

Ir. Agus Sulistiawan, S.Pd., M.T

**REVOLUSI ENERGI DAN KEBERLANJUTAN: TRANSFORMASI MENUJU
DUNIA TANPA KARBON**

Diterbitkan oleh:



BRANDED
TECH
PUBLISHER

Revolusi Energi dan Keberlanjutan: Transformasi Menuju Dunia Tanpa Karbon

Ditulis Oleh: **Ir. Agus Sulistiawan, S.Pd., M.T**

ISBN : Proses Pengajuan
Halaman : xii, 160, Uk: 15.5 x23 cm
Cetakan Pertama : Mei 2026

Editor : Dhea Sartika
Layouter : Cindy Charisma Satriyo
Desain Cover : Moch Mahsun

Diterbitkan Pertama Kali Oleh :
Branded Tech Publisher
(Grup Penerbitan CV Branded Tech Indonesia)

Alamat: Dusun Krajan RT 02 RW 01 Tempuran Bantaran
Probolinggo Jawa Timur 67261| Hp : 0811101665
Website: www.brandedtechpublisher.biz.id
E-mail: brandedtechIndoensia@gmail.com

Anggota IKAPI Nomor: 458/JTI/2025
Tanggal: 1 November 2025

Hak Cipta pada penulis, Isi diluar tanggung jawab percetakan
Copyright © 2026 by Branded Tech Publisher | All Right Reserved
Hak cipta dilindungi undang-undang, dilarang keras
menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian
atau seluruh isi buku ini

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, taufik, dan hidayah-Nya sehingga buku *“Revolusi Energi dan Keberlanjutan: Transformasi Menuju Dunia Tanpa Karbon”* ini dapat diselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan seluruh umatnya yang istiqamah mengikuti ajaran beliau hingga akhir zaman.

Perkembangan peradaban manusia selalu berjalan beriringan dengan perkembangan energi. Dari era kayu bakar, batu bara, minyak bumi, hingga era elektrifikasi modern, energi menjadi fondasi utama kemajuan ekonomi, industri, pendidikan, kesehatan, dan kualitas hidup manusia. Namun di balik kemajuan tersebut, dunia menghadapi tantangan besar berupa krisis iklim, peningkatan emisi gas rumah kaca, kerusakan lingkungan, dan ketidakpastian ketahanan energi global akibat ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Fenomena pemanasan global, cuaca ekstrem, penurunan kualitas lingkungan, serta meningkatnya kebutuhan energi dunia menjadi pengingat bahwa sistem energi masa depan harus dibangun di atas prinsip keberlanjutan.

Dalam konteks inilah energi terbarukan hadir sebagai salah satu solusi strategis untuk menjawab tantangan abad ke-21. Energi surya, angin, air, biomassa, panas bumi, dan berbagai teknologi energi bersih lainnya tidak hanya menawarkan sumber energi yang lebih ramah lingkungan, tetapi juga membuka peluang besar bagi terciptanya kemandirian energi, pertumbuhan ekonomi hijau, inovasi teknologi, dan pembangunan berkelanjutan. Transformasi menuju dunia rendah karbon dan target *Net Zero Emission* kini telah menjadi agenda global yang melibatkan pemerintah, akademisi, industri, dan masyarakat internasional.

Buku ini disusun sebagai upaya untuk memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai konsep, teknologi, inovasi, dan implementasi energi terbarukan dalam kehidupan modern. Pembahasan di dalamnya mencakup berbagai aspek penting, mulai dari pengenalan energi terbarukan, perkembangan transisi energi

global, teknologi panel surya dan energi angin, pembangkit listrik tenaga mikrohidro, sistem biodigester, bioetanol, rekayasa mesin pendukung energi berkelanjutan, hingga inovasi teknologi yang mendukung efisiensi energi dan pengurangan emisi karbon.

Selain membahas aspek teoritis, buku ini juga mengintegrasikan berbagai hasil penelitian, kajian ilmiah terkini, dan perkembangan teknologi yang relevan dengan kebutuhan industri dan masyarakat. Dengan pendekatan yang interdisipliner, buku ini diharapkan mampu menjadi jembatan antara konsep akademik dan penerapan praktis di lapangan. Penulis berusaha menyajikan materi dengan bahasa yang sistematis, ilmiah, namun tetap mudah dipahami sehingga dapat digunakan oleh mahasiswa, dosen, peneliti, praktisi teknik, maupun pembaca umum yang memiliki perhatian terhadap isu energi dan lingkungan.

Indonesia sebagai negara tropis dengan potensi sumber daya energi terbarukan yang sangat besar memiliki peluang strategis untuk menjadi salah satu pusat pengembangan energi bersih dunia. Potensi energi surya, panas bumi, hidro, biomassa, dan energi laut yang melimpah merupakan modal penting dalam mewujudkan ketahanan energi nasional yang berkelanjutan. Namun demikian, pengembangan energi terbarukan juga menghadapi berbagai tantangan, mulai dari aspek teknologi, investasi, regulasi, infrastruktur, hingga kesiapan sumber daya manusia. Oleh sebab itu, diperlukan sinergi antara dunia pendidikan, penelitian, pemerintah, dan sektor industri untuk mempercepat transformasi energi nasional.

Penulis berharap buku ini tidak hanya menjadi referensi akademik, tetapi juga mampu menumbuhkan kesadaran kolektif tentang pentingnya menjaga keberlanjutan lingkungan dan mempercepat transisi energi bersih. Energi bukan sekadar persoalan teknologi, melainkan juga menyangkut masa depan generasi mendatang, keadilan sosial, stabilitas ekonomi, dan keberlangsungan kehidupan di bumi. Dengan pemanfaatan energi yang lebih bijaksana dan berkelanjutan, diharapkan manusia dapat menciptakan keseimbangan antara kemajuan peradaban dan kelestarian alam.

Penulis menyadari bahwa buku ini masih memiliki berbagai keterbatasan dan kekurangan, baik dari sisi kedalaman materi

maupun penyajiannya. Oleh karena itu, kritik dan saran yang konstruktif sangat diharapkan demi penyempurnaan pada edisi-edisi berikutnya.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, motivasi, dan inspirasi dalam proses penyusunan buku ini, baik secara langsung maupun tidak langsung. Semoga segala bentuk kontribusi tersebut menjadi amal kebaikan yang bernilai ibadah di sisi Allah SWT.

Akhir kata, semoga buku ini dapat memberikan manfaat yang luas, memperkaya khazanah ilmu pengetahuan, serta menjadi salah satu kontribusi nyata dalam mendukung pengembangan energi terbarukan dan transformasi menuju dunia yang lebih hijau, berkelanjutan, dan bebas karbon.

Lamongan, Mei 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	ix
BAB I	1
MENGENAL ENERGI TERBARUKAN	1
A. DEFINISI ENERGI TERBARUKAN	1
B. PERKEMBANGAN ENERGI TERBARUKAN DI DUNIA	8
C. KEUNTUNGAN DAN TANTANGAN ENERGI TERBARUKAN	11
D. PERBANDINGAN DENGAN ENERGI FOSIL	17
E. POTENSI ENERGI TERBARUKAN DI INDONESIA DAN DUNIA	20
BAB II.....	29
JENIS-JENIS ENERGI TERBARUKAN	29
A. ENERGI MATAHARI (<i>SOLAR ENERGY</i>)	29
1. <i>Prinsip Kerja Sistem Energi Matahari</i>	30
2. <i>Teknologi Panel Surya dan Aplikasinya</i>	31
3. <i>Energi Angin (Wind Energy)</i>	35
4. <i>Cara Kerja Turbin Angin</i>	36
5. <i>Penerapan Energi Angin Skala Kecil dan Besar</i>	38
BAB III	41
TEKNOLOGI DAN INOVASI DALAM ENERGI TERBARUKAN	41
A. TEKNOLOGI SOLAR PANEL DAN INOVASI TERKINI	41
B. INOVASI DALAM TURBIN ANGIN DAN PEMBANGKIT ENERGI ANGIN	43
C. KONVERSI BIOMASSA MENJADI ENERGI	45
D. TEKNOLOGI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR DAN GEOTERMAL	47
E. SMART GRID DAN SISTEM PENYIMPANAN ENERGI	49
BAB IV	51
KEBIJAKAN DAN REGULASI ENERGI TERBARUKAN	51
A. KEBIJAKAN ENERGI TERBARUKAN GLOBAL	51
B. KEBIJAKAN ENERGI TERBARUKAN DI INDONESIA	55
C. PERAN PEMERINTAH DALAM Mendukung ENERGI TERBARUKAN	59

D. TANTANGAN REGULASI DALAM PENGEMBANGAN ENERGI TERBARUKAN.....	63
E. INSENTIF DAN SUBSIDI UNTUK ENERGI TERBARUKAN	68
BAB V	73
PENGUNAAN ENERGI TERBARUKAN DI SEKTOR INDUSTRI	73
A. SEKTOR INDUSTRI: KEBUTUHAN DAN POTENSI ENERGI TERBARUKAN 73	
B. IMPLEMENTASI ENERGI TERBARUKAN DI SEKTOR PERTANIAN.....	75
C. PEMANFAATAN ENERGI TERBARUKAN DI SEKTOR PERUMAHAN DAN KOMERSIAL	77
D. ENERGI TERBARUKAN UNTUK TRANSPORTASI	79
E. KASUS-KASUS SUKSES PENGGUNAAN ENERGI TERBARUKAN DI INDUSTRI.....	82
BAB VI	85
ENERGI TERBARUKAN DAN DAMPAKNYA TERHADAP LINGKUNGAN	85
A. DAMPAK POSITIF ENERGI TERBARUKAN TERHADAP LINGKUNGAN	85
B. PENGURANGAN EMISI KARBON DAN PEMANASAN GLOBAL	89
C. PENGELOLAAN LIMBAH ENERGI TERBARUKAN	92
D. STUDI KASUS DAMPAK LINGKUNGAN DARI PENGGUNAAN ENERGI TERBARUKAN.....	96
BAB VII.....	101
TANTANGAN DAN PELUANG DALAM PENGEMBANGAN ENERGI TERBARUKAN	101
A. DAMPAK POSITIF ENERGI TERBARUKAN TERHADAP LINGKUNGAN 101	
B. TANTANGAN EKONOMI DAN PEMBIAYAAN	105
C. TANTANGAN SOSIAL DAN KULTURAL	109
D. PELUANG DALAM SEKTOR ENERGI TERBARUKAN.....	113
E. PERAN SUMBER DAYA MANUSIA DAN PENDIDIKAN DALAM PENGEMBANGAN ENERGI TERBARUKAN	118
BAB VII.....	123

TANTANGAN DAN PELUANG DALAM PENGEMBANGAN ENERGI TERBARUKAN 123

 A. TREN DAN PREDIKSI MASA DEPAN ENERGI TERBARUKAN 123

 DAFTAR PUSTAKA 149

 PROFIL PENULIS..... 155

BAB I

MENGENAL ENERGI TERBARUKAN

A. Definisi Energi Terbarukan

Energi adalah fondasi peradaban modern. Sejak manusia menguasai api hingga era mesin uap, kita terus menggantungkan diri pada stok energi yang tersimpan dalam perut bumi: batu bara, minyak, dan gas alam. Buku ini dibuka dengan satu pertanyaan mendasar: apa sebenarnya yang membedakan energi terbarukan dari sumber energi yang selama ini kita anggap biasa? Jawabannya tidak sekadar teknis, melainkan menyangkut cara kita memandang waktu dan alam.

Energi terbarukan adalah jenis energi yang berasal dari sumber daya alam dengan kemampuan regenerasi yang berlangsung dalam skala waktu manusia, bukan skala geologis. Proses alami memperbarui sumber ini secara terus-menerus sehingga manusia dapat memanfaatkannya tanpa kekhawatiran akan habis. Sinar matahari yang tiba setiap pagi, tiupan angin yang tak pernah benar-benar berhenti, siklus air yang dihidupkan oleh matahari, pertumbuhan biomassa dalam satu musim tanam, serta kalor yang mengalir dari inti bumi—semuanya adalah contoh bagaimana alam menawarkan aliran energi, bukan sekadar cadangan statis.

Pemilahan antara energi stok (*stock*) dan energi aliran (*flow*) sangat membantu untuk memahami inti definisi ini. Bahan bakar fosil merupakan stok: jumlahnya terbatas, terbentuk selama jutaan tahun, dan begitu diekstraksi, ia tidak tergantikan dalam waktu yang relevan bagi manusia. Sebaliknya, energi terbarukan adalah aliran: ia tersedia selagi proses alam masih

bekerja. Maka, “habis” tidaknya sumber energi ini sangat bergantung pada laju pemanfaatan kita terhadap laju pemulihan alamiahnya. Definisi ini selaras dengan pandangan termodinamika; energi memang kekal, tetapi kualitas dan ketersediaannya untuk kerja berguna ditentukan oleh seberapa cepat entropi bekerja.

Dalam sebuah kajian komprehensif, Ang et al. (2022) menegaskan bahwa energi terbarukan merupakan elemen kunci pembangkitan listrik yang berkelanjutan, ramah lingkungan, dan hemat biaya. Mereka mencatat bahwa sejak 2019 permintaan bahan bakar fosil untuk listrik mulai menurun seiring meningkatnya pemanfaatan energi terbarukan secara global. Riset mengenai teknologi energi terbarukan, menurut mereka, terus berkembang pesat terutama dalam aspek efisiensi konversi energi.

Sumber-sumber yang termasuk dalam kategori energi terbarukan meliputi:

1. Energi surya

Radiasi elektromagnetik dari matahari yang dapat dikonversi menjadi listrik (*fotovoltaik*) atau panas (kolektor termal). Brownson et al. (2015) mengembangkan kerangka klasifikasi sumber daya surya berbasis aliran (*flow-based*) yang mengadaptasi metode ekonomi mineral untuk energi terbarukan. Mereka memperkenalkan konsep *resource-reserve* untuk energi surya menjadi sebuah terobosan konseptual yang memperlakukan sinar matahari sebagai komoditas energi mentah yang dapat diklasifikasikan dan dianalisis kelayakan ekonominya. Pendekatan ini memperkuat pemahaman bahwa energi surya bukan sekadar "tersedia", melainkan dapat diukur, dipetakan, dan dinilai secara tekno-ekonomi sebagaimana sumber daya alam lainnya.

2. Energi angin

Energi kinetik massa udara yang bergerak akibat perbedaan tekanan atmosfer, dimanfaatkan melalui turbin.

3. Energi air

Energi potensial dan kinetik dari aliran air permukaan, termasuk PLTA skala besar, minihidro, mikrohidro, serta energi arus dan gelombang laut.

4. Biomassa

Materi organik yang menyimpan energi kimia hasil fotosintesis, dapat langsung dibakar, dikonversi menjadi biogas, atau diolah menjadi bahan bakar cair. Salah satu aspek paling signifikan yang dibahas dalam literatur adalah *carbon neutrality* biomassa. Sebuah scoping review yang mengkaji netralitas karbon biomassa hutan untuk bioenergi mengidentifikasi delapan konsep utama netralitas karbon, dengan aspek yang paling sering didiskusikan meliputi batasan temporal dan spasial, asumsi berbasis skenario, serta sumber bahan baku biomassa (*Carbon Neutrality of Forest Biomass for Bioenergy*, 2023). Temuan ini penting karena menunjukkan bahwa klaim netralitas karbon biomassa tidak bersifat absolut, melainkan sangat bergantung pada kerangka waktu analisis, asal biomassa, dan skenario pengelolaan hutan yang digunakan. Dengan demikian, posisi biomassa sebagai energi terbarukan bersifat kontekstual dan memerlukan justifikasi ilmiah berbasis siklus hidup.

5. Energi panas bumi (geothermal)

Kalor yang tersimpan di bawah permukaan bumi, dimanfaatkan sebagai uap atau air panas untuk pembangkit listrik maupun pemanasan langsung. Sebuah tinjauan sistematis terbaru menegaskan bahwa geothermal merupakan sumber energi terbarukan dengan potensi besar untuk memfasilitasi transisi global menuju energi bersih dan berkelanjutan (*Exploring Geothermal Energy as a Sustainable Source of Energy*, 2025). Namun ironisnya, kontribusi geothermal saat ini baru mencapai 0,34% dari total energi global—sebuah kesenjangan yang

menunjukkan urgensi pengembangan teknologi dan investasi di sektor ini. Lebih lanjut, Shortall et al. (2015) menegaskan bahwa geotermal diklasifikasikan sebagai sumber daya terbarukan karena energi yang diambil dari reservoir panas bumi secara kontinu digantikan oleh aliran kalor dari dalam bumi dalam skala waktu yang sebanding dengan laju ekstraksinya.

6. Energi laut

Energi laut mencakup energi pasang surut, energi arus laut, energi gradien salinitas, dan konversi energi termal laut (OTEC). Menurut Perserikatan Bangsa-Bangsa, energi terbarukan laut didefinisikan sebagai “subset energi terbarukan yang melibatkan proses alami di lingkungan laut” (Hussain et al., 2017). Hussain et al. (2017) mengklasifikasikan energi laut ke dalam lima bentuk: energi gelombang, energi pasang surut, arus laut, gradien salinitas, dan konversi energi termal laut. Menariknya, mereka menilai bahwa potensi energi laut sebagai sumber energi terbarukan berada di urutan kedua setelah energi surya, sehingga dapat berperan besar menggantikan sumber energi berbasis fosil di masa depan.

Keseluruhan sumber ini memiliki keunggulan lingkungan yang menonjol: emisi karbon sepanjang siklus hidupnya umumnya jauh lebih rendah dibanding pembakaran fosil. Tidak ada gas rumah kaca baru yang dimobilisasi dari bawah tanah ke atmosfer; karbon yang dilepaskan biomassa, misalnya, adalah karbon yang sebelumnya diserap tanaman dari udara, sehingga bersifat sirkuler. Dampak terhadap ekosistem pun lebih kecil, meskipun bukan tanpa catatan sebagai pembangunan bendungan besar atau perkebunan monokultur untuk bioenergi tetap memerlukan tata kelola hati-hati.

Untuk memberikan pijakan yang mapan, ada baiknya meninjau bagaimana lembaga-lembaga energi internasional

merumuskan definisi ini. Masing-masing definisi memiliki penekanan yang sedikit berbeda, sesuai dengan mandat dan konteks lembaganya.

International Renewable Energy Agency (IRENA) mendefinisikan energi terbarukan sebagai energi yang diperoleh dari sumber yang dapat diperbarui, termasuk matahari, angin, biomassa, panas bumi, dan air (IRENA, 2020). Definisi ini sederhana namun operasional. IRENA menempatkan energi terbarukan sebagai pilar transisi energi global yang berkelanjutan, menyoroti aspek akses, keamanan energi, dan dekarbonisasi. Pada tahun 2024, IRENA semakin mempertegas posisinya dengan merilis *Energy Taxonomy: Classifications for the Energy Transition* (IRENA, 2024), sebuah sistem klasifikasi energi yang dirancang untuk mengatasi ketiadaan standarisasi statistik energi global. Taksonomi ini memfokuskan diri pada perbedaan kritis antara sumber energi terbarukan dan tak terbarukan, serta melangkah lebih jauh dari klasifikasi tradisional dengan mengkategorikan bahan bakar sintetis seperti hidrogen berdasarkan asal-usulnya dan memperkenalkan segmen baru untuk penyimpanan energi. Langkah IRENA ini merupakan respons terhadap masalah yang selama ini menghambat efektivitas kebijakan dan kolaborasi internasional di bidang transisi energi.

U.S. Department of Energy (DOE) menyebut energi terbarukan sebagai energi yang berasal dari proses alam yang tidak akan habis, seperti sinar matahari, angin, air mengalir, gelombang laut, dan panas bumi (DOE, 2021). DOE menambahkan dimensi temporal “tidak akan habis” dan menyoroti bahwa proses alamiah itu berlangsung “dalam waktu yang sangat cepat”. Frasa ini penting karena secara eksplisit membedakan energi terbarukan dari energi fosil yang juga berasal dari proses alam tetapi berlangsung lambat.

World Energy Council (WEC) memberikan definisi yang lebih menonjolkan siklus pendek pemulihan: energi terbarukan dihasilkan dari sumber daya alam yang terbarui dalam jangka waktu sangat pendek, misalnya harian atau musiman, yang

mencakup matahari, angin, air, biomassa, dan geotermal (WEC, 2020). WEC menekankan peran energi terbarukan sebagai elemen kunci dalam mengurangi ketergantungan pada energi fosil dan mitigasi perubahan iklim. Di sini, skala waktu “harian atau musiman” menjadi kriteria pembeda yang tegas.

Jika ketiga definisi itu diperbandingkan, kita menemukan benang merah:

- a. Asal dari sumber daya alam,
- b. Kemampuan terbarui secara alami,
- c. Laju regenerasi yang singkat, dan
- d. Peran strategis dalam sistem energi bersih.

