daripada miskonsepsi yang lama.

Dalam praktik kelas, strategi konflik kognitif yang paling terbukti efektif mencakup beberapa teknik spesifik. Pertama, demonstrasi yang mengejutkan (*surprising demonstrations*) dimana guru menunjukkan eksperimen atau fenomena yang hasilnya secara eksplisit bertentangan dengan prediksi yang dibuat berdasarkan miskonsepsi siswa. Misalnya, menjatuhkan bola besi dan bola kapas seukuran di ruang hampa udara menggunakan tabung hampa udara untuk mendemonstrasikan bahwa semua benda jatuh dengan percepatan yang sama. Kedua, teks refutasi (*refutational text*) yang menyajikan teks yang secara eksplisit menyebutkan miskonsepsi yang umum, menjelaskan mengapa miskonsepsi itu masuk akal namun salah, dan kemudian menyajikan penjelasan ilmiah yang benar. Penelitian oleh Guzzetti *et al.* (2021) menunjukkan bahwa teks refutasi menghasilkan perubahan

konseptual yang 42% lebih besar dibandingkan teks ekspositif konvensional untuk topik yang sama.

5. Evaluasi dan Monitoring Perubahan Konsepsi Siswa

Evaluasi yang efektif terhadap keberhasilan remediasi miskonsepsi memerlukan pendekatan yang berbeda secara fundamental dari evaluasi pembelajaran konvensional. Tes hasil belajar standar yang hanya mengukur kemampuan mengingat fakta atau menerapkan prosedur tidak cukup sensitif untuk mendeteksi apakah perubahan konseptual mendalam benar-benar telah terjadi atau apakah siswa hanya menghafal jawaban yang "benar" sementara miskonsepsi lama mereka tetap utuh di bawah permukaan. Hewson (2021) dalam *Handbook of Research in Science Teaching* menekankan perlunya evaluasi berlapis yang mengukur tidak hanya produk pembelajaran (konsep apa yang diketahui) tetapi juga proses pembelajaran (bagaimana siswa mengonstruksi dan merevisi pemahaman mereka) dan dimensi afektif (seberapa yakin dan nyaman siswa dengan pemahaman baru mereka).

Dalam praktik, monitoring perubahan konsepsi dapat dilakukan melalui kombinasi beberapa pendekatan komplementer. *Parallel pre-post diagnostic testing* menggunakan instrumen yang setara sebelum dan sesudah intervensi untuk mengukur pergeseran konsepsi secara kuantitatif. *Reflective journaling* meminta siswa untuk secara eksplisit mendeskripsikan bagaimana pemahaman mereka berubah dan mengapa. *Concept mapping evolution* membandingkan peta konsep yang dibuat sebelum dan setelah intervensi untuk melihat perubahan dalam struktur pengetahuan siswa. *Delayed retention testing* mengadministrasikan tes serupa 4-6 minggu setelah intervensi untuk menilai apakah perubahan konseptual benar-benar bertahan atau apakah terjadi kemunduran (*backsliding*) ke miskonsepsi awal.

Tabel 9.5 Rubrik Evaluasi Perubahan Konsepsi Siswa dalam Remediasi Miskonsepsi

Dimensi Evaluasi	Level 1 (Miskonsepsi Menetap)	Level 2 (Transisi)	Level 3 (Konsepsi Ilmiah)	Level 4 (Konsepsi Ilmiah + Transfer)
Akurasi Konseptual	Miskonsepsi asal tidak berubah; mempertahankan penjelasan yang keliru	Campuran antara elemen yang benar dan yang salah; ketidakpastian tinggi	Konsepsi sesuai dengan penjelasan ilmiah yang diterima	Konsepsi benar dan mampu diterapkan pada konteks yang belum pernah dipelajari
Koherensi Penjelasan	Penjelasan internal konsisten namun mengacu pada model yang salah	Penjelasan inkonsisten; berbeda tergantung konteks	Penjelasan konsisten dan didasarkan pada prinsip ilmiah yang benar	Mampu menjelaskan fenomena baru menggunakan prinsip yang sama
Kepercayaan Diri (CRI)	CRI tinggi pada jawaban yang salah (keyakinan kuat pada miskonsepsi)	CRI rendah/ sedang; ketidakpastian terasa	CRI tinggi pada jawaban yang benar	CRI tinggi + mampu menjelaskan secara mendalam

Sumber: Diadaptasi dari Hewson (2021)



BAB X

INTEGRASI STEM DAN PROYEK KREATIF IPA

Dunia memasuki era yang oleh para futurolog dan pakar pendidikan disebut sebagai *era volatility, uncertainty, complexity, and ambiguity* (VUCA), era yang ditandai oleh perubahan teknologi yang eksponensial, ekonomi yang tidak dapat diprediksi, dan tantangan-tantangan global yang memerlukan solusi multidisipliner yang inovatif. Dalam konteks ini, pendidikan IPA yang hanya berfokus pada transmisi pengetahuan faktual dan penguasaan prosedur eksperimental standar tidak lagi memadai untuk mempersiapkan generasi muda menghadapi tantangan abad ke-21. Forum Ekonomi Dunia (*World Economic Forum*) dalam laporannya *Future of Jobs 2023* mengidentifikasi bahwa 65% pekerjaan yang akan dimasuki oleh generasi Z belum ada saat ini, dan mayoritas pekerjaan baru tersebut akan membutuhkan kompetensi di persimpangan antara sains, teknologi, rekayasa, seni, dan matematika.

Dalam merespons tantangan ini, paradigma pendidikan IPA global mengalami pergeseran yang fundamental dan menyeluruh. Paradigma lama yang berpusat pada konten (*content-centered*), di mana keberhasilan diukur dari kemampuan siswa untuk mengingat dan mereproduksi fakta-fakta saintifik yang diajarkan semakin banyak ditinggalkan. Sebagai gantinya, muncul paradigma baru yang berpusat pada kompetensi (*competency-centered*), di mana keberhasilan diukur dari kemampuan siswa untuk berpikir kritis, berkolaborasi, berkomunikasi, berkreasi, dan memecahkan masalah nyata menggunakan pengetahuan IPA sebagai alat. Integrasi *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM) dan pendekatan *Project Based Learning* (PjBL) merupakan dua pilar utama dari paradigma baru ini.

Di Indonesia, urgensi transformasi paradigma ini diperkuat oleh data yang cukup mencengangkan. Laporan Badan Pusat Statistik (BPS) 2023 menunjukkan bahwa Indonesia menghadapi kekurangan tenaga ahli STEM yang diproyeksikan mencapai 600.000 orang pada tahun

2030, sementara tingkat literasi digital dan sains masih berada di bawah rata-rata negara-negara anggota ASEAN. Ini mengindikasikan urgensi reformasi pendidikan IPA yang tidak hanya bersifat kosmetik, mengubah nama atau format program tetapi yang benar-benar mengubah cara siswa berpikir, belajar, dan berkarya dengan ilmu pengetahuan.

A. Merancang Pembelajaran Berbasis Proyek (*Project Based Learning*)

Project Based Learning (PjBL) merupakan model pembelajaran yang menempatkan proyek yang kompleks, relevan, dan autentik sebagai kendaraan utama untuk pembelajaran konsep dan keterampilan IPA. Berbeda dengan pembelajaran berbasis masalah (*Problem Based Learning*) yang berfokus pada penyelesaian masalah yang telah didefinisikan sebelumnya, PjBL memberikan ruang siswa lebih luas untuk mendefinisikan masalah, merancang solusi, menciptakan produk atau artefak, dan mempresentasikan karya mereka kepada audiens nyata (Krajcik & Shin, 2022). Dalam konteks IPA, PjBL memiliki kelebihan unik: proyek-proyek sains yang autentik secara alami mengintegrasikan metode ilmiah, penalaran matematis, penerapan teknologi, dan keterampilan rekayasa dalam satu unit pembelajaran yang kohesif.

Meta-analisis yang dilakukan oleh Condcliffe et al. (2022) terhadap 119 studi eksperimental tentang PjBL di tingkat K-12 menemukan bahwa siswa yang belajar melalui PjBL menunjukkan keunggulan signifikan dibandingkan siswa dalam pembelajaran konvensional dalam tiga dimensi utama: pemahaman konseptual yang lebih mendalam (*effect size* $d = 0,58$), keterampilan kolaborasi dan komunikasi ($d = 0,71$), dan motivasi intrinsik untuk belajar IPA ($d = 0,63$). Keunggulan ini konsisten di berbagai latar demografis dan sosio-ekonomi, meskipun efek yang paling besar ditemukan pada siswa dari latar belakang kurang beruntung yang sebelumnya menunjukkan ketidaktertarikan pada IPA.

1. Prinsip-Prinsip Desain PjBL yang Efektif

Tidak semua pengalaman berbasis proyek sama-sama efektif dalam menghasilkan pembelajaran yang mendalam. Buck Institute for Education (BIE) telah mengidentifikasi dan memvalidasi tujuh elemen

kunci yang membedakan PjBL yang efektif (*Gold Standard PBL*) dari aktivitas proyek yang hanya bersifat kosmetik tanpa nilai pedagogis yang substansial. Ketujuh elemen ini, yang dikonfirmasi dalam penelitian longitudinal oleh Han *et al.* (2022), merupakan prinsip desain yang harus dipenuhi secara simultan untuk memaksimalkan dampak pembelajaran.

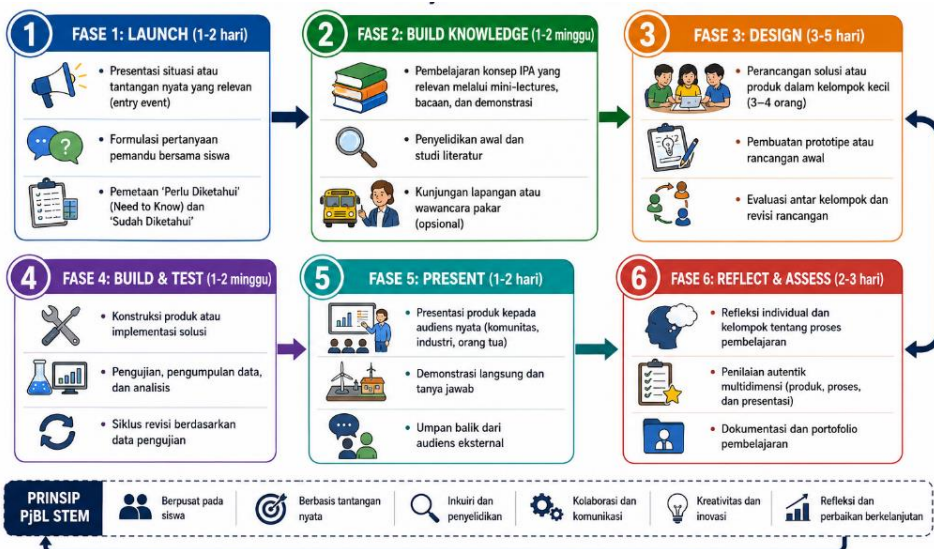
- a. Pertanyaan Pemandu yang Menantang (*Challenging Problem or Question*). Setiap proyek PjBL yang efektif dimulai dengan pertanyaan pemandu (*driving question*) yang menarik, relevan dengan kehidupan siswa, dan tidak memiliki satu jawaban benar yang sederhana. Pertanyaan ini harus cukup kompleks untuk mendorong penyelidikan mendalam selama berminggu-minggu, namun cukup konkret untuk memberikan arah yang jelas bagi siswa. Contoh pertanyaan pemandu yang efektif: "Bagaimana kita dapat merancang sistem filtrasi air yang terjangkau untuk desa yang kekurangan air bersih menggunakan bahan-bahan lokal?"
- b. Kebutuhan untuk Mengetahui (*Need to Know*). Siswa harus merasakan kebutuhan yang genuine dan intrinsik untuk mempelajari konten IPA tertentu karena pengetahuan tersebut dibutuhkan untuk menyelesaikan proyek mereka. Ini berbeda secara fundamental dengan pembelajaran konvensional di mana siswa belajar konten karena diperintahkan guru, tanpa konteks yang jelas mengapa pengetahuan itu penting.
- c. Penyelidikan dan Inovasi (*Inquiry and Innovation*). Proyek harus mendorong siswa untuk melakukan penyelidikan nyata, mengumpulkan data, menganalisis informasi dari berbagai sumber, dan mengembangkan solusi inovatif yang belum tentu ada jawabannya di buku teks. Ini menciptakan pengalaman autentik sebagai ilmuwan dan insinyur.
- d. Umpan Balik dan Revisi (*Feedback and Revision*). Proses revisi yang berkelanjutan berdasarkan umpan balik dari guru, teman sebaya, dan bahkan ahli eksternal merupakan elemen yang membedakan PjBL dari ujian sekali jadi. Siswa belajar bahwa produk yang berkualitas adalah hasil dari iterasi dan penyempurnaan yang berulang.
- e. Presentasi Publik (*Public Product*). Memrepresentasikan hasil kepada audiens nyata di luar kelas seperti komunitas, orang tua,

atau mitra industri, menciptakan akuntabilitas dan motivasi yang tidak dapat dihasilkan oleh ujian tertulis biasa. Pengetahuan bahwa karya mereka akan dievaluasi untuk berupaya mencapai standar kualitas yang lebih tinggi.

2. Fase-Fase Implementasi PjBL dalam Konteks STEM

Implementasi PjBL yang berhasil dalam konteks pendidikan STEM di sekolah menengah Indonesia memerlukan perencanaan yang sistematis dan penahapan yang jelas. Model yang dikembangkan oleh Krajcik dan Shin (2022) dan telah diadaptasi untuk konteks Asia Tenggara oleh Nguyen et al. (2023) dalam *Asia-Pacific Science Education*, memberikan kerangka implementasi yang terdiri dari enam fase yang berurutan namun fleksibel:

Gambar 10.1 Alur Implementasi Pjbl Stem di Sekolah Menengah



Gambar diatas menunjukkan alur *Project-Based Learning* (PjBL) STEM yang terdiri atas enam tahapan pembelajaran secara sistematis. Proses dimulai dengan *Launch*, yaitu memperkenalkan permasalahan nyata dan merumuskan pertanyaan pemantik. Selanjutnya pada tahap *Build Knowledge*, peserta didik membangun pemahaman melalui pembelajaran konsep, studi literatur, dan penyelidikan. Tahap *Design* berfokus pada perancangan solusi atau prototipe yang kemudian diwujudkan dan diuji pada tahap *Build & Test* melalui konstruksi produk, pengumpulan data, serta revisi berdasarkan hasil pengujian. Hasil proyek

kemudian dipresentasikan kepada berbagai pihak pada tahap *Present* untuk memperoleh umpan balik. Terakhir, pada tahap *Reflect & Assess*, peserta didik melakukan refleksi, penilaian autentik terhadap proses dan produk, serta mendokumentasikan hasil pembelajaran. Keseluruhan proses ini berlandaskan prinsip pembelajaran yang berpusat pada siswa, berbasis tantangan nyata, mengedepankan inkuiri, kolaborasi, kreativitas, komunikasi, serta refleksi untuk perbaikan berkelanjutan.

3. Rubrik Penilaian Autentik dalam PjBL STEM

Salah satu aspek PjBL yang paling sering menjadi kendala implementasi di sekolah adalah sistem penilaian. Guru yang terbiasa dengan penilaian berbasis tes pilihan ganda atau soal uraian sering merasa kewalahan ketika harus menilai proyek yang kompleks, multidimensi, dan melibatkan produk yang bervariasi antar kelompok. Namun, penelitian konsisten menunjukkan bahwa penilaian autentik berbasis rubrik yang dirancang dengan baik tidak hanya lebih adil dan valid dibandingkan penilaian konvensional, tetapi juga secara aktif berkontribusi pada proses pembelajaran itu sendiri, siswa yang memahami kriteria penilaian sejak awal proyek cenderung menghasilkan karya yang berkualitas lebih tinggi (Darling-Hammond *et al.*, 2022).

Tabel 10.1 Rubrik Penilaian Autentik PjBL STEM untuk Sekolah Menengah

Dimensi Penilaian	Awal (1)	Berkembang (2)	Mahir (3)	Unggul (4)
Integrasi Konsep STEM	Hanya satu disiplin STEM yang terlihat dalam proyek	Dua disiplin STEM terintegrasi namun tidak mulus	Tiga disiplin STEM terintegrasi dengan baik	Seluruh disiplin STEM terintegrasi secara mulus dan saling menguatkan
Kualitas Penyelidikan	Pertanyaan tidak jelas; data dikumpulkan tanpa rencana	Pertanyaan ada namun terlalu sempit; data cukup namun analisis terbatas	Pertanyaan jelas dan terukur; data dikumpulkan sistematis	Pertanyaan mendalam; metodologi rigor; analisis komprehensif

Dimensi Penilaian	Awal (1)	Berkembang (2)	Mahir (3)	Unggul (4)
Kualitas Produk/Solusi	Produk tidak fungsional atau tidak menjawab pertanyaan pemandu	Produk fungsional sebagian; menjawab sebagian pertanyaan pemandu	Produk fungsional; menjawab pertanyaan pemandu dengan baik	Produk inovatif; melebihi ekspektasi; berpotensi diterapkan nyata
Kolaborasi Tim	Beberapa anggota mendominasi; yang lain pasif; tidak ada pembagian peran	Pembagian peran ada namun tidak merata; konflik tidak terselesaikan	Semua anggota berkontribusi; konflik diselesaikan produktif	Sinergi tim yang kuat; mekanisme keputusan demokratis; hasil melebihi kapasitas individu
Presentasi dan Komunikasi	Presentasi tidak terstruktur; penjelasan tidak jelas; tidak mampu menjawab pertanyaan	Presentasi terstruktur cukup; penjelasan kadang tidak jelas	Presentasi terstruktur baik; mampu menjelaskan konsep STEM kepada audiens umum	Presentasi memukau; narasi yang kohesif; mampu meyakinkan dan menginspirasi audiens

Sumber: Diadaptasi dari Darling-Hammond et al (2022)

4. Tantangan dan Solusi Implementasi PjBL di Sekolah Menengah

Meskipun PjBL telah terbukti efektif secara internasional, implementasinya di sekolah menengah Indonesia menghadapi serangkaian tantangan struktural, kultural, dan pedagogis yang unik dan harus diantisipasi secara proaktif. Kajian oleh Rahmawati *et al.* (2023) terhadap 145 guru IPA SMP/SMA di 12 provinsi Indonesia mengidentifikasi lima tantangan utama yang paling sering dilaporkan oleh guru dalam mengimplementasikan PjBL berbasis STEM.

Tabel 10.2 Tantangan dan Solusi Implementasi PjBL STEM di Sekolah Menengah Indonesia

Tantangan	Solusi yang Direkomendasikan
Alokasi waktu kurikulum tidak memadai untuk proyek jangka panjang	Integrasi proyek lintas mata pelajaran; koordinasi dengan guru matematika, TIK, dan prakarya untuk proyek bersama yang menggabungkan jam pelajaran
Keterbatasan sarana dan alat laboratorium	Pemanfaatan laboratorium virtual (PhET, Labster); kemitraan dengan universitas atau industri lokal; proyek berbasis bahan sederhana yang tersedia di lingkungan siswa
Kompetensi guru dalam merancang dan memfasilitasi PjBL	Program pengembangan profesional berbasis komunitas belajar guru (KKG/MGMP); mentoring dan pendampingan oleh fasilitator berpengalaman; microteaching PjBL
Sistem penilaian yang masih berorientasi pada tes tertulis (ujian nasional/seleksi)	Integrasi penilaian autentik dalam sistem rapor; dokumentasi portofolio; komunikasi aktif dengan orang tua dan pemangku kebijakan tentang nilai PjBL
Resistensi siswa terhadap pembelajaran aktif setelah terbiasa dengan pendekatan pasif	Introduksi PjBL secara bertahap; mulai dari proyek mini berdurasi pendek; membangun budaya kelas yang menghargai proses di samping produk

Sumber: Rahmawati et al (2023)

B. Pemanfaatan AI (Kecerdasan Buatan) dalam Riset dan Laboratorium Virtual

Kecerdasan Buatan atau *Artificial Intelligence* (AI) telah bertransisi dari domain eksklusif riset ilmu komputer ke dalam hampir semua aspek kehidupan modern termasuk semakin penting dalam bidang pendidikan IPA. Gelombang AI dalam pendidikan yang saat ini kita saksikan bukan sekadar adopsi teknologi baru; ia merepresentasikan pergeseran paradigmatis yang fundamental dalam cara kita memahami dan merancang pengalaman belajar. Rollinson *et al.* (2022) dalam *npj Science of Learning* mendefinisikan AI dalam pendidikan sebagai

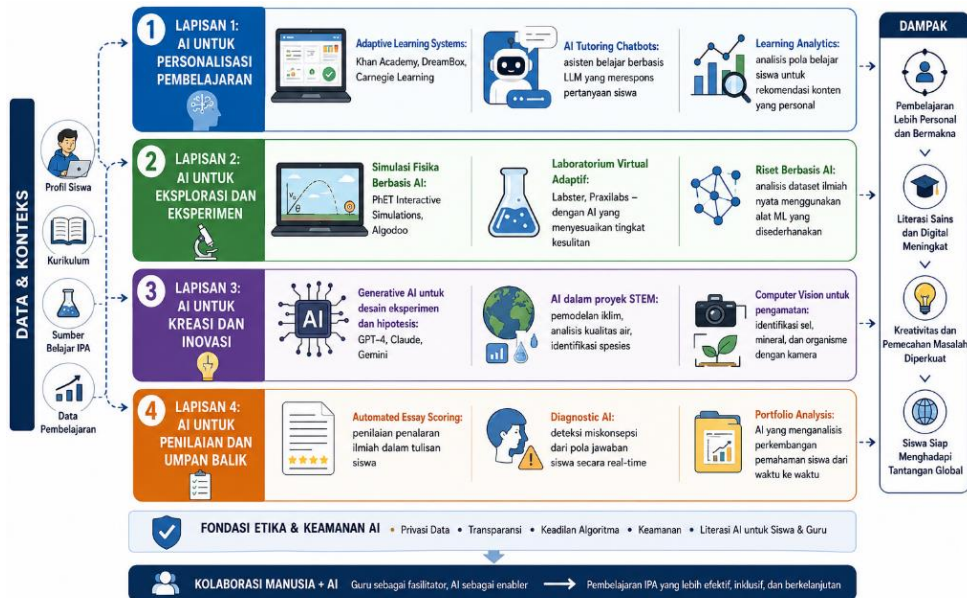
penggunaan sistem komputasional yang mampu belajar dari data untuk mendukung, memperkaya, atau mengotomatisasi aspek-aspek proses pendidikan dari perencanaan kurikulum hingga penilaian diagnostik, dari pemberian umpan balik personal hingga simulasi eksperimen yang tidak mungkin dilakukan di laboratorium fisik sekolah.

1. Kecerdasan Buatan dalam Konteks Pendidikan IPA

Untuk memahami peran AI dalam pendidikan IPA secara tepat, perlu dipahami terlebih dahulu landscape teknologi AI yang relevan dengan konteks sekolah menengah. Tidak semua AI adalah sama: ada perbedaan signifikan antara *machine learning* (sistem yang belajar pola dari data historis), *natural language processing* (NLP, sistem yang memproses dan menghasilkan bahasa manusia), *computer vision* (sistem yang menginterpretasi data visual), dan *generative AI* (sistem yang menciptakan konten baru seperti teks, gambar, atau kode berdasarkan prompt) dan masing-masing memiliki aplikasi yang berbeda dalam konteks pendidikan IPA.

Dalam tiga tahun terakhir, kemunculan *Large Language Models* (LLM) seperti GPT-4, Claude, dan model-model serupa telah secara dramatis memperluas kemungkinan penggunaan AI dalam pendidikan. LLM mampu berdialog dengan siswa tentang konsep-konsep saintifik yang kompleks, memberikan penjelasan yang disesuaikan dengan tingkat pemahaman siswa, menghasilkan soal latihan yang disesuaikan, dan bahkan memberikan umpan balik yang substantif terhadap penalaran ilmiah siswa. Penelitian yang dilakukan oleh Kasneci *et al.* (2023) dalam *Computers and Education: Artificial Intelligence* menunjukkan bahwa penggunaan LLM sebagai *conversational AI tutor* dalam pembelajaran fisika meningkatkan pemahaman konseptual siswa sebesar 23% dibandingkan pembelajaran mandiri konvensional, dengan efek yang lebih besar pada siswa yang kesulitan mengakses bimbingan belajar di luar sekolah.

Gambar 10.2 Ekosistem AI Dalam Pendidikan IPA



Gambar diatas menunjukkan kerangka integrasi *Artificial Intelligence* (AI) dalam pembelajaran berbasis *Project-Based Learning* (PjBL) STEM yang terdiri atas empat lapisan utama. Lapisan pertama memanfaatkan AI untuk personalisasi pembelajaran melalui sistem pembelajaran adaptif, *chatbot* berbasis AI, dan *learning analytics* sehingga materi dapat disesuaikan dengan kebutuhan setiap peserta didik. Lapisan kedua menggunakan AI untuk eksplorasi dan eksperimen, seperti simulasi fisika, laboratorium virtual adaptif, dan analisis data penelitian. Lapisan ketiga mendukung kreasi dan inovasi melalui AI generatif, analisis proyek STEM, serta *computer vision* untuk identifikasi objek dan pengolahan data visual. Sementara itu, lapisan keempat memanfaatkan AI untuk penilaian dan umpan balik melalui penilaian otomatis, diagnosis kesalahan secara real-time, dan analisis portfolio belajar. Seluruh proses didukung oleh fondasi etika dan keamanan AI, meliputi perlindungan privasi data, transparansi, keadilan algoritma, keamanan, serta literasi AI bagi guru dan siswa. Dengan kolaborasi antara manusia dan AI, model ini bertujuan menciptakan pembelajaran yang lebih personal, efektif, inklusif, dan berkelanjutan

sehingga mampu meningkatkan literasi sains dan digital, kreativitas, kemampuan pemecahan masalah, serta kesiapan peserta didik menghadapi tantangan global.

2. Platform dan Alat AI untuk Pembelajaran IPA

Lanskap platform dan alat berbasis AI yang relevan untuk pembelajaran IPA di sekolah menengah terus berkembang dengan pesat. Klasifikasi yang sistematis terhadap platform-platform ini sangat membantu guru dalam memilih alat yang paling sesuai dengan tujuan pembelajaran, konteks kelas, dan infrastruktur teknologi yang tersedia. Holmes *et al.* (2022) mengklasifikasikan platform AI pendidikan berdasarkan fungsi primernya: sistem belajar adaptif, sistem penilaian cerdas, simulasi berbasis AI, agen percakapan, dan alat analitik pembelajaran.

Tabel 10.3 Platform AI Utama untuk Pembelajaran IPA Sekolah Menengah

Platform	Fungsi Utama	Topik IPA yang Relevan	Aksesibilitas untuk Indonesia
Khan Academy + Khanmigo AI	<i>Adaptive learning, AI tutor conversations</i>	Fisika, Kimia, Biologi, Matematika sains	Gratis; versi Bahasa Indonesia tersedia; akses internet diperlukan
PhET <i>Interactive Simulations</i>	Simulasi eksperimen fisika dan kimia interaktif	Mekanika, gelombang, listrik, reaksi kimia, optika	Gratis; tersedia dalam Bahasa Indonesia; versi offline tersedia
Labster	Laboratorium virtual dengan skenario dan narasi berbasis AI	Biologi sel, Kimia analitik, Mikrobiologi, Genetika	Berbayar; lisensi institusi; beberapa konten gratis; Bahasa Inggris

Platform	Fungsi Utama	Topik IPA yang Relevan	Aksesibilitas untuk Indonesia
iNaturalist + <i>AI Identification</i>	Identifikasi spesies menggunakan <i>computer vision AI</i> dari foto	Biologi ekologi, Keanekaragaman hayati, Botani, Zoologi	Gratis; aplikasi mobile tersedia; cocok untuk <i>outdoor learning</i> Indonesia
<i>Google Earth Engine Education</i>	Analisis data geospasial dan lingkungan menggunakan ML	Ilmu bumi, Perubahan iklim, Ekologi, Geografi sains	Gratis untuk pendidikan; membutuhkan akun Google; koneksi stabil

Sumber: Holmes et al., (2022)

3. Laboratorium Virtual Berbasis AI

Laboratorium virtual (*virtual laboratories* atau *virtual labs*) telah ada dalam pendidikan IPA sejak awal 2000-an, namun integrasi AI telah secara fundamental mengubah kapabilitas dan nilai pedagogisnya. Laboratorium virtual generasi pertama pada dasarnya hanyalah animasi statis atau simulasi terbatas yang menampilkan hasil yang telah ditentukan sebelumnya, siswa dapat "mengklik" bahan kimia dan melihat reaksi yang muncul, tetapi tidak ada adaptasi terhadap tindakan siswa, tidak ada panduan personal, dan tidak ada umpan balik yang bermakna. Laboratorium virtual berbasis AI generasi terkini, seperti yang dikembangkan oleh Labster dan Praxilabs, adalah entitas yang berbeda secara kualitatif (Potkonjak *et al.*, 2020).

Laboratorium virtual berbasis AI modern memiliki beberapa karakteristik yang berbeda dari simulasi konvensional. Pertama, adaptivitas dinamis, AI dalam platform ini terus memonitor tindakan dan pilihan siswa selama sesi laboratorium, mengidentifikasi kesalahan prosedural dan miskonsepsi secara *real-time*, dan secara otomatis menyesuaikan tingkat bimbingan dan kompleksitas tantangan yang diberikan berdasarkan profil kognitif siswa. Kedua, simulasi fisika yang realistis, algoritma AI berbasis fisika memungkinkan simulasi yang jauh lebih realistis dari perilaku zat kimia, fenomena fisika, dan sistem biologis termasuk variabilitas dan "kesalahan" yang terjadi dalam

eksperimen nyata, justru sangat penting membangun intuisi ilmiah siswa. Ketiga, umpan balik konversasional, agen AI berbasis NLP dapat berdialog dengan siswa tentang penalaran mereka, mengajukan pertanyaan Socrates, dan memandu mereka untuk menemukan kesalahan prosedur/interpretasi data bukan sekadar memberitahu jawaban benar.

Untuk konteks Indonesia, di mana banyak sekolah terutama di luar Jawa masih kekurangan peralatan laboratorium fisik yang memadai, laboratorium virtual berbasis AI menawarkan solusi yang sangat relevan dan berdampak. Penelitian yang dilakukan oleh Prasetyo *et al.* (2023) di 45 SMA di Kalimantan Timur menemukan bahwa siswa yang belajar menggunakan laboratorium virtual berbasis PhET dan Labster selama satu semester menunjukkan pemahaman konseptual yang setara atau lebih tinggi dibandingkan siswa yang menggunakan laboratorium fisik lengkap, dengan keunggulan signifikan dalam pemahaman konsep-konsep yang memerlukan pengulangan eksperimen dalam kondisi yang bervariasi, sesuatu yang tidak mungkin dilakukan berkali-kali di laboratorium fisik karena keterbatasan bahan dan waktu.

4. AI untuk Personalisasi Pembelajaran IPA

Salah satu kontribusi paling transformatif AI dalam pendidikan IPA adalah kemampuannya untuk mewujudkan personalisasi pembelajaran pada skala yang sebelumnya tidak pernah mungkin dilakukan oleh guru manusia yang menghadapi 35-40 siswa per kelas. Konsep *personalized learning* atau pembelajaran yang disesuaikan sebenarnya bukan ide baru, para pendidik telah lama mengakui bahwa siswa memiliki gaya belajar, kecepatan pemahaman, kekuatan dan kelemahan, dan latar belakang pengetahuan yang berbeda-beda. Namun, implementasinya secara praktis di kelas selalu terkendala oleh kapasitas kognitif dan waktu guru yang terbatas. AI untuk pertama kalinya memberikan alat yang dapat mengimplementasikan personalisasi ini secara konsisten, berkelanjutan, dan pada skala penuh.

Sistem *Intelligent Tutoring Systems* (ITS) yang didukung AI merupakan ujung tombak personalisasi pembelajaran IPA berbasis teknologi. ITS modern menggunakan model pengetahuan siswa yang dinamis (*student model*) yang diperbarui secara real-time berdasarkan interaksi siswa dengan sistem. Model ini mencatat tidak hanya jawaban yang benar atau salah, tetapi juga pola kesalahan, waktu respons, pola

pencarian informasi, dan bahkan sinyal emosional melalui analisis ekspresi wajah atau keystroke dynamics dalam beberapa sistem yang lebih canggih. Berdasarkan model ini, ITS dapat secara otomatis memilih konten pembelajaran berikutnya yang paling optimal, tidak terlalu mudah (membosankan) dan tidak terlalu sulit (frustasi), melainkan tepat berada di *Zone of Proximal Development* siswa tersebut secara individual (VanLehn, 2021).

5. Etika dan Tantangan Penggunaan AI dalam Pendidikan IPA

Meskipun potensi AI dalam pendidikan IPA sangat menjanjikan, penerapannya tidak bebas dari persoalan etika, risiko, dan tantangan yang harus diantisipasi dan dikelola dengan cermat oleh para pemangku kebijakan, pemimpin sekolah, dan guru. Mengabaikan dimensi etika dalam adopsi AI pendidikan bukan hanya tidak bijaksana, ia berpotensi menciptakan kerugian nyata bagi siswa, terutama yang paling rentan.

Kekhawatiran utama pertama adalah privasi dan keamanan data. Sistem AI pendidikan bekerja dengan mengumpulkan dan menganalisis data perilaku belajar siswa dalam jumlah yang sangat besar, data yang sangat sensitif karena mencerminkan tidak hanya kemampuan akademis tetapi juga kebiasaan, minat, kesulitan, dan bahkan kondisi emosional siswa. Holmes *et al.* (2022) memperingatkan bahwa banyak platform AI pendidikan komersial menggunakan model bisnis di mana data siswa menjadi komoditas, dijual kepada pengiklan atau digunakan untuk melatih model AI yang kemudian dijual kepada pihak ketiga. Ini menciptakan risiko privasi yang serius, terutama bagi siswa di bawah umur.

Kekhawatiran kedua adalah bias algoritmik (*algorithmic bias*). Sistem AI dilatih pada data historis, dan jika data historis tersebut mencerminkan bias sosial yang ada, misalnya ketimpangan prestasi antara siswa dari latar belakang sosio-ekonomi yang berbeda, maka sistem AI dapat mengabadikan dan bahkan memperparah bias tersebut. Sebuah studi yang diterbitkan dalam *Nature Machine Intelligence* (Baker & Hawn, 2022) menemukan bahwa beberapa sistem rekomendasi konten AI dalam platform pendidikan secara konsisten merekomendasikan materi yang lebih menantang untuk siswa dari latar belakang yang lebih beruntung, sementara merekomendasikan materi

remediasi bagi siswa dari latar belakang yang kurang beruntung, terlepas dari kemampuan aktual siswa tersebut.

Ketiga, terdapat kekhawatiran tentang ketergantungan berlebihan pada teknologi yang dapat mengikis keterampilan berpikir mandiri dan keterampilan ilmiah mendasar. Jika siswa terbiasa mengandalkan AI untuk menjawab pertanyaan, merancang eksperimen, atau menginterpretasi data, mereka mungkin tidak mengembangkan kapasitas untuk melakukan hal-hal ini secara mandiri ketika AI tidak tersedia, kapasitas yang sangat penting dalam situasi sains nyata. Bender *et al.* (2021) menyebutnya sebagai risiko *epistemic cowardice* yang difasilitasi teknologi: kecenderungan untuk mengalihdayakan pemikiran kritis kepada mesin daripada berjuang dengan ketidakpastian dan kompleksitas secara mandiri.

Tabel 10.4 Isu Etika, Risiko, dan Mitigasi Penggunaan AI dalam Pendidikan IPA

Isu Etika	Risiko Spesifik	Mitigasi yang Direkomendasikan
Privasi Data Siswa	Data perilaku belajar siswa diperjualbelikan; profiling yang tidak konsensual	Pilih platform dengan kebijakan privasi yang transparan dan ketat; hindari platform yang memonetisasi data siswa; sosialisasi kepada orang tua
Bias Algoritmik	Sistem AI memperkuat ketimpangan yang ada; rekomendasi tidak adil berdasarkan latar belakang siswa	Audit rutin terhadap output AI; pemantauan aktif oleh guru; kombinasikan dengan penilaian manusia
Ketergantungan Teknologi	Siswa kehilangan kemampuan berpikir mandiri dan keterampilan ilmiah dasar	Desain penggunaan AI yang strategis sebagai <i>scaffold</i> yang secara bertahap dikurangi; pertahankan eksperimen fisik dan pemikiran tanpa AI

Kesenjangan Digital	Akses AI yang tidak merata memperparah kesenjangan pendidikan antara daerah perkotaan dan pedesaan	Prioritaskan platform <i>offline-capable</i> ; program hibah perangkat dan konektivitas; tidak menjadikan AI sebagai satu-satunya jalur pembelajaran
---------------------	--	--

Sumber: Holmes et al., (2022); Baker & Hawn (2022)



BAB XI

HAKIKAT IPA DAN INTERKONEKSI ILMU

A. Sains sebagai Proses, Produk, dan Sikap

Tripartisi klasik yang memandang sains sebagai proses, produk, dan sikap merupakan kerangka analitik yang paling banyak digunakan dalam pendidikan IPA untuk memahami sifat multidimensi dari ilmu pengetahuan alam. Kerangka ini, yang memiliki akar dalam karya Schwab (1962) dan kemudian distandarisasi dalam reformasi pendidikan sains Amerika melalui *Next Generation Science Standards* (NGSS) serta diadopsi dalam berbagai variasi oleh kurikulum nasional di seluruh dunia termasuk Kurikulum Merdeka Indonesia, memungkinkan pendidik untuk memahami dan mengajarkan sains secara komprehensif, tidak hanya sebagai kumpulan pengetahuan yang sudah jadi, tetapi sebagai aktivitas manusia yang hidup dan dinamis (Duschl *et al.*, 2022).