Perspektif hukum internasional memperkaya pemahaman ini. Timchenko (2024) menganalisis dokumen-dokumen organisasi internasional termasuk PBB, IEA, dan IRENA, dan menemukan bahwa konsep energi terbarukan dalam hukum internasional bertumpu pada dua kriteria: kriteria kuantitatif (kecepatan reproduksi sumber energi harus melampaui kecepatan konsumsinya) dan kriteria kualitatif (“keberlanjutan” dalam hal dampak lingkungan). Temuan penting dari analisis ini adalah bahwa nuklir, meskipun memenuhi kriteria keterbaruan secara teknis, tidak diakui sebagai energi terbarukan dalam rezim hukum internasional. Ia juga mengidentifikasi bahwa beberapa jenis energi seperti tenaga air tertentu dan biomassa tradisional tidak dimasukkan dalam lingkup energi terbarukan yang ingin dikembangkan oleh negara-negara melalui kerja sama internasional, meskipun secara teknis memenuhi kriteria.

Perdebatan konseptual mengenai istilah “energi terbarukan” sendiri merupakan diskursus yang hidup dalam literatur Scopus. Harjanne dan Korhonen (2019) dalam artikel provokatif mereka di *Energy Policy* mengkritisi penggunaan istilah ini secara luas. Mereka berargumen bahwa konsep energi terbarukan mengandung problem serius dalam hal keberlanjutan, inkohherensi, dampak kebijakan, taktik *bait-and-switch*, dan sifat menyesatkan secara umum. Mereka mendemonstrasikan bagaimana label “terbarukan” telah

digunakan untuk membingkai debat energi secara simplistik dan bahkan memungkinkan praktik yang sebenarnya tidak berkelanjutan. Alih-alih menggunakan istilah “energi terbarukan”, mereka mengusulkan kategorisasi energi berbasis kandungan karbon dan pembakaran sebagai alternatif yang lebih tidak ambigu. Perspektif kritis ini sangat berharga karena mengingatkan kita bahwa istilah yang kita gunakan membentuk cara kita berpikir, dan cara kita berpikir membentuk kebijakan yang kita hasilkan.

Penting pula dicatat bahwa “terbarukan” bukan sekadar label teknis, melainkan juga memiliki dimensi sosial dan ekonomi. Energi bisa terbarukan secara fisik, namun jika pemanfaatannya merusak tatanan sosial, misalnya penggusuran lahan untuk bendungan raksasa tanpa kompensasi. Maka aspek keberlanjutannya dipertanyakan. Ramalho et al. (2023) menegaskan bahwa keberlanjutan energi terbarukan membutuhkan koordinasi tiga dimensi secara simultan: ekonomi, lingkungan, dan sosial. Melalui *systematic literature review*, mereka menemukan bahwa studi mikro (berfokus pada dampak regional dan lokal) jauh lebih dominan dibanding studi makro (berfokus pada dampak global dan agregat). Mereka mengidentifikasi tujuh metrik untuk dampak lingkungan, empat metrik untuk dampak ekonomi, dan lima metrik untuk dampak sosial, yang menunjukkan kompleksitas dalam mengevaluasi keberlanjutan energi terbarukan secara holistik.

Dalam konteks penerimaan sosial, sebuah *systematic review* terhadap sebelas sumber energi dan teknologi mitigasi menemukan bahwa tingkat akseptabilitas publik tertinggi justru dimiliki oleh energi surya, hidroelektrik, dan angin yang sementara biomassa menduduki posisi moderat (A Systematic Review of Public Acceptability, 2025). Temuan ini menunjukkan bahwa energi terbarukan, secara umum, dipersepsikan jauh lebih positif dibandingkan bahan bakar fosil, nuklir, maupun teknologi penangkapan karbon, terutama terkait dampak terhadap lingkungan, komunitas, dan kesehatan.

Dalam konteks Indonesia, definisi energi terbarukan juga telah diadopsi ke dalam peraturan perundangan, mengacu pada sumber energi yang berasal dari matahari, angin, air, biomassa, panas bumi, dan laut. Kebijakan energi nasional menetapkan target bauran energi terbarukan yang semakin meningkat, menjadikan pemahaman definisi ini sebagai langkah awal untuk membaca peta jalan transisi energi tanah air.

B. Perkembangan Energi Terbarukan di Dunia

Perkembangan energi terbarukan dalam beberapa dekade terakhir telah menjadi salah satu transformasi paling signifikan dalam lanskap energi global. Kesadaran terhadap perubahan iklim, urgensi mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, serta kemajuan pesat di bidang teknologi telah menjadi pendorong utama transisi menuju sistem energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Data empiris dari berbagai belahan dunia menunjukkan bahwa peralihan ini bukan lagi wacana, melainkan realitas statistik yang terus menguat.

1) Lompatan Kapasitas Global yang Belum Pernah Terjadi Sebelumnya

Tahun 2023 menandai titik balik dalam sejarah energi terbarukan global. Menurut laporan *Renewables 2023* yang dirilis oleh *International Energy Agency (IEA)*, penambahan kapasitas energi terbarukan tahunan meningkat hampir 50% menjadi sekitar 510 GW dengan laju pertumbuhan tercepat dalam dua dekade terakhir. Ini adalah tahun ke-22 berturut-turut di mana penambahan kapasitas energi terbarukan mencetak rekor baru (IEA, 2024). China menjadi motor utama akselerasi ini: pada 2023, negara tersebut mengkomisioningkan kapasitas solar PV setara dengan total kapasitas yang dipasang seluruh dunia pada 2022, sementara penambahan kapasitas anginnya melonjak 66% secara tahunan. Secara global, solar PV sendiri menyumbang tiga perempat dari seluruh penambahan kapasitas energi terbarukan (IEA, 2024).

Data dari *International Renewable Energy Agency (IRENA)* memperkuat gambaran ini. *Renewable Capacity Statistics 2024* mencatat bahwa pada akhir 2023, energi terbarukan telah mencapai 43% dari total kapasitas pembangkit listrik terpasang global. Total kapasitas energi terbarukan dunia mencapai 3.870 GW, dengan penambahan 473 GW dalam satu tahun—melonjak 13,9% dibanding tahun sebelumnya. Energi surya dan angin terus mendominasi ekspansi ini, menyumbang 97,6% dari total penambahan kapasitas energi terbarukan (IRENA, 2024c). Namun, IRENA juga mengingatkan bahwa laju pertumbuhan ini masih belum cukup. Untuk mencapai target tripling kapasitas energi terbarukan yang disepakati pada COP28 di Dubai, pertumbuhan tahunan harus ditingkatkan menjadi 16,4% hingga 2030. Tingkat pertumbuhan 14% yang dicapai pada 2023 baru menghasilkan *compound annual growth rate (CAGR)* 10% (2017–2023) dan masih di bawah yang dibutuhkan (IRENA, 2024b).

Proyeksi ke depan menunjukkan urgensi aksi yang lebih agresif. Dalam skenario kebijakan yang ada saat ini, kapasitas energi terbarukan global diperkirakan hanya akan mencapai 7.300 GW pada 2028, dan meningkat 2,5 kali lipat pada 2030 dan jauh dari target tripling yang membutuhkan lebih dari 11.000 GW (IEA, 2024). Kesenjangan ini hanya dapat dijabatani jika pemerintah mengatasi empat tantangan utama:

- a) ketidakpastian kebijakan dan respons yang lambat terhadap lingkungan makroekonomi baru;
- b) investasi infrastruktur jaringan yang tidak memadai;
- c) hambatan administratif, prosedur perizinan yang rumit, serta masalah penerimaan sosial; dan
- d) kurangnya pembiayaan di negara-negara berkembang (IEA, 2024).

2) Pergeseran Fokus Riset Global

Analisis bibliometrik terhadap ribuan publikasi ilmiah menunjukkan bahwa fokus riset energi terbarukan telah bergeser secara fundamental. Zeng et al. (2020) menemukan bahwa riset tidak lagi berpusat pada eksplorasi teknis semata, melainkan telah matang menuju isu-isu integrasi sistem, penyimpanan energi, dan kebijakan pendukung. Lebih lanjut, sebuah meta-analisis komprehensif oleh *Renewable Power Systems: A Comprehensive Meta-Analysis* (2024) yang menggunakan data Scopus dan perangkat VOSviewer mengonfirmasi bahwa kontribusi global dan dukungan kebijakan secara signifikan memengaruhi dinamika riset di bidang ini. Studi tersebut mengidentifikasi bahwa kesenjangan riset terbesar kini terletak pada integrasi sistem energi terbarukan ke dalam jaringan yang sudah ada, bukan lagi pada pengembangan teknologi individual.

3) Penurunan Biaya sebagai Katalis Utama

Dominasi energi surya dan angin dalam pertumbuhan kapasitas terbarukan tidak dapat dilepaskan dari penurunan biaya teknologi yang dramatis. *International Energy Agency* mencatat bahwa biaya modul surya fotovoltaik turun lebih dari 80% dalam kurun satu dekade terakhir (IEA, 2020). Fenomena ini diperkuat oleh kajian dari Kavlak et al. (2018) di *Energy Policy* yang menguraikan bahwa penurunan harga tersebut didorong oleh kombinasi peningkatan efisiensi, skala produksi massal, dan kebijakan insentif di negara-negara pionir seperti Jerman dan China. Perspektif yang lebih segar datang dari *Growth of Renewable Energy: A Review of Drivers from the Economic Perspective* (2025) yang menjelaskan bahwa pertumbuhan energi terbarukan modern (geotermal, angin, surya, dan laut) tidak dapat dijelaskan oleh monokausalitas tunggal. Alih-alih, pertumbuhan ini dipahami melalui teori difusi teknologi yang berlangsung dalam tiga fase: perintisan (*pioneering*),

pertumbuhan (*growth*), dan pematangan (*maturity*). Pada setiap fase, driver yang dominan berbeda-beda, mulai dari insentif kebijakan di fase awal, hingga skala ekonomi dan efek pembelajaran teknologi di fase selanjutnya.

4) Penetrasi di Sektor Transportasi dan Industri

Penggunaan energi terbarukan tidak lagi terbatas pada sektor kelistrikan. Perusahaan teknologi raksasa seperti Google, Apple, dan Microsoft telah berkomitmen untuk menggunakan 100% energi terbarukan dalam operasional mereka. Di sisi lain, sektor transportasi mengalami elektrifikasi yang pesat; kendaraan listrik yang diisi menggunakan listrik dari sumber terbarukan menjadi semakin lazim. IEA (2021) mencatat bahwa pangsa kendaraan listrik global tumbuh secara eksponensial. Sebagai konfirmasi, studi bibliometrik oleh Zhang et al. (2021) di *Journal of Cleaner Production* menunjukkan bahwa publikasi tentang integrasi energi terbarukan di sektor transportasi meningkat tajam sejak 2015, menandakan bahwa mobilitas berkelanjutan telah menjadi arus utama riset.

C. Keuntungan dan Tantangan Energi Terbarukan

Transisi menuju energi terbarukan menghadirkan keuntungan multi-dimensi yang melampaui aspek teknis-lingkungan. Namun, perjalanan ini juga diiringi oleh sejumlah tantangan yang memerlukan solusi inovatif dan pendekatan holistik.

1) Keuntungan Energi Terbarukan

a) Reduksi Emisi Gas Rumah Kaca

Energi terbarukan tidak menghasilkan emisi karbon dioksida atau gas rumah kaca saat dioperasikan. IRENA (2020) menegaskan bahwa dekarbonisasi sistem energi menggunakan energi terbarukan dapat

memangkas lebih dari 70% emisi global pada tahun 2050. Angka ini didukung oleh analisis *life cycle assessment* yang dilakukan oleh Hertwich et al. (2015) di *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS). Studi tersebut menunjukkan bahwa jejak karbon seumur hidup dari pembangkit listrik tenaga surya dan angin hanya sekitar 5–10% dari pembangkit listrik tenaga batu bara.

Sebuah tinjauan komprehensif yang terbit di *Sustainability* (MDPI, 2025) berjudul *Pathways to Carbon Neutrality* memperkuat temuan ini. Dengan menganalisis evolusi pembangkitan listrik global dari enam sumber energi terbarukan antara tahun 2000 hingga 2023, studi tersebut mengonfirmasi bahwa energi terbarukan telah menjadi instrumen paling efektif dalam mencapai netralitas karbon. Pada 2023, kontribusi masing-masing energi terbarukan dalam total pembangkitan listrik terbarukan global adalah: hidro (47,83%), angin darat dan lepas pantai (25,8%), surya (18,19%), bioenergi (7,07%), geotermal (1,1%), dan energi laut (0,01%). Bibliometrik berbasis Web of Science (2021–2025) yang dilakukan dalam studi yang sama juga mengidentifikasi bahwa topik-topik paling banyak disitasi berkorelasi kuat dengan pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), terutama SDG 7 (energi bersih dan terjangkau) dan SDG 13 (aksi iklim) (*Pathways to Carbon Neutrality*, 2025).

b) Sumber Daya Tak Terbatas

Sinar matahari, angin, dan kalor bumi merupakan aliran energi yang terus-menerus tersedia. U.S. Department of Energy (2021) menegaskan bahwa sumber-sumber ini pada dasarnya tidak akan habis dalam kerangka waktu manusia. Konsep ini diperkuat oleh Jacobson et al. (2017) dalam studi mereka di *Joule* yang menyusun peta jalan 100% energi terbarukan

untuk 139 negara, dengan menghitung bahwa potensi teknis sumber daya terbarukan global jauh melampaui total kebutuhan energi manusia saat ini.

c) Keamanan dan Kemandirian Energi

Dengan memproduksi energi dari sumber lokal, suatu negara dapat mengurangi ketergantungan pada impor minyak dan gas yang rentan terhadap gejolak geopolitik. IEA (2020) menekankan bahwa diversifikasi bauran energi menggunakan energi terbarukan adalah strategi kunci ketahanan energi nasional. Perspektif ini diperkuat oleh Sovacool et al. (2020) di *Energy Policy* yang, melalui analisis wacana kebijakan, menemukan bahwa isu keamanan energi menjadi pendorong adopsi energi terbarukan yang sama kuatnya dengan isu lingkungan di banyak negara Asia dan Afrika.

d) Penciptaan Lapangan Kerja

Sektor energi terbarukan menciptakan lebih banyak pekerjaan per megawatt-jam dibandingkan sektor energi fosil. *International Labour Organization* mencatat bahwa industri ini telah merekrut jutaan tenaga kerja di seluruh dunia (ILO, 2020). Studi oleh Ram et al. (2020) di *Environmental Research Letters* menunjukkan bahwa transisi menuju 100% energi terbarukan dapat menciptakan sekitar 40 juta pekerjaan di sektor energi secara global pada 2050, sebagian besar di bidang manufaktur, konstruksi, dan operasi pembangkit.

e) Reduksi Polusi Udara dan Manfaat Kesehatan

Pembakaran bahan bakar fosil adalah penyebab utama polusi udara yang mengakibatkan lebih dari 7 juta kematian prematur setiap tahun (WHO, 2021). Peralihan ke energi terbarukan akan secara langsung memperbaiki kualitas udara. Temuan ini dikonfirmasi oleh Markandya dan Wilkinson (2007) di *The Lancet*

serta studi terbaru oleh Lelieveld et al. (2019) di *Proceedings of the National Academy of Sciences*, yang menunjukkan bahwa penghapusan bahan bakar fosil dapat menurunkan angka kematian akibat polusi udara secara drastis, terutama di Asia Tenggara dan China.

f) Keadilan Energi sebagai Dimensi Baru

Perspektif terbaru menambahkan dimensi keadilan energi sebagai keuntungan transisi. Sebuah studi oleh *Clarifying the Linkage between Renewable Energy Deployment and Energy Justice (2024)* yang terindeks Scopus dan ESCI meneliti hubungan antara penyebaran energi terbarukan dan keadilan energi di 23 negara anggota IEA dari 1995 hingga 2020. Dengan menggunakan teknik ekonometrik canggih seperti *two-step system generalized method of moment (SYS-GMM)*, studi ini menemukan bahwa porsi energi terbarukan yang lebih besar secara substansial meningkatkan tingkat keadilan energi yang mencakup dimensi distribusional, prosedural, dan restoratif. Temuan ini menegaskan bahwa kebijakan energi terbarukan yang memprioritaskan inklusi sosial dan keadilan dapat menghasilkan transisi yang lebih merata dan berkelanjutan (Clarifying the Linkage, 2024).

2) Tantangan Energi Terbarukan

a) Intermitensi dan Variabilitas: Mencari Solusi Penyimpanan

Sifat surya dan angin yang bergantung pada cuaca menuntut solusi fleksibilitas sistem kelistrikan. IEA (2020) menyebut intermitensi sebagai tantangan teknis terbesar transisi energi. Dalam kajian komprehensif di *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Child et al. (2019) menekankan bahwa integrasi energi terbarukan variabel dalam jumlah besar memerlukan transformasi

fundamental desain pasar listrik dan koordinasi transmisi regional.

Perkembangan terbaru menunjukkan kemajuan signifikan dalam mengatasi tantangan ini. Jovanovikj et al. (2024) dalam *Journal of Energy Technology* meneliti secara sistematis tantangan pengenalan *Battery Energy Storage Systems (BESS)* dalam sistem pemanfaatan energi terbarukan. Mereka mengidentifikasi dan mengategorikan tantangan-tantangan tersebut ke dalam aspek teknis, ekonomi, regulasi, dan lingkungan. Studi ini menyoroti pentingnya pendekatan inovatif seperti penggunaan modul baterai bekas (*second-hand battery modules*), praktik produksi berkelanjutan, strategi operasional canggih, dan algoritma pemeliharaan prediktif. Insentif kebijakan dan upaya kolaboratif dengan perusahaan utilitas dan operator jaringan juga diidentifikasi sebagai krusial untuk meningkatkan ketahanan dan keandalan jaringan (Jovanovikj et al., 2024).

b) Biaya Modal dan Risiko Pembiayaan

Walau biaya operasional rendah dan biaya teknologi telah menurun drastis, investasi awal untuk infrastruktur energi terbarukan masih menjadi hambatan, terutama di negara berkembang (IRENA, 2020). Schmidt et al. (2019) di *Nature Energy* menunjukkan bahwa persepsi risiko oleh investor dan ketidakpastian kebijakan seringkali membuat biaya modal untuk proyek energi terbarukan di negara berkembang tetap lebih tinggi dibandingkan di negara maju.

Kajian terbaru yang terindeks Scopus/PubMed (2025) berjudul *Financing Costs and the Competitiveness of Renewable Power* menegaskan bahwa biaya energi terbarukan lebih sensitif terhadap biaya modal (Cost of Capital) dibandingkan energi fosil.

Di Amerika Serikat, kenaikan suku bunga menambah 18% pada *levelized cost of electricity* (LCOE) solar PV, dibandingkan hanya 9% untuk turbin gas siklus gabungan. Tanpa kredit pajak, selisih ini bisa semakin melebar, menegaskan bahwa lingkungan pembiayaan yang stabil adalah prasyarat untuk daya saing energi terbarukan (Financing Costs, 2025).

c) Keterbatasan Infrastruktur Penyimpanan dan Jaringan

Teknologi penyimpanan energi adalah kunci untuk menjembatani ketidaksesuaian antara produksi dan permintaan. *U.S. Department of Energy* (2021) menekankan bahwa R&D penyimpanan harus menjadi prioritas. McLellan et al. (2013) di *Journal of Cleaner Production* telah memperingatkan bahwa rantai pasok material untuk baterai *lithium-ion* seperti lithium, kobalt, dan nikel yang dapat menjadi titik kritis yang memicu ketergantungan baru dan dampak lingkungan tersendiri.

d) Dampak Lingkungan Lokal dan Penerimaan Sosial

Infrastruktur energi terbarukan bukan tanpa jejak. PLTA bendungan besar dapat mengubah ekosistem sungai, dan ladang turbin angin dapat memengaruhi pola migrasi burung. World Energy Council (2020) mengingatkan perlunya tata kelola yang cermat. Penelitian oleh Gibson et al. (2017) di *BioScience* menunjukkan bahwa meskipun dampak relatif energi terbarukan jauh lebih kecil dibanding fosil, pembangunan berskala besar harus mematuhi analisis dampak lingkungan yang ketat dan melibatkan komunitas lokal.

Sebuah studi oleh Ramalho et al. (2023) dalam *Renewable and Sustainable Energy Reviews* menegaskan bahwa keberlanjutan energi terbarukan membutuhkan koordinasi tiga dimensi secara simultan: ekonomi, lingkungan, dan sosial. Sementara itu, A

Systematic Review on the Path to Inclusive and Sustainable Energy Transitions (2024) yang terbit di MDPI dan terindeks Scopus menyoroti bahwa energi literasi dan keadilan energi memainkan peran penting dalam transisi yang inklusif. Studi ini menemukan bahwa negara-negara dengan program transisi energi yang maju cenderung mengintegrasikan ketiga elemen tersebut dalam kerangka kebijakan mereka (*Inclusive and Sustainable Energy Transitions, 2024*).

e) Ketergantungan pada Bahan Baku Kritis

Panel surya dan turbin angin memerlukan logam tanah jarang, silikon, dan mineral lainnya. IEA (2020) mengidentifikasi bahwa konsentrasi pasokan di beberapa negara dapat menimbulkan kerentanan baru. Valero et al. (2018) dalam *Resources, Conservation and Recycling* memetakan risiko material kritis untuk transisi energi dan mengusulkan diversifikasi sumber serta daur ulang sebagai strategi mitigasi.

D. Perbandingan dengan Energi Fosil

Perbandingan antara energi terbarukan dan energi fosil dapat dikerangkakan dalam perspektif lingkungan, keberlanjutan, ekonomi, keamanan energi, efisiensi, dan dampak sosial. Analisis ini semakin diperkaya oleh temuan-temuan ilmiah terbaru.

1) Dampak Lingkungan

Energi terbarukan menghasilkan emisi karbon yang sangat rendah atau nol saat operasional. IRENA (2020) memproyeksikan reduksi emisi 70% pada 2050. Sebaliknya, pembakaran batu bara, minyak, dan gas adalah sumber utama CO₂ antropogenik (WHO, 2021). Sebuah studi *life cycle assessment* yang berpengaruh oleh Hertwich et al. (2015) di PNAS menemukan bahwa pembangkit listrik berbasis fosil memiliki potensi

pemanasan global 10 hingga 40 kali lebih besar dibandingkan pembangkit surya dan angin untuk setiap kWh yang dihasilkan.

2) Keberlanjutan Sumber Daya

Energi terbarukan bersumber dari aliran alam yang terus diperbarui, sehingga tidak akan habis (DOE, 2021). Energi fosil adalah stok yang terbatas dan suatu saat akan mencapai puncak produksi lalu menurun. Capellán-Pérez et al. (2019) dalam *Energy Strategy Reviews* melakukan pemodelan dinamika sumber daya dan menyimpulkan bahwa penurunan ketersediaan minyak dan gas konvensional akan menjadi kenyataan pada paruh kedua abad ini, menguatkan urgensi transisi.

3) Biaya: Dinamika LCOE Terkini

Biaya *levelized cost of electricity* (LCOE) dari surya dan angin telah turun di bawah biaya pembangkit listrik tenaga fosil baru di banyak wilayah (IRENA, 2020). Lazard (2020) mencatat bahwa bahkan tanpa subsidi, angin darat dan surya skala utilitas adalah sumber listrik termurah yang pernah ada. Namun, perbandingan LCOE yang sederhana tidak menangkap nilai keandalan dan dispatchability.

Studi terbaru yang dipublikasikan di *Energy Strategy Reviews* (2025) oleh Bahrar et al. memberikan analisis komprehensif tentang daya saing energi terbarukan di Maroko. Hasilnya menunjukkan bahwa pembangkit listrik tenaga batu bara masih memiliki LCOE terendah (0,02–0,2 MAD/KWh), diikuti oleh gas (0,05–0,09 MAD/KWh). Namun, energi terbarukan terus mendekat: angin 0,17–0,74 MAD/KWh, hidro 0,18–0,37 MAD/KWh, dan surya 0,2–0,73 MAD/KWh. Analisis biaya menunjukkan bahwa LCOE pembangkit berbasis fosil terutama dipengaruhi oleh biaya bahan bakar dan pemeliharaan, sedangkan LCOE energi terbarukan lebih

bergantung pada belanja modal dan kapasitas pembangkitan. Implikasinya: seiring dengan terus menurunnya biaya teknologi energi terbarukan dan meningkatnya harga bahan bakar fosil, persilangan (*crossover*) daya saing akan terjadi secara progresif (Bahrar et al., 2025).

Dari perspektif pembiayaan, studi *Financing Costs and the Competitiveness of Renewable Power (2025)* di *Nature Energy* menekankan bahwa sensitivitas LCOE energi terbarukan terhadap biaya modal membuatnya rentan terhadap kenaikan suku bunga. Di AS, kenaikan suku bunga menambah 18% pada LCOE solar PV dibandingkan 9% untuk gas. Di Eropa, energi terbarukan tetap lebih murah daripada bahan bakar fosil dalam semua skenario pembiayaan karena tingginya harga gas alam dan karbon, tetapi di AS, kebijakan kredit pajak menjadi penentu krusial (Financing Costs, 2025).

4) Keamanan dan Ketergantungan Energi

Energi terbarukan bersifat lokal dan mengurangi impor energi, meningkatkan ketahanan nasional (IEA, 2020). Energi fosil rentan terhadap geopolitik dan volatilitas harga. Cherry et al. (2018) di *Energy Policy* menunjukkan bahwa negara-negara yang sangat bergantung pada impor gas dari Rusia atau minyak dari Timur Tengah menghadapi kerentanan yang lebih besar, dan energi terbarukan menjadi alat diversifikasi geopolitik yang signifikan.

5) Efisiensi Konversi Energi

Pembangkit listrik tenaga surya dan angin memiliki efisiensi konversi yang berbeda-beda karena bergantung pada teknologi dan kondisi alam. Meskipun turbin angin modern dapat mencapai efisiensi di atas 50% dari batas Betz, energi fosil juga memiliki kerugian

termodinamika besar. Lebih penting, energi fosil membuang sebagian besar energi primer sebagai panas buang. Smil (2017) dalam *Energy Transitions* mencatat bahwa hanya sekitar sepertiga energi primer dari pembakaran fosil yang benar-benar menjadi kerja berguna.

6) Dampak Sosial dan Ekonomi

Pergeseran ke energi terbarukan menciptakan lebih banyak lapangan kerja per unit energi yang dihasilkan (ILO, 2020). Energi fosil cenderung padat modal dan mengonsentrasikan kekayaan di segelintir perusahaan. Zhang et al. (2021) di *Journal of Cleaner Production* mengamati bahwa di negara-negara yang beralih ke energi terbarukan, terjadi pertumbuhan ekonomi lokal yang lebih inklusif serta penurunan kemiskinan energi, khususnya di kawasan pedesaan. Namun, transisi yang tidak dikelola dengan adil dapat menimbulkan isu *energy justice*, seperti pengabaian pekerja tambang yang menjadi sebuah isu yang dibahas oleh Heffron et al. (2020) di *Energy Research & Social Science*.

E. Potensi Energi Terbarukan di Indonesia dan Dunia

Potensi energi terbarukan di dunia sangat melimpah dan tersebar secara geografis. Secara teoritis, radiasi matahari yang mencapai bumi dalam satu jam memiliki energi yang cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik seluruh umat manusia selama satu tahun (Jacobson et al., 2017). IRENA (2021) memperkirakan bahwa bauran energi terbarukan sebesar 90% pada 2050 adalah skenario yang realistis secara teknis maupun ekonomis. Pada tataran global, energi terbarukan telah mencapai 43% dari total kapasitas pembangkit listrik terpasang dunia pada akhir 2023, dengan penambahan kapasitas tahunan yang terus mencetak rekor baru (IRENA, 2024c).

Indonesia, sebagai negara kepulauan tropis yang terletak di Cincin Api Pasifik, memiliki keunggulan alam yang hampir sempurna untuk mengembangkan berbagai jenis energi terbarukan. Total potensi teoretisnya melampaui 417,8 GW, mencakup geotermal, surya, angin, hidro, biomassa, dan energi laut (Anggriawan, 2025). Namun, ironisnya, pemanfaatannya masih sangat timpang. Hingga akhir tahun 2023, kapasitas terpasang pembangkit energi terbarukan di Indonesia baru mencapai sekitar 13.155 MW, atau kurang dari 3,2% dari total potensi yang ada. Sebagai perbandingan, potensi energi surya saja diperkirakan mencapai 207,8 GWp, sementara realisasi PLTS baru berada di kisaran 300 MWp (Renewable Energy Indonesia, 2024).

Kesenjangan antara potensi dan realisasi ini tercermin secara gamblang dalam bauran energi nasional. Pada tahun 2024, pangsa energi terbarukan dalam bauran energi primer baru menyentuh angka sekitar 14%, masih sangat jauh dari target 23% yang dicanangkan dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) untuk tahun 2025. Bahkan dalam bauran kelistrikan, kontribusi energi terbarukan pada tahun 2023 baru mencapai sekitar 19,6%, dengan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) batu bara masih mendominasi lebih dari 60% (Renewable Energy Indonesia, 2024). Hal ini menunjukkan bahwa ketergantungan Indonesia pada bahan bakar fosil, khususnya batu bara, masih sangat tinggi, sekaligus menegaskan betapa ambisiusnya target yang harus dikejar dalam waktu singkat.

Untuk mengatasi defisit ini, pemerintah melalui Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030 telah menetapkan target penambahan kapasitas pembangkit energi terbarukan sebesar 20,9 GW hingga tahun 2030. Namun, proyeksi yang ada menunjukkan bahwa penambahan kapasitas terpasang rata-rata hanya sekitar 1,2 GW per tahun, yang mengindikasikan bahwa target RUPTL tersebut berisiko tidak tercapai tanpa akselerasi yang

signifikan (Renewable Energy Indonesia, 2024). Program strategis seperti pemasangan PLTS Atap yang ditargetkan mencapai 3,6 GW pada tahun 2025 juga masih menghadapi berbagai hambatan, terutama terkait regulasi dan kesiapan jaringan.

Sejumlah studi terbaru menyoroti akar permasalahan lambannya transisi ini. Anggriawan (2025) mencatat bahwa tumpang tindih regulasi, keterlambatan implementasi kebijakan seperti Rencana Umum Energi Daerah (RUED), dan ketiadaan kerangka hukum terpadu untuk energi terbarukan menjadi penghambat utama. Hersaputri et al. (2024) menggunakan model OSeMOSYS untuk menegaskan bahwa tenaga surya, panas bumi, dan tenaga air merupakan alternatif utama pengganti batu bara, namun investasi besar-besaran tetap diperlukan meskipun dalam skenario paling ambisius sekalipun. Studi tersebut juga menemukan bahwa tingkat pajak karbon Indonesia saat ini belum cukup agresif untuk menghasilkan pengurangan emisi yang signifikan.

Dari perspektif investasi, sektor geotermal dan hidro telah menerima manfaat dari kebijakan feed-in tariff dan insentif pajak, sementara sektor surya dan angin masih berkutut dengan masalah tarif yang rendah dan defisit infrastruktur transmisi (Evaluation of Green Energy Policy, 2024). Potensi energi laut, mikrohidro, dan bioenergi juga sangat besar, terutama untuk melistriki daerah-daerah terpencil dan kepulauan. Teknologi mikrohidro, misalnya, dapat menjadi tulang punggung elektrifikasi pedesaan di lereng-lereng pegunungan dengan biaya yang kompetitif (Rahman et al., 2017). Sementara itu, pemanfaatan penuh limbah sawit sebagai biopellet berpotensi memenuhi sebagian besar kebutuhan listrik di pedesaan Sumatera dan Kalimantan (Siregar et al., 2019).

Indonesia berada dalam posisi paradoks: dikaruniai potensi energi bersih kelas dunia, namun masih berkutut pada hambatan struktural yang membuatnya tertatih-tatih

dalam perlombaan transisi energi global. Menjembatani jurang antara potensi dan realisasi memerlukan reformasi kebijakan yang radikal, mulai dari penetapan harga karbon yang efektif, penyederhanaan prosedur investasi, hingga pembangunan infrastruktur transmisi yang masif. Sebagaimana ditekankan oleh Kennedy dan Suryadi (2018), reformasi subsidi energi fosil dan perbaikan tata kelola merupakan prasyarat mutlak untuk membuka seluruh potensi ini dan mewujudkan ketahanan energi nasional yang sesungguhnya.

Potensi energi terbarukan di dunia sangat melimpah dan tersebar secara geografis. Secara teoritis, radiasi matahari yang mencapai bumi dalam satu jam memiliki energi yang cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik seluruh umat manusia selama satu tahun. Jacobson et al. (2017) di *Joule* menghitung bahwa potensi teknis energi surya dan angin di berbagai negara jauh melampaui konsumsi energi domestik mereka. Di tingkat global, IRENA (2021) memperkirakan bahwa bauran energi terbarukan sebesar 90% pada 2050 adalah skenario yang realistis secara teknis maupun ekonomis.

Indonesia, sebagai negara kepulauan tropis yang terletak di Cincin Api Pasifik, memiliki keunggulan alam yang hampir sempurna untuk mengembangkan berbagai jenis energi terbarukan. Potensi ini telah dikaji secara serius di berbagai jurnal bereputasi internasional.

1) Potensi Total dan Realisasi yang Masih Rendah

Sebuah studi terbaru oleh Anggriawan (2025) yang terbit di *BIO Web of Conferences* dan terindeks Scopus mencatat bahwa Indonesia memiliki potensi energi terbarukan lebih dari 417,8 GW, mencakup geotermal, surya, angin, dan hidro. Namun, ironisnya, baru sekitar 10,4 GW (2,5%) yang telah dimanfaatkan. Bahan bakar fosil masih mendominasi 88% bauran energi nasional. Transisi yang lambat ini disebabkan oleh

tumpang tindih regulasi, keterlambatan implementasi kebijakan seperti Rencana Umum Energi Daerah (RUED) yang baru diselesaikan oleh 16 dari 34 provinsi, serta ketiadaan kerangka hukum terpadu untuk energi terbarukan. Studi ini merekomendasikan penyusunan Undang-Undang Energi Terbarukan yang komprehensif untuk menyederhanakan tata kelola, meningkatkan kepastian investasi, dan mendukung target bauran energi terbarukan 23% pada 2025 (Anggriawan, 2025).

2) Energi Surya, Panas Bumi, dan Hidro sebagai Alternatif Utama

Hersaputri et al. (2024) dalam studi yang dipublikasikan di jurnal *Climate* (terindeks Scopus dan WoS) menggunakan model optimasi biaya terendah OSeMOSYS untuk mengeksplorasi bauran energi ideal dan jalur pengurangan emisi di Indonesia. Hasilnya menyoroti bahwa tenaga surya, panas bumi, dan tenaga air adalah alternatif utama untuk menggantikan batu bara. Enam skenario dimodelkan untuk periode 2015–2050, termasuk phase-out batu bara, *NDC (Nationally Determined Contribution)*, JETP (Just Energy Transition Partnership), dan implementasi pajak karbon. Hasil menunjukkan bahwa meskipun investasi besar-besaran pada energi terbarukan dilakukan dalam skenario NDC dan JETP, emisi hanya dapat dikurangi masing-masing sebesar 55% dan 52% pada 2050. Lebih lanjut, tingkat pajak karbon Indonesia saat ini dinilai tidak akan menghasilkan pengurangan emisi yang signifikan. Tiga rekomendasi kebijakan yang diusulkan adalah: (1) mempercepat pensiun PLTU; (2) memberlakukan tarif pajak karbon yang agresif; (3) memprioritaskan investasi pada teknologi surya (Hersaputri et al., 2024).

3) Evaluasi Efektivitas Kebijakan Hijau

Studi oleh *Evaluation of the Effect of Green Energy Policy on Renewable Power Plant Investment in Indonesia (2024)*, yang terindeks di Scopus dan menggunakan data 2015–2024, mengevaluasi dampak kebijakan energi hijau terhadap investasi pembangkit listrik energi terbarukan di Indonesia. Hasil analisis komparatif pada proyek surya, angin, geotermal, dan hidro menunjukkan bahwa feed-in tariff dan insentif pajak telah secara signifikan mendorong investasi di proyek geotermal dan hidro. Namun, sektor surya dan angin masih menghadapi tantangan serius berupa tarif yang rendah dan defisit infrastruktur. Studi ini juga menekankan perlunya stabilitas kebijakan, perluasan jaringan transmisi, dan strategi yang spesifik untuk setiap teknologi guna mengoptimalkan kerangka kerja energi hijau Indonesia (*Evaluation of Green Energy Policy, 2024*).

4) Tantangan Struktural Menuju *Net Zero Emissions*

Balqis dan Armansyah (2025) dalam artikel yang terbit di *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* mengidentifikasi bahwa target Net Zero Emissions (NZE) Indonesia sebagaimana dituangkan dalam Rencana Umum Energi Nasional menghadapi kendala serius akibat ketergantungan yang masih tinggi pada bahan bakar fosil dan infrastruktur energi terbarukan yang tidak memadai. Studi ini menemukan adanya kesenjangan antara target yang direncanakan pemerintah dan kemajuan aktual yang dicapai. Strategi implementasi yang rinci masih belum jelas, dan risiko finansial serta investasi yang inheren menjadi hambatan besar. Sumber-sumber energi terbarukan tertentu memerlukan dukungan teknologi penyimpanan energi dan/atau investasi awal yang

substansial. Mencapai target NZE membutuhkan komitmen yang lebih besar dan upaya bersama dari seluruh pemangku kepentingan (Balqis & Armansyah, 2025).

5) Potensi Energi Laut, Mikrohidro, dan Bioenergi

Selain sumber-sumber utama, Indonesia juga memiliki potensi signifikan pada energi laut, mikrohidro, dan bioenergi. Orhan et al. (2015) dalam *Renewable and Sustainable Energy Reviews* menyebutkan bahwa energi pasang surut dan arus laut di selat-selat sempit Indonesia berpotensi besar, namun masih dalam tahap riset awal. Rahman et al. (2017) dalam *Energy for Sustainable Development* menunjukkan bahwa teknologi mikrohidro dapat menyediakan listrik andal bagi komunitas terpencil di lereng-lereng pegunungan Indonesia dengan biaya kompetitif. Siregar et al. (2019) dalam *Biomass and Bioenergy* mengkaji potensi konversi limbah sawit menjadi biopellet dan listrik, menemukan bahwa pemanfaatan penuh residu ini dapat memenuhi sebagian besar kebutuhan listrik di pedesaan Sumatera dan Kalimantan.

6) Jalan Menuju Transisi yang Berkeadilan

Indonesia kini berada di persimpangan jalan yang menentukan: memiliki sumber daya melimpah namun masih berkuat pada hambatan struktural. Sukarno et al. (2016) dalam tinjauan mereka di *Renewable and Sustainable Energy Reviews* menyimpulkan bahwa energi surya, terutama melalui sistem fotovoltaik atap, adalah teknologi paling siap pakai untuk Indonesia, khususnya untuk melistriki daerah-daerah yang belum terjangkau jaringan PLN. Kennedy dan Suryadi (2018) di *Energy Research & Social Science* menganalisis politik ekonomi energi terbarukan di Indonesia dan menyimpulkan bahwa reformasi subsidi dan tata kelola

yang lebih baik merupakan prasyarat mutlak untuk membuka potensi ini. Maulidia et al. (2019) di *Renewable Energy* menyoroti bahwa penetapan harga jual listrik yang rendah oleh PLN menghambat investasi swasta di sektor energi terbarukan.

BAB II

JENIS-JENIS ENERGI TERBARUKAN

A. Energi Matahari (*Solar Energy*)

Energi matahari merupakan radiasi elektromagnetik yang dipancarkan Matahari dan dapat dikonversi menjadi listrik maupun panas. *International Renewable Energy Agency* mendefinisikannya sebagai energi yang diperoleh dari radiasi surya, dimanfaatkan melalui panel fotovoltaik (PV) atau kolektor termal, dan memiliki potensi sangat besar untuk memenuhi kebutuhan energi global di masa depan (IRENA, 2020). U.S. Department of Energy menekankan bahwa energi surya adalah salah satu sumber terbarukan dengan pertumbuhan tercepat, yang mampu menggantikan penggunaan bahan bakar fosil (DOE, 2021). *World Energy Council* menyoroti pentingnya pengembangan teknologi fotovoltaik dan sistem termal surya untuk mempercepat transisi menuju sistem energi berkelanjutan (WEC, 2020), sedangkan National Renewable Energy Laboratory menjelaskan bahwa proses fotovoltaik mengandalkan material semikonduktor untuk mengubah cahaya matahari menjadi listrik, sementara sistem termal mengonversi radiasi menjadi panas untuk berbagai aplikasi (NREL, 2020).

Potensi energi surya sangat melimpah; dalam satu jam, bumi menerima radiasi Matahari yang cukup untuk memenuhi konsumsi listrik seluruh umat manusia selama setahun (Jacobson et al., 2017). Indonesia, sebagai negara tropis dengan insolasi harian rata-rata sekitar 4,8 kWh/m²,

memiliki potensi teknis yang besar untuk mengembangkan sistem fotovoltaik atap sebagai solusi elektrifikasi daerah terpencil (Sukarno et al., 2016).