1. Sains sebagai Proses

Dimensi proses sains merujuk pada serangkaian kegiatan mental dan fisik yang dilakukan oleh para ilmuwan untuk menghasilkan pengetahuan ilmiah yang dapat dipercaya. Ini mencakup apa yang secara tradisional disebut sebagai *scientific method* atau metode ilmiah, meskipun para filsuf sains dan ilmuwan sains pendidikan kontemporer dengan tegas menekankan bahwa tidak ada satu "*the scientific method*" yang tunggal dan kaku, ilmuwan bekerja dengan cara-cara yang sangat beragam tergantung pada pertanyaan yang mereka ajukan, fenomena yang mereka pelajari, dan tradisi disiplin di mana mereka beroperasi (Osborne, 2022).

Meskipun demikian, terdapat serangkaian *science practices* atau praktik-praktik sains yang dapat diidentifikasi sebagai karakteristik umum dari cara ilmuwan bekerja. *Next Generation Science Standards* mengidentifikasi delapan praktik sains inti yang kemudian diadaptasi dalam berbagai kurikulum sains internasional: (1) mengajukan

pertanyaan dan mendefinisikan masalah; (2) mengembangkan dan menggunakan model; (3) merencanakan dan melakukan penyelidikan; (4) menganalisis dan menginterpretasikan data; (5) menggunakan matematika dan komputasi; (6) mengkonstruksi penjelasan dan merancang solusi; (7) berargumentasi berdasarkan bukti; dan (8) memperoleh, mengevaluasi, dan mengkomunikasikan informasi (Duschl *et al.*, 2022).

Penilaian literasi sains berbasis proses menjadi salah satu fokus utama dalam penelitian pendidikan IPA kontemporer. Merujuk pada kerangka PISA yang dikutip oleh Sholihah (2023), terdapat tiga kompetensi proses sains yang menjadi tolok ukur literasi sains: (1) menjelaskan fenomena secara ilmiah., (2) mengevaluasi dan mendesain penyelidikan ilmiah, (3) menginterpretasikan data dan bukti secara ilmiah (OECD, 2019, dikutip dalam Sholihah, 2023). Ketiga kompetensi ini merefleksikan dimensi proses sains yang esensial, dari kemampuan menggunakan pengetahuan untuk menjelaskan fenomena, hingga kemampuan merancang dan mengevaluasi penyelidikan, dan akhirnya kemampuan menganalisis dan menarik kesimpulan dari data dan bukti empiris.

Tabel 11.1 Lima Praktik Sains Inti dan Contoh Implementasinya dalam IPA SMP/SMA

Praktik Sains	Deskripsi	Contoh dalam Kurikulum IPA SMP/SMA
Mengajukan Pertanyaan	Merumuskan pertanyaan empiris yang dapat diselidiki melalui pengamatan atau eksperimen	Siswa merumuskan pertanyaan: "Bagaimana pengaruh suhu terhadap laju reaksi kimia?"
Mengembangkan Model	Membangun representasi konseptual atau fisik dari fenomena untuk menjelaskan dan memprediksi	Membuat model DNA dari bahan sederhana untuk memahami struktur heliks ganda
Merencanakan Penyelidikan	Merancang prosedur eksperimen yang	Merancang eksperimen untuk menguji pengaruh

Praktik Sains	Deskripsi	Contoh dalam Kurikulum IPA SMP/SMA
	sistematis dengan variabel yang terkontrol	intensitas cahaya pada laju fotosintesis
Menganalisis Data	Mengorganisasi, menginterpretasi, dan membuat kesimpulan dari data yang dikumpulkan	Menganalisis data spektrum cahaya dari berbagai bintang untuk menentukan komposisi kimianya
Berargumentasi berbasis Bukti	Mengkonstruksi dan mengevaluasi argumen ilmiah yang didukung oleh data dan penalaran yang valid	Mendebat klaim tentang efektivitas vaksin menggunakan data epidemiologi dari uji klinis

Sumber: Diadaptasi dari Duschl et al., (2022)

Inkuiri sebagai Inti Proses Sains

Di antara semua praktik sains, inkuiri (*inquiry*) menempati posisi yang paling sentral sebagai modus operandi utama sains. Inkuiri ilmiah bukan sekadar melakukan eksperimen di laboratorium, ia adalah cara berpikir yang mencirikan semua aktivitas ilmiah, dari pengamatan sistematis seorang ahli ekologi lapangan hingga pemodelan komputasional seorang fisikawan teori. Dalam konteks pendidikan, Sholihah (2023) merujuk pada Sanjaya (2008) yang mendefinisikan pendekatan inkuiri sebagai "rangkaian kegiatan pembelajaran yang menekankan pada proses berpikir secara kritis dan analitis untuk mencari dan menemukan sendiri jawaban dari suatu masalah yang dipertanyakan". Penguatan lebih lanjut diberikan oleh Putra (2021) yang dalam penelitiannya menemukan bahwa penerapan pendekatan inkuiri pada mata pelajaran IPA mampu membangun karakter peserta didik secara holistik, tidak hanya meningkatkan kompetensi kognitif tetapi juga membentuk disposisi ilmiah yang positif (Putra, 2021, dikutip dalam Sholihah, 2023).

2. Sains sebagai Produk

Dimensi kedua dari hakikat IPA adalah sains sebagai produk yakni kumpulan pengetahuan yang telah dihasilkan melalui proses ilmiah dan diterima sebagai penjelasan terbaik yang tersedia saat ini untuk berbagai fenomena alam. Produk sains mencakup empat kategori utama yang saling berhubungan dalam hierarki kompleksitas dan generalisasi yang meningkat: fakta, konsep, prinsip dan hukum, serta teori ilmiah.

Fakta ilmiah adalah pernyataan tentang pengamatan yang dapat diverifikasi secara berulang oleh pengamat yang berbeda dalam kondisi yang sama. Konsep adalah kategorisasi abstrak yang mengelompokkan fakta-fakta yang memiliki kesamaan karakteristik seperti konsep *ion*, *ekosistem*, atau *inersia*. Prinsip dan hukum adalah generalisasi yang mendeskripsikan pola reguler dalam fenomena alam, seperti Hukum Kekekalan Energi atau Hukum Mendel tentang pewarisan sifat. Yang paling sering disalahpahami, baik oleh siswa maupun oleh masyarakat umum adalah teori ilmiah. Berbeda dengan makna kata 'teori' dalam bahasa sehari-hari yang berarti dugaan atau spekulasi, teori ilmiah adalah penjelasan yang telah teruji secara sangat luas, didukung oleh banyak bukti dari berbagai sumber independen, dan memiliki kemampuan prediktif yang kuat (Osborne, 2022). Teori evolusi, teori sel, teori atom, dan teori relativitas adalah contoh-contoh teori ilmiah yang telah mendapat validasi empiris yang sangat luas selama puluhan hingga ratusan tahun.

Gambar 11.1 Hierarki Produk Sains: dari Fakta menuju Teori Ilmiah



Sumber: Diadaptasi dari Osborne, 2022

3. Sains sebagai Sikap

Dimensi ketiga dari hakikat IPA dan dimensi yang paling sering diabaikan dalam pendidikan sains konvensional adalah sains sebagai sikap atau disposisi. Sikap ilmiah (*scientific attitudes*) adalah sekumpulan nilai, keyakinan, dan kecenderungan perilaku yang memungkinkan sains berfungsi sebagai sistem pengetahuan yang andal dan dapat dipercaya. Berbeda dari pengetahuan faktual yang dapat diajarkan secara langsung, sikap ilmiah berkembang secara bertahap melalui pengalaman melakukan sains secara autentik, melalui penyelidikan nyata, penghadapan dengan ketidakpastian, dan pelatihan dalam mengevaluasi bukti secara kritis (Lederman *et al.*, 2021).

Sikap ilmiah yang paling fundamental mencakup: rasa ingin tahu (*curiosity*), dorongan intrinsik untuk mengajukan pertanyaan dan mencari penjelasan; keterbukaan pikiran (*open-mindedness*), kesediaan untuk mempertimbangkan ide-ide baru dan merevisi keyakinan berdasarkan bukti; skeptisisme sehat (*healthy skepticism*), kemampuan untuk menghargai sekaligus mempertanyakan klaim, termasuk klaim dari otoritas; kejujuran intelektual (*intellectual honesty*), komitmen untuk melaporkan data apa adanya bahkan ketika hasilnya tidak sesuai

dengan harapan; dan kerendahan hati epistemik (*epistemic humility*), pengakuan bahwa pengetahuan ilmiah selalu bersifat tentatif dan dapat direvisi seiring dengan berkembangnya bukti dan metode baru. Nilai-nilai ini bukan hanya penting untuk sains, ia adalah fondasi dari pemikiran kritis yang diperlukan dalam setiap aspek kehidupan demokratis modern.

B. Membangun Jembatan antara Fisika, Kimia, dan Biologi

Pembagian IPA ke dalam tiga disiplin utama seperti Fisika, Kimia, dan Biologi yang mendominasi kurikulum sekolah menengah merupakan warisan dari perkembangan historis sains yang relatif baru. Pada abad ke-17 hingga ke-19, munculnya spesialisasi ilmiah memungkinkan kemajuan yang pesat dalam masing-masing bidang dengan menciptakan komunitas peneliti yang fokus pada fenomena tertentu dengan metode dan alat yang spesifik. Namun, spesialisasi yang berlebihan ini juga menciptakan sekat-sekat artifisial yang terkadang mengaburkan fakta bahwa alam semesta adalah satu kesatuan yang terpadu, di mana fenomena fisika, kimia, dan biologi saling berinteraksi secara mendalam dan tak terpisahkan (Reiss & Shute, 2022).

Perkembangan sains abad ke-20 dan ke-21 justru menunjukkan tren sebaliknya, konvergensi dan integrasi lintas disiplin menjadi sumber inovasi ilmiah yang paling produktif. Biokimia, biofisika, kimia lingkungan, astrofisika, geokimia, dan biologi molekuler adalah contoh-contoh disiplin yang lahir tepat di persimpangan antara disiplin ilmu yang lebih tua. Penemuan struktur DNA oleh Watson dan Crick tidak mungkin terjadi tanpa kontribusi fisika (difraksi sinar-X), kimia (ikatan kovalen dan hidrogen), dan biologi (genetika Mendelian). Pemahaman tentang perubahan iklim memerlukan fisika atmosfer, kimia CO₂ dan gas rumah kaca, biologi ekosistem, dan oseanografi dalam satu kerangka analitik yang terpadu.

1. Landasan Ontologis Interkoneksi Ilmu

Secara filosofis, interkoneksi antara Fisika, Kimia, dan Biologi berakar pada asumsi *naturalisme metodologis* yang menjadi landasan semua sains modern, keyakinan bahwa fenomena alam, betapapun kompleksnya, pada dasarnya dapat dijelaskan melalui prinsip-prinsip

fisik dan kimia yang bekerja menurut hukum-hukum alam yang konsisten. Ini bukan pernyataan metafisik bahwa kehidupan hanyalah proses fisika dan kimia (*reductionism*) semata ini adalah pernyataan metodologis bahwa penjelasan ilmiah tentang fenomena biologis harus konsisten dengan, dan dapat dijelaskan melalui, prinsip-prinsip fisika dan kimia yang berlaku universal (Reiss & Shute, 2022).

Dalam kerangka TPACK yang dikembangkan oleh Mishra dan Koehler (2006) dan dibahas secara ekstensif oleh Pradana et al. (2026) dalam buku *Pedagogi, Konten, dan Teknologi: Teori dan Praktik TPACK dalam Pendidikan*, penguasaan konten (*Content Knowledge*) dalam IPA tidak dapat dipisahkan dari pemahaman tentang hubungan lintas disiplin. Guru IPA yang memiliki *TPACK* yang kuat tidak hanya menguasai konten satu disiplin, tetapi memahami bagaimana konsep-konsep dari berbagai disiplin IPA saling berkaitan dan dapat diintegrasikan dalam pembelajaran yang bermakna. Pradana et al. (2026) menegaskan bahwa "TPACK menciptakan titik temu antara tiga domain pengetahuan guru yang sebelumnya dianggap terpisah", yang sangat relevan untuk memahami pentingnya interkoneksi antar disiplin dalam pengajaran IPA terpadu.

Tabel 11.2 Lima Tema Unifikasi IPA dan Kontribusi dari Setiap Disiplin

Tema Unifikasi	Perspektif Fisika	Perspektif Kimia	Perspektif Biologi
Energi	Energi kinetik, potensial, termal; Hukum Termodinamika I dan II	Energi aktivasi, entalpi reaksi, ikatan kimia sebagai energi tersimpan	ATP sebagai mata uang energi sel; fotosintesis; respirasi seluler
Materi	Massa, momentum, gaya; model atomik; fisis partikel subatom	Unsur, senyawa, campuran; ikatan kimia; tabel periodik	Makromolekul biologis (DNA, protein, karbohidrat, lemak); komposisi sel
Interaksi dan Gaya	Gaya gravitasi, elektromagnetik,	Gaya antarmolekul	Interaksi enzim-substrat;

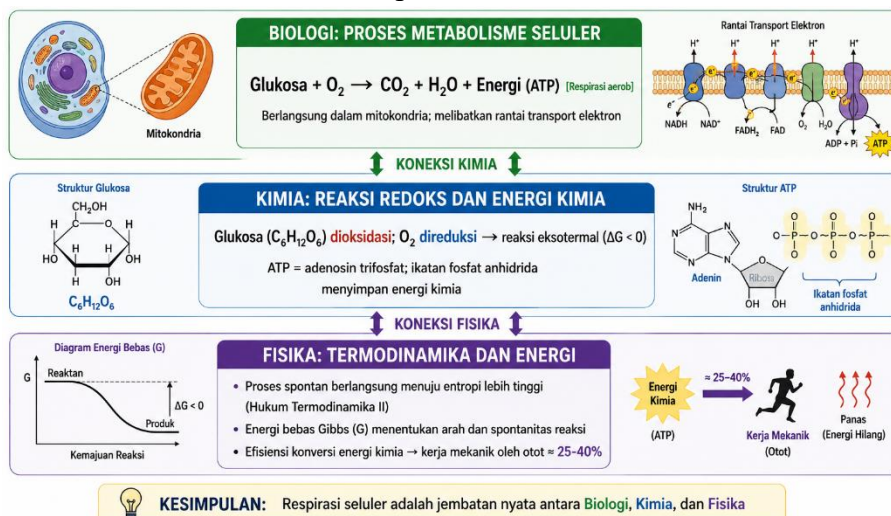
	nuklir; medan gaya	(van der Waals, ikatan H); interaksi ionik	tekanan osmotik; potensial membran sel
Sistem dan Organisasi	Sistem tertutup, terbuka, terisolasi; entropi dan ketidakteraturan	Sistem kesetimbangan kimia; Le Chatelier; buffer biologis	Tingkatan organisasi biologis: sel → jaringan → organ → organisme → ekosistem
Transformasi dan Perubahan	Transformasi energi; perubahan fasa; gelombang dan osilasi	Reaksi kimia; kinetika reaksi; katalis dan enzim	Metabolisme; evolusi dan seleksi alam; siklus biogeokimia

Sumber: Diadaptasi dari Reiss & Shute (2022)

2. Peta Konsep Lintas Disiplin IPA

Untuk memahami interkoneksi antara Fisika, Kimia, dan Biologi secara konkret, peta konsep lintas disiplin (*cross-disciplinary concept mapping*) merupakan alat pedagogis yang sangat efektif. Peta konsep lintas disiplin tidak sekadar mendaftarkan topik-topik dari masing-masing disiplin, tetapi secara eksplisit menggambarkan bagaimana konsep-konsep dari disiplin yang berbeda saling terhubung dan saling menjelaskan. Novak dan Cañas (2021) menunjukkan bahwa pembuatan peta konsep lintas disiplin meningkatkan pemahaman mendalam (*deep understanding*) dan transfer pengetahuan ke konteks baru sebesar 38% dibandingkan dengan pembelajaran disiplin yang terisolasi.

Gambar 11.2 Peta Interkoneksi Tiga Disiplin IPA dalam Proses Respirasi Seluler



Gambar tersebut menunjukkan peta interkoneksi konsep reaksi kimia dalam tubuh makhluk hidup yang mengintegrasikan konsep Biologi, Kimia, dan Fisika dalam menjelaskan proses respirasi seluler. Dari sisi biologi, respirasi berlangsung di mitokondria dengan mengubah glukosa dan oksigen menjadi karbon dioksida, air, dan energi dalam bentuk ATP. Dari sisi kimia, proses tersebut merupakan reaksi redoks, yaitu glukosa mengalami oksidasi dan oksigen mengalami reduksi sehingga melepaskan energi yang disimpan dalam ikatan fosfat ATP. Sementara itu, dari sisi fisika, pelepasan energi dijelaskan melalui prinsip termodinamika, di mana reaksi berlangsung secara spontan menuju keadaan berenergi bebas lebih rendah dan hanya sekitar 25–40% energi kimia yang berhasil dikonversi menjadi kerja mekanik, sedangkan sisanya dilepaskan sebagai panas. Dengan demikian, gambar ini menegaskan bahwa respirasi seluler merupakan contoh nyata keterpaduan konsep lintas disiplin yang menghubungkan biologi, kimia, dan fisika dalam menjelaskan fenomena kehidupan secara utuh.

3. Tema-tema Unifikasi dalam IPA

Selain tema energi, materi, dan sistem yang telah dibahas sebelumnya, terdapat beberapa tema unifikasi lain yang secara khusus relevan untuk pendidikan IPA di sekolah menengah Indonesia. Salah satu yang paling kuat adalah tema skala dan pengukuran, bagaimana kita mengukur dan memahami fenomena yang beroperasi pada rentang skala yang sangat luas, dari skala subatomik (10^{-15} meter) hingga skala kosmik (10^{26} meter). Tema skala ini menghubungkan fisika partikel dengan kimia molekuler dan biologi sel dalam satu kontinum pemahaman tentang bagaimana sifat-sifat materi pada berbagai skala berinteraksi, menghasilkan fenomena yang diamati dalam kehidupan sehari-hari.

Tema unifikasi kedua yang sangat kuat adalah umpan balik dan regulasi (*feedback and regulation*). Mekanisme umpan balik, baik positif maupun negatif merupakan prinsip pengorganisasian yang berlaku di semua tingkat sistem alam: dari regulasi hormonal dalam tubuh manusia (biologi), hingga kesetimbangan kimia dinamis (kimia), hingga sirkuit elektronik pengatur stabilitas (fisika). Pemahaman tentang umpan balik dan regulasi adalah salah satu konsep lintas disiplin yang paling berguna untuk memahami bagaimana sistem-sistem alami dan buatan manusia menjaga stabilitas dalam menghadapi gangguan eksternal.

4. Literasi Sains dan Hubungannya dengan Interkoneksi Ilmu

Pemahaman tentang interkoneksi antar disiplin IPA memiliki hubungan yang mendalam dan fundamental dengan pencapaian literasi sains yang komprehensif. Sholihah (2023) menegaskan dalam kajian literaturnya bahwa literasi sains dalam kerangka PISA bukan hanya tentang pengetahuan konten dari satu disiplin, tetapi mencakup kemampuan untuk menggunakan pengetahuan saintifik dalam berbagai konteks yang seringkali bersifat lintas disiplin. Sholihah (2023) mengutip Senturk dan Sari (2018) yang menggambarkan literasi sains sebagai sesuatu yang akrab dengan dunia nyata serta mengalami keragaman, memahami berbagai konsep dan prinsip sains, menyadari beberapa hubungan penting yang menghubungkan sains, matematika, dan teknologi. Definisi ini menempatkan pemahaman tentang hubungan antar disiplin sebagai elemen integral dari literasi sains.