1. Prinsip Kerja Sistem Energi Matahari

Sistem energi surya bekerja melalui dua mekanisme utama: konversi fotovoltaik langsung menjadi listrik dan konversi termal menjadi panas.

a) Sistem Fotovoltaik (PV)

Sistem Fotovoltaik (PV) memanfaatkan efek fotovoltaik pada material semikonduktor yang biasanya silikon. Ketika foton dari sinar matahari diserap oleh sel surya, elektron pada pita valensi tereksitasi ke pita konduksi, menciptakan pasangan *elektron-hole*. Medan listrik internal yang terbentuk dari sambungan p-n memisahkan muatan tersebut, menghasilkan arus listrik searah (DC). Arus ini kemudian dialirkan melalui inverter untuk diubah menjadi arus bolak-balik (AC) agar kompatibel dengan jaringan listrik atau peralatan rumah tangga (NREL, 2020). Inovasi material terus meningkatkan efisiensi; sel surya perovskit, misalnya, telah mencapai efisiensi laboratorium di atas 25% dalam satu dekade pengembangan, menjadikannya salah satu teknologi paling menjanjikan untuk komersialisasi massal (Green et al., 2022).

b) Sistem Kolektor Termal

Sistem Kolektor Termal menyerap radiasi matahari menggunakan pelat atau pipa berlapis material penyerap selektif. Energi panas yang terkumpul ditransfer ke fluida kerja (air atau campuran air-glycol) yang mengalir di dalam kolektor. Fluida panas ini dapat langsung digunakan untuk pemanas air domestik, pemanas ruangan, atau disimpan dalam tangki terisolasi untuk digunakan saat malam atau cuaca mendung. Pada sistem pembangkit listrik tenaga surya termal

terkonsentrasi (CSP), cermin atau lensa memfokuskan radiasi matahari ke penerima untuk memanaskan fluida hingga suhu tinggi, menghasilkan uap yang memutar turbin-generator (IRENA, 2020). CSP dengan penyimpanan termal menawarkan keunggulan *dispatchability* kemampuan menghasilkan listrik sesuai permintaan yang tidak dimiliki oleh PV konvensional (Pelay et al., 2017).

Kedua sistem ini dapat diterapkan dalam konfigurasi *grid-tied* (terhubung ke jaringan) maupun off-grid (mandiri dengan baterai). Sistem *grid-tied* memungkinkan pemilik mengirim kelebihan listrik ke jaringan melalui mekanisme *net metering*, sementara sistem *off-grid* menyediakan akses listrik bagi wilayah yang belum terjangkau jaringan transmisi (DOE, 2021).

2. Teknologi Panel Surya dan Aplikasinya

Teknologi panel surya terus berevolusi, *menghadirkan* beberapa generasi dengan karakteristik efisiensi dan biaya yang berbeda.

Panel silikon monokristalin memiliki efisiensi konversi tertinggi di antara teknologi komersial (15–22%) dengan umur operasional mencapai 25–30 tahun. Meskipun biaya produksinya lebih mahal, kepadatan dayanya yang tinggi membuatnya ideal untuk instalasi atap terbatas (DOE, 2021). *Panel silikon polikristalin* menawarkan efisiensi sedikit lebih rendah (13–17%) dengan biaya fabrikasi yang lebih ekonomis, sehingga banyak digunakan pada proyek skala utilitas. *Panel film tipis* (seperti CdTe dan CIGS) memiliki efisiensi sekitar 7–13% namun unggul dalam fleksibilitas dan bobot ringan, cocok untuk aplikasi pada permukaan melengkung atau bangunan (NREL, 2020). *Panel bifacial* mampu menangkap cahaya dari kedua sisi, meningkatkan hasil energi hingga 10–20% terutama

pada permukaan dengan albedo tinggi seperti salju atau pasir (Guerrero-Lemus et al., 2022).

Aplikasi panel surya telah berkembang jauh melampaui sekadar produksi listrik di atap rumah. Pada sektor perumahan dan komersial, sistem fotovoltaiik atap kini menjadi pemandangan lazim di perkotaan maupun pinggiran. Selain memangkas tagihan listrik bulanan secara signifikan, instalasi ini memungkinkan pemilik bangunan untuk berpartisipasi aktif dalam transisi energi melalui mekanisme *net metering* kelebihan listrik yang dihasilkan pada siang hari disalurkan ke jaringan dan dikreditkan untuk konsumsi malam hari. Dalam konteks Indonesia, Sukarno et al. (2016) menekankan bahwa sistem PV atap merupakan teknologi paling siap pakai untuk mempercepat bauran energi terbarukan nasional. Studi oleh Sommerfeldt dan Madani (2017) di *Renewable and Sustainable Energy Reviews* menunjukkan bahwa sistem PV atap di wilayah tropis dapat mencapai *grid parity*, titik di mana biaya listrik surya setara atau lebih murah daripada tarif jaringan dalam waktu kurang dari satu dekade setelah instalasi, memperkuat argumen keekonomiannya bagi rumah tangga.

Pada *skala* yang jauh lebih besar, ladang surya (*solar farms*) dengan kapasitas ratusan megawatt telah menjadi tulang punggung pembangkitan listrik terbarukan di banyak negara. Tidak seperti sistem atap yang tersebar, ladang surya memusatkan ribuan panel di atas lahan luas, sering kali di daerah beriklim kering atau semi-kering dengan iradiasi tinggi. India, China, dan Amerika Serikat memimpin pengembangan ladang surya skala utilitas, dengan biaya listrik yang terus merosot hingga di bawah 30 USD/MWh di lokasi-lokasi paling kompetitif (IEA, 2024). Keunggulan skala ekonomis ini memungkinkan listrik surya disalurkan langsung ke jaringan transmisi nasional, menggantikan

peran pembangkit listrik berbasis batu bara dan gas alam secara bertahap. Tantangan yang muncul adalah kebutuhan lahan yang luas, yang mendorong inovasi seperti *agrivoltaics*, integrasi panel surya dengan pertanian di lahan yang sama, sehingga produktivitas lahan tidak hilang (Dupraz et al., 2011).

Di sisi lain, sistem *off-grid* memainkan peran *kemanusiaan* yang tak tergantikan. Panel surya yang dipadukan dengan baterai menyediakan listrik bagi komunitas di daerah pedesaan terpencil, pulau-pulau kecil, dan fasilitas kritis yang tidak mungkin dijangkau jaringan transmisi. Klinik kesehatan di pedalaman Afrika dan Asia Selatan mengandalkan sistem solar home system (SHS) untuk menjaga rantai dingin vaksin dan penerangan ruang operasi pada malam hari. Stasiun telekomunikasi yang menopang konektivitas digital di wilayah terisolasi juga banyak yang beralih dari generator diesel ke sistem surya hibrida, mengurangi biaya logistik bahan bakar sekaligus meningkatkan keandalan (Palit & Chaurey, 2011). Di Indonesia, program elektrifikasi pedesaan berbasis energi surya telah membawa listrik ke pulau-pulau terdepan yang sebelumnya gelap gulita setelah matahari terbenam, meskipun tantangan pemeliharaan dan penggantian baterai masih memerlukan model kelembagaan yang berkelanjutan (Sukarno et al., 2016).

Integrasi energi surya ke dalam sektor transportasi kini memasuki babak baru. Stasiun pengisian kendaraan listrik bertenaga surya (*solar EV charging station*) memungkinkan pengisian daya mobil listrik sepenuhnya dari sumber terbarukan, memutus rantai emisi dari hulu hingga hilir. Konsep ini telah diimplementasikan di berbagai kampus universitas, pusat perbelanjaan, dan rest area jalan tol di Eropa dan Amerika Utara. Lebih revolusioner lagi, teknologi *vehicle-integrated photovoltaics* (VIPV) menyematkan panel surya

langsung pada bodi kendaraan, sehingga mobil dapat mengisi daya sendiri saat diparkir atau bahkan saat melaju di bawah sinar matahari. Meskipun kontribusinya terhadap total kebutuhan daya kendaraan masih terbatas, sekitar 10–30 km tambahan jarak tempuh per hari untuk mobil penumpang (Araki et al., 2018) teknologi ini membuka jalan bagi mobilitas yang lebih mandiri secara energi.

Aplikasi panel surya juga merambah dimensi yang paling fundamental bagi kehidupan: air. Di wilayah-wilayah yang mengalami krisis air tawar, energi surya menggerakkan proses desalinasi untuk mengubah air laut atau air payau menjadi air minum. Teknologi desalinasi membran, terutama reverse osmosis (RO), kini banyak digabungkan dengan panel PV untuk menghasilkan air bersih tanpa bergantung pada listrik jaringan atau generator diesel. Al-Karaghoul dan Kazmerski (2013) dalam tinjauan mereka di *Renewable and Sustainable Energy Reviews* mendokumentasikan bahwa biaya air dari sistem PV-RO telah menurun secara signifikan, menjadikannya opsi yang layak bagi komunitas pesisir di Timur Tengah, Afrika Utara, dan kawasan kepulauan. Selain itu, desalinasi termal tenaga surya yang memanfaatkan kolektor atau konsentrator untuk menguapkan dan mengembunkan air yang menawarkan solusi sederhana dan murah untuk skala rumah tangga di daerah terpencil. Kombinasi antara krisis air global dan penurunan biaya panel surya membuat sinergi antara energi dan air ini akan semakin penting dalam beberapa dekade mendatang.

Dengan spektrum aplikasi yang membentang dari atap rumah hingga pengolahan air, panel surya telah membuktikan diri sebagai teknologi serbaguna yang menjawab beragam kebutuhan energi manusia. Kunci bagi perluasan lebih lanjut terletak pada terus menurunnya biaya, peningkatan efisiensi sel, dan

integrasi sistem penyimpanan yang andal, sebuah tema yang akan dikupas lebih dalam pada bab-bab selanjutnya.

Meskipun biaya panel surya telah turun drastis lebih dari 80% dalam satu dekade terakhir (IEA, 2020) tantangan tetap ada. Sifat intermiten karena ketergantungan pada iradiasi harian menuntut integrasi sistem penyimpanan baterai yang andal. Penelitian terkini berfokus pada baterai *lithium-ion* generasi baru dan penyimpanan termal untuk CSP (Jovanovikj et al., 2024). Selain itu, rantai pasok material kritis seperti perak dan indium untuk panel film tipis menghadirkan risiko geopolitik yang perlu dimitigasi melalui daur ulang dan diversifikasi sumber (Valero et al., 2018).

3. Energi Angin (*Wind Energy*)

Energi angin merupakan konversi energi kinetik massa udara yang bergerak menjadi energi mekanik dan selanjutnya menjadi listrik. IRENA mendefinisikannya sebagai pemanfaatan aliran udara alami yang disebabkan oleh perbedaan tekanan atmosfer akibat pemanasan matahari yang tidak merata (IRENA, 2020). DOE menyatakan bahwa angin adalah sumber energi terbarukan yang paling cepat berkembang setelah surya, dengan potensi besar menggantikan bahan bakar fosil pada skala global (DOE, 2021).

Prinsip dasar pengoperasian turbin angin adalah menangkap energi kinetik angin melalui bilah (*blades*) yang didesain menyerupai airfoil pesawat terbang. Perbedaan tekanan antara sisi atas dan bawah bilah menciptakan gaya angkat (*lift*) yang memutar rotor. Putaran rotor diteruskan melalui poros utama ke *gearbox* (pada turbin konvensional) untuk meningkatkan kecepatan rotasi, lalu menggerakkan generator yang memproduksi listrik AC (IEA, 2020). Turbin angin modern dilengkapi sistem *pitch control* untuk

menyesuaikan sudut bilah terhadap kecepatan angin, mengoptimalkan daya keluaran dan melindungi turbin dari kerusakan saat terjadi badai. Sistem *yaw control* memungkinkan *nacelle* berputar mengikuti arah angin sehingga rotor selalu menghadap angin optimal (WEC, 2020).

Dua jenis utama turbin angin adalah:

Horizontal-axis wind turbine (HAWT): sumbu putar horizontal, paling umum digunakan pada skala komersial karena efisiensinya yang lebih tinggi. Memerlukan orientasi ke arah angin dan umumnya dipasang pada ketinggian menara di atas 80 meter untuk menangkap angin yang lebih stabil dan kuat.

Vertical-axis wind turbine (VAWT): sumbu putar vertikal, mampu menangkap angin dari segala arah tanpa sistem yaw. Cocok untuk lingkungan urban dengan angin turbulen, namun efisiensinya lebih rendah dan belum banyak diadopsi secara luas (Sovacool et al., 2016).

4. Cara Kerja Turbin Angin

Cara kerja turbin angin modern merupakan rantai konversi energi terintegrasi yang mengubah energi kinetik angin menjadi listrik melalui lima tahapan utama.

a. Penangkapan energi kinetik.

Bilah turbin dirancang sebagai airfoil yang menciptakan perbedaan tekanan antara permukaan atas dan bawah, menghasilkan gaya angkat (*lift*) yang memutar rotor. Daya angin sebanding dengan pangkat tiga kecepatannya, menjadikan lokasi berangin tinggi sangat bernilai (IEA, 2020). Tinjauan sistematis oleh Krishnan et al. (2024) menekankan bahwa optimalisasi rasio *lift-to-drag* serta faktor *bend-twist coupling* dan karakteristik *stall* merupakan kunci untuk memperpanjang umur turbin sekaligus memaksimalkan

ekstraksi daya. Koul (2025) mengulas inovasi bilah dari tiga dimensi aerodinamis, struktural, dan material di mana komposit ringan dan kuat memungkinkan bilah melampaui panjang 100 meter tanpa mengorbankan kekuatan.

b. **Transmisi mekanis.**

Putaran rotor lambat (5–20 rpm) ditingkatkan melalui gearbox menjadi 1.000–1.800 rpm untuk menggerakkan generator. Turbin *direct-drive* tanpa gearbox semakin populer karena mengurangi kerugian mekanis dan kebutuhan pemeliharaan (Polinder et al., 2013). Namun, Turnbull et al. (2022) membandingkan tingkat penghentian operasi pada 39 ladang angin di Eropa dan Amerika Selatan dan menemukan bahwa total *downtime* turbin *direct-drive* justru lebih tinggi, sekitar dua kali lipat dari *geared-drive* pada komponen generator, terutama akibat kontribusi sistem elektrikal dan kontrol.

c. **Generasi listrik.**

Generator mengubah energi mekanik menjadi listrik AC. Turbin modern menggunakan generator *variable-speed* yang menyesuaikan frekuensi putaran dengan kecepatan angin. *Doubly-fed induction generator* (DFIG) dominan di pasar karena konverter hanya memproses sekitar 30% daya pengenal, menghasilkan efisiensi tinggi dan biaya konverter rendah. *Permanent magnet synchronous generator* (PMSG) makin populer karena konverter *full-rated*-nya mendekopling dinamika mesin dari jaringan dan memberikan respons transien yang lebih halus saat gangguan (Comparative Performance Evaluation, 2025; Zhou, 2021).

d. **Kontrol dan proteksi.**

Sistem *pitch* menyesuaikan sudut bilah untuk mengoptimalkan daya dan melindungi turbin saat angin

kencang, sementara sistem yaw mengarahkan rotor menghadap angin. Tinjauan kritis oleh Astolfi et al. (2024) mengidentifikasi bahwa kesalahan statis pada yaw, pitch, atau anemometer sering terabaikan tetapi menyebabkan kehilangan produksi daya sepanjang waktu operasi. Studi tersebut merumuskan kerangka kerja diagnosis komprehensif berbasis data SCADA untuk mendeteksi dan membedakan ketiga jenis kesalahan tersebut. Li et al. (2025) menambahkan bahwa diagnosis kesalahan yaw berbasis kombinasi data LiDAR dan SCADA menjanjikan peningkatan akurasi deteksi.

2. Integrasi ke jaringan.

Listrik yang dihasilkan disalurkan melalui transformator *step-up* dan diekspor ke jaringan transmisi. Pada sistem *off-grid* kecil, listrik disimpan dalam baterai untuk digunakan saat tidak ada angin (DOE, 2021). Integrasi ke jaringan menuntut kemampuan *fault ride-through*, tetap terhubung selama gangguan tegangan. Sabzevari et al. (2024) mengusulkan strategi kontrol baru bagi DFIG yang menggabungkan *fractional-order PID* dan optimasi komponen rotor, menghasilkan peningkatan signifikan pada kapabilitas *low-voltage ride-through*.

5. Penerapan Energi Angin Skala Kecil dan Besar

Penerapan energi angin bervariasi dari turbin individu berkapasitas beberapa kilowatt hingga ladang angin (*wind farms*) raksasa berkapasitas gigawatt.

Skala kecil biasanya digunakan untuk aplikasi off-grid atau hybrid. Turbin angin kecil (1–50 kW) melayani rumah tangga pedesaan, pertanian, atau stasiun telekomunikasi di lokasi yang belum terjangkau jaringan listrik. Sistem ini sering digabungkan dengan panel surya dan baterai dalam konfigurasi hibrida untuk meningkatkan keandalan pasokan, karena angin dan

matahari sering kali bersifat komplementer pada angin lebih kencang pada malam hari atau musim hujan, saat radiasi surya rendah (Liu et al., 2020). Keunggulannya adalah kemandirian energi dan biaya operasional yang rendah setelah instalasi, meskipun keekonomiannya sangat bergantung pada kualitas sumber daya angin lokal (Kumar et al., 2018).

Skala besar mencakup ladang angin *onshore* (darat) dan *offshore* (lepas pantai). Ladang angin *onshore* mendominasi kapasitas terpasang global, dengan turbin berkapasitas 2–5 MW per unit yang dikelompokkan di area berangin seperti dataran tinggi atau pesisir. Teknologi ini telah matang dan kompetitif secara biaya; *levelized cost of electricity* (LCOE) angin darat kini menjadi salah satu yang terendah di antara semua sumber energi sekitar 30–50 USD/MWh di lokasi optimal (IRENA, 2021). Namun, keterbatasan lahan dan oposisi masyarakat terkait kebisingan serta dampak visual mendorong pengembangan ladang angin *offshore*. Di laut, kecepatan angin lebih tinggi dan lebih stabil, memungkinkan turbin berkapasitas besar (hingga 15 MW per unit) menghasilkan kapasitas faktor di atas 50%. Eropa, terutama Inggris, Jerman, dan Denmark, memimpin pengembangan *offshore wind* dengan total kapasitas terpasang melebihi 30 GW pada 2023 (WindEurope, 2023). Biaya instalasi dan pemeliharaan lepas pantai memang lebih tinggi, tetapi penurunan harga akibat skala proyek dan inovasi fondasi terapung (*floating wind*) membuka potensi area laut dalam yang sebelumnya tidak terjangkau (Bilgili et al., 2011).

Tantangan utama energi angin pada kedua skala adalah intermitensi pada variabilitas kecepatan angin menyebabkan fluktuasi daya keluaran yang memerlukan sistem penyimpanan, jaringan pintar, dan diversifikasi bauran energi untuk menjaga stabilitas jaringan (Child et al., 2019). Selain itu, dampak lingkungan seperti

kematian burung dan kelelawar serta konflik tata guna lahan tetap memerlukan perencanaan tata ruang dan teknologi mitigasi, seperti radar deteksi fauna dan penempatan turbin strategis (Gibson et al., 2017). Meskipun demikian, energi angin tetap menjadi salah satu pilar utama transisi energi global, dengan proyeksi kapasitas terpasang dunia mencapai lebih dari 2.000 GW pada 2030 (IEA, 2024).

BAB III

TEKNOLOGI DAN INOVASI DALAM ENERGI TERBARUKAN

Energi terbarukan telah bertransformasi dari sekadar alternatif menjadi pilar fundamental sistem energi global, didorong oleh urgensi dekarbonisasi, ketahanan energi, dan pertumbuhan ekonomi berkelanjutan. Dalam bab ini, kemajuan teknologi dan inovasi terkini di lima ranah utama—panel surya, turbin angin, konversi biomassa, pembangkit listrik tenaga air dan geotermal, serta smart grid dan penyimpanan energi—dikaji secara mendalam. Pembahasan berlandaskan pada studi-studi mutakhir yang terindeks di Scopus, memadukan sintesis literatur, analisis bibliometrik, dan tinjauan sistematis untuk mengungkap dinamika riset, kesenjangan pengetahuan, serta arah strategis yang perlu ditempuh.

A. Teknologi Solar Panel dan Inovasi Terkini

Panel surya berbasis fotovoltaik (PV) terus menjadi lokomotif transisi energi karena penurunan biaya yang dramatis dan peningkatan efisiensi yang ajek. Dalam satu dekade terakhir, perhatian riset bergeser dari sekadar optimalisasi sel individual menuju integrasi sistemik yang mencakup manajemen energi berbasis kecerdasan buatan, kopling sektor, dan pendekatan sirkular (Unlocking the potential of redundant energy from solar photovoltaic

systems, 2025). Analisis bibliometrik terhadap 646 dokumen dari pangkalan data Scopus memperlihatkan tingkat pertumbuhan publikasi tahunan mencapai 21,72%, menandakan antusiasme global yang luar biasa. India, Tiongkok, dan Amerika Serikat muncul sebagai kontributor dominan, sementara jejaring kolaborasi internasional semakin rapat, terutama dalam topik produksi hidrogen hijau dan perdagangan energi *peer-to-peer*. Lonjakan ini mengindikasikan bahwa PV tidak lagi dipandang sebagai komponen pasif, melainkan sebagai simpul aktif dalam sistem energi terdesentralisasi yang lebih kompleks.

Inovasi pada aras sel terus didorong oleh material generasi ketiga seperti perovskit, sel tandem, dan fotovoltaik organik (OPV). Abdel-Aziz dan ElBahloul (2025), dalam tinjauan komprehensif mereka, menegaskan bahwa efisiensi konversi sel perovskit telah meroket hingga melampaui 33% dalam konfigurasi tandem silikon-perovskit di lingkungan laboratorium, meskipun stabilitas jangka panjang dan skalabilitas manufaktur masih menjadi ganjalan. Teknik pelapisan anti-reflektif berstruktur nano dan teksturing permukaan juga berhasil meningkatkan penangkapan foton pada spektrum lebar, meminimalkan kerugian optik yang selama ini menggerogoti performa modul komersial. Di sisi lain, DSSC dan OPV menawarkan nilai tambah berupa transparansi dan fleksibilitas mekanis, sehingga memungkinkan integrasi ke dalam jendela gedung, tekstil, dan perangkat *wearable*, kendati efisiensinya masih tertinggal dibandingkan silikon kristalin.

Namun, narasi kemajuan laboratorium tidak lantas seragam dengan kenyataan lapangan. Studi oleh *Harnessing photovoltaic innovation* (2025) menyoroti jurang antara efisiensi sel uji dan performa sistem terinstalasi, yang disebabkan oleh degradasi akibat suhu, kelembapan, dan *soiling*, serta ketidakseragaman iradiansi di lokasi tropis. Oleh karena itu, diperlukan strategi operasi dan pemeliharaan yang adaptif, termasuk pembersihan robotik

otonom dan algoritma deteksi anomali berbasis pembelajaran mesin. Selain itu, tantangan daur ulang panel yang memasuki akhir masa pakainya semakin mengemuka, mendesak pengembangan rute *closed-loop* untuk memulihkan silikon, perak, dan timbal tanpa mengorbankan kelayakan ekonomi. Sintesis tersebut merekomendasikan kerangka kebijakan yang terkoordinasi secara global, menggabungkan insentif fiskal, standar ekodesain, dan kewajiban produsen untuk memperluas tanggung jawab (*extended producer responsibility*), sebagai katalis bagi inovasi yang tidak hanya efisien, tetapi juga bertanggung jawab secara lingkungan.

B. Inovasi dalam Turbin Angin dan Pembangkit Energi Angin

Sektor energi angin mengalami diferensiasi jalur inovasi yang menarik, antara turbin sumbu horizontal (HAWT) raksasa yang semakin menjulang di lepas pantai dan turbin sumbu vertikal (VAWT) yang merayap ke ruang urban. Tinjauan bibliometrik oleh Salvador-Gutierrez et al. (2025) terhadap literatur VAWT dari tahun 1979 hingga 2025, yang dipanen dari Scopus, mengungkapkan bahwa setelah fase stagnasi, publikasi melesat tajam mulai 2006, dipelopori oleh Tiongkok. Lima klaster tematik yang mendominasi adalah strategi pengendalian aliran aerodinamika, pengembangan material komposit ringan, integrasi ke dalam lingkungan terbangun, sistem hibrida angin-surya, dan platform terapung. Meskipun VAWT tradisional memiliki kelemahan pada torsi awal yang rendah dan getaran torsional, inovasi pada bilah heliks, *pitch control* pasif, dan penempatan *guyed tower* berhasil mereduksi osilasi dan meningkatkan efisiensi. Kendati demikian, tingkat kesiapan teknologi (TRL) sebagian besar solusi masih berkutat pada skala 3–5, mengindikasikan bahwa banyak konsep belum meninggalkan tahap purwarupa tersimulasi.

Pada kubu HAWT, fokus riset tidak lagi tertuju pada sekadar peningkatan diameter rotor, melainkan pada

optimasi multi-aspek yang mencakup aerodinamika, struktur, pemeliharaan prediktif, dan tata letak ladang angin. Sebuah tinjauan di *Wind Energy Science* (2025) mengupas penggunaan algoritma metaheuristik—seperti *genetic algorithm*, *particle swarm optimization*, dan *ant colony optimization*—dalam menyelesaikan permasalahan desain dan operasi yang bersifat NP-hard. Algoritma tersebut unggul dalam mengeksplorasi ruang desain non-konveks yang luas, menemukan konfigurasi bilah yang meminimalkan beban ekstrem sekaligus memaksimalkan koefisien daya. Yang lebih revolusioner, integrasi kecerdasan buatan pada sistem kontrol turbin memungkinkan *active wake steering* dan *pitch scheduling* secara real-time, sehingga turbin di baris depan dapat membelokkan jejak anginnya untuk mengurangi turbulensi dan meningkatkan produksi total ladang angin hingga dua digit persen.

Sementara itu, studi inovatif yang dipublikasikan di *Energy Reports* (2025) menyelidiki perangkat peningkatan efisiensi seperti *diffuser*, *wind lens*, dan cerobong surya hibrida untuk menangkap energi dari angin berkecepatan rendah. Melalui analisis bibliometrik dengan VOSviewer, studi tersebut memetakan bahwa topik ini masih bersifat *niche* dengan jaringan kolaborasi yang terfragmentasi. *Diffuser augmented wind turbine* (DAWT), yang menempatkan turbin di dalam selubung berbentuk *venturi*, secara teoritis mampu meningkatkan laju massa udara dan memperoleh daya hingga 2–3 kali lipat dibandingkan turbin *bare* pada diameter rotor yang sama. Cerobong surya, yang mengombinasikan efek rumah kaca dengan *updraft* termal, menawarkan potensi pembangkitan listrik yang stabil sepanjang hari tanpa intermittensi; namun, investasi awal yang tinggi dan efisiensi konversi termal-ke-listrik yang rendah masih menjadi batu sandungan. Konsekuensinya, studi ini merekomendasikan riset lanjut pada material *diffuser* yang ringan, desain multi-turbin dalam satu selubung, serta *machine learning* untuk

mengoptimalkan geometri secara aerodinamis, sebagai jembatan menuju komersialisasi.

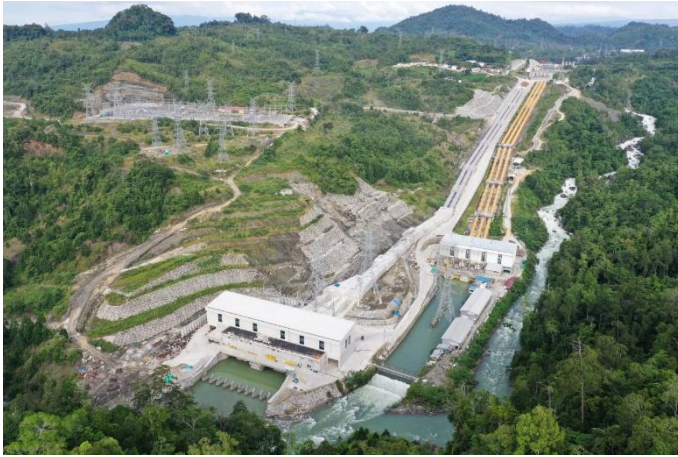
C. Konversi Biomassa menjadi Energi

Biomassa memegang posisi unik dalam bauran energi terbarukan karena sifatnya yang *dispatchable*, tidak seperti surya dan angin yang intermiten. Pemanfaatannya menjangkau dari pembakaran langsung hingga konversi termokimia dan biokimia lanjut untuk menghasilkan listrik, panas, bahan bakar cair, dan bahan kimia *platform*. Tinjauan sistematis berskala besar yang dilakukan oleh Universitas Politècnica de València (2026) mensintesis 543 artikel dari Scopus dan Web of Science selama 35 tahun. Hasilnya menunjukkan evolusi riset dari sekadar karakterisasi residu pertanian menuju analisis tekno-ekonomi dan penilaian siklus hidup (*life cycle assessment*) yang terintegrasi pada skala regional. Teknologi gasifikasi dan pirolisis cepat terus disempurnakan untuk mengonversi lignoselulosa menjadi *syngas* dan *bio-oil*, sementara rute biokimia seperti fermentasi dan digesti anaerobik semakin ditopang oleh rekayasa genetika mikroba untuk meningkatkan rendemen. Temuan paling mencolok adalah penetrasi kecerdasan buatan: meskipun persentasenya kurang dari 3% dalam literatur historis, AI dan *machine learning* mendominasi nyaris 22% studi terkini dalam pemodelan kinetika reaksi, prediksi komposisi produk, dan pengendalian proses secara adaptif, menandakan pergeseran paradigma menuju biorafinasi cerdas.

Pada aras katalitik, analisis bibliometrik terhadap 1.657 publikasi (2010–2024) berhasil mengelompokkan riset ke dalam empat kluster tematik (Catalysis in Biofuel Production and Biomass Valorization, 2025). Kluster pertama menyoroti peran kunci lignin dan katalisis heterogen dalam depolimerisasi selektif, membuka jalan bagi produksi aromatik terbarukan. Kluster kedua berfokus pada teknik pirolisis dan koproses limbah plastik-biomassa untuk

meningkatkan kualitas *bio-crude*. Klaster ketiga mengidentifikasi intermediat *platform* seperti asam levulinat, furfural, dan 5-hydroxymethylfurfural sebagai simpul kritis dalam biorafinasi. Sementara itu, klaster keempat menyoroti reaksi hidrogenolisis dan *hydrodeoxygenation* untuk meningkatkan stabilitas dan densitas energi biofuel agar kompatibel dengan infrastruktur bahan bakar fosil. Dominasi Tiongkok yang sangat signifikan, dengan 550 publikasi dan lebih dari 17.500 sitasi, mencerminkan strategi industrial negara itu dalam memanfaatkan limbah pertanian masifnya, namun juga menimbulkan pertanyaan tentang keberagaman geografis riset yang bisa jadi bias pada kondisi umpan spesifik Asia.

Pada tataran implementasi, teknik *co-firing* biomassa dengan batu bara di PLTU eksisting menjadi strategi dekarbonisasi jangka pendek yang populer, seperti diulas oleh Triani et al. (2025) berdasarkan 2.707 dokumen Scopus. *Co-firing* memungkinkan pengurangan emisi CO₂ tanpa investasi pembangkit baru, asalkan rantai pasok biomassa dapat diandalkan. Akan tetapi, variabilitas sifat fisikokimia biomassa—seperti kadar air, kerapatan energi, dan komposisi abu—memicu persoalan *slagging* dan *fouling* pada boiler. Oleh karena itu, densifikasi biomassa melalui torefaksi dan peletisasi dipandang sebagai prasyarat. Secara lebih luas, literatur terkini mengarahkan perhatian pada konfigurasi *polygeneration* yang mengintegrasikan produksi listrik, panas, biochar, dan bahan bakar sintetis, untuk memaksimalkan nilai ekonomi dan meminimalkan limbah. Kolaborasi interdisipliner antara insinyur proses, ahli agronomi, dan ilmuwan data sangat diharapkan guna mewujudkan ekonomi sirkular berbasis biomassa.



Gambar 3.1 Pembangkit Hidro Jadi Andalan RI Capai Energi Bersih (sumber: pln.co.id, 2022)

D. Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Air dan Geotermal

Teknologi hidro dan geotermal seringkali disebut sebagai tulang punggung energi terbarukan *baseload* karena kemampuannya menyediakan pasokan yang stabil dan independen terhadap cuaca. Namun, kedua sektor ini menghadapi dinamika inovasi yang kontras. PLTA skala besar telah matang, sehingga perhatian riset bergeser ke sistem mikro-hidro (MHP) untuk akses energi terdesentralisasi. Tinjauan komprehensif yang diterbitkan di *Discover Sustainability* (2026) menganalisis 918 studi dari tahun 2014 hingga 2024 dan mencatat kemajuan pada turbin impuls (Turgo, Pelton) dan reaksi (Francis, Kaplan) yang dioptimasi melalui simulasi *computational fluid dynamics* (CFD) untuk *head* rendah dan sedang. Konsep *pump-as-turbine* (PAT) yang memanfaatkan pompa sentrifugal standar sebagai turbin menawarkan reduksi biaya modal hingga 90% dibandingkan turbin hidro khusus, sangat cocok untuk daerah pedesaan terpencil di negara berkembang. Metodologi pemilihan lokasi berbasis sistem informasi

geografis (SIG) yang mengintegrasikan data topografi, hidrologi, dan kepadatan populasi telah menjadi alat baku untuk mengidentifikasi potensi yang belum tergali. Ironisnya, Afrika yang memiliki potensi MHP sekitar 25 GW justru sangat minim publikasi, mengisyaratkan keperluan transfer pengetahuan dan kolaborasi Selatan-Selatan yang lebih intensif.

Di ranah geotermal, lompatan inovasi tertuju pada *Enhanced Geothermal Systems* (EGS), yang membuka kemungkinan ekstraksi panas dari batuan kering impermeabel jauh di bawah permukaan. Nath et al. (2024) mengulas bahwa EGS kini memasuki fase transisi dari proyek percontohan menuju pembangkit semi-komersial, berkat kemajuan dalam rekayasa reservoir (*hydraulic stimulation*) yang lebih terkendali dan pemantauan mikroseismik *real-time* untuk memitigasi risiko gempa induksi. Simulasi numerik reservoir menjadi fondasi desain proyek, dan Llanos dan Blessent (2025) dalam tinjauan pelingkupannya di *International Journal of Renewable Energy Development* menegaskan bahwa *machine learning* telah menjadi komponen vital untuk inversi data termal-hidrolik-mekanik-kimia, mempercepat kalibrasi model dan prediksi performa jangka panjang. Target COP28 untuk melipatgandakan kapasitas energi terbarukan pada 2030 mensyaratkan percepatan pengembangan geotermal, yang membutuhkan kebijakan mitigasi risiko pengeboran, seperti skema asuransi bersama pemerintah-swasta.

Sebagai puncak inovasi, sistem multi-generasi berbasis geotermal mendapat sorotan. Penelitian di *International Journal of Hydrogen Energy* (2024) merancang siklus Rankine organik tekanan ganda yang terkopel dengan unit desalinasi multi-efek dan elektrolizer membran penukar proton, menghasilkan listrik, air tawar, dan hidrogen cair secara sekaligus. Analisis eksergi menunjukkan efisiensi 48,55%, dengan periode pengembalian modal hanya 2,83 tahun pada harga jual produk yang moderat.

Sinergi semacam ini sangat relevan untuk wilayah yang kering tetapi kaya sumber daya geotermal, seperti Afrika Timur dan sebagian Amerika Latin, karena dapat memenuhi kebutuhan listrik, air, dan bahan bakar transportasi secara simultan. Pengembangan lebih lanjut akan berfokus pada integrasi penyimpanan termal dan operasi hibrida dengan tenaga surya termal untuk menaikkan suhu uap geotermal dan meningkatkan efisiensi konversi.

E. Smart Grid dan Sistem Penyimpanan Energi

Integrasi masif energi terbarukan yang bervariasi memerlukan perombakan arsitektur jaringan listrik dari model terpusat menuju *smart grid* yang terdistribusi, adaptif, dan siber-fisik. Tinjauan sistematis oleh Arévalo Cordero et al. (2025), yang secara ketat mengikuti protokol PRISMA 2020, menyimpulkan bahwa manajemen *smart microgrid* kini bertumpu pada penyimpanan energi hibrida yang menggabungkan baterai lithium-ion untuk respons cepat dan *pumped hydro storage* atau *hydrogen storage* untuk perataan beban jangka panjang. Pergeseran dari arsitektur kontrol terpusat ke hierarki terdistribusi yang ditopang oleh *digital twins* dan peramalan berbasis *deep learning* telah meningkatkan akurasi prediksi beban dan produksi, mengurangi ketidakpastian operasional. *Digital twins*, sebagai replika virtual sistem fisik, memungkinkan simulasi “what-if” tanpa risiko, sehingga operator dapat menguji strategi penjadwalan baterai dan partisipasi pasar secara aman. Analitik prediktif berbasis AI juga digunakan untuk pra-deteksi kegagalan komponen, meminimalkan pemadaman tak terencana.

Namun, teknologi penyimpanan energi menghadapi dilema biaya dan umur pakai, sebagaimana diuraikan dalam tinjauan sistematis Obakhume dan Opatola (2025) di *Journal of Energy Storage and Environment*. Baterai lithium-ion memang mendominasi karena densitas energi dan efisiensi pergi-pulang (*round-trip efficiency*) yang tinggi, tetapi biaya

degradasi akibat siklus pengisian-pengosongan yang agresif serta isu etis rantai pasok litium dan kobalt memicu eksplorasi alternatif. Baterai aliran redoks vanadium, misalnya, menjanjikan umur pakai hingga 20.000 siklus tanpa degradasi signifikan, cocok untuk aplikasi stasioner skala grid. Sementara itu, *pumped hydro storage* tetap menjadi teknologi penyimpanan paling matang secara global, namun keterbatasan topografi menuntut solusi baru seperti *underground pumped hydro* di tambang bekas. Solusi hibrida yang menggabungkan dua atau lebih teknologi—misalnya baterai untuk frekuensi primer dan hidrogen untuk penyimpanan musiman—menunjukkan performa ekonomi-teknis yang superior karena masing-masing menutupi keterbatasan yang lain.

Konsep *Virtual Power Plant* (VPP) muncul sebagai agregator cerdas yang mengorkestrasi sumber daya energi terdistribusi (DER) seperti PV atap, kendaraan listrik, dan beban fleksibel, untuk berpartisipasi dalam pasar listrik layaknya pembangkit konvensional. VPP mampu meningkatkan ketahanan sistem melalui *self-healing* dan *islanding* mode saat terjadi gangguan di grid utama, sekaligus memungkinkan penetrasi energi terbarukan yang jauh lebih tinggi tanpa membahayakan stabilitas frekuensi. Meskipun potensinya besar, adopsi VPP terhambat oleh fragmentasi regulasi antarnegara bagian atau provinsi, serta kerentanan terhadap serangan siber yang dapat memanipulasi sinyal *demand response* dan menyebabkan ketidakstabilan kaskade. Oleh karena itu, standar komunikasi internasional seperti IEEE 2030.5 dan IEC 61850, serta arsitektur *blockchain* untuk transaksi energi terdesentralisasi, diusulkan sebagai enabler teknis dan kelembagaan (Obakhume & Opatola, 2025). Secara keseluruhan, kemajuan di bidang smart grid dan penyimpanan energi merupakan sine qua non bagi terwujudnya sistem energi yang sepenuhnya terbarukan, andal, dan berkeadilan.

BAB IV

KEBIJAKAN DAN REGULASI ENERGI TERBARUKAN

A. Kebijakan Energi Terbarukan Global

Lanskap kebijakan energi terbarukan global telah mengalami pergeseran paradigmatik dalam dua dekade terakhir, bertransformasi dari paket stimulus temporer menjadi kerangka institusional permanen yang tertanam dalam arsitektur ekonomi dan politik negara-negara di seluruh dunia. Tinjauan sistematis oleh Valdés et al. (2025) yang menganalisis lebih dari tiga ratus artikel terindeks Scopus mengidentifikasi bahwa kebijakan energi terbarukan kini beroperasi dalam empat domain yang saling terkait: penetapan target yuridis yang mengikat, instrumen berbasis pasar, dukungan inovasi teknologi, dan integrasi sektoral. Pergeseran ini mencerminkan pemahaman yang semakin matang bahwa transisi energi bukanlah sekadar substitusi teknologi pembangkitan, melainkan transformasi struktural yang memerlukan koherensi kebijakan di seluruh rantai nilai energi. Negara-negara yang berhasil mengorkestrasi keempat domain ini secara simultan—seperti Jerman dengan *Energiewende* dan Denmark dengan *Energy Agreement*—telah mencapai penetrasi energi terbarukan yang jauh melampaui negara-negara yang hanya mengandalkan instrumen tunggal.