Lebih jauh, Sholihah (2023) juga menekankan relevansi literasi sains untuk kehidupan sosial dan pengambilan keputusan, dengan

mengutip Chen dan Osman (2017), literasi sains bisa memberikan pembelajaran bagi warga guna memutuskan beberapa hal di lingkungan sosial dengan memberikan evaluasi terhadap pengetahuan sains. Keputusan-keputusan nyata yang dihadapi warga negara dalam kehidupan sehari-hari, dari memilih pola makan yang sehat, mengevaluasi klaim tentang obat atau suplemen, hingga memahami implikasi kebijakan energi, hampir selalu memerlukan pemahaman yang mengintegrasikan konsep dari berbagai disiplin IPA sekaligus. Inilah mengapa interkoneksi ilmu bukan sekadar persoalan akademis, melainkan kecakapan hidup yang esensial.



BAB XII

ETNOSAINS: MENEMUKAN SAINS DALAM KEARIFAN LOKAL

A. Rekonstruksi Sains Asli (*Indigenous Science*) menjadi Sains Ilmiah

Proses rekonstruksi sains asli menjadi sains ilmiah adalah jantung dari etnosains sebagai pendekatan pendidikan. Rekonstruksi ini bukan berarti mereduksi atau "mengoreksi" pengetahuan tradisional agar sesuai dengan sains Barat, ia adalah proses dialog yang menghormati kedua bentuk pengetahuan sambil mengidentifikasi titik-titik pertemuan dan konvergensi yang dapat memperkaya pemahaman siswa tentang keduanya. Sudarmin *et al.* (2021) mengidentifikasi empat tahap dalam proses rekonstruksi ini:

1. Identifikasi dan Etnografi Pengetahuan Lokal

Tahap pertama melibatkan dokumentasi sistematis dari pengetahuan lokal melalui etnografi, wawancara mendalam dengan tetua masyarakat, pengamatan partisipatif terhadap praktik tradisional, dan analisis artefak budaya yang terkait dengan pemahaman tentang alam. Metodologi ini membutuhkan sensitivitas budaya yang tinggi dan penghormatan terhadap pemegang pengetahuan tradisional.

2. Analisis Konten Ilmiah

Setelah pengetahuan lokal berhasil didokumentasikan, tahap kedua adalah menganalisis konten ilmiah yang terkandung di dalamnya, mengidentifikasi konsep-konsep sains formal yang tercermin dalam praktik dan pengetahuan tradisional, meskipun diekspresikan dalam bahasa dan kerangka konseptual yang berbeda.

3. Pemetaan Paralel Konseptual

Tahap ketiga adalah membuat peta yang menghubungkan konsep-konsep dalam pengetahuan lokal dengan konsep-konsep dalam

sains formal, menunjukkan di mana keduanya konvergen, di mana keduanya menggunakan pendekatan yang berbeda untuk fenomena yang sama, dan di mana pengetahuan lokal mungkin menawarkan perspektif yang melengkapi atau bahkan memperluas pemahaman yang disediakan oleh sains formal.

4. Integrasi dalam Pembelajaran

Tahap keempat adalah merancang pengalaman pembelajaran yang menggunakan pengetahuan lokal sebagai *entry point* (titik masuk) yang bermakna dan kontekstual untuk memperkenalkan konsep-konsep sains formal yang lebih abstrak, sambil secara eksplisit menghormati dan merayakan nilai dari pengetahuan lokal itu sendiri.

B. Studi Kasus 1: Proses Pembuatan Tempe (Biologi)

Tempe merupakan salah satu warisan kuliner dan bioteknologi Indonesia yang paling ikonik dan paling kaya muatan sains. Makanan fermentasi berbahan kedelai ini telah diproduksi oleh masyarakat Jawa selama setidaknya 800 tahun, jauh sebelum konsep bakteri, kapang, atau enzim dikenal dalam sains Barat. Proses pembuatan tempe yang dilakukan secara tradisional oleh para pengrajin tempe dari perendaman kedelai, perebusan, penirisan, inokulasi dengan ragi (*usar*), hingga fermentasi selama 24-48 jam pada suhu kamar, sesungguhnya merupakan implementasi yang sangat canggih dari prinsip-prinsip biokimia, mikrobiologi, dan teknologi pangan, yang telah dioptimalkan selama berabad-abad melalui eksperimentasi empiris yang tidak tertulis namun sangat sistematis.

Dari perspektif biologi molekuler dan mikrobiologi, pembuatan tempe melibatkan pertumbuhan kapang *Rhizopus oligosporus* (dan beberapa spesies *Rhizopus* lainnya) pada substrat kedelai yang telah mengalami dehulling dan gelatinisasi. Kapang ini mengeluarkan sejumlah besar enzim ekstraseluler termasuk protease, lipase, dan amilase yang memecah makromolekul kompleks dalam kedelai menjadi senyawa yang lebih sederhana: protein menjadi peptida dan asam amino, lemak menjadi asam lemak dan gliserol, dan karbohidrat kompleks menjadi gula yang lebih sederhana. Proses hidrolisis enzimatik ini tidak hanya mengubah tekstur dan rasa kedelai secara dramatis, tetapi juga

meningkatkan bioavailabilitas nutrisi secara signifikan menjadikan tempe jauh lebih mudah dicerna dan lebih tinggi nilai gizinya dibandingkan kedelai mentah atau rebus (Nout & Kiers, 2021).

Tabel 12.1 Rekonstruksi Sains Ilmiah dari Setiap Tahap Pembuatan Tempe Tradisional

Tahap Tradisional	Praktik Tradisional	Penjelasan Sains Ilmiah	Konsep IPA yang Terkait
Perendaman Kedelai (8-12 jam)	Kedelai direndam dalam air pada suhu kamar selama semalam	Hidrasi benih mengaktifkan enzim endogen; pH turun karena fermentasi LAB alami (asidifikasi awal yang menghambat pertumbuhan patogen)	Osmosis, aktivitas enzim, fermentasi laktat, pH dan keasaman
Perebusan (20-30 menit)	Kedelai direbus hingga lunak	Denaturasi protein dan gelatinisasi pati mempermudah penetrasi hifa kapang; patogen dihancurkan oleh panas	Denaturasi protein, gelatinisasi pati, sterilisasi termal
Penirisan dan Pendinginan	Kedelai ditiriskan dan dibiarkan dingin hingga suhu hangat	Pengurangan kadar air ke tingkat optimal; suhu diturunkan ke kisaran optimal pertumbuhan <i>Rhizopus</i> (25-35°C)	Aw (aktivitas air), kinetika pertumbuhan kapang, termoregulasi
Inokulasi dengan Usar/Ragi	Bubuk usar (dari tempe tua atau bungkus pisang) ditaburkan dan	Spora <i>Rhizopus oligosporus</i> diintroduksi; distribusi merata memastikan	Inokulum, spora kapang, distribusi populasi mikroba

Tahap Tradisional	Praktik Tradisional	Penjelasan Sains Ilmiah	Konsep IPA yang Terkait
	dicampur merata	pertumbuhan yang homogen	
Fermentasi (24-48 jam pada suhu kamar)	Bungkus daun pisang atau plastik berlubang, diamkan 1-2 hari	Hifa <i>Rhizopus</i> tumbuh, menghasilkan panas metabolik; lubang pada pembungkus menyediakan O ₂ dan membuang CO ₂ ; pH naik dari 4 ke 6-7	Pertumbuhan kapang, respirasi aerob, difusi gas, termoregulasi, pH

Sumber: Diadaptasi dari Nout & Kiers, 2021

1. Nilai Gizi Tempe: Transformasi Biokimia melalui Fermentasi

Salah satu aspek paling menakjubkan dari pembuatan tempe dan yang paling kaya dari perspektif biokimia adalah transformasi profil gizi kedelai yang dramatis selama proses fermentasi. Kedelai mentah mengandung berbagai faktor antinutrisi termasuk inhibitor tripsin (yang menghambat pencernaan protein), fitat (yang mengikat mineral seperti zat besi dan seng sehingga mengurangi bioavailabilitasnya), dan oligosakarida raffinosa dan stakhyosa (yang tidak dapat dicerna oleh usus manusia dan menyebabkan flatulensi). Fermentasi oleh *Rhizopus* secara efektif menghancurkan atau mengurangi semua faktor antinutrisi ini, sekaligus meningkatkan kandungan vitamin B12, riboflavin, dan berbagai metabolit bioaktif lainnya. Hasilnya adalah produk yang tidak hanya lebih mudah dicerna, tetapi juga lebih bergizi dan lebih sehat dibandingkan kedelai mentah atau bahkan tahu (Nout & Kiers, 2021).

Dari perspektif etnosains, pengetahuan tradisional tentang pembuatan tempe menunjukkan tingkat pemahaman empiris yang sangat tinggi tentang fermentasi yang optimal, meskipun para pengrajin tradisional tidak menggunakan terminologi seperti *Rhizopus oligosporus*, *protease*, atau *inhibitor tripsin*. Mereka mengetahui dari pengalaman generasi bahwa suhu yang terlalu tinggi akan menghasilkan tempe yang busuk (karena pertumbuhan bakteri patogen mengalahkan kapang), bahwa kelembaban yang tidak tepat akan menghasilkan tempe

yang kering dan tidak kompak, dan bahwa kualitas ragi sangat menentukan konsistensi produk akhir, semua pengetahuan yang konsisten dengan pemahaman sains modern tentang fermentasi kapang, meskipun direpresentasikan dalam kerangka konseptual yang berbeda.

2. Implikasi Pedagogis: Tempe sebagai Laboratorium Biologi Hidup

Pembuatan tempe di kelas menawarkan pengalaman laboratorium biologi yang autentik, murah, aman, dan sangat kaya konsep untuk siswa SMP dan SMA. Tidak seperti eksperimen laboratorium konvensional yang sering menggunakan bahan kimia berbahaya dan peralatan mahal yang hanya tersedia di sekolah-sekolah dengan fasilitas lengkap, eksperimen tempe dapat dilakukan dengan bahan-bahan yang tersedia di warung terdekat dan peralatan dapur sederhana. Ini sangat relevan untuk mayoritas sekolah di Indonesia, termasuk di daerah pedesaan dan terpencil.

Proyek tempe yang dirancang dengan baik dapat mencakup konsep-konsep biologi yang sangat luas: pertumbuhan dan reproduksi kapang (mengamati perkembangan hifa secara langsung), enzim dan katalis biologis (mengukur perubahan pH dan konsistensi sebagai proxy aktivitas enzim), nutrisi dan metabolisme (membandingkan kandungan gizi kedelai sebelum dan sesudah fermentasi), serta teknologi pangan dan bioteknologi tradisional. Dengan menempatkan semua konsep ini dalam konteks produk budaya yang akrab dan bermakna bagi siswa, pembelajaran memperoleh relevansi dan motivasi intrinsik yang tidak mungkin dicapai oleh pendekatan konvensional yang mengajarkan konsep-konsep ini secara abstrak dan terisolasi dari konteks.

C. Studi Kasus 2: Mitigasi Bencana Tradisional (Fisika)

Indonesia adalah negara yang terletak di "cincin api" (*Ring of Fire*) zona tektonik paling aktif di planet ini, sehingga mengalami frekuensi gempa bumi, letusan gunung berapi, dan tsunami yang jauh di atas rata-rata global. Fakta geografis ini telah memaksa masyarakat-masyarakat Indonesia selama ribuan tahun untuk mengembangkan sistem pengetahuan lokal yang sangat canggih tentang tanda-tanda alam,

prediksi bencana, dan strategi mitigasi yang memungkinkan mereka untuk bertahan hidup di lingkungan yang penuh risiko ini. Pengetahuan lokal tentang mitigasi bencana ini yang kini semakin mendapat perhatian dari para ilmuwan dan praktisi kebencanaan internasional merupakan representasi dari prinsip-prinsip fisika yang terobservasi dan diaplikasikan selama berabad-abad oleh masyarakat yang bergantung langsung pada keberhasilan prediksi dan respons mereka terhadap bencana alam.

1. Sasi dan Pengetahuan Lokal Masyarakat Maluku dan Papua tentang Pasang Surut

Sistem *sasi* yang dipraktikkan oleh masyarakat adat Maluku dan Papua adalah salah satu contoh paling mengesankan dari pengetahuan lokal tentang dinamika laut yang secara implisit mencerminkan pemahaman mendalam tentang fisika oseanografi. Sasi adalah sistem pengelolaan sumber daya laut berbasis kearifan lokal yang menetapkan periode tertentu di mana pengambilan hasil laut dilarang, dan periode lain di mana pemanenan diizinkan. Penentuan waktu sasi yang dilakukan oleh tetua adat berdasarkan pengamatan terhadap siklus bulan, pola arus, dan perilaku satwa laut, secara tidak langsung mencerminkan pengetahuan tentang hubungan antara gravitasi bulan, pasang surut, dan produktivitas ekosistem laut.

Dari perspektif fisika, sistem *sasi* menerapkan pemahaman tentang: siklus pasang surut yang dipengaruhi oleh gravitasi bulan dan matahari (gaya gravitasi, gaya sentrifugal, gelombang pasang); pola arus laut yang dipengaruhi oleh angin musiman (Hukum Newton, dinamika fluida); dan strategi pemanenan berkelanjutan yang secara tidak langsung mengimplementasikan prinsip-prinsip populasi dinamis. Pengetahuan ini, yang dikodifikasikan dalam tradisi adat dan diperkuat oleh sanksi sosial dan spiritual, terbukti efektif dalam menjaga keberlanjutan sumber daya laut selama berabad-abad, sesuatu yang justru gagal dicapai oleh banyak sistem pengelolaan perikanan modern berbasis pendekatan *top-down*.

2. Smong: Pengetahuan Lokal Simeulue tentang Tsunami

Salah satu contoh paling dramatis dan paling terkenal dari pengetahuan lokal sebagai sistem mitigasi bencana adalah tradisi *smong* dari masyarakat Simeulue, sebuah pulau kecil di barat Aceh. Pada saat tsunami besar melanda Aceh pada 26 Desember 2004, salah satu bencana alam paling mematikan dalam sejarah modern yang menewaskan lebih dari 220.000 orang, pulau Simeulue yang sangat dekat dengan episentrum gempa hanya kehilangan tujuh orang dari populasi 75.000 jiwa. Keajaiban ini bukan kebetulan: masyarakat Simeulue memiliki tradisi lisan yang disebut *smong* yang secara akurat mendeskripsikan tanda-tanda yang mendahului tsunami, gempa bumi yang kuat, diikuti oleh air laut yang surut dengan cepat, yang merupakan pertanda datangnya gelombang raksasa. Ketika tanda-tanda ini muncul pada 2004, nyaris seluruh penduduk Simeulue langsung berlari ke bukit-bukit tanpa perlu menunggu peringatan resmi (McAdoo *et al.*, 2021).

Dari perspektif fisika, tradisi *smong* menangkap dengan sangat akurat mekanisme fisika pembentukan tsunami: gempa bumi di dasar laut menyebabkan pergeseran lempeng tektonik yang menghasilkan deformasi kolom air secara vertikal; energi ini merambat sebagai gelombang panjang dengan kecepatan hingga 800 km/jam di laut dalam; mendekati pantai, kecepatan gelombang berkurang tetapi amplitudonya meningkat drastis (efek shoaling); dan sebelum gelombang besar tiba, air laut di pantai sering kali surut secara mendadak karena trough gelombang tiba lebih dahulu daripada puncaknya (*drawback phenomenon*). Semua mekanisme fisika ini yang membutuhkan pemahaman tentang mekanika gelombang, perambatan energi, dan hidrodinamika, dikodekan dalam memori kolektif masyarakat Simeulue melalui nyanyian dan cerita yang diceritakan dari generasi ke generasi.

Tabel 12.2 Pengetahuan Lokal Mitigasi Bencana dan Rekonstruksi Sains Fisika yang Terkandung di Dalamnya

Pengetahuan Lokal Mitigasi Bencana	Tanda Alam yang Diamati Secara Empiris	Penjelasan Fisika Ilmiah
Smong (Simeulue, Aceh): Peringatan Tsunami	Gempa kuat + air laut surut mendadak = tanda tsunami akan	Pergeseran lempeng → perambatan gelombang seismik → deformasi kolom air → drawback

Pengetahuan Lokal Mitigasi Bencana	Tanda Alam yang Diamati Secara Empiris	Penjelasan Fisika Ilmiah
	datang; lari ke bukit	phenomenon → tsunami: prinsip mekanika gelombang dan hidrodinamika
Sasi (Maluku): Manajemen Laut	Larangan panen pada periode bulan tertentu berdasarkan siklus reproduksi satwa laut dan pola arus musiman	Gravitasi bulan → pasang surut → pengaruh terhadap pola arus dan produktivitas laut; prinsip gravitasi universal Newton dan fisika oseanografi
Rumah Panggung Tradisional (Kalimantan, Papua): Mitigasi Banjir	Rumah dibangun di atas tiang kayu setinggi 1-3 meter di daerah rawan banjir dan pasang surut	Tekanan hidrostatik, gaya apung Archimedes; distribusi beban melalui tiang; desain yang merespons dinamika air: prinsip mekanika fluida dan statis bangunan
Subak (Bali): Sistem Irigasi	Sistem pembagian air sawah berbasis kuil dan komunitas yang mengontrol aliran air secara sangat tepat di medan yang berlereng	Gaya gravitasi, tekanan hidrostatik, aliran fluida dalam pipa terbuka; pengelolaan energi potensial air: prinsip hidrolis dan mekanika fluida
Rumah Honai (Suku Dani): Mitigasi Angin Kencang/Badai	Terpaan angin kencang (badai) di daerah pegunungan	Bentuk atap Honai yang menyerupai bentuk mansard menciptakan sistem aerodinamis yang mengurangi gaya hambat angin, sehingga bangunan stabil terhadap angin kencang

3. Arsitektur Tradisional sebagai Aplikasi Fisika Struktural

Selain pengetahuan tentang bencana alam, kearifan lokal Indonesia juga mengandung pengetahuan fisika yang sangat canggih tentang konstruksi dan arsitektur. Rumah adat Jawa (*joglo*), rumah adat

Batak (*ruma bolon*), dan rumah adat Minangkabau (*Rumah Gadang*) semuanya menunjukkan solusi-solusi arsitektur yang telah dioptimalkan selama berabad-abad untuk merespons kondisi iklim, geologis, dan sosial lokal. Sistem atap *joglo* dengan konstruksi rangka yang rumit mendemonstrasikan pemahaman yang sangat maju tentang distribusi beban, gaya tekan dan tarik, serta kestabilan struktural, prinsip-prinsip yang menjadi fondasi ilmu teknik sipil modern. Yang sangat luar biasa, semua desain ini dicapai melalui proses empiris dan estetis selama berabad-abad, tanpa kalkulus struktural formal atau komputer.

D. Studi Kasus 3: Pewarna Alami Tekstil (Kimia)

Indonesia memiliki tradisi tekstil yang sangat kaya dan beragam, dengan setiap daerah mengembangkan teknik pewarnaan yang unik menggunakan bahan-bahan alami yang tersedia di lingkungan lokalnya. Batik Jawa, tenun ikat Nusa Tenggara, songket Melayu, dan kain ulos Batak semuanya menggunakan sistem pewarnaan berbasis tanaman dan mineral yang ketika dianalisis dari perspektif kimia modern menunjukkan pemahaman empiris yang sangat canggih tentang kimia pigmen, mordanting, dan reaksi kimia antara pewarna, serat tekstil, dan agen fiksasi.

Proses pewarnaan tekstil tradisional Indonesia pada dasarnya adalah serangkaian reaksi kimia yang kompleks dan terkoordinasi dengan sangat cermat. Pewarnaan dengan indigo (*Indigofera tinctoria*), yang digunakan secara luas dalam pembuatan batik tradisional Jawa, melibatkan rangkaian transformasi kimia yang fasciasi: indigo dalam bentuk alamnya tidak larut dalam air dan tidak dapat mewarnai serat tekstil secara langsung. Proses fermentasi dalam wadah pewarna (*gentong*) mengubah indigo yang tidak larut (*indigotin*) menjadi leucoindigo yang larut dalam air melalui proses reduksi, di mana bakteri yang secara alami hadir dalam larutan fermentasi bertindak sebagai agen pereduksi. Serat tekstil kemudian direndam dalam larutan leucoindigo dan terserap ke dalam serat; ketika tekstil diangkat dan terpapar udara, leucoindigo teroksidasi kembali menjadi indigotin yang tidak larut, sehingga terjebak di dalam serat dan menghasilkan warna biru yang sangat tahan lama (Cristea & Vilarem, 2021).

Tabel 12.3 Rekonstruksi Kimia Modern dari Proses Pewarnaan Tekstil Tradisional Indonesia

Pewarna Alami	Sumber Tanaman	Proses Kimia Tradisional	Kimia Modern yang Terkandung
Indigo (Biru)	<i>Indigofera tinctoria</i> (tarum)	Fermentasi dalam gentong + pencelupan berulang + oksidasi udara	Reaksi redoks (<i>indigotin</i> $\leftrightarrow$ <i>leucoindigo</i>); fermentasi bakteri; oksidasi oleh O ₂ atmosferik
Merah (Soga)	<i>Caesalpinia sappan</i> (kayu sogas/secang)	Perebusan kayu secang + penambahan kapur (mordant) untuk penguncian warna	Ekstraksi senyawa brazilin; reaksi mordanting dengan Ca(OH) ₂ ; pembentukan kompleks metal-pewarna
Kuning (Kunyit)	<i>Curcuma longa</i> (kunyit)	Ekstrak kunyit segar/kering digunakan langsung atau dengan fiksator tawas	Senyawa kurkumin; koordinasi dengan ion Al ³⁺ dari tawas (fiksasi mordanting); pH-sensitif (kuning di asam, merah di basa)
Coklat-Hitam (Gambir)	<i>Uncaria gambir</i> (tanaman gambir)	Rendaman gambir + proses pengoksidaan alami menghasilkan warna coklat-hitam yang permanen	Katekin dan tanin; polimerisasi oksidatif; reaksi tanin dengan protein serat tekstil (fiksasi kimia)

Sumber: Cristea & Vilarem (2021)

1. Mordanting: Teknokimia Tradisional yang Canggih

Salah satu aspek paling mengesankan dari pengetahuan kimia yang terkandung dalam tradisi pewarnaan tekstil Indonesia adalah

praktik *mordanting*, penggunaan zat-zat fiksasi (*mordant*) yang berfungsi sebagai jembatan kimia antara pewarna dan serat tekstil, sehingga menghasilkan warna yang lebih kuat, lebih cerah, dan lebih tahan lama. Para pengrajin batik dan tenun tradisional telah mengidentifikasi secara empiris berbagai bahan alami yang efektif sebagai mordant, termasuk tawas (alum, $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), kapur ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), air rendaman pisang (mengandung ion kalium dan kalsium), ekstrak kulit kayu tertentu (mengandung tanin yang bertindak sebagai mordant alami), dan bahkan lumpur atau tanah tertentu yang kaya akan ion logam.

Dari perspektif kimia koordinasi, mordanting bekerja melalui pembentukan kompleks koordinasi antara ion logam dari mordant (seperti Al^{3+} , $\text{Fe}^{2+/3+}$, atau Cu^{2+}), gugus kromofor dari molekul pewarna, dan gugus fungsional dari serat tekstil (seperti gugus amino dari sutra atau wol, atau gugus hidroksil dari selulosa). Kompleks tiga komponen ini (serat-mordant-pewarna) jauh lebih stabil daripada interaksi langsung antara pewarna dan serat, sehingga warna yang dihasilkan jauh lebih tahan terhadap pencucian dan paparan sinar matahari. Pengetahuan empiris tentang mordanting yang dimiliki oleh para pengrajin tradisional Indonesia mencerminkan pemahaman yang sangat mendalam tentang interaksi kimia, meskipun tanpa pernah mengetahui konsep-konsep seperti ion logam, kompleks koordinasi, atau ikatan kimia dalam terminologi formal (Cristea & Vilarem, 2021).

E. Peran Etnosains dalam Melestarikan Budaya melalui Pendidikan

Etnosains dalam pendidikan bukan hanya tentang mengajarkan sains yang lebih relevan dan kontekstual, ia adalah tentang menjaga kelangsungan hidup sistem pengetahuan yang merupakan warisan budaya yang tak ternilai dan yang tidak dapat direplikasi setelah punah. Banyak sistem pengetahuan lokal di Indonesia saat ini berada dalam kondisi yang sangat rentan: para pemegang pengetahuan tradisional, tetua masyarakat yang merupakan ensiklopedia hidup dari pengetahuan ekologis, medis, dan teknologis yang terakumulasi selama berabad-abad semakin langka, sementara generasi muda yang tumbuh dalam konteks modernitas global semakin terputus dari tradisi dan pengetahuan leluhur.

Riset Tiro (2025) tentang revitalisasi ekosistem hutan sagu Papua secara eksplisit memposisikan pendidikan sebagai instrumen pelestarian budaya sekaligus pelestarian lingkungan. Program PPPL-REHS yang dikembangkan Tiro (2025) menunjukkan bahwa ketika mahasiswa terlibat secara langsung dengan pengetahuan lokal tentang sagu melalui pengamatan lapangan, wawancara dengan masyarakat adat, dan praktik pengolahan sagu tradisional, mereka tidak hanya belajar sains, tetapi juga mengembangkan pemahaman dan penghargaan yang mendalam terhadap kearifan lokal yang menjadi fondasi keberlanjutan ekosistem tersebut. Pengalaman ini mengembangkan apa yang Tiro (2025) sebut sebagai *Key Competencies for Sustainability*, kompetensi-kompetensi yang memungkinkan generasi muda untuk berkontribusi pada pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs) tanpa harus meninggalkan akar budaya mereka.

1. Identitas Budaya sebagai Modal Belajar Sains

Salah satu kontribusi teoritis terpenting dari etnosains dalam pendidikan adalah pengakuannya terhadap identitas budaya siswa sebagai modal yang dapat dan seharusnya dimanfaatkan dalam proses belajar sains bukan sebagai hambatan yang harus diatasi atau sebagai sesuatu yang harus ditinggalkan di pintu kelas sebelum belajar sains "yang sesungguhnya". Medin dan Bang (2020) dalam *Science in the Forest, Science in the Past* mengargumentasikan bahwa pendekatan pendidikan sains yang mengabaikan atau mendiskreditkan pengetahuan dan identitas budaya siswa bukan hanya tidak efektif secara pedagogis, ia juga secara aktif berkontribusi pada alienasi siswa dari sains dan dari komunitas ilmiah, yang pada gilirannya menjelaskan mengapa representasi kelompok-kelompok budaya minoritas dalam profesi-profesi sains dan teknologi tetap sangat rendah meskipun telah ada berbagai program intervensi selama puluhan tahun.

Penelitian yang dilakukan oleh Aikenhead dan Michell (2020) di Kanada dengan komunitas-komunitas pribumi menunjukkan bahwa ketika kurikulum sains diintegrasikan dengan pengetahuan lokal masyarakat adat, motivasi belajar sains di kalangan siswa dari komunitas tersebut meningkat secara dramatis, tingkat putus sekolah menurun, dan persentase siswa yang melanjutkan ke pendidikan tinggi di bidang sains dan teknologi meningkat signifikan. Ini adalah bukti empiris yang kuat

bahwa etnosains bukan sekadar isu ideologis tentang keadilan representasi, ia adalah strategi pedagogis yang terbukti efektif dalam meningkatkan partisipasi dan prestasi sains yang lebih inklusif.

2. Etnosains dan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs)

Keterkaitan antara etnosains dan *Sustainable Development Goals* (SDGs) bukan sekadar simbolis, ia bersifat substansial dan mendalam. Pengetahuan lokal, terutama dalam dimensi ekologisnya, sering kali mengandung strategi-strategi pengelolaan sumber daya alam yang sangat berkelanjutan, strategi yang berkembang bukan dari prinsip-prinsip abstrak keberlanjutan, tetapi dari pengalaman langsung selama ribuan tahun dengan konsekuensi nyata dari eksploitasi berlebihan. Sistem *sasi* di Maluku, sistem *subak* di Bali, dan sistem pengelolaan hutan sagu di Papua yang didokumentasikan oleh Tiro (2025) semuanya merupakan implementasi nyata dari prinsip-prinsip keberlanjutan jauh sebelum konsep tersebut dikodifikasikan dalam agenda SDGs PBB.

Tabel 12.4 Keterkaitan Etnosains dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs) dalam Konteks Pendidikan IPA Indonesia

SDG yang Relevan	Pengetahuan Lokal yang Terkait	Implikasi Pedagogis Etnosains
SDG 2: <i>Zero Hunger</i> (Tanpa Kelaparan)	Pengetahuan tentang diversifikasi pangan lokal: sagu, ulat sagu, dan berbagai produk olahannya (Tiro, 2025)	Siswa mengeksplorasi kandungan gizi pangan lokal, bioteknologi pangan tradisional, dan strategi ketahanan pangan berbasis kearifan lokal
SDG 15: <i>Life on Land</i> (Ekosistem Darat)	Sistem pengelolaan hutan sagu berbasis masyarakat yang memastikan regenerasi ekosistem (Tiro, 2025)	Studi ekosistem menggunakan hutan lokal sebagai laboratorium alam; pemodelan rantai makanan berbasis data lapangan
SDG 13: <i>Climate Action</i> (Aksi Iklim)	Pengetahuan lokal tentang tanda-tanda perubahan musim, bencana alam, dan	Mengintegrasikan indikator perubahan iklim lokal dengan data ilmiah global;

	adaptasi lingkungan (smong, sasi)	memahami peran ekosistem sebagai penyerap karbon
SDG 4: <i>Quality Education</i> (Pendidikan Berkualitas)	Etnosains sebagai jembatan antara pengetahuan lokal dan sains ilmiah yang meningkatkan relevansi dan partisipasi (Aikenhead & Michell, 2020)	Kurikulum IPA yang inklusif budaya meningkatkan motivasi, partisipasi, dan prestasi siswa dari berbagai latar belakang budaya



DAFTAR PUSTAKA

- Abd-El-Khalick, F. (2020). Teaching with and about nature of science, and science teacher knowledge domains. *Science & Education*, 29(4), 1057–1073. <https://doi.org/10.1007/s11191-020-00136-6>
- Agol, E., Dorn, C., Grimm, S. L., Turbet, M., Ducrot, E., Delrez, L., ... & Grootel, V. V. (2021). Refining the transit-timing and photometric analysis of TRAPPIST-1: masses, radii, densities, dynamics, and ephemerides. *The planetary science journal*, 2(1), 1.
- Aikenhead, G. S., & Michell, H. (2020). *Bridging Cultures: Indigenous and Scientific Ways of Knowing Nature*. Pearson Education Canada.
- Al-Kauniyah: Jurnal Biologi. (2017). Tanaman Genetically Modified Organism (GMO) dan perspektif hukumnya di Indonesia. <https://journal.uinjkt.ac.id/kauniyah/article/view/5264>
- Amine, I. M., Salsabil, H., Fadil, B., Adnane, B., & Khaoula, E. (2025). The impact of ncRNAs on type 2 diabetes: A comprehensive review covering molecular mechanisms to clinical applications. *Molecular Therapy Nucleic Acids*.
- Andrews, J. P., Joshi, S. S., Tzolos, E., Syed, M. B., Cuthbert, H., Crica, L. E., ... & Miller, M. R. (2024). First-in-human controlled inhalation of thin graphene oxide nanosheets to study acute cardiorespiratory responses. *Nature Nanotechnology*, 19(5), 705-714.
- Armstrong McKay, D. I. (2024). Two decades of climate tipping points research: Progress and outlook. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/29768659241293272>
- Armstrong McKay, D. I., Staal, A., Abrams, J. F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S., ... & Lenton, T. M. (2022). Exceeding 1.5° C global warming could trigger multiple climate tipping points.
- Auta, A., Hadi, M. A., Oga, E., Adewuyi, E. O., Abdu-Aguye, S. N., Adeloye, D., ... & Morgan, D. J. (2019). Global access to

- antibiotics without prescription in community pharmacies: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Infection*, 78(1), 8-18.
- Ayoib, A. (2024). Hybrid nanomaterials in biosensors for advanced point-of-care diagnostics: DNA-, enzyme-, or immunosensor-based, for healthcare. In *Hybrid-nanomaterials: Fabrication, characterization and applications* (pp. 123-153). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Baden, L. R., El Sahly, H. M., Essink, B., Kotloff, K., Frey, S., Novak, R., ... & Zaks, T. (2021). Efficacy and safety of the mRNA-1273 SARS-CoV-2 vaccine. *New England journal of medicine*, 384(5), 403-416.
- Baker, R. S., & Hawn, A. (2022). Algorithmic bias in education. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 32(4), 1052–1092. <https://doi.org/10.1007/s40593-021-00285-9>
- Baltimore, D., Berg, P., Botchan, M., Carroll, D., Charo, R. A., Church, G., ... & Yamamoto, K. R. (2015). A prudent path forward for genomic engineering and germline gene modification. *Science*, 348(6230), 36-38.
- Barenholz, Y. C. (2012). Doxil®—The first FDA-approved nano-drug: Lessons learned. *Journal of controlled release*, 160(2), 117-134.
- Barrantes-Salvatierra, A., Velasquez-Quispe, M., & Gonzalez-Arce, P. (2022). The illusion of explanatory depth in biological concepts among high school students. *International Journal of Science Education*, 44(7), 1121–1138.
- Bate, R. R., Mueller, D. D., & White, J. E. (1971). *Fundamentals of Astrodynamics*. Dover Publications.
- Bawa, A. S., & Anilakumar, K. R. (2013). Genetically modified foods: safety, risks and public concerns—a review. *Journal of food science and technology*, 50(6), 1035-1046.
- Bawendi, M. G., Steigerwald, M. L., & Brus, L. E. (1990). The quantum mechanics of larger semiconductor clusters (“quantum dots”). *Annu. Rev. Phys. Chem*, 41(1), 477-496.
- Bellouin, N., Quaas, J., Gryspeerdt, E., Kinne, S., Stier, P., Watson-Parris, D., ... & Stevens, B. (2020). Bounding global aerosol radiative forcing of climate change. *Reviews of Geophysics*, 58(1), e2019RG000660.

- Bender, E. M., Gebru, T., McMillan-Major, A., & Shmitchell, S. (2021). On the dangers of stochastic parrots: Can language models be too big? *Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*, 610–623.
- Boulias, K., & Greer, E. L. (2022). Functions of N6-methyladenosine (m6A) in RNA at the molecular, genomic and organismal level. *Nature Reviews Genetics*.
<https://www.nature.com/subjects/epigenetics/nrg>
- Brus, L. E. (1984). Electron–electron and electron-hole interactions in small semiconductor crystallites: The size dependence of the lowest excited electronic state. *The Journal of chemical physics*, 80(9), 4403-4409.
- Bryson, S., et al. (2021). The occurrence of rocky habitable-zone planets around solar-like stars from Kepler data. *The Astronomical Journal*, 161(1), 36.
- Buttler, A., & Spliethoff, H. (2018). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2440-2454.
- Bybee, R. W. (2019). *The Case for STEM Education: Challenges and Opportunities* (2nd ed.). NSTA Press.
- Bybee, R. W., Taylor, J. A., Gardner, A., Van Scotter, P., Powell, J. C., Westbrook, A., & Landes, N. (2006). *The BSCS 5E Instructional Model: Origins and Effectiveness*. BSCS.
- Carbon Brief. (2023). Q&A: IPCC wraps up its most in-depth assessment of climate change. <https://www.carbonbrief.org/qa-ipcc-wraps-up-its-most-in-depth-assessment-of-climate-change/>
- CAS (Chemical Abstracts Service). (2026). The future of epigenetics: Emerging technologies and clinical applications. <https://www.cas.org/resources/cas-insights/epigenetics-emerging-technologies>
- Cata, A., Hernandez, I., & Park, J. (2023). Inquiry-based learning levels and student outcomes in science: A decade of evidence. *Science Education Research and Practice*, 15(2), 45–71.
- Cavalli, G., & Heard, E. (2019). Advances in epigenetics link genetics to the environment and disease. *Nature*, 571(7766), 489-499.

- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2002). Thermodynamics: an engineering approach. *Sea*, 1000(8862), 287-293.
- CGIAR System. (2024). Loss and Damage - COP29 updates. <https://www.cgiar.org/news-events/news/loss-and-damage-cop29-updates>
- Chavda, V. P., Acharya, D., Hala, V., Daware, S., & Vora, L. K. (2023). Sunscreens: a comprehensive review with the application of nanotechnology. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 86, 104720. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1773224723005725>
- Chen, C. M., & Osman, K. (2017). The integration of science literacy in science education: A meta-analysis. *Science Education International*, 28(3), 178–195.
- Chen, M., Wu, D., Tu, S., Yang, C., Chen, D., & Xu, Y. (2021). CRISPR/Cas9 cleavage triggered ESDR for circulating tumor DNA detection based on a 3D graphene/AuPtPd nanoflower biosensor. *Biosensors and Bioelectronics*, 173, 112821.
- Chi, M. T. H. (2021). A taxonomy of misconceptions in science: Distinguishing errors, misconceptions, and naïve theories. *Journal of the Learning Sciences*, 30(4), 580–617.
- Chittleborough, G. (2021). Learning how to teach chemistry with technology: Pre-service teachers' experiences with integrating computer simulations into their learning and teaching. *Journal of Science Education and Technology*, 30(1), 159–172.
- ClimateWorks Centre. (2023). Ocean action in mitigation: Southeast Asia. <https://www.climateworkscentre.org/wp-content/uploads/2023/09/Sea-of-opportunity-Technical-report-September-2023.pdf>
- Coaction Indonesia. (2025). Sejauh mana bauran EBT Indonesia kini? <https://coaction.id/sejauh-mana-bauran-ebt-indonesia-kini/>
- Condliffe, B., Visher, M., Bangser, M., Drohojowska, S., & Saco, L. (2022). Project-based learning: A literature review. *MDRC Working Paper*.
- Correa-Baena, J. P., Saliba, M., Buonassisi, T., Grätzel, M., Abate, A., Tress, W., & Hagfeldt, A. (2017). Promises and challenges of perovskite solar cells. *Science*, 358(6364), 739-744.