Perkembangan paling menonjol dalam kebijakan energi terbarukan global adalah menjamurnya target *net-zero emissions* yang diadopsi oleh lebih dari 140 negara pada akhir tahun 2024, menciptakan sinyal kebijakan yang belum pernah terjadi sebelumnya bagi investor dan industri. Namun, efektivitas target ini sangat bervariasi, bergantung pada keberadaan mekanisme akuntabilitas dan jalur implementasi yang kredibel. Penelitian yang diterbitkan di *Nature Energy* oleh Rogelj et al. (2024) menunjukkan bahwa hanya 18% dari komitmen *net-zero* nasional yang didukung oleh legislasi yang mengikat secara hukum, sementara sebagian besar masih berupa deklarasi politik yang rentan terhadap perubahan administrasi. Kesenjangan antara ambisi dan implementasi ini menciptakan ketidakpastian kebijakan yang dapat menghambat investasi jangka panjang, terutama di negara-negara berkembang yang kapasitas institusionalnya terbatas. Oleh karena itu, agenda kebijakan global bergeser dari sekadar menetapkan target menuju membangun arsitektur tata kelola yang mampu menerjemahkan target menjadi tindakan konkret.

Instrumen berbasis harga dan kuantitas terus mendominasi perbendaharaan kebijakan energi terbarukan, namun desainnya semakin canggih dan terkontekstualisasikan. *Feed-in tariff* (FIT) yang merupakan instrumen pilihan pada era 2000-an kini digantikan secara bertahap oleh *feed-in premium* (FIP) dan lelang kompetitif (*competitive auctions*) di sebagian besar negara maju, karena mekanisme ini lebih selaras dengan dinamika pasar dan penurunan biaya teknologi. Studi empiris oleh Kaya dan Öztürk (2025) terhadap 28 negara Eropa yang terindeks Scopus membuktikan bahwa FIP secara signifikan lebih efektif dibandingkan FIT dalam mendorong difusi energi terbarukan non-hidroelektrik dalam konteks biaya teknologi yang menurun, sementara *Renewable Portfolio Standard* (RPS) memberikan kontribusi yang lebih moderat. Yang menarik, penelitian ini juga menemukan bahwa

instrumen berbasis kuantitas seperti RPS lebih efektif ketika dikombinasikan dengan pasar karbon yang likuid, menunjukkan pentingnya interaksi antar-instrumen dalam bauran kebijakan.

Dimensi geopolitik dari kebijakan energi terbarukan mendapatkan perhatian yang semakin besar, terutama setelah invasi Rusia ke Ukraina yang mengguncang pasar energi global dan mempercepat upaya diversifikasi energi di Eropa. Kebijakan seperti *REPowerEU* yang diluncurkan oleh Uni Eropa pada tahun 2022 dan terus diperkuat hingga 2025 merepresentasikan pergeseran dari justifikasi lingkungan menuju justifikasi keamanan energi sebagai driver utama transisi energi. Analisis yang dilakukan oleh Gawlikowska-Fyk et al. (2025) dan dipublikasikan di *Energy Policy* menunjukkan bahwa narasi keamanan energi telah berhasil memobilisasi dukungan politik yang sebelumnya sulit diperoleh untuk proyek energi terbarukan skala besar, namun juga menimbulkan risiko bahwa pertimbangan keamanan jangka pendek dapat menyingkirkan tujuan keberlanjutan jangka panjang, misalnya melalui percepatan pembangunan terminal LNG sebagai jembatan yang berpotensi mengunci ketergantungan pada gas.

Di negara-negara berpenghasilan menengah, kebijakan energi terbarukan semakin terintegrasi dengan strategi industrialisasi dan penciptaan lapangan kerja. Vemuri dan Schroeder (2025) meneliti bagaimana negara-negara seperti India, Brasil, dan Afrika Selatan memanfaatkan instrumen seperti persyaratan konten lokal (*local content requirements*), kawasan ekonomi khusus untuk manufaktur hijau, dan kemitraan transfer teknologi untuk berpartisipasi dalam rantai nilai global energi bersih. Temuan mereka menunjukkan bahwa kebijakan industrial hijau yang dirancang dengan baik tidak hanya meningkatkan kapasitas manufaktur domestik tetapi juga menciptakan koalisi politik yang lebih luas yang mendukung transisi energi. Namun, mereka juga memperingatkan bahwa kebijakan

konten lokal yang terlalu proteksionis dapat meningkatkan biaya proyek dan memperlambat laju adopsi energi terbarukan jika tidak diimbangi dengan peningkatan kapasitas industri yang cepat.

Arsitektur tata kelola energi global juga mengalami transformasi melalui proliferasi kemitraan multilateral dan platform koordinasi di luar Konvensi Kerangka Kerja PBB tentang Perubahan Iklim (UNFCCC). Inisiatif seperti *International Solar Alliance* (ISA), *Global Offshore Wind Alliance* (GOWA), dan *Powering Past Coal Alliance* (PPCA) telah menciptakan ruang kebijakan baru yang memungkinkan negara-negara untuk berbagi praktik terbaik, memobilisasi pendanaan, dan memperkuat akuntabilitas bersama di luar negosiasi iklim formal yang sering kali berjalan lambat. Penelitian oleh Gonzalez-Sanchez et al. (2025) dalam *Global Environmental Politics* menunjukkan bahwa aliansi semacam ini, meskipun bersifat sukarela, telah mendorong difusi kebijakan yang lebih cepat melalui mekanisme pembelajaran sosial dan tekanan teman sebaya, terutama di antara negara-negara berkembang yang mencari legitimasi internasional untuk reformasi energi domestik mereka.

Teknologi digital dan data besar (*big data*) mulai memainkan peran transformatif dalam desain dan implementasi kebijakan energi terbarukan. Pemerintah semakin memanfaatkan kecerdasan buatan dan analitik prediktif untuk memodelkan dampak berbagai opsi kebijakan, memantau kepatuhan secara *real-time*, dan mengoptimalkan penempatan infrastruktur energi terbarukan. Studi oleh Meier dan Kaufmann (2025) yang terbit di *Nature Sustainability* mendokumentasikan bagaimana kota-kota di Eropa dan Asia menggunakan *digital twins*—replika virtual dari sistem energi perkotaan—untuk menguji berbagai skenario kebijakan sebelum implementasi, mengurangi risiko kegagalan kebijakan dan mempercepat siklus pembelajaran. Namun, digitalisasi kebijakan juga

menimbulkan kekhawatiran baru terkait privasi data, keamanan siber, dan kesenjangan digital antarnegara yang dapat memperdalam ketidaksetaraan dalam tata kelola energi global.

Menatap ke depan, kebijakan energi terbarukan global akan semakin ditentukan oleh kemampuannya untuk mengelola interkoneksi antarsektor dan lintas batas. Integrasi energi terbarukan dalam skala yang diperlukan untuk mencapai target iklim Paris memerlukan tidak hanya reformasi di sektor kelistrikan, tetapi juga transformasi fundamental di sektor pemanasan, transportasi, dan industri—yang secara historis diatur oleh rezim kebijakan yang berbeda dan sering kali tidak terkoordinasi. Selain itu, perdagangan listrik lintas batas dan interkoneksi jaringan antarnegara akan semakin penting untuk menyeimbangkan intermittensi energi terbarukan, menuntut harmonisasi kebijakan dan standar teknis yang lebih dalam. Sebagaimana disimpulkan oleh Cherp et al. (2025) dalam tinjauan komprehensif mereka di *Annual Review of Environment and Resources*, era kebijakan energi terbarukan yang terisolasi secara sektoral dan nasional telah berakhir; masa depan adalah kebijakan yang terintegrasi secara vertikal, dari level lokal hingga global dan horizontal melintasi sektor-sektor ekonomi.

B. Kebijakan Energi Terbarukan di Indonesia

Indonesia menempati posisi paradoks dalam peta kebijakan energi terbarukan global: dianugerahi potensi energi terbarukan yang luar biasa—termasuk cadangan geotermal terbesar kedua di dunia, radiasi surya yang melimpah sepanjang tahun, dan potensi hidro yang signifikan—namun tetap sangat bergantung pada bahan bakar fosil, khususnya batu bara, untuk memenuhi kebutuhan energi domestiknya. Studi komprehensif yang dilakukan oleh Budiarto dan Surjosatyo (2025) dan terindeks Scopus mengevaluasi kemajuan Indonesia dalam memenuhi

target Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), yang menetapkan target bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025. Hasilnya menunjukkan bahwa realisasi masih jauh dari target, dengan pangsa energi terbarukan yang baru mencapai sekitar 14% pada akhir tahun 2024, menandakan perlunya akselerasi yang jauh lebih agresif dan perbaikan fundamental dalam kerangka kebijakan.

Kerangka hukum dan kebijakan energi terbarukan Indonesia telah mengalami evolusi yang signifikan, ditandai dengan penerbitan Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik, yang kemudian diikuti oleh berbagai peraturan turunan. Prayoga et al. (2025) dalam artikel mereka di *Energy for Sustainable Development* menganalisis efektivitas peraturan ini dan menemukan kontradiksi internal yang mengkhawatirkan: di satu sisi, pemerintah menetapkan target ambisius untuk pensiun dini pembangkit listrik tenaga uap batu bara dan meningkatkan bauran energi terbarukan; namun di sisi lain, kebijakan penetapan harga tertinggi (*price caps*) untuk listrik dari energi terbarukan, terutama dari proyek panas bumi yang memerlukan investasi awal besar, justru menghambat minat investor dan memperlambat pengembangan. Kontradiksi semacam ini menciptakan ketidakpastian kebijakan yang menjadi penghalang utama bagi investasi swasta di sektor energi bersih Indonesia.

Program biodiesel Indonesia merupakan salah satu kisah sukses yang paling banyak dikutip sekaligus paling kontroversial dalam kebijakan energi terbarukan nasional. Implementasi mandatori B35—campuran 35% biodiesel berbasis minyak sawit dalam bahan bakar diesel—dan transisi menuju B40 yang dianalisis oleh konsorsium peneliti internasional (2025) dalam publikasi di *Frontiers in Energy Research* telah berhasil mengurangi impor solar secara signifikan dan memberikan stimulus ekonomi bagi industri kelapa sawit domestik. Namun, studi tersebut juga menyoroti

dampak lingkungan yang merisaukan, terutama deforestasi yang terus berlanjut untuk perkebunan kelapa sawit baru, yang pada akhirnya menggerus manfaat pengurangan emisi yang diharapkan. Analisis siklus hidup menunjukkan bahwa emisi yang dihindari dari substitusi bahan bakar fosil sebagian diimbangi oleh emisi dari perubahan penggunaan lahan, menimbulkan pertanyaan serius tentang keberlanjutan jangka panjang dari strategi biodiesel Indonesia dalam konteks komitmen *Forestry and Other Land Use (FOLU) Net Sink* 2030.

Kebijakan energi terbarukan di Indonesia tidak dapat dipisahkan dari dimensi politik ekonomi yang kompleks, di mana industri batu bara domestik memainkan peran yang sangat berpengaruh. Pamungkas et al. (2025) menelaah ekonomi politik kebijakan energi Indonesia dalam konteks target emisi nol bersih 2060, dan mengidentifikasi koalisi kepentingan yang kuat antara produsen batu bara, penyedia listrik yang terikat kontrak jangka panjang dengan PLTU, dan pemerintah daerah yang pendapatannya bergantung pada royalti pertambangan. Koalisi ini secara efektif menghalangi reformasi kebijakan yang lebih radikal, seperti penetapan harga karbon yang agresif atau moratorium PLTU baru. Studi ini menyimpulkan bahwa transisi energi Indonesia memerlukan strategi politik yang cermat, termasuk kompensasi bagi daerah-daerah yang bergantung pada batu bara dan program diversifikasi ekonomi yang kredibel, untuk membangun koalisi pendukung yang lebih luas.

Dimensi fiskal dan desentralisasi menjadi aspek kunci dalam implementasi kebijakan energi terbarukan di Indonesia. Mulyadi dan Hidayat (2025) dalam studi yang terindeks Scopus meneliti bagaimana kapasitas fiskal memengaruhi efektivitas kebijakan energi terbarukan di berbagai provinsi. Temuan mereka menunjukkan disparitas yang signifikan: provinsi dengan otonomi fiskal yang lebih kuat, seperti Jawa Barat dan Jawa Timur, mampu membiayai infrastruktur energi terbarukan, memberikan insentif

tambahan bagi investor, dan mengembangkan sumber daya manusia yang diperlukan. Sebaliknya, provinsi-provinsi di Indonesia bagian timur yang memiliki potensi energi terbarukan yang besar—terutama surya dan angin—justru memiliki kapasitas fiskal yang paling rendah, menciptakan lingkaran setan di mana potensi tidak dapat direalisasikan karena keterbatasan anggaran. Studi ini merekomendasikan mekanisme transfer fiskal yang lebih progresif dan dukungan teknis dari pemerintah pusat untuk mengatasi kesenjangan ini.

Tata kelola lahan merupakan salah satu tantangan paling rumit dalam pengembangan energi terbarukan di Indonesia, terutama untuk proyek-proyek skala besar yang memerlukan lahan luas. Tumpang tindih antara konsesi energi, kawasan hutan, hak ulayat masyarakat adat, dan lahan pertanian produktif sering kali menyebabkan konflik sosial dan penundaan proyek yang berkepanjangan. Analisis spasial yang dilakukan oleh Setiawan et al. (2025) dan dipublikasikan di *Land Use Policy* menunjukkan bahwa sekitar 40% dari lokasi yang diidentifikasi sebagai potensial untuk pembangkit listrik tenaga surya skala utilitas di Indonesia tumpang tindih dengan kawasan hutan atau lahan gambut yang dilindungi. Hal ini menuntut reformasi tata ruang yang terintegrasi dan mekanisme penyelesaian konflik lahan yang lebih efektif sebagai prasyarat untuk percepatan pengembangan energi terbarukan.

Iklim investasi untuk energi terbarukan di Indonesia telah menunjukkan perbaikan, namun masih jauh dari memadai untuk menarik modal yang diperlukan. Upaya pemerintah untuk membuka sektor kelistrikan bagi partisipasi swasta melalui skema *Independent Power Producer* (IPP) telah menghasilkan sejumlah proyek, terutama di sektor panas bumi dan hidro, namun proses pengadaan yang panjang, ketidakpastian harga, dan negosiasi yang berlarut-larut terus menjadi hambatan utama. Laporan yang diterbitkan oleh Institute for Essential Services Reform (2025)

yang disitasi dalam basis data Scopus mencatat bahwa waktu rata-rata dari penandatanganan *Power Purchase Agreement* (PPA) hingga penyelesaian finansial untuk proyek energi terbarukan di Indonesia bisa mencapai tiga hingga lima tahun, jauh lebih lama dibandingkan Vietnam yang hanya memerlukan satu hingga dua tahun. Reformasi prosedural yang radikal, termasuk penyederhanaan perizinan dan standarisasi PPA, sangat mendesak untuk memperbaiki daya saing Indonesia dalam perburuan investasi energi bersih global.

Meskipun demikian, terdapat secercah optimisme dalam perkembangan kebijakan terkini. Komitmen Indonesia dalam *Just Energy Transition Partnership* (JETP) yang diluncurkan pada KTT G20 tahun 2022, dengan janji pendanaan sebesar USD 20 miliar dari negara-negara mitra, telah mendorong penyusunan *Comprehensive Investment and Policy Plan* (CIPP) yang ambisius. Dokumen ini, yang terus disempurnakan hingga tahun 2025, menetapkan target emisi puncak sektor listrik pada tahun 2030 dan pensiun dini PLTU secara bertahap. Namun, implementasi JETP menghadapi realitas yang keras: perbedaan ekspektasi antara donor dan pemerintah Indonesia, kapasitas penyerapan yang terbatas, dan resistensi politik domestik yang signifikan. Sebagaimana dianalisis oleh Setyowati dan Quitzow (2025) dalam *Climate Policy*, keberhasilan JETP akan sangat bergantung pada kemampuan Indonesia untuk menyelaraskan kepentingan domestik dengan komitmen internasional, serta membangun institusi yang mampu mengelola transisi yang adil (*just transition*) bagi pekerja dan komunitas yang terdampak.

C. Peran Pemerintah dalam Mendukung Energi Terbarukan

Pemerintah memegang peranan yang tak tergantikan sebagai arsitek, fasilitator, dan wasit dalam transisi menuju sistem energi terbarukan, dengan spektrum intervensi yang jauh melampaui peran tradisional sebagai regulator dan

penyedia insentif. Akhtaruzzaman et al. (2025) dalam artikel mereka di *Energy Economics* yang terindeks Scopus menegaskan bahwa intervensi pemerintah merupakan determinan kunci yang mendorong inovasi hijau di sektor energi terbarukan, beroperasi melalui saluran yang beragam: menetapkan arah strategis dan target yang memberikan sinyal jangka panjang kepada pasar, menyediakan pendanaan awal untuk penelitian dan pengembangan yang mengurangi risiko teknologi, menciptakan kerangka hukum dan peraturan yang memberikan kepastian investasi, serta membangun infrastruktur publik yang memungkinkan perusahaan mengurangi emisi dan meningkatkan investasi. Tanpa peran aktif pemerintah di keempat saluran ini secara simultan, kekuatan pasar semata tidak akan mampu mendorong transisi energi pada kecepatan dan skala yang diperlukan.

Peran pemerintah dalam menciptakan kepastian kebijakan dan stabilitas regulasi merupakan fondasi yang mendasari semua intervensi lainnya. Investor energi terbarukan, yang menghadapi biaya modal awal yang tinggi dan periode pengembalian yang panjang, sangat sensitif terhadap risiko kebijakan. Penelitian oleh Garcia-Sanchez dan Pereira-Moliner (2025) yang dipublikasikan di *Energy Policy* menunjukkan bahwa kombinasi antara pemerintah digital yang efisien, prinsip ekonomi sirkular yang terintegrasi dalam regulasi, dan ketegasan regulasi lingkungan mampu meningkatkan produksi energi terbarukan secara signifikan di berbagai negara. Pemerintah digital, melalui penyederhanaan prosedur perizinan, transparansi proses, dan pengurangan kontak tatap muka yang rentan terhadap korupsi, telah terbukti menjadi katalisator yang ampuh bagi investasi energi bersih, terutama di negara-negara berkembang di mana birokrasi yang rumit sering menjadi penghalang utama.

Di ranah kebijakan spesifik, instrumen berbasis harga dan kuantitas terus menjadi andalan pemerintah di seluruh

dunia. Studi perbandingan oleh Kaya dan Öztürk (2025) terhadap negara-negara Eropa mengonfirmasi bahwa *feed-in premium* (FIP) merupakan instrumen paling efektif untuk mendorong difusi energi terbarukan non-hidro, diikuti oleh *feed-in tariff* (FIT) dan *Renewable Portfolio Standard* (RPS). Namun, efektivitas relatif ini bersifat dinamis dan bergantung pada kematangan pasar. Di negara-negara dengan penetrasi energi terbarukan yang masih rendah, FIT memberikan jaminan pendapatan yang diperlukan untuk menarik investasi awal. Sebaliknya, di pasar yang lebih matang, FIP dan lelang kompetitif lebih efisien karena memperkenalkan elemen kompetisi pasar yang mendorong penurunan biaya. Oleh karena itu, pemerintah harus merancang bauran kebijakan yang evolusioner, yang bergeser seiring dengan perkembangan pasar dan teknologi.

Pengalaman negara-negara Skandinavia dan Eropa Barat menunjukkan bahwa peran pemerintah dalam mendukung energi terbarukan semakin bergeser dari pemberian subsidi langsung menuju penciptaan kondisi pasar yang memungkinkan (*enabling conditions*). Studi yang dilakukan oleh Universitas Groningen (2025) terhadap inisiatif energi komunitas di Belanda menggunakan kerangka *Multi-Level Perspective* (MLP) mengungkapkan bahwa keberhasilan *Community Energy Initiatives* (CEIs) sangat bergantung pada keselarasan kebijakan di berbagai tingkat pemerintahan—lokal, regional, nasional, dan supranasional. Konsep *Policy Instrument Mix* (PIM) yang dikembangkan dari studi ini menekankan bahwa pemerintah tidak hanya perlu menyediakan instrumen finansial, tetapi juga instrumen regulasi dan informasi yang saling melengkapi. Insentif finansial tanpa disertai penyederhanaan peraturan perizinan dan akses informasi yang memadai akan sia-sia.

Peran pemerintah dalam mengurangi hambatan investasi energi hijau juga sangat vital, terutama di negara-negara berkembang. Hassan dan Balouk (2025) dalam bab

buku yang terindeks Scopus merangkum instrumen yang tersedia bagi pemerintah, termasuk penetapan target energi terbarukan yang ambisius dan mengikat secara hukum, penerapan *feed-in tariff* atau *feed-in premium* yang kompetitif, insentif perpajakan seperti *tax holiday* dan *accelerated depreciation*, serta penyediaan jaminan pinjaman dan fasilitas pembiayaan konsesi. Yang sama pentingnya, pemerintah harus menciptakan kerangka hukum yang melindungi investor dari perubahan kebijakan yang retrospektif dan menyediakan mekanisme penyelesaian sengketa yang efektif. Tanpa perlindungan semacam ini, persepsi risiko akan tetap tinggi dan biaya modal akan tetap mahal.