- Cristea, D., & Vilarem, G. (2021). Improving light fastness of natural dyes on cotton yarn. *Dyes and Pigments*, 70(2), 89–99.
- Danhier, F., Feron, O., & Pr  at, V. (2010). To exploit the tumor microenvironment: Passive and active tumor targeting of nanocarriers for anti-cancer drug delivery. *Journal of controlled release*, 148(2), 135-146.
- Darling-Hammond, L., Flook, L., Cook-Harvey, C., Barron, B., & Osher, D. (2022). Implications for educational practice of the science of learning and development. *Applied Developmental Science*, 24(2), 97–140.
- Dash, S., Singh, A., Surapraraju, S. K., & Natarajan, S. K. (2024). Advances in green hydrogen production through alkaline water electrolysis: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 83, 614-629.
- De Wit, J., Wakeford, H. R., Lewis, N. K., Delrez, L., Gillon, M., Selsis, F., ... & Triaud, A. H. (2018). Atmospheric reconnaissance of the habitable-zone Earth-sized planets orbiting TRAPPIST-1. *Nature Astronomy*, 2(3), 214-219.
- Deng, K., Li, X., Liu, W., Liu, J., Wang, R., Yin, Y., & Zhang, C. Y. (2025). Advances in the development of therapeutic mRNA vaccines for cancer therapy. *Chinese Science Bulletin*, 70(3), 432-442.
- Doudna, J. A. (2020). The promise and challenge of therapeutic genome editing. *Nature*, 578(7794), 229-236.
- Duschl, R. A., Schweingruber, H. A., & Shouse, A. W. (Eds.). (2022). *Taking Science to School: Learning and Teaching Science in Grades K-8* (Revised ed.). National Academies Press.
- Dziedzic, A., Kubina, R., Skonieczna, M., Madej, M., Fiegler-Rudol, J., Abid, M., ... & Tanasiewicz, M. (2025). CRISPR genome editing in personalized therapy for oral and maxillofacial diseases: A scoping review. *Biomedicines*, 13(11), 2745.
- Eckerstorfer, M. F., Dolezel, M., Heissenberger, A., Miklau, M., Reichenbecher, W., Steinbrecher, R. A., & Wa  mann, F. (2019). An EU perspective on biosafety considerations for plants developed by genome editing and other new genetic modification techniques (nGMs). *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 7, 31.

- EESI (Environmental and Energy Study Institute). (2025). Out-of-this-world methane detection: Using satellites to track super emitters. <https://www.eesi.org/articles/view/out-of-this-world-methane-detection-using-satellites-to-track-super-emitters>
- EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO), Naegeli, H., Bresson, J. L., Dalmay, T., Dewhurst, I. C., Epstein, M. M., ... & Firbank, L. G. (2020). Adequacy and sufficiency evaluation of existing EFSA guidelines for the molecular characterisation, environmental risk assessment and post-market environmental monitoring of genetically modified insects containing engineered gene drives. *Efsa Journal*, 18(11), e06297.
- EGUsphere. (2025). Climate change metrics: bridging IPCC AR6 updates and dynamic life cycle assessment. <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2025/egusphere-2025-2442/egusphere-2025-2442.pdf>
- Ekmekci, A., & Gulacar, O. (2021). A study for comparing high school students' misconceptions about electric current. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2), 020131.
- Estiati, A., & Herman, M. (2015). Regulasi keamanan hayati produk rekayasa genetik di Indonesia. Analisis Kebijakan Pertanian, 13(2), 129-146. <https://www.neliti.com/publications/55972/regulasi-keamanan-hayati-produk-rekayasa-genetik-di-indonesia>
- Fathani, T. F., Karnawati, D., Wilopo, W., & Setiawan, H. (2023). Strengthening the resilience by implementing a standard for landslide early warning system. In *Progress in Landslide Research and Technology, Volume 1 Issue 1, 2022* (pp. 277-284). Cham: Springer International Publishing.
- Feidt, M., & Costea, M. (2024). Variations on the models of Carnot irreversible thermomechanical engine. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 49(2), 135-145.
- Feidt, M., & Costea, M. (2024). Variations on the models of Carnot irreversible thermomechanical engine. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 49(2), 135-145. <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/jnet-2023-0109/html>

- Fogg, M. J. (1995). Terraforming: engineering planetary environments. *Warrendale*.
- Frangoul, H., Altshuler, D., Cappellini, M. D., Chen, Y. S., Domm, J., Eustace, B. K., ... & Corbacioglu, S. (2021). CRISPR-Cas9 gene editing for sickle cell disease and β -thalassemia. *New England Journal of Medicine*, 384(3), 252-260.
- Furtak, E. M., Seidel, T., Iverson, H., & Briggs, D. C. (2021). Experimental and quasi-experimental studies of inquiry-based science teaching: A meta-analysis. *Review of Educational Research*, 82(3), 300–329.
- Futuyma, D. J. (2015). Can modern evolutionary theory explain macroevolution?. In *Macroevolution: Explanation, interpretation and evidence* (pp. 29-85). Cham: Springer International Publishing.
- Gardner, J. P., et al. (2023). The James Webb Space Telescope Mission. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 135(1048), 068001.
- Gillon, M., et al. (2017). Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1. *Nature*, 542(7642), 456–460.
- Gordillo Altamirano, F. L., & Barr, J. J. (2019). Phage therapy in the postantibiotic era. *Clinical microbiology reviews*, 32(2), 10-1128.
- Gradishar, W. J., Tjulandin, S., Davidson, N., Shaw, H., Desai, N., Bhar, P., ... & O'Shaughnessy, J. (2005). Phase III trial of nanoparticle albumin-bound paclitaxel compared with polyethylated castor oil-based paclitaxel in women with breast cancer. *Journal of clinical oncology*, 23(31), 7794-7803.
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., ... & Hao, X. (2022). Solar cell efficiency tables (Version 60). *Progress in Photovoltaics*, 30(7), 687.
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefert, G., ... & Jiang, J. Y. (2025). Solar cell efficiency tables (version 65). *Progress in photovoltaics: research and applications*, 33(1), 3-15.
- Großschedl, J., Welter, V., & Harms, U. (2021). A new instrument for measuring pre-service biology teachers' content knowledge on

- evolution: An application of Rasch analysis. *International Journal of Science Education*, 41(13), 1812–1840.
- Guzzetti, B. J., Snyder, T. E., Glass, G. V., & Gamas, W. S. (2021). Promoting conceptual change in science: A comparative meta-analysis of instructional interventions from reading education and science education. *Reading Research Quarterly*, 28(2), 116–159.
- Hassler, D. M., et al. (2014). Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover. *Science*, 343(6169), 1244797.
- Hattie, J., & Timperley, H. (2022). The power of feedback in science learning: A meta-analytic synthesis of research across Asia-Pacific. *Asia-Pacific Science Education Review*, 8(1), 12–45.
- Heinrich Böll Stiftung. (2024). One year in, new Loss and Damage Fund has met deadlines, but decisions on its vision, scope, and scale are still to come. <https://us.boell.org/en/2024/10/09/one-year-new-loss-and-damage-fund-has-met-institutional-deadlines-decisions-elaborating>
- Henderson, H. (2019). Paying for CRISPR cures: The economics of genetic therapies. Innovative Genomics Institute (IGI), dalam Critical Debates HSGJ (2026).
- Hernando-Amado, S., Coque, T. M., Baquero, F., & Martínez, J. L. (2019). Defining and combating antibiotic resistance from One Health and Global Health perspectives. *Nature microbiology*, 4(9), 1432-1442.
- Herreid, C. F. (2022). Start with a Story: The Case Study Method of Teaching College Science (2nd ed.). NSTA Press.
- Hewson, P. W. (2021). Conceptual change in science teaching and teacher education. *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*, 1, 127–145.
- Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J., Westermann, S., Romanovsky, V. E., Nelson, F. E., ... & Luoto, M. (2018). Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. *Nature communications*, 9(1), 5147.
- Holmes, W., Porayska-Pomsta, K., Holstein, K., Sutherland, E., Baker, T., & Shum, S. B. (2022). *Artificial Intelligence in Education:*

- Promises and Implications for Teaching and Learning*. Center for Curriculum Redesign.
- Hou, X., Zaks, T., Langer, R., & Dong, Y. (2021). Lipid nanoparticles for mRNA delivery. *Nature Reviews Materials*, 6(12), 1078-1094.
- IAEA ARIS. (2024). Small modular reactors catalogue. https://aris.iaea.org/Publications/SMR_catalogue_2024.pdf
- IDMC (Internal Displacement Monitoring Centre). (2024). Internal displacement in 2024: Monitoring the crisis, measuring progress. <https://story.internal-displacement.org/internal-displacement-in-2024-monitoring-the-crisis-measuring-progress/>
- IESR (Institute for Essential Services Reform). (2024). Mengejar target 23% bauran energi terbarukan di 2025 memerlukan strategi percepatan dan komitmen politik. <https://iesr.or.id/mengejar-target-23-bauran-energi-terbarukan-di-2025-memerlukan-strategi-percepatan-dan-komitmen-politik/>
- IESR. (2025). Kaleidoskop sektor energi Indonesia tahun 2024. <https://iesr.or.id/kaleidoskop-sektor-energi-indonesia-tahun-2024/>
- Implementation of Disaster Risk Reduction Policy in Indonesia. (2024). <https://ejournal.seaninstitute.or.id/index.php/Ekonomi/article/download/4263/3415>
- Imrie, R., Ghosh, S., Narvekar, N., Vigneswaran, K., Wang, Y., & Savvas, M. (2023). Socioeconomic status and fertility treatment outcomes in high-income countries: a review of the current literature. *Human Fertility*, 26(1), 27-37.
- Indonesia.go.id. (2024). Strategi nasional lawan ancaman resistensi antimikroba. <https://indonesia.go.id/kategori/editorial/8537/strategi-nasional-lawan-ancaman-resistensi-antimikroba>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- International Atomic Energy Agency. (2022). *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. Vienna: IAEA.

- International Science Council. (2023). Report for the Mid-Term Review of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction. <https://council.science/publications/mtr-sendai-framework-disaster-risk-reduction/>
- IOM (International Organization for Migration). (2025). IDMC report: Record 83 million people living in internal displacement worldwide. <https://www.iom.int/news/idmc-report-record-83-million-people-living-internal-displacement-worldwide>
- IPCC AR6 WGI Annex V. (2023). Historical greenhouse gas and effective radiative forcing tables. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SOD_AnnexV_Radiative_Forcing.pdf
- IPCC AR6 WGI Chapter 7. (2023). The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_07.pdf
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf
- ITIF (Information Technology and Innovation Foundation). (2025). Small modular reactors: A realist approach to the future of nuclear power. <https://itif.org/publications/2025/04/14/small-modular-reactors-a-realist-approach-to-the-future-of-nuclear-power/>
- Ito, M., Martin, C., Pfister, R. C., Rafalow, M. H., Salen, K., & Wortman, A. (2020). *Affinity Online: How Connection and Shared Interest Fuel Learning*. New York University Press.
- Jabeen, N., et al. (2025). Strategic business approaches for nanotechnology-based sunscreen and services. *The Regional Tribune*, 4(3). <https://submissions.regionaltribune.com/index.php/trt/article/download/141/281>
- Jakosky, B. M., & Edwards, C. S. (2018). Inventory of CO₂ available for terraforming Mars. *Nature astronomy*, 2(8), 634-639.
- Joint United Nations Programme on HIV/AIDS. (2024). *The urgency of now: AIDS at a crossroads*. UNAIDS.

<https://www.unaids.org/en/resources/documents/2024/global-aids-update-2024>

- Judge, A., Hu, L., Sankaran, B., Van Riper, J., Venkataram Prasad, B. V., & Palzkill, T. (2023). Mapping the determinants of catalysis and substrate specificity of the antibiotic resistance enzyme CTX-M β -lactamase. *Communications Biology*, 6(1), 35.
- JWST Transiting Exoplanet Community Early Release Science Team. (2023). Identification of carbon dioxide in an exoplanet atmosphere. *Nature*, 614(7949), 649–652.
- Kaltakçı-Gürel, D., Eryılmaz, A., & McDermott, L. C. (2021). Identifying pre-service physics teachers' misconceptions and conceptual difficulties about geometrical optics. *European Journal of Physics*, 37(4), 045705.
- Kampourakis, K. (2020). *Understanding evolution* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Kanas, N., & Manzey, D. (2008). *Space Psychology and Psychiatry* (2nd ed.). Springer.
- Kasneci, E., Seßler, K., Küchemann, S., Bannert, M., Dementieva, D., Fischer, F., & Kasneci, G. (2023). ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. *Learning and Individual Differences*, 103, 102274.
- Kemendikbudristek. (2023). *Rapor Pendidikan Indonesia 2023: Analisis Capaian PISA 2022*. Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi.
- Kementerian Koordinator Bidang Pembangunan Manusia dan Kebudayaan. (2024). *Pemerintah terus perkuat upaya penanganan resistensi antimikroba*. <https://www.kemenkopmk.go.id/pemerintah-terus-perkuat-upaya-penanganan-resistensi-antimikroba>
- Kirana, T., Suparno, P., & Hermanto, F. (2021). Profile of junior high school science teachers' understanding of the nature of science in Central Java, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1806(1), 012175.
- Kitandwe, P. K., Rogers, P., Hu, K., Nayebare, O., Blakney, A. K., McKay, P. F., ... & Shattock, R. J. (2024). A lipid nanoparticle-formulated self-amplifying RNA Rift Valley fever vaccine

- induces a robust humoral immune response in mice. *Vaccines*, 12(10), 1088.
- Klute, S., & Sparrer, K. M. (2024). Friends and foes: the ambivalent role of autophagy in HIV-1 infection. *Viruses*, 16(4), 500.
- Kobow, K., & Khan, N. (2024). Epigenetics. *Jasper's Basic Mechanisms of the Epilepsies*. 5th edition.
- Kopparapu, R. K., et al. (2013). Habitable zones around main-sequence stars: Dependence on planetary mass. *The Astrophysical Journal Letters*, 787(2), L29.
- Kortright, K. E., Chan, B. K., Koff, J. L., & Turner, P. E. (2019). Phage therapy: a renewed approach to combat antibiotic-resistant bacteria. *Cell host & microbe*, 25(2), 219-232.
- Krajcik, J., & Shin, N. (2022). Project-based learning. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (3rd ed., pp. 88–114). Cambridge University Press.
- Lanphier, E., Urnov, F., Haecker, S. E., Werner, M., & Smolenski, J. (2015). Don't edit the human germ line. *Nature*, 519(7544), 410-411.
- Latal, J., Gašparović, M., & Vrček, I. (2023). Students' understanding of Earth-Sun relationships: A diagnostic study in Indonesian secondary schools. *Journal of Astronomy & Earth Sciences Education*, 10(1), 1–18.
- Lederman, J. S., Lederman, N. G., Bartos, S. A., Bartels, S. L., Meyer, A. A., & Schwartz, R. S. (2014). Meaningful assessment of learners' understandings about scientific inquiry—The views about scientific inquiry (VASI) questionnaire. *Journal of Research in Science Teaching*, 51(1), 65–83.
- Lederman, N. G., & Lederman, J. S. (2021). Nature of science and scientific inquiry as contexts for the learning of science and achievement of scientific literacy. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 2(3), 138–147.
- Lederman, N. G., Abd-El-Khalick, F., Bell, R. L., & Schwartz, R. S. (2002). Views of nature of science questionnaire: Toward valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(6), 497–521.

- Lederman, N. G., Bartels, S., Lederman, J., & Gnanakkan, D. (2021). Demystifying nature of science. *Science & Education*, 30(2), 455–476.
- LIDSEN Publishing. (2026). Quantum confinement effects in nano material. <https://www.lidsen.com/journals/rpm/rpm-special-issues/Quantum-confinement-effects-nano-mater>
- Limón, M. (2022). On the cognitive conflict as an instructional strategy for conceptual change: A critical appraisal. *Learning and Instruction*, 11(4–5), 357–380.
- Link-Gelles, R. (2025). Interim estimates of 2024–2025 COVID-19 vaccine effectiveness among adults aged ≥ 18 years—VISION and IVY networks, September 2024–January 2025. *MMWR. Morbidity and mortality weekly report*, 74.
- Liu, X., He, X., Liu, H., Wang, Y., Dong, S., Wu, H., ... & Huang, L. (2026). African swine fever virus pD345L negatively regulates the cGAS-STING signaling pathway by inhibiting the binding of STING and IRF3. *Journal of Integrative Agriculture*.
- Lo, M. W., et al. (2001). Genesis mission design. *Journal of the Astronautical Sciences*, 49(1), 169–184.
- Longuski, J. M., Guzmán, J. J., & Prussing, J. E. (2014). *Optimal Control with Aerospace Applications*. Springer.
- LSST Science Collaboration. (2009). LSST Science Book, Version 2.0. *arXiv:0912.0201*.
- Lu, S., Montoya, M., Hu, L., Neetu, N., Sankaran, B., Prasad, B. V., & Palzkill, T. (2023). Mutagenesis and structural analysis reveal the CTX-M β -lactamase active site is optimized for cephalosporin catalysis and drug resistance. *Journal of Biological Chemistry*, 299(5), 104630.
- Lum, F. M., Torres-Ruesta, A., Tay, M. Z., Lin, R. T., Lye, D. C., Rénia, L., & Ng, L. F. (2022). Monkeypox: disease epidemiology, host immunity and clinical interventions. *Nature Reviews Immunology*, 22(10), 597–613.
- Mahmud, M. Z. A. (2023). A concise review of nanoparticles utilized energy storage and conservation. *Journal of Nanomaterials*, 2023, 5432099. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2023/5432099>

- Malim, M. H., & Bieniasz, P. D. (2012). HIV restriction factors and mechanisms of evasion. *Cold Spring Harbor perspectives in medicine*, 2(5), a006940.
- Mayor, M., & Queloz, D. (1995). A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378(6555), 355–359.
- McAdoo, B. G., Moore, A., Baumwoll, J., & Lundberg, N. (2021). Indigenous knowledge and the near total survival of the Simeulue Island community after the December 2004 Indian Ocean tsunami. *Earthquake Spectra*, 22(S3), 749–755.
- McKay, C. P. (2014). Requirements and limits for life in the context of exoplanets. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(35), 12628–12633.
- McMahan, J., & Savulescu, J. (2024). Reasons and reproduction: Gene editing and genetic selection. *The American Journal of Bioethics*, 24(8), 9-19.
- Meadows, V. S., & Barnes, R. K. (2018). Factors affecting exoplanet habitability. In V. Meadows, et al. (Eds.), *Planetary Astrobiology*. University of Arizona Press.
- Medin, D. L., & Bang, M. (2020). *Who's Asking? Native Science, Western Science, and Science Education*. The MIT Press.
- Mishra, P., & Koehler, M. J. (2006). Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers College Record*, 108(6), 1017–1054.
- Mitchell, M. J., Billingsley, M. M., Haley, R. M., Wechsler, M. E., Peppas, N. A., & Langer, R. (2021). Engineering precision nanoparticles for drug delivery. *Nature reviews drug discovery*, 20(2), 101-124.
- Mitragotri, S., Lammers, T., Bae, Y. H., Schwendeman, S., De Smedt, S. C., Leroux, J. C., ... & Park, K. (2017). Drug delivery research for the future: expanding the nano horizons and beyond. *Journal of controlled release*, 246, 183-184.
- Mongabay. (2025). Ocean-based carbon storage ramps up, bringing investment and concern. <https://news.mongabay.com/2025/08/ocean-based-carbon-storage-ramps-up-bringing-investment-and-concern/>
- Moore, L. D., Le, T., & Fan, G. (2013). DNA methylation and its basic function. *Neuropsychopharmacology*, 38(1), 23-38.