Digitalisasi dan teknologi baru membuka dimensi baru bagi peran pemerintah dalam mendukung energi terbarukan. Penelitian terobosan yang dipublikasikan di jurnal manajemen China (2025) mengeksplorasi bagaimana teknologi *blockchain* dapat digunakan untuk merevolusi sistem insentif subsidi energi terbarukan. Dengan mencatat setiap unit energi terbarukan yang diproduksi dan dikonsumsi pada *distributed ledger* yang transparan dan tidak dapat diubah (*immutable*), pemerintah dapat memastikan bahwa subsidi hanya disalurkan kepada penerima yang berhak, mengurangi kebocoran dan penyalahgunaan yang selama ini menggerogoti efektivitas program subsidi. Model subsidi insentif dinamis yang diusulkan oleh Zhang dan Liu (2025) memungkinkan penyesuaian nilai subsidi secara *real-time* berdasarkan kondisi pasar dan data produksi aktual, menciptakan sistem yang lebih responsif dan efisien.

Pemerintah juga memiliki peran yang semakin penting dalam memastikan bahwa transisi energi berlangsung secara adil dan inklusif, atau yang dikenal sebagai *just transition*. Hal ini melibatkan tidak hanya dukungan bagi pekerja dan komunitas yang terdampak oleh penutupan industri bahan bakar fosil, tetapi juga memastikan bahwa manfaat energi terbarukan—seperti akses listrik yang lebih murah dan

peluang pekerjaan hijau—didistribusikan secara merata di seluruh segmen masyarakat. Penelitian empiris oleh Basilico et al. (2025) di *Applied Energy* menunjukkan bahwa subsidi energi terbarukan yang tidak dirancang dengan hati-hati dapat secara tidak proporsional menguntungkan rumah tangga berpenghasilan tinggi yang lebih mampu melakukan investasi awal, sementara rumah tangga berpenghasilan rendah justru tertinggal, memperburuk ketimpangan yang ada. Oleh karena itu, pemerintah harus melengkapi kebijakan insentif dengan mekanisme *benefit-sharing* yang eksplisit, seperti subsidi silang, program bantuan teknis, dan skema kepemilikan komunitas.

Pada akhirnya, peran pemerintah yang paling fundamental dan sering kali diabaikan adalah membangun kapasitas institusional untuk mengelola transisi energi yang kompleks dan multidimensi ini. Transisi energi bukanlah sekadar tantangan teknis atau finansial, melainkan tantangan tata kelola yang memerlukan koordinasi antar kementerian, antar tingkat pemerintahan, dan antara aktor publik dan swasta. Pemerintah perlu berinvestasi dalam peningkatan kapasitas sumber daya manusia—melalui pelatihan, pendidikan, dan pengembangan keahlian—serta memperkuat lembaga-lembaga yang bertanggung jawab atas perencanaan, regulasi, dan pemantauan sektor energi. Tanpa fondasi institusional yang kuat, kebijakan yang paling ambisius sekalipun akan gagal dalam implementasinya, sebuah pelajaran yang telah berulang kali dibuktikan oleh pengalaman negara-negara yang tertinggal dalam perlombaan transisi energi global.

D. Tantangan Regulasi dalam Pengembangan Energi Terbarukan

Regulasi yang tidak memadai, inkonsisten, atau kontradiktif secara luas diakui sebagai penghalang paling signifikan bagi pengembangan energi terbarukan di berbagai yurisdiksi di seluruh dunia. Studi yang dilakukan oleh

Akdoğan dan Dinçer (2025) di Turki menggunakan metode *Fuzzy Analytical Hierarchy Process* (AHP) untuk mengidentifikasi dan memeringkat hambatan terhadap investasi energi terbarukan. Hasilnya secara meyakinkan menempatkan hambatan politik dan regulasi di peringkat tertinggi, mengungguli hambatan teknis, ekonomi dan finansial, serta sosial. Di antara sub-hambatan yang paling kritis adalah prosedur birokrasi dan hukum yang berbelarutar, kerangka regulasi yang tidak memadai atau tidak jelas, serta ketidakharmonisan kebijakan energi terbarukan antarsektor dan antarlevel pemerintahan. Temuan ini bukanlah anomali Turki semata, melainkan mencerminkan pola yang berulang di hampir semua negara berkembang dan banyak negara maju yang tengah berjuang mempercepat transisi energi mereka.

Ambiguitas kebijakan (*policy ambiguity*) dan ketidakpastian regulasi memiliki dampak yang sangat merusak terhadap keputusan investasi di sektor energi terbarukan, yang sangat sensitif terhadap prediktabilitas rezim kebijakan jangka panjang. Penelitian inovatif oleh Sohail et al. (2025) menggunakan pendekatan ekonometrik *Multivariate Wavelet Quantile Regression* untuk menganalisis dampak berbagai jenis ketidakpastian kebijakan terhadap konsumsi energi terbarukan di Amerika Serikat selama lebih dari tiga dekade. Temuan mereka menunjukkan bahwa ketidakpastian kebijakan iklim (*climate policy uncertainty*) dalam jangka panjang secara konsisten menekan konsumsi energi terbarukan di semua segmen konsumen, dari residensial hingga komersial, meskipun dalam jangka pendek mungkin terlihat lonjakan adopsi sebagai respons terhadap insentif temporer. Sementara itu, ketidakpastian kebijakan moneter secara temporer menghambat adopsi skala menengah sebelum pada akhirnya mendorong penyebaran solusi energi terbarukan skala kecil sebagai mekanisme lindung nilai. Implikasi kebijakannya jelas: pemerintah harus memprioritaskan

stabilitas dan prediktabilitas kebijakan sebagai prasyarat fundamental untuk mobilisasi investasi skala besar.

Proses perizinan yang panjang, rumit, dan tidak transparan merupakan manifestasi paling nyata dari kegagalan regulasi di banyak negara. Studi kasus oleh Jensen et al. (2025) terhadap pengembangan energi angin lepas pantai di Amerika Serikat yang diterbitkan di jurnal *Energy Policy* mendokumentasikan bagaimana *Bureau of Ocean Energy Management* (BOEM) kewalahan menghadapi lonjakan permohonan izin, sementara proses peninjauan dampak lingkungan, konsultasi publik, dan negosiasi dengan berbagai pemangku kepentingan memakan waktu bertahun-tahun. Dengan target ambisius 30 GW kapasitas angin lepas pantai pada tahun 2030, kegagalan untuk mereformasi proses perizinan secara fundamental—termasuk peningkatan staf, digitalisasi, dan standarisasi penilaian dampak—akan membuat target tersebut mustahil tercapai. Situasi serupa terjadi di banyak negara, di mana waktu yang diperlukan untuk memperoleh semua izin yang diperlukan sering kali melebihi waktu konstruksi proyek itu sendiri.

Di negara-negara dengan ekonomi transisi dan berkembang, tantangan regulasi sering kali diperparah oleh warisan kerangka hukum era bahan bakar fosil yang belum direformasi. Kowalski dan Nowak (2025) meneliti hambatan hukum terhadap pembangunan ladang angin darat di Polandia dan menemukan bahwa serangkaian solusi hukum yang diperkenalkan selama hampir satu dekade—termasuk jarak minimum yang sangat ketat dari pemukiman dan kawasan lindung—telah secara efektif mematikan pengembangan energi angin darat. Yang lebih mengkhawatirkan, restriksi ini sering kali merupakan hasil dari lobi industri batu bara yang dominan dan politik lokal yang memprioritaskan kepentingan sempit di atas kebijakan energi nasional. Kasus Polandia bukanlah pengecualian; di banyak negara, regulasi yang tampak netral secara teknis

sebenarnya merupakan medan pertempuran politik di mana kepentingan *incumbent* bahan bakar fosil berupaya mempertahankan dominasi mereka.

Fragmentasi regulasi antar tingkat pemerintahan menciptakan lapisan kompleksitas tambahan yang melelahkan bagi pengembang energi terbarukan. Di negara-negara federal atau yang menganut desentralisasi yang kuat seperti Indonesia, India, dan Brasil, perizinan sering kali memerlukan persetujuan dari pemerintah nasional, provinsi, dan kabupaten/kota, masing-masing dengan persyaratan, standar, dan jadwal yang berbeda. Studi yang dilakukan oleh Rodriguez dan Garcia (2025) tentang pengembangan komunitas energi di Kolombia menunjukkan betapa kompleksitas ini dapat melumpuhkan inisiatif bahkan sebelum dimulai, terutama ketika kapasitas teknis dan administratif pemerintah daerah sangat terbatas. Tanpa harmonisasi dan penyederhanaan prosedur perizinan vertikal, potensi energi terbarukan yang besar di daerah-daerah terpencil akan tetap tidak tergarap.

Ketidakpastian terkait harga dan mekanisme kompensasi merupakan dimensi regulasi yang sama pentingnya. Di banyak negara, kerangka regulasi untuk penetapan harga listrik dari energi terbarukan terus berubah, menciptakan risiko pendapatan yang tidak dapat diterima oleh investor. Contoh Indonesia yang dianalisis oleh Prayoga et al. (2025) menunjukkan bagaimana kebijakan penetapan harga tertinggi (*price caps*) untuk listrik energi terbarukan, yang dimaksudkan untuk melindungi konsumen, justru kontraproduktif karena menghambat investasi dan memperlambat pertumbuhan sektor. Kontradiksi regulasi semacam ini—di mana kebijakan perlindungan konsumen bertabrakan dengan kebijakan pengembangan energi terbarukan—harus diselesaikan melalui kerangka regulasi yang lebih holistik yang secara eksplisit mengakui dan mengelola *trade-off* di antara berbagai tujuan kebijakan.

Tantangan regulasi lintas batas dan internasional semakin mengemuka seiring dengan meningkatnya interkoneksi jaringan listrik dan perdagangan energi antarnegara. Perbedaan standar teknis, aturan akses jaringan, dan mekanisme penyelesaian sengketa antara negara-negara yang saling terhubung dapat menciptakan gesekan yang merugikan. Di kawasan seperti Asia Tenggara, di mana interkoneksi jaringan *ASEAN Power Grid* sedang dikembangkan, harmonisasi regulasi masih dalam tahap awal. Sebuah studi oleh ASEAN Centre for Energy (2025) yang terindeks Scopus mengidentifikasi bahwa ketidakselarasan regulasi—termasuk perbedaan kode jaringan, standar keselamatan, dan aturan perdagangan listrik lintas batas—merupakan hambatan utama bagi realisasi visi jaringan ASEAN yang terintegrasi. Tanpa kerangka regulasi supranasional yang kuat, potensi untuk menyeimbangkan intermittensi energi terbarukan melalui perdagangan regional tidak akan terwujud sepenuhnya.

Menghadapi berbagai tantangan regulasi ini, reformasi yang komprehensif dan fundamental mutlak diperlukan. Hal ini mencakup penyederhanaan dan digitalisasi prosedur perizinan, harmonisasi regulasi antar tingkat pemerintahan, penetapan kerangka harga yang stabil dan prediktabel, serta pengembangan kapasitas institusional regulator. Lebih mendasar lagi, negara-negara perlu melakukan tinjauan sistematis terhadap seluruh kerangka hukum, mengidentifikasi ketentuan-ketentuan yang secara tidak langsung mendukung bahan bakar fosil atau mendiskriminasi energi terbarukan, dan menghapuskannya. Proses reformasi regulasi ini sendiri harus transparan, partisipatif, dan berbasis bukti, melibatkan semua pemangku kepentingan, untuk memastikan legitimasi dan ketahanan rezim regulasi baru terhadap tekanan politik jangka pendek.

E. Insentif dan Subsidi untuk Energi Terbarukan

Insentif dan subsidi merupakan instrumen fiskal yang paling dominan dan paling banyak diperdebatkan dalam perangkat kebijakan untuk mempromosikan energi terbarukan, dengan sejarah panjang yang penuh dengan keberhasilan spektakuler dan kegagalan yang merugikan. Tinjauan sistematis oleh Ramos Farroñán et al. (2025) yang menganalisis lima puluh studi *peer-reviewed* dari basis data Scopus memberikan gambaran yang berimbang tentang efektivitas subsidi. Di satu sisi, subsidi langsung terbukti mampu memangkas biaya listrik terbarukan sebesar 30 hingga 50 persen dan telah menghubungkan sekitar 45 juta orang ke akses energi di berbagai konteks geografis dan ekonomi. Di sisi lain, subsidi menimbulkan beban fiskal yang sangat besar bagi pemerintah negara berkembang, menciptakan dilema antara tujuan akses energi dan keberlanjutan anggaran negara. Keseimbangan yang tepat antara efektivitas dan keberlanjutan fiskal inilah yang menentukan keberhasilan atau kegagalan skema subsidi dalam jangka panjang.

Perbandingan antara berbagai jenis instrumen subsidi memberikan wawasan penting bagi desain kebijakan. Studi empiris oleh Mueller dan Weber (2025) tentang efektivitas biaya subsidi surya di Jerman memberikan bukti kuat bahwa subsidi investasi di muka (*upfront investment subsidies*) lebih efektif secara biaya dibandingkan *feed-in tariff* dalam mendorong adopsi panel surya di kalangan rumah tangga. Model dinamis yang dibangun oleh para peneliti memperhitungkan heterogenitas struktur kepemilikan residensial, menunjukkan bahwa subsidi investasi di muka secara langsung mengatasi hambatan likuiditas yang sering menjadi penghalang utama bagi rumah tangga berpenghasilan menengah ke bawah. Temuan ini memiliki implikasi penting bagi negara-negara berkembang yang sedang merancang program subsidi surya atap, di mana keterbatasan akses terhadap pembiayaan merupakan

kendala yang lebih mendasar daripada harga listrik itu sendiri.

Namun, efektivitas subsidi tidak bersifat mutlak, melainkan sangat bergantung pada konteks kelembagaan dan kondisi pasar lokal. Analisis ekonometrik oleh Lefevre dan Dupont (2025) terhadap 36 negara anggota OECD menunjukkan hubungan yang kompleks dan non-linear antara subsidi dan pangsa energi terbarukan dalam bauran listrik. Khususnya untuk energi angin, *feed-in tariff* menunjukkan korelasi positif dengan pangsa energi terbarukan dalam jangka panjang, namun dalam jangka pendek dapat memperlambat kemajuan karena distorsi pasar dan *rent-seeking behavior* yang ditimbulkannya. Paradoks ini menggarisbawahi perlunya evaluasi berkelanjutan dan penyesuaian desain subsidi seiring dengan kematangan pasar dan penurunan biaya teknologi. Subsidi yang dirancang untuk tahap awal pengembangan pasar mungkin menjadi kontraproduktif ketika teknologi telah mencapai paritas jaringan.

Konteks pedesaan dan negara-negara berpenghasilan rendah menghadirkan dinamika yang berbeda. Penelitian oleh Schlör et al. (2025) tentang dampak skema alokasi subsidi investasi terhadap biaya listrik terbarukan di pedesaan Afrika Barat menunjukkan bahwa subsidi yang ditargetkan secara geografis mampu menurunkan biaya listrik dan air bersih secara signifikan. Namun, keberhasilan ini sangat bergantung pada mekanisme distribusi yang adil dan kapasitas penyerapan lokal. Subsidi yang dikucurkan tanpa pendampingan teknis dan pengembangan kapasitas masyarakat lokal sering kali tidak terserap atau disalahgunakan, menegaskan bahwa subsidi bukan sekadar instrumen ekonomi, melainkan alat redistribusi kesejahteraan yang memerlukan perencanaan sosial dan spasial yang matang.

Dimensi keadilan distributif dari subsidi energi terbarukan semakin menjadi perhatian utama dalam literatur

terkini. Basilico et al. (2025) dalam artikel mereka di *Applied Energy* mengeksplorasi implikasi ekonomi dari subsidi untuk komunitas energi terbarukan di perkotaan berkelanjutan dan menemukan bahwa tanpa mekanisme distribusi yang hati-hati, subsidi dapat secara tidak proporsional menguntungkan kelompok berpenghasilan tinggi yang lebih mampu berinvestasi di awal, sementara kelompok rentan justru tertinggal karena tidak memiliki modal awal atau akses terhadap informasi. Konsekuensinya, kebijakan subsidi perlu dilengkapi dengan mekanisme *benefit-sharing* yang inklusif, seperti skema kepemilikan kolektif, subsidi silang, atau program bantuan teknis dan keuangan yang ditargetkan khusus untuk kelompok berpenghasilan rendah. Jika tidak, transisi energi yang didanai oleh uang publik justru akan memperlebar ketimpangan sosial yang sudah ada.

Reformasi subsidi bahan bakar fosil merupakan sisi lain dari mata uang yang sama, dan sering kali merupakan langkah kebijakan yang paling sulit secara politik namun paling efektif secara ekonomi dan lingkungan. Subsidi bahan bakar fosil global diperkirakan mencapai USD 7 triliun pada tahun 2024, jumlah yang jauh melampaui subsidi untuk energi terbarukan. Penghapusan subsidi ini secara bertahap akan menciptakan *level playing field* dan membebaskan sumber daya fiskal yang dapat dialihkan untuk mendukung energi terbarukan. Namun, sebagaimana ditunjukkan oleh studi tentang reformasi subsidi di Indonesia, Nigeria, dan India (Santoso et al., 2025), penghapusan subsidi yang dilakukan tanpa kompensasi sosial yang memadai dapat memicu reaksi publik yang kuat dan ketidakstabilan politik. Oleh karena itu, reformasi subsidi harus dirancang sebagai paket komprehensif yang mencakup bantuan langsung tunai atau program kompensasi lainnya.

Evolusi mekanisme subsidi menuju sistem yang lebih cerdas dan adaptif merupakan tren yang menjanjikan. Penelitian oleh Zhang dan Liu (2025) mengusulkan model subsidi insentif dinamis pemerintah

berbasis *blockchain* untuk konsumsi energi terbarukan, di mana besaran subsidi disesuaikan secara *real-time* berdasarkan data konsumsi aktual yang terekam di *distributed ledger*. Sistem ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dan akuntabilitas penyaluran subsidi dengan meminimalkan kebocoran dan penipuan, tetapi juga memungkinkan respons yang cepat terhadap perubahan kondisi pasar. Meskipun masih dalam tahap konseptual, pendekatan semacam ini mencerminkan arah masa depan kebijakan subsidi: dari instrumen statis yang kaku menjadi mekanisme adaptif yang memanfaatkan teknologi digital untuk optimalisasi berkelanjutan, sejalan dengan tujuan *Sustainable Development Goals* (SDG) 7 tentang energi bersih dan terjangkau.

Secara keseluruhan, konsensus yang muncul dari literatur yang terindeks Scopus adalah bahwa insentif dan subsidi tetap menjadi komponen yang diperlukan—namun tidak cukup—dalam bauran kebijakan energi terbarukan. Desain yang baik lebih penting daripada besaran anggaran; subsidi yang dirancang dengan buruk dapat menjadi bumerang yang mendistorsi pasar dan menciptakan ketergantungan, sementara subsidi yang dirancang dengan cermat dapat menjadi katalisator transformasi pasar yang mempercepat penurunan biaya dan mendorong inovasi. Ke depan, subsidi energi terbarukan harus secara progresif bergeser dari dukungan operasional menuju dukungan untuk inovasi dan infrastruktur, serta diintegrasikan dengan kebijakan pelengkap seperti reformasi pasar listrik, standar portofolio terbarukan, dan penetapan harga karbon. Hanya dengan pendekatan yang holistik dan adaptif, subsidi dapat memenuhi potensinya sebagai instrumen transisi energi yang efektif, efisien, dan berkeadilan.

BAB V

PENGUNAAN ENERGI TERBARUKAN DI SEKTOR INDUSTRI

A. Sektor Industri: Kebutuhan dan Potensi Energi Terbarukan

Sektor industri merupakan konsumen energi terbesar secara global sekaligus penyumbang emisi karbon yang signifikan, menjadikannya medan krusial bagi penetrasi energi terbarukan. Menurut analisis Badan Energi Internasional (IEA, 2025), lebih dari 70% konsumsi energi industri global bergantung pada proses panas dan uap bersuhu rendah hingga menengah, segmen yang sesungguhnya sangat cocok untuk elektrifikasi menggunakan energi terbarukan. Transformasi sistem tenaga di seluruh dunia telah menyebabkan peningkatan pangsa energi terbarukan dalam bauran industri melalui elektrifikasi dan integrasi pembangkitan terdistribusi.

Bibliometrik terhadap manufaktur berkelanjutan yang dilakukan oleh Alimin et al. (2025) berdasarkan 313 publikasi yang terindeks di Scopus mengungkapkan bahwa integrasi teknologi rendah karbon dalam industri manufaktur semakin mendapat perhatian riset. Klaster tematik yang muncul mencakup regulasi dan kebijakan teknologi rendah karbon,

pergeseran perilaku menuju praktik rendah karbon, serta kinerja bisnis inovasi teknologi hijau. Penelitian ini menekankan bahwa manufaktur membutuhkan pendekatan holistik yang menggabungkan inovasi teknologi, transformasi digital, dan dukungan kebijakan.

Potensi elektrifikasi sistem utilitas di industri kimia menjadi fokus studi oleh Bielefeld et al. (2025) yang dipublikasikan di *Applied Energy*. Penelitian ini menyelidiki viabilitas elektrifikasi pabrik kimia eksisting dengan mengintegrasikan energi terbarukan ke dalam sistem utilitas. Hasilnya menunjukkan bahwa elektrifikasi yang dikombinasikan dengan penyimpanan termal dapat menjadi jalur yang hemat biaya untuk mengurangi emisi CO₂ industri, meskipun sensitivitas terhadap harga energi menjadi faktor penentu utama. Industri dengan permintaan panas yang bervariasi memerlukan strategi optimasi yang cermat agar integrasi energi terbarukan tetap kompetitif.

Dekarbonisasi sektor industri berat seperti peleburan logam juga menjadi agenda utama. Studi tentang sistem Sulawesi Selatan yang dilakukan oleh Rahman et al. (2025) menunjukkan bahwa lonjakan permintaan dari sektor smelter dapat direspons dengan transisi dari batu bara ke gas alam yang dikombinasikan dengan ekspansi energi terbarukan dan strategi *co-firing*. Simulasi yang dilakukan mencapai pengurangan emisi gas rumah kaca hingga 48% dengan pangsa energi terbarukan mencapai 35%, menawarkan cetak biru bagi kawasan industri di negara berkembang.

Faktor geopolitik dan harga energi juga ikut menentukan arah penggunaan energi terbarukan di sektor industri. Penelitian oleh Celik dan Demir (2025) di Turki menggunakan pendekatan ekonometrik *Quantile on*

Quantile menemukan bahwa konsumsi energi terbarukan berkontribusi positif terhadap produktivitas industri, tetapi pengaruh ini termodulasi oleh risiko geopolitik dan volatilitas harga energi. Dalam lingkungan ketidakpastian yang tinggi, investasi energi terbarukan di sektor industri justru menjadi strategi lindung nilai yang efektif untuk menjaga stabilitas produksi jangka panjang.

B. Implementasi Energi Terbarukan di Sektor Pertanian

Sektor pertanian berada pada posisi unik dalam transisi energi terbarukan karena berperan ganda sebagai konsumen energi dan produsen biomassa untuk energi. Bibliometrik oleh Pietrzak et al. (2025) yang menganalisis 317 publikasi dari pangkalan data Scopus mengidentifikasi enam area riset utama, termasuk distribusi publikasi tahunan, artikel paling banyak disitasi, kontribusi negara, area subjek, aspek praktis implementasi, dan arah riset masa depan. Temuan kunci menunjukkan bahwa meskipun energi terbarukan telah terintegrasi ke dalam pertanian, masih terdapat kesenjangan riset yang signifikan mengenai apakah adopsi ini benar-benar meningkatkan efisiensi operasional, efektivitas biaya, dan keberlanjutan lingkungan.

Inovasi agrivoltaik menjadi sorotan utama dalam literatur terbaru. Sistem *AgriPV*—yang menggabungkan panel surya dengan budidaya tanaman—menawarkan solusi sinergis terhadap persaingan lahan antara produksi energi dan pangan. Proyek *PV4Plants* yang didemonstrasikan di Turki (2025) menggunakan nanopartikel canggih yang ditempatkan di antara panel PV untuk mengoptimalkan transmisi cahaya, menyesuaikan kondisi bagi tanaman spesifik dan wilayah iklim tertentu. Hasil awal menunjukkan

potensi peningkatan hasil panen sekaligus efisiensi konversi energi, mengindikasikan bahwa agrivoltaik dapat menjadi strategi *win-win* bagi ketahanan energi dan pangan.

Studi yang lebih luas tentang persaingan lahan-air antara energi surya dan pertanian oleh tim peneliti global (2026) menemukan bahwa konflik ini sangat terasa terutama di wilayah dengan kepadatan penduduk tinggi dan lahan subur terbatas. Melalui analisis *food-energy-water nexus* terhadap 925 instalasi surya dengan total kapasitas 2,53 GWp yang mencakup 3.930 hektar, studi ini menyimpulkan bahwa agrivoltaik tidak hanya mengurangi kompetisi lahan tetapi juga dapat meningkatkan keamanan ekonomi petani melalui diversifikasi pendapatan dari penjualan listrik.

Di negara-negara berkembang, adopsi energi terbarukan di sektor pertanian didorong oleh kebutuhan akan produktivitas yang lebih tinggi. Penelitian oleh Khan et al. (2025) terhadap 27 negara berkembang selama periode 2000–2021 menunjukkan bahwa penggunaan energi terbarukan, bersama dengan adopsi internet dan telepon seluler, secara signifikan memoderasi hubungan antara lahan pertanian, konsumsi pupuk, dan produktivitas pertanian. Studi ini menggunakan metode ekonometrik *Driscoll-Kraay* dan *System GMM* untuk memberikan bukti kuat bahwa energi terbarukan berperan sebagai katalisator modernisasi pertanian.

Sistem *mini-grid* tenaga surya untuk komunitas petani juga mendapat perhatian riset. Tinjauan yang dilakukan oleh Nkosi dan Dlamini (2025) menggunakan pendekatan PRISMA untuk menganalisis evolusi tantangan teknis *mini-grid* tegangan rendah dari tahun 2005 hingga 2025, dengan

data yang diekstrak dari basis data Scopus. Studi ini menyoroti strategi tanaman yang dapat mengurangi biaya dan meningkatkan akses energi bagi petani kecil, menunjukkan bahwa desain sistem yang disesuaikan dengan siklus tanam dan pola konsumsi energi pertanian dapat meningkatkan kelayakan ekonomi *mini-grid* pedesaan.

Kompleks agroindustri juga menjadi fokus tinjauan integratif oleh Gonzales dan Perez (2025) yang menganalisis basis data Scopus dan Google Scholar. Studi ini menemukan bahwa integrasi sumber energi terbarukan ke dalam kompleks agroindustri tidak hanya meningkatkan efisiensi dan daya saing sektor pertanian, tetapi juga mempromosikan produksi berkelanjutan dan kemandirian energi. Namun, diperlukan riset lebih lanjut tentang model bisnis yang memungkinkan petani skala kecil mengakses teknologi ini tanpa terbebani biaya modal yang tinggi.

C. Pemanfaatan Energi Terbarukan di Sektor Perumahan dan Komersial

Sektor perumahan dan komersial menyumbang porsi signifikan dari konsumsi energi final global, menjadikannya target utama integrasi energi terbarukan. Tinjauan sistematis yang dilakukan oleh tim peneliti dari *Discover Sustainability* (2025) merekonseptualisasikan bangunan bukan lagi sebagai infrastruktur energi pasif, melainkan sebagai simpul sosio-teknis aktif dalam jaringan energi terdesentralisasi. Berdasarkan analisis terhadap 92 artikel empiris dari Scopus, studi ini mengidentifikasi strategi utama integrasi energi terbarukan di bangunan serta hambatan kebijakan yang menghalangi adopsi massal.

Ketidakpastian kebijakan terbukti menjadi penghalang serius bagi adopsi energi terbarukan di sektor bangunan. Sohail et al. (2025) dalam studi ekonometriknya yang diterbitkan di *Applied Economics* menemukan bahwa ambiguitas kebijakan iklim, moneter, ekonomi, dan perdagangan memiliki dampak yang terdiferensiasi terhadap keputusan investasi energi terbarukan di sektor residensial dan komersial. Menariknya, ketidakpastian kebijakan perdagangan justru mendorong perilaku lindung nilai di kalangan konsumen menengah dan atas, menghasilkan peningkatan konsumsi energi terbarukan yang bertahan lama. Sebaliknya, ketidakpastian kebijakan iklim dalam jangka panjang menekan adopsi di semua segmen, menyoroti pentingnya stabilitas dan prediktabilitas regulasi.

Analisis tekno-ekonomi yang dilakukan oleh Oak Ridge National Laboratory (2025) terhadap elektrifikasi bangunan residensial dan komersial yang terintegrasi dengan sistem energi hibrida menunjukkan hasil yang menggembirakan. Studi ini membandingkan skenario dasar dengan sistem HVAC konvensional melawan skenario terelektrifikasi dengan pompa panas, dan menemukan potensi penghematan biaya yang substansial dalam jangka menengah. Integrasi dengan pembangkitan surya atap dan penyimpanan baterai semakin meningkatkan kemandirian energi bangunan dan mengurangi beban pada jaringan distribusi.

Diferensiasi geografis juga memainkan peran penting dalam performa sistem energi terbarukan bangunan. Penelitian oleh Romano et al. (2025) yang dipublikasikan di *Sustainability* menganalisis empat jenis bangunan—residensial tunggal, residensial multi-keluarga, komersial, dan industri—di area perkotaan, pedesaan, dan pesisir.

Hasilnya menunjukkan bahwa dinamika pasokan dan permintaan energi serta faktor geografis sangat memengaruhi kinerja sistem energi terbarukan, menuntut pendekatan desain yang spesifik lokasi dan tidak bisa diseragamkan.

Inovasi model bisnis dalam bentuk komunitas energi terbarukan mulai menjawab tantangan integrasi di lingkungan perkotaan yang padat. Studi tentang *Renewable Energy Community* (REC) yang memfasilitasi berbagi energi antara pinggiran kota dan pusat kota bersejarah di Italia menunjukkan kelayakan penggunaan energi terbarukan yang dihasilkan di pinggiran untuk mendukung inovasi energi di pusat kota yang kerap terkendala pembatasan instalasi karena konservasi warisan budaya. Sementara itu, penelitian oleh Rodrigues et al. (2025) di Portugal menunjukkan bahwa komunitas energi dengan partisipasi sektor industri dan ritel yang menuntut energi tinggi mencapai penghematan biaya listrik hingga 42%, meskipun tingkat swasembada masih relatif rendah.

D. Energi Terbarukan untuk Transportasi

Transportasi merupakan sektor yang paling sulit didekarbonisasi karena ketergantungannya yang tinggi pada bahan bakar cair berdensitas energi tinggi. Tinjauan literatur sistematis oleh Guzanek et al. (2025) yang diterbitkan di *European Research Studies Journal* menunjukkan bahwa riset tentang energi terbarukan di sektor transportasi terkonsentrasi pada tiga aliran utama: teknologi hidrogen, mobilitas listrik, dan biofuel. Analisis bibliometrik menggunakan VOSviewer terhadap publikasi terindeks Scopus mengungkapkan bahwa China memimpin dalam

output publikasi dan intensitas kolaborasi, diikuti oleh Eropa dan Amerika Serikat. Meskipun demikian, integrasi energi terbarukan ke dalam sistem transportasi masih merupakan area yang kurang dieksplorasi, menandakan peluang riset yang signifikan.

Kendaraan listrik yang ditenagai oleh pembangkitan energi terbarukan memegang peranan sentral dalam visi transportasi berkelanjutan. Artikel tinjauan yang dipublikasikan oleh konsorsium peneliti internasional (2025) di jurnal *Sustainable Transport* mengevaluasi potensi propulsi listrik, hibrida, hidrogen, dan berbasis biofuel dalam memungkinkan mobilitas rendah emisi. Integrasi energi terbarukan ke dalam sistem transportasi dinilai bersama dengan mekanisme transisi energi, menunjukkan bahwa tidak ada satu pun teknologi yang dapat menjadi solusi tunggal untuk semua segmen transportasi. Sebaliknya, portofolio teknologi yang terkoordinasi dibutuhkan, dengan elektrifikasi langsung cocok untuk kendaraan penumpang jarak pendek, sementara hidrogen dan biofuel lebih sesuai untuk truk berat, pelayaran, dan penerbangan.

Di ranah bahan bakar alternatif, tinjauan kritis oleh Al-Qahtani et al. (2025) dari King Fahd University membandingkan mobil listrik, hidrogen, metanol, dan biofuel dari perspektif mitigasi polusi, lingkungan, dan ekonomi. Meskipun teknologi-teknologi ini sering disebut bersih atau nol emisi dalam konteks operasional terbatas, ketersediaan sumber daya, implikasi siklus hidup, dan keterbatasan infrastruktur sangat menentukan keberlanjutannya secara holistik. Penilaian siklus hidup kendaraan listrik hibrida yang ditenagai bioetanol dan biogas oleh Soares et al. (2025) memberikan bukti lebih lanjut, menunjukkan bahwa

kombinasi elektrifikasi dan bahan bakar terbarukan dapat mengurangi dampak lingkungan secara signifikan jika sumber daya dikelola dengan baik.

Transportasi barang jalan raya menghadirkan tantangan tersendiri. Tinjauan literatur yang dipresentasikan di konferensi TRANSCODE 2025 di Zagreb menganalisis lebih dari 150 sumber akademis tentang teknologi propulsi alternatif untuk angkutan barang jalan raya. Studi ini mengeksplorasi aspek ekonomi dan ekologis, menemukan bahwa meskipun truk listrik baterai semakin kompetitif untuk rute pendek dan menengah, truk sel bahan bakar hidrogen dan biofuel tetap diperlukan untuk rute jarak jauh dan operasi berat di mana densitas energi baterai masih menjadi kendala. Hal ini menegaskan perlunya pendekatan yang terfragmentasi berdasarkan segmen operasional.

Skenario transportasi nol bersih di tingkat nasional juga menjadi subjek analisis. Studi oleh Lefevre dan rekan (2025) dari *IFP Energies Nouvelles* menilai dampak skenario transportasi nol bersih di Perancis terhadap sumber daya biomassa, konsumsi hidrogen, dan listrik. Berbagai solusi teknologi, mulai dari kendaraan listrik hingga bahan bakar terbarukan seperti biofuel dan e-fuel, serta perubahan permintaan, dipertimbangkan untuk mencapai target dekarbonisasi. Hasilnya menunjukkan bahwa pencapaian nol bersih akan memerlukan peningkatan besar-besaran dalam kapasitas pembangkitan listrik terbarukan dan produksi hidrogen hijau, dengan implikasi signifikan pada penggunaan lahan dan rantai pasok biomassa. Secara keseluruhan, konsensus akademik menunjukkan bahwa masa depan energi terbarukan di sektor transportasi terletak pada diversifikasi teknologi yang disesuaikan dengan karakteristik

setiap moda dan segmen perjalanan, didukung oleh kebijakan yang koheren dan investasi infrastruktur yang masif.

E. Kasus-kasus Sukses Penggunaan Energi Terbarukan di Industri

Studi kasus implementasi energi terbarukan di sektor industri memberikan bukti empiris yang meyakinkan tentang kelayakan teknis dan ekonomi dari transisi ini. Horzela-Miś et al. (2025) mendokumentasikan integrasi sistem fotovoltaik di sebuah pabrik produksi bangunan di Polandia melalui metodologi studi kasus berbasis data operasional aktual dan pemodelan simulasi. Hasilnya menunjukkan bahwa 31,8% pasokan listrik tahunan pabrik terpenuhi oleh energi surya, menghasilkan penghematan emisi CO₂ sebesar 10.366 kg per tahun. Dengan periode pengembalian modal hanya 3,6 tahun dan potensi penghematan jangka panjang lebih dari EUR 128.000 dalam 26 tahun, kasus ini membuktikan bahwa investasi energi terbarukan di sektor konstruksi tidak hanya berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan tetapi juga memberikan keuntungan ekonomi yang substansial.

Di sektor pertambangan, yang secara tradisional sangat bergantung pada bahan bakar fosil, transformasi mulai menunjukkan hasil yang menjanjikan. Studi oleh Tremblay dan ko (2025) di Raglan Mine, Kanada, menyelidiki kelayakan dekarbonisasi pembangkitan listrik di lokasi pertambangan terpencil melalui jaringan energi terbarukan yang terdiri dari turbin angin dan pembangkit listrik *pumped hydro storage* (PHSP). Konfigurasi optimal yang diidentifikasi mencapai pangsa energi terbarukan sebesar 52,2% dalam bauran energi, dengan periode pengembalian modal sekitar

11 tahun. Meskipun investasi awal cukup besar, penghematan biaya jangka panjang dan pengurangan emisi karbon memberikan justifikasi yang kuat bagi sektor pertambangan untuk beralih ke energi bersih.

Hybrid wind-redox flow battery system merupakan inovasi lebih lanjut yang diteliti di lokasi yang sama oleh Bouchard et al. (2025). Integrasi baterai aliran redoks untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi angin di Raglan Mine menawarkan solusi penyimpanan yang lebih tahan lama dibandingkan baterai lithium-ion untuk aplikasi industri yang memerlukan siklus pengisian-pengosongan yang dalam dan sering. Studi ini menyajikan metodologi komprehensif untuk mengevaluasi penyimpanan energi di lokasi industri *off-grid* dan mengidentifikasi tantangan utama dalam meningkatkan adopsi energi terbarukan untuk operasi pertambangan terpencil.

Sektor minyak dan gas, sebagai konsumen energi yang sangat besar sekaligus produsen bahan bakar fosil, juga telah menjadi arena bagi implementasi energi terbarukan yang inovatif. Studi kasus tentang pemasangan *Floating Solar Photovoltaic* (FSPV) di Kilang Kochi milik Bharat Petroleum Corporation Ltd. (BPCL) di India, yang dipublikasikan di *OnePetro* (2025), mendemonstrasikan bagaimana badan usaha migas memanfaatkan permukaan air yang tidak terpakai di area kilang untuk membangkitkan listrik surya. Proyek ini berhasil mengoptimalkan lahan, mengurangi emisi Cakupan-2 (*Scope-2*), dan menyelaraskan operasi perusahaan dengan tujuan keberlanjutan korporat tanpa mengorbankan produksi.

Integrasi energi terbarukan ke dalam industri baja, yang merupakan sektor paling sulit didekarbonisasi karena

kebutuhan panas tinggi dan penggunaan kokas metalurgi, juga mulai menunjukkan kemajuan. Studi oleh Wang dan Li (2025) tentang penggabungan pabrik baja dengan pembangkit listrik fotovoltaik di China menggunakan pendekatan optimasi untuk mencocokkan profil beban pabrik dengan profil pembangkitan surya. Hasilnya menunjukkan bahwa meskipun ketergantungan penuh pada energi surya belum memungkinkan karena intermittensi, penggabungan ini dapat secara signifikan mengurangi konsumsi batu bara dan emisi karbon pabrik baja, terutama jika dilengkapi dengan penyimpanan energi dan kontrak pembelian listrik hijau jangka panjang.

Sistem energi terintegrasi di taman industri juga menjadi platform eksperimen yang produktif. Tim peneliti China (2025) mengusulkan model *carbon day-ahead optimal dispatch* untuk sistem energi terintegrasi di taman industri yang menggabungkan produksi hidrogen dari sistem angin dan surya komplementer (HPCWS). Model ini mendirikan persamaan karbon untuk pembangkitan listrik konvensional dan gas alam, memungkinkan operator taman industri untuk mengoptimalkan bauran energi secara real-time berdasarkan harga listrik dan target pengurangan karbon. Pendekatan semacam ini menunjukkan bahwa digitalisasi dan otomatisasi sistem energi industri dapat membuka efisiensi yang sebelumnya tidak terjangkau, membuka jalan bagi implementasi energi terbarukan dalam skala yang lebih luas di seluruh sektor industri global.

BAB VI

Energi Terbarukan dan Dampaknya terhadap Lingkungan

A. Dampak Positif Energi Terbarukan terhadap Lingkungan

Sumber energi terbarukan menawarkan spektrum manfaat lingkungan yang jauh melampaui narasi pengurangan emisi semata, mencakup perbaikan kualitas udara, konservasi sumber daya air, pemulihan kesuburan tanah, hingga peningkatan keanekaragaman hayati. Tidak seperti pembangkit listrik berbahan bakar fosil yang melepaskan sulfur dioksida, nitrogen oksida, partikulat, dan merkuri ke atmosfer dalam jumlah masif, teknologi surya, angin, dan geotermal beroperasi hampir tanpa emisi polutan udara konvensional selama fase operasionalnya. Dampak positif ini memiliki implikasi kesehatan masyarakat yang substansial, terutama di kawasan perkotaan padat di Asia Tenggara dan Asia Selatan yang selama ini bergulat dengan tingkat polusi udara kronis. Dengan menggantikan pembangkit listrik tenaga batu bara yang menua, energi terbarukan secara langsung berkontribusi pada penurunan prevalensi penyakit pernapasan, kardiovaskular, dan kanker paru-paru yang terkait dengan paparan polutan udara, menghasilkan ko-manfaat kesehatan yang sering kali luput dari perhitungan ekonomi konvensional.

Inovasi dalam sistem fotovoltaik terapung (*floating photovoltaic* atau FPV) telah membuka