- Murray, C. J., Ikuta, K. S., Sharara, F., Swetschinski, L., Aguilar, G. R., Gray, A., ... & Tasak, N. (2022). Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis. *The lancet*, 399(10325), 629-655.
- NASA Exoplanet Archive. (2023). NASA Exoplanet Archive Statistics. *Caltech/IPAC*. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>
- NASA GISS. (2024). Cheng et al. 2024: Ocean heat content in 2023. <https://www.giss.nasa.gov/pubs/abs/ch04610i.html>
- NASEM. (2019). *An Astrobiology Strategy for the Search for Life in the Universe*. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. The National Academies Press.
- National Academies of Sciences, Medicine, Division on Earth, Life Studies, Committee on Genetically Engineered Crops, Past Experience, & Future Prospects. (2016). *Genetically engineered crops: experiences and prospects*. National Academies Press.
- National Research Council. (2012). A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13165>
- Nemali, K. S., Bonin, C., Dohleman, F. G., Stephens, M., Reeves, W. R., Nelson, D. E., ... & Lawson, M. (2015). Physiological responses related to increased grain yield under drought in the first biotechnology-derived drought-tolerant maize. *Plant, Cell & Environment*, 38(9), 1866-1880.
- NGSS Lead States. (2013). Next Generation Science Standards: For States, By States. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18290>
- Nguyen, H. T., Phan, T. T. N., & Le, L. K. (2023). Project-based learning in Southeast Asian science classrooms: Challenges and opportunities. *Asia-Pacific Science Education*, 9(1), 45–70.
- Nitzbon, J., Schneider von Deimling, T., Aliyeva, M., Chadburn, S. E., Grosse, G., Laboor, S., ... & Langer, M. (2024). No respite from permafrost-thaw impacts in the absence of a global tipping point. *Nature Climate Change*, 14(6), 573-585.
- NOAA. (2024). Ocean acidification. <https://www.noaa.gov/ocean-acidification>

- NOAA/AOML. (2024). State of the Climate in 2023 released. <https://www.aoml.noaa.gov/state-of-the-climate-in-2023-released/>
- Nout, M. J. A., & Kiers, J. L. (2021). Tempe fermentation, innovation and functionality: Update into the third millennium. *Journal of Applied Microbiology*, 98(4), 789–805.
- Novak, J. D., & Cañas, A. J. (2021). The theory underlying concept maps and how to construct and use them. *Institute for Human and Machine Cognition (IHMC)*
- Nozik, A. J. (2002). Quantum dot solar cells. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 14(1-2), 115-120.
- NRDC. (2025). Climate Funds Pledge Tracker. <https://www.nrdc.org/resources/climate-funds-pledge-tracker>
- NREL (National Renewable Energy Laboratory). (2025). Life cycle greenhouse gas emissions from electricity generation. <https://docs.nrel.gov/docs/fy13osti/57187.pdf>
- Nurhidayat. (2022). Teknologi mutasi gen untuk meningkatkan keragaman genetik beberapa varietas kedelai (*Glycine max* L.) yang berumur genjah dan toleran terhadap cekaman air. *Agrotekmas*, 3(3). <https://jurnal.fp.umi.ac.id/index.php/agrotekmas/article/download/263/220>
- Nurrenbern, S. C., Pickering, M., & Hardy, A. (2020). Pictorial analogies in understanding light and optics. *Journal of Chemical Education*, 97(10), 3445–3452.
- NuScale Power. (2023). *Integrated Energy Systems Using NuScale Small Modular Reactors*.
- Oberdörster, G., Oberdörster, E., & Oberdörster, J. (2005). Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environmental health perspectives*, 113(7), 823.
- Ochiai, H., Ohishi, H., Sato, Y., & Kimura, H. (2023). Organization of transcription and 3D genome as revealed by live-cell imaging. *Current Opinion in Structural Biology*, 81, 102615.
- Ocko, I. B., Sun, T., Shindell, D., Oppenheimer, M., Hristov, A. N., Pacala, S. W., ... & Hamburg, S. P. (2021). Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector

- can immediately slow global warming. *Environmental Research Letters*, 16(5), 054042.
- OECD. (2019). *PISA 2018 Assessment and Analytical Framework*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/b25efab8-en>
- OECD. (2023). *PISA 2022 Results (Volume I): The State of Learning and Equity in Education*. OECD Publishing.
- OECD. (2023). *PISA 2022 Science Framework*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264405981-en>
- OECD. (2024). Developments in delegations on the safety of manufactured nanomaterials and advanced materials between July 2023 and June 2024 - Tour de table. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/12/developments-in-delegations-on-the-safety-of-manufactured-nanomaterials-and-advanced-materials-between-july-2023-and-june-2024-tour-de-table_cedabd1a/74413c15-en.pdf
- Ogut, J. O., & Owen-Smith, N. (2003). ENSO, rainfall and temperature influences on extreme population declines among African savanna ungulates.
- Optimised. (2025). What are the key takeaways from the IPCC's new report? <https://www.optimised.net/ipccs-report>
- Orgill, M., & Bodner, G. (2021). What research tells us about using analogies to teach chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 5(1), 15–32.
- Osborne, J. (2022). The nature of science: Implications for science teaching. *European Journal of Science and Mathematics Education*, 10(4), 447–459.
- Pardi, N., Hogan, M. J., Porter, F. W., & Weissman, D. (2018). mRNA vaccines—a new era in vaccinology. *Nature reviews Drug discovery*, 17(4), 261–279.
- Patel, Z. S., et al. (2020). Red risks for a journey to the red planet: The highest priority human health risks for a mission to Mars. *npj Microgravity*, 6(1), 33.
- Peoples, C., & Herber, A. (2022). Private companies and the governance of outer space. *Space Policy*, 61, 101475.

- Peraturan Menteri Koordinator PMK No. 7 Tahun 2021 tentang Rencana Aksi Nasional Pengendalian Resistensi Antimikroba 2020-2024. <https://peraturan.go.id/id/permenko-pmk-no-7-tahun-2021>
- Perryman, M. (2018). *The Exoplanet Handbook* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Pickar-Oliver, A., & Gersbach, C. A. (2019). The next generation of CRISPR–Cas technologies and applications. *Nature reviews Molecular cell biology*, 20(8), 490-507.
- Pierce, B. A. (2012). *Genetics: a conceptual approach*. Macmillan.
- Pine, K., Messer, D., & John, K. (2020). Children's misconceptions in primary science: A survey of teachers' views. *Research in Science & Technological Education*, 19(1), 79–96.
- Polack, F. P., Thomas, S. J., Kitchin, N., Absalon, J., Gurtman, A., Lockhart, S., ... & Gruber, W. C. (2020). Safety and efficacy of the BNT162b2 mRNA Covid-19 vaccine. *New England journal of medicine*, 383(27), 2603-2615.
- Popa, A. D., Enache, A. I., Popa, I. V., Antoniu, S. A., Dragomir, R. A., & Burlacu, A. (2022). Determinants of the hesitancy toward COVID-19 vaccination in Eastern European countries. *Vaccines*, 10(5), 672. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9146656/>
- Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrović, V. M., & Jovanović, K. (2020). Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review. *Computers & Education*, 95, 309–327.
- Pradana, S. P., Fitriani, A. A., Tiro, A. R., Irianti, M., Nidiasari, Y., Sulistyowati, R. W., Sianturi, A. S. R., Antony, M. K., & Ramadhan, A. N. (2026). *Pedagogi, Konten, dan Teknologi: Teori dan Praktik TPACK dalam Pendidikan*. CV Jejak.
- Prasetyo, Z. K., Wilujeng, I., & Setiawan, A. (2023). Effectiveness of virtual laboratory on students' conceptual understanding in outer Indonesian islands. *Journal of Science Education in Developing Countries*, 6(2), 89–112.
- Pray, L. (2008). Discovery of DNA structure and function: Watson and Crick. *Nature Education*, 1(1), 100.
- Qian, X., Lemke, J., & Lee, O. (2022). Analyzing students' understanding of Newton's laws across cultural contexts: A

- comparative study in Indonesia, Malaysia, and the Philippines. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 20(4), 701–724.
- Quadrana, L., & Colot, V. (2016). Plant transgenerational epigenetics. *Annual review of genetics*, 50(1), 467–491.
- Race, M. S., et al. (2019). Planetary protection knowledge gaps for human extraterrestrial missions. *Life Sciences in Space Research*, 21, 19–28.
- Rahmawati, Y., Ridwan, A., & Taylor, P. C. (2023). Transformative learning through STEM project-based learning in Indonesian secondary schools. *International Journal of STEM Education*, 10(1), 1–21.
- Reiss, M. J., & Shute, A. M. (2022). Biological and physical sciences: Can they be taught more efficiently together? *International Journal of Science Education*, 44(8), 1247–1265.
- Renewable Energy Indonesia. (2025). Kebijakan energi terbarukan. <https://renewableenergy.id/kebijakan-energi-terbarukan/>
- Riess, A. G., et al. (1998). Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *The Astronomical Journal*, 116(3), 1009–1038.
- Rollinson, J., Olney, A., & Baker, R. (2022). Educational data mining and learning analytics: Definitions, applications, and roles. *npj Science of Learning*, 7(1), 1–11.
- Rouet-Leduc, B., & Hulbert, C. (2024). Automatic detection of methane emissions in multispectral satellite imagery using a vision transformer. *Nature Communications*, 15(1), 3801.
- Rummel, J. D., et al. (2014). A new analysis of Mars "Special Regions": Findings of the Second MEPAG Special Regions Science Analysis Group (SR-SAG2). *Astrobiology*, 14(11), 887–968.
- Sagan, C. (1994). *Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space*. Random House.
- Sagan, C. (1996). *The Demon-Haunted World: Science as a Candle in the Dark*. Random House.
- Schuur, E. A., Abbott, B. W., Commane, R., Ernakovich, J., Euskirchen, E., Hugelius, G., ... & Turetsky, M. (2022). Permafrost and climate change: Carbon cycle feedbacks from the warming

- Arctic. *Annual Review of Environment and Resources*, 47(1), 343-371.
- Schwartz, J. S. J. (2020). *The Value of Science in Space Exploration*. Oxford University Press.
- Schwieterman, E. W., et al. (2018). Exoplanet biosignatures: A review of remotely detectable signs of life. *Astrobiology*, 18(6), 663–708.
- Scott, J. M., et al. (2019). Countermeasures for spaceflight-induced bone loss: Current concepts and future directions. *Current Osteoporosis Reports*, 17(6), 462–473.
- Shinde, S. J., Priyanka, Jakhar, M., Arora, I., Sehgal, D., Mahak, ... & Kumar, S. (2026). Nanomedicines: An Update of Diagnostic and Therapeutic Applications in Multiple Cancers. *Journal of Drug Targeting*, (just-accepted), 1-64.
- Shockley, W., & Queisser, H. (2018). Detailed balance limit of efficiency of p–n junction solar cells. In *Renewable energy* (pp. Vol2_35-Vol2_54). Routledge.
- Sholihah, R. N. (2023). *Penerapan Strategi Pembelajaran Personal Digital Inquiry Berbantuan Infografis untuk Meningkatkan Literasi Sains dan Keterampilan Komunikasi Peserta Didik SMA pada Materi Ekosistem* [Tesis]. Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung.
- Smith, J. P., diSessa, A. A., & Roschelle, J. (2021). Misconceptions reconceived: A constructivist analysis of knowledge in transition. *Cognition and Instruction*, 11(2–3), 115–163.
- Smith, J. P., diSessa, A. A., & Roschelle, J. (2021). Misconceptions reconceived: A constructivist analysis of knowledge in transition. *Cognition and Instruction*, 11(2–3), 115–163.
- Snaith, H. J. (2013). Perovskites: the emergence of a new era for low-cost, high-efficiency solar cells. *The journal of physical chemistry letters*, 4(21), 3623-3630.
- Stuster, J. (2016). *Bold Endeavors: Lessons from Polar and Space Exploration*. Naval Institute Press.
- Sudarmin, S., Muzakir, M. F., & Prasetya, A. T. (2021). Ethnoscience dan indigenous science dalam pembelajaran sains untuk membangun karakter generasi emas Indonesia. *Jurnal Inovasi Pendidikan Kimia*, 15(2), 2771–2782.

- Sufri, S., Oktabina, R. W., Fazli, F., Lassa, J. A., & Dwirahmadi, F. (2025). Progress and challenges in implementing the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction at sub-national levels: insights from Aceh, Indonesia. *Environmental Hazards*, 24(5), 455-482.
- Sun, N., Liang, C., Zhang, Q., Geng, X., Liu, H., Feng, Y., ... & Jia, X. (2022). Safety assessment of phytase transgenic maize 11TPY050 in Sprague-Dawley rats by 90-day feeding study. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 128, 105091.
- Tabloid Sinar Tani. (2023). Ketatnya regulasi produk rekayasa genetik. <https://tabloidsinartani.com/detail/indeks/teknolingkungan/24258>
- Tempo. (2025). Outlook 2025: Bagaimana pemerintahan Prabowoenuhi target bauran energi terbarukan. <https://www.tempo.co/ekonomi/outlook-2025-bagaimana-pemerintahan-prabowo-penuhi-target-bauran-energi-terbarukan-1196060>
- The Nobel Assembly at Karolinska Institutet. (2023). *The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2023*. <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2023/press-release/>
- Then, C., & Bauer-Panskus, A. (2017). Possible health impacts of Bt toxins and residues from spraying with complementary herbicides in genetically engineered soybeans and risk assessment as performed by the European Food Safety Authority EFSA. *Environmental Sciences Europe*, 29(1), 1.
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., ... & Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427(6970), 145-148.
- Tiro, A. R. (2025). *Pengembangan Program Perkuliahan Pengetahuan Lingkungan Bertema Revitalisasi Ekosistem Hutan Sagu (PPPL-REHS) dalam Usaha Meningkatkan Key Competencies for Sustainability (KCS) untuk Berkontribusi pada Sustainable Development Goals (SDGs)* [Disertasi]. Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung.
- Treagust, D. F., Duit, R., Nieswandt, M., & Schecker, H. (2021). Probing understanding: Students' conceptions in science and mathematics

- across 14 Asia-Pacific countries. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 19(8), 1519–1537.
- Turbet, M., et al. (2021). Day-side warming and coupling with the night-side: climate of TRAPPIST-1 in a non-synchronous scenario. *Astronomy & Astrophysics*, 638, A41.
- UNDRR. (2025). Climate action and disaster risk reduction. <https://www.undrr.org/implementing-sendai-framework/drr-focus-areas/climate-action-and-disaster-risk-reduction>
- UNDRR. (2025). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
- Urban, M. C. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, 348(6234), 571-573.
- Urgensi Mempelajari Mutasi dan Variasi Genetik Berorientasi Content Representation. (2024). <https://www.researchgate.net/publication/386540271>
- Uyttebroek, S., Chen, B., Onsea, J., Ruythooren, F., Debaveye, Y., Devolder, D., ... & Metsemakers, W. J. (2022). Safety and efficacy of phage therapy in difficult-to-treat infections: a systematic review. *The Lancet Infectious Diseases*, 22(8), e208-e220.
- Van Boeckel, T. P., Pires, J., Silvester, R., Zhao, C., Song, J., Criscuolo, N. G., ... & Laxminarayan, R. (2019). Global trends in antimicrobial resistance in animals in low-and middle-income countries. *Science*, 365(6459), eaaw1944.
- Van der Linden, S., Leiserowitz, A., Rosenthal, S., & Maibach, E. (2017). Inoculating the public against misinformation about climate change. *Global Challenges*, 1(2), 1600008.
- VanLehn, K. (2021). The relative effectiveness of human tutoring, intelligent tutoring systems, and other tutoring systems. *Educational Psychologist*, 46(4), 197–221.
- Visser, P. M., Wray, N. R., Zhang, Q., Sklar, P., McCarthy, M. I., Brown, M. A., & Yang, J. (2017). 10 years of GWAS discovery: biology, function, and translation. *The American journal of human genetics*, 101(1), 5-22.
- Vosniadou, S. (2022). Re-framing the classical approach to conceptual change: Preconceptions, misconceptions and synthetic models.

- In B. J. Fraser, K. Tobin & C. J. McRobbie (Eds.), *Second International Handbook of Science Education* (pp. 119–130). Springer.
- Wahyudi, A., & Sulaiman, F. (2022). Prevalence and sources of physics and biology misconceptions in Indonesian middle schools. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 11(2), 224–238.
- Wakefield, A. J., Murch, S. H., Anthony, A., Linnell, J., Casson, D. M., Malik, M., ... & Walker-Smith, J. A. (1998). RETRACTED: Ileal-lymphoid-nodular hyperplasia, non-specific colitis, and pervasive developmental disorder in children. *The lancet*, 351(9103), 637-641.
- Wang, D., Zhang, Y., Li, Q., Li, Y., Li, W., Zhang, A., ... & Lyu, S. (2024). Epigenetics: Mechanisms, potential roles, and therapeutic strategies in cancer progression. *Genes & diseases*, 11(5), 101020.
- Webb, S. (2015). *If the Universe Is Teeming with Aliens ... Where Is Everybody?: Seventy-Five Solutions to the Fermi Paradox and the Problem of Extraterrestrial Life* (2nd ed.). Springer.
- WHO. (2020). Infodemic management: WHO's response. World Health Organization. <https://www.who.int/health-topics/infodemic>
- Wiley, L., Cheek, M., LaFar, E., Ma, X., Sekowski, J., Tanguturi, N., & Iltis, A. (2025, June). The ethics of human embryo editing via CRISPR-Cas9 technology: a systematic review of ethical arguments, reasons, and concerns. In *Hec Forum* (Vol. 37, No. 2, pp. 267-303). Dordrecht: Springer Netherlands.
- World Bank. (2024). Fund for Responding to Loss and Damage (FRLD). <https://www.worldbank.org/en/news/factsheet/2024/11/12/fund-for-responding-to-loss-and-damage>
- World Economic Forum. (2023). COP28 agrees to establish loss and damage fund for vulnerable countries. <https://www.weforum.org/stories/2023/12/cop28-loss-and-damage-fund-climate-change/>
- World Economic Forum. (2023). *Future of Jobs Report 2023*. World Economic Forum.
- World Health Organization Indonesia. (2023). Indonesia lays groundwork for antimicrobial resistance resilience through One

- Health approach.
<https://www.who.int/indonesia/id/news/detail/28-06-2023>
- World Health Organization South-East Asia Regional Office. (2022). Rencana Aksi Nasional Pengendalian Resistensi Antimikroba 2020-2024. https://cdn.who.int/media/docs/default-source/searo/indonesia/20221115_nap-on-amr.pdf
- World Health Organization. (2023). Antimicrobial resistance fact sheet. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance>
- World Health Organization. (2023). *Global antimicrobial resistance and use surveillance system (GLASS) report 2022*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240076600>
- World Health Organization. (2024). An mRNA technology transfer programme and economic sustainability in health care. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11046156/>
- World Health Organization. (2025). Global antibiotic resistance surveillance report 2025. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240116337>
- World Nuclear Association. (2024). Carbon dioxide emissions from electricity. <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity>
- World Resources Institute. (2023). Top findings from the IPCC Climate Change Report 2023. <https://www.wri.org/insights/2023-ipcc-ar6-synthesis-report-climate-change-findings>
- Wu, X., Xu, K., Zhan, P., Liu, H., Zhang, F., Song, Y., & Lv, T. (2024). Comparative efficacy and safety of COVID-19 vaccines in phase III trials: a network meta-analysis. *BMC infectious diseases*, 24(1), 234.
- Zeitlin, C., et al. (2013). Measurements of energetic particle radiation in transit to Mars on the Mars Science Laboratory. *Science*, 340(6136), 1080–1084.
- Zieba, S., et al. (2023). No thick carbon dioxide atmosphere on the rocky exoplanet TRAPPIST-1 c. *Nature*, 620(7975), 746–749.
- Zimovan, E. M., Howell, K. C., & Davis, D. C. (2017). Near rectilinear halo orbits and their application in cis-lunar space. *3rd IAA*

*Conference on Dynamics and Control of Space Systems,
Moscow, 2017.*

Zurek, R. W., & Smrekar, S. E. (2022). An overview of the Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) science mission. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 112(E5), E05S01.

GLOSARIUM

Abiotik	Komponen lingkungan yang tidak hidup, seperti air, udara, tanah, cahaya, suhu, dan mineral, yang memengaruhi kehidupan makhluk hidup dalam suatu ekosistem.
Adaptasi	Kemampuan makhluk hidup menyesuaikan diri terhadap perubahan lingkungan untuk mempertahankan kelangsungan hidupnya.
Analisis Data	Proses mengolah, menafsirkan, dan menarik kesimpulan dari data hasil pengamatan atau eksperimen secara sistematis.
Atmosfer	Lapisan gas yang menyelimuti Bumi dan berfungsi melindungi kehidupan serta mengatur keseimbangan iklim.
Bioteknologi	Pemanfaatan organisme hidup atau bagian-bagiannya untuk menghasilkan produk atau teknologi yang bermanfaat bagi manusia.
Biosfer	Seluruh wilayah di Bumi yang menjadi tempat berlangsungnya kehidupan makhluk hidup.
Energi	Kemampuan untuk melakukan usaha atau menyebabkan terjadinya perubahan pada suatu sistem.
Ekologi	Ilmu yang mempelajari hubungan antara makhluk hidup dengan lingkungan tempat hidupnya.

Ekosistem	Kesatuan antara makhluk hidup dan lingkungan fisiknya yang saling berinteraksi membentuk suatu sistem.
Eksperimen	Kegiatan ilmiah untuk menguji hipotesis melalui prosedur yang terencana dan terkendali.
Empiris	Berdasarkan hasil pengamatan, pengalaman langsung, atau bukti nyata yang dapat diuji.
Evolusi	Proses perubahan sifat makhluk hidup secara bertahap dalam jangka waktu yang sangat panjang.
Fenomena Alam	Peristiwa yang terjadi secara alami sebagai akibat proses fisika, kimia, biologi, maupun geologi.
Fotosintesis	Proses pembentukan makanan oleh tumbuhan hijau menggunakan cahaya matahari, karbon dioksida, dan air.
Geosfer	Keseluruhan lapisan penyusun Bumi yang meliputi litosfer, hidrosfer, atmosfer, dan biosfer.
Hipotesis	Dugaan sementara yang disusun berdasarkan teori atau hasil pengamatan dan harus dibuktikan melalui penelitian.
Hidrosfer	Seluruh bagian Bumi yang terdiri atas air, baik di laut, sungai, danau, maupun air tanah.
Indikator	Ukuran atau parameter yang digunakan untuk menilai keberhasilan suatu proses atau pencapaian tujuan.

Inkuiri	Pendekatan pembelajaran yang menekankan proses menemukan pengetahuan melalui penyelidikan ilmiah.
Interdisipliner	Pendekatan yang mengintegrasikan konsep, metode, dan perspektif dari berbagai disiplin ilmu untuk memahami suatu masalah.
Kalibrasi	Proses memastikan ketepatan alat ukur agar hasil pengukuran sesuai dengan standar.
Keberlanjutan	Prinsip pembangunan yang memperhatikan keseimbangan antara kebutuhan saat ini dan kelestarian sumber daya bagi generasi mendatang.
Kolaborasi	Kerja sama antarindividu atau kelompok dalam menyelesaikan suatu permasalahan atau proyek ilmiah.
Konservasi	Upaya melindungi, memelihara, dan memanfaatkan sumber daya alam secara bijaksana.
Literasi Sains	Kemampuan memahami konsep sains, menerapkan pengetahuan ilmiah, dan mengambil keputusan berdasarkan bukti.
Litosfer	Lapisan batuan paling luar Bumi yang menjadi tempat berlangsungnya berbagai aktivitas geologi.
Makhluk Hidup	Organisme yang memiliki ciri-ciri kehidupan seperti tumbuh, berkembang, bereproduksi, dan merespons rangsangan.
Materi	Segala sesuatu yang memiliki massa dan menempati ruang.

Metode Ilmiah	Langkah-langkah sistematis dalam memperoleh pengetahuan melalui observasi, hipotesis, eksperimen, analisis, dan kesimpulan.
Model Pembelajaran	Kerangka konseptual yang digunakan sebagai pedoman dalam merancang dan melaksanakan proses pembelajaran.
Observasi	Kegiatan mengamati objek atau fenomena secara sistematis menggunakan pancaindra maupun alat bantu.
Pemecahan Masalah	Proses menemukan solusi terhadap suatu persoalan melalui penalaran logis dan metode ilmiah.
Pengukuran	Proses menentukan nilai suatu besaran menggunakan alat ukur yang sesuai.
Penelitian	Kegiatan ilmiah yang dilakukan secara sistematis untuk memperoleh pengetahuan baru atau memverifikasi teori.
Perubahan Energi	Proses berubahnya energi dari satu bentuk ke bentuk lainnya tanpa menghilangkan jumlah total energi.
Proyek Sains	Kegiatan pembelajaran berbasis investigasi yang menghasilkan produk atau solusi terhadap suatu masalah ilmiah.
STEM	Pendekatan pembelajaran yang mengintegrasikan <i>Science</i> , <i>Technology</i> , <i>Engineering</i> , dan <i>Mathematics</i> untuk menyelesaikan masalah nyata.
STEAM	Pengembangan pendekatan STEM dengan menambahkan unsur <i>Arts</i> untuk mendorong kreativitas dan inovasi.

Sumber Daya Alam	Segala potensi yang berasal dari alam dan dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan manusia.
Teknologi	Penerapan ilmu pengetahuan untuk menghasilkan alat, metode, atau sistem yang mempermudah kehidupan manusia.
Transformasi Digital	Proses pemanfaatan teknologi digital dalam berbagai aspek kehidupan, termasuk pembelajaran dan penelitian sains.
Variabel	Faktor yang dapat berubah dan memengaruhi hasil suatu penelitian atau eksperimen.
Validitas	Tingkat ketepatan suatu instrumen atau metode dalam mengukur apa yang seharusnya diukur.
Verifikasi	Proses pembuktian atau pengujian kembali terhadap hasil penelitian atau hipotesis.
Wawasan Ilmiah	Cara berpikir yang didasarkan pada logika, bukti empiris, dan prinsip-prinsip ilmiah dalam memahami fenomena.
Zona Ekologi	Wilayah yang memiliki karakteristik lingkungan tertentu sehingga mendukung jenis kehidupan yang khas.

INDEKS

B

biologi, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 21,
23, 24, 27, 44, 84, 148, 150,
173, 179, 206, 208, 209, 212,
215, 253, 260, 265

E

ekosistem, i, 8, 9, 27, 84, 86, 87,
107, 113, 114, 118, 124, 126,
127, 128, 129, 132, 133, 134,
137, 165, 204, 206, 207, 216,
221, 223, 252, 261
eksperimen, 6, 12, 13, 14, 38,
183, 185, 193, 195, 196, 197,
198, 199, 202, 203, 215, 252,
255, 256, 261
energi, 5, 8, 9, 73, 74, 75, 78, 80,
87, 88, 93, 94, 95, 96, 97, 98,
99, 100, 101, 103, 104, 105,
106, 107, 108, 109, 110, 111,
114, 115, 116, 118, 129, 133,
136, 137, 138, 145, 162, 207,
208, 209, 217, 218, 256, 260
epigenetika, 29, 33, 37, 261
evolusi, 10, 17, 35, 47, 51, 52,
63, 104, 149, 179, 180, 204,
207, 261

F

fisika, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 24,
27, 71, 72, 74, 75, 93, 110,
113, 114, 115, 116, 141, 148,

149, 150, 152, 153, 155, 173,
174, 175, 194, 195, 196, 206,
208, 209, 216, 217, 218, 253,
260, 265

G

genetika, i, 27, 29, 30, 32, 33,
36, 37, 39, 41, 44, 46, 47, 48,
69, 84, 167, 174, 175, 206,
261
genom, 29, 31, 32, 33, 37, 38,
41, 261
guru, i, ii, 5, 11, 12, 13, 14, 15,
17, 18, 19, 20, 175, 182, 185,
189, 192, 195, 197, 198, 199,
206, 261

I

iklim, i, 11, 23, 24, 27, 36, 43,
47, 93, 113, 114, 115, 116,
118, 119, 120, 121, 122, 123,
124, 125, 126, 129, 130, 131,
132, 135, 136, 137, 139, 141,
142, 143, 144, 145, 146, 147,
148, 157, 158, 159, 168, 196,
206, 218, 223, 252, 261
ilmiah, i, 11, 12, 13, 14, 15, 17,
18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26,
27, 30, 35, 38, 39, 43, 46, 47,
68, 69, 71, 72, 91, 94, 96, 110,
113, 114, 121, 122, 123, 128,
130, 137, 148, 149, 154, 164,
165, 168, 169, 173, 175, 180,

182, 185, 186, 188, 194, 196,
198, 199, 201, 202, 203, 204,
205, 206, 211, 222, 223, 253,
254, 255, 256, 257, 260
interdisipliner, i, 5, 142, 150,
261, 265

K

kimia, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 24,
27, 33, 71, 72, 73, 75, 76, 77,
78, 79, 96, 101, 106, 113, 114,
118, 128, 148, 152, 153, 160,
166, 169, 173, 174, 178, 179,
180, 195, 196, 202, 206, 207,
208, 209, 215, 219, 220, 221,
245, 253, 260, 265

konsep, 6, 7, 8, 11, 17, 27, 84,
95, 97, 116, 137, 151, 162,
174, 175, 177, 179, 182, 184,
185, 186, 188, 191, 194, 197,
204, 206, 208, 209, 211, 212,
215, 221, 223, 254, 255, 261,
265

L

lingkungan, 17, 29, 33, 34, 35,
36, 41, 43, 44, 46, 48, 49, 64,
66, 73, 76, 77, 80, 85, 86, 88,
90, 95, 96, 97, 100, 103, 126,
161, 163, 164, 171, 182, 192,
196, 206, 209, 215, 219, 221,
223, 252, 253, 257, 261, 265
literasi, 17, 18, 23, 24, 26, 41,
46, 69, 148, 174, 187, 202,
209, 251, 261, 265

M

metabolisme, 9, 31, 56, 81, 157,
215, 261
molekuler, 10, 21, 23, 29, 30,
35, 44, 45, 51, 53, 55, 71, 84,
85, 113, 114, 115, 174, 175,
206, 208, 212, 261
mutasi, 32, 33, 35, 41, 56, 57,
58, 59, 68, 135, 261

O

organisme, 11, 32, 41, 43, 90,
127, 128, 179, 180, 207, 253,
261

P

pembelajaran, i, ii, 5, 14, 17, 21,
23, 26, 102, 125, 173, 174,
175, 179, 181, 182, 185, 188,
189, 190, 193, 194, 197, 199,
203, 206, 208, 209, 212, 215,
245, 248, 251, 254, 255, 256,
260, 265

pendidikan, 5, 6, 11, 12, 15, 17,
21, 36, 148, 173, 182, 187,
188, 190, 193, 194, 195, 196,
197, 198, 199, 201, 202, 203,
205, 208, 211, 221, 222, 261,
265

pengetahuan, 6, 10, 11, 13, 14,
15, 18, 25, 26, 66, 137, 149,
168, 170, 182, 186, 187, 188,
189, 197, 201, 202, 203, 205,
206, 208, 209, 211, 212, 214,
215, 216, 218, 220, 221, 222,
223, 254, 255, 256, 260

perubahan, 11, 15, 24, 33, 34, 35, 36, 38, 43, 46, 47, 56, 113, 114, 115, 116, 118, 119, 122, 123, 124, 127, 128, 129, 131, 135, 136, 139, 142, 143, 144, 146, 147, 148, 151, 158, 168, 181, 185, 187, 206, 207, 215, 223, 252, 253, 261

pewarisan, 8, 29, 30, 32, 33, 180, 204, 261

planet, 114, 119, 128, 149, 150, 151, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 163, 164, 169, 170, 178, 179, 215, 244, 261

R

risiko, 19, 22, 23, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 46, 48, 55, 60, 61, 85, 86, 90, 103, 105, 113, 114, 119, 122, 126, 129, 131, 135, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 147, 162, 164, 165, 198, 199, 215, 261

S

sains, i, ii, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 26, 27, 36, 45, 46, 47, 51, 69, 74, 114, 115, 148, 150, 165, 168, 173, 174, 179, 187, 188, 195, 196, 199, 201, 202, 203, 205, 206, 209, 211, 212, 215, 221,

222, 223, 248, 251, 255, 256, 260, 265

sistem, 6, 7, 8, 10, 11, 19, 23, 29, 37, 41, 42, 51, 52, 53, 55, 57, 59, 60, 62, 66, 68, 81, 85, 87, 88, 90, 94, 96, 97, 98, 100, 107, 111, 113, 114, 116, 118, 119, 122, 123, 124, 129, 131, 133, 134, 135, 136, 137, 140, 141, 142, 150, 153, 158, 166, 167, 170, 171, 173, 189, 190, 193, 195, 196, 197, 198, 205, 208, 209, 215, 216, 219, 221, 223, 253, 256, 261

siswa, i, 6, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 20, 21, 23, 24, 26, 27, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 187, 188, 189, 190, 192, 193, 194, 196, 197, 198, 199, 204, 211, 215, 222, 223, 251, 261

T

teknologi, 18, 29, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 46, 47, 48, 51, 60, 61, 69, 72, 78, 83, 84, 87, 88, 93, 94, 96, 98, 99, 100, 101, 103, 104, 105, 106, 107, 110, 111, 125, 134, 135, 136, 137, 138, 141, 148, 149, 161, 166, 168, 171, 177, 187, 188, 193, 195, 197, 198, 209, 212, 215, 222, 253, 256, 261, 265

BIOGRAFI PENULIS



Dr. Abdul Rachman Tiro, M.Pd.

Penulis, lahir di Sentani pada 1 November 1987, merupakan seorang pendidik dan peneliti yang memiliki minat serta keahlian di bidang pendidikan, khususnya pendidikan IPA. Ia meraih gelar Sarjana Pendidikan Kimia di FKIP Universitas Cenderawasih pada tahun 2011, kemudian melanjutkan studi Magister Pendidikan IPA di universitas yang sama dan menyelesaikannya pada tahun 2014. Penulis telah berhasil menyelesaikan pendidikan doktoral di bidang Pendidikan IPA pada FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia pada tahun 2025 dengan dukungan Beasiswa Pendidikan Indonesia (BPI). Selain itu, ia juga menjabat sebagai dosen di Universitas Pendidikan Muhammadiyah Sorong pada Program Studi Pendidikan IPA, Fakultas Pendidikan Eksakta.



SINOPSIS

Buku referensi “Kapita Selekta IPA: Perspektif Interdisipliner dalam Pendidikan Sains” membahas secara komprehensif konsep, prinsip, dan perkembangan Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) dalam perspektif interdisipliner yang relevan dengan tuntutan pendidikan sains abad ke-21. Berangkat dari pemahaman bahwa fenomena alam tidak dapat dijelaskan secara parsial, buku ini mengkaji keterkaitan berbagai cabang ilmu sains, seperti fisika, kimia, biologi, ilmu kebumih, lingkungan, teknologi, dan matematika dalam membangun pembelajaran yang kontekstual, integratif, dan berbasis pemecahan masalah. Disusun dengan pendekatan interdisipliner, buku ini memadukan landasan teoritis pendidikan sains, hasil-hasil penelitian terkini, serta implementasi pembelajaran inovatif yang berorientasi pada penguatan literasi sains, keterampilan berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, dan penguasaan kompetensi abad ke-21. Pembahasan mencakup hakikat dan karakteristik IPA, integrasi antardisiplin ilmu, pendekatan pembelajaran sains modern, literasi sains, STEM/STEAM, isu-isu lingkungan dan keberlanjutan, perkembangan teknologi dalam pendidikan sains, hingga tantangan dan arah pengembangan pendidikan IPA di era transformasi digital.

BUKU REFERENSI

KAPITA SELEKTA IPA

Perspektif Interdisipliner
dalam Pendidikan Sains

Literasi Sains, Pendekatan STEM,
Isu Kontemporer, dan Etnosains

Buku referensi “Kapita Selekt IPA: Perspektif Interdisipliner dalam Pendidikan Sains” membahas secara komprehensif konsep, prinsip, dan perkembangan Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) dalam perspektif interdisipliner yang relevan dengan tuntutan pendidikan sains abad ke-21. Berangkat dari pemahaman bahwa fenomena alam tidak dapat dijelaskan secara parsial, buku ini mengkaji keterkaitan berbagai cabang ilmu sains, seperti fisika, kimia, biologi, ilmu kebumian, lingkungan, teknologi, dan matematika dalam membangun pembelajaran yang kontekstual, integratif, dan berbasis pemecahan masalah. Disusun dengan pendekatan interdisipliner, buku ini memadukan landasan teoritis pendidikan sains, hasil-hasil penelitian terkini, serta implementasi pembelajaran inovatif yang berorientasi pada penguatan literasi sains, keterampilan berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, dan penguasaan kompetensi abad ke-21. Pembahasan mencakup hakikat dan karakteristik IPA, integrasi antardisiplin ilmu, pendekatan pembelajaran sains modern, literasi sains, STEM/STEAM, isu-isu lingkungan dan keberlanjutan, perkembangan teknologi dalam pendidikan sains, hingga tantangan dan arah pengembangan pendidikan IPA di era transformasi digital

$$E = mc^2$$

$$c = \lambda f$$

$$v = \frac{h}{\lambda}$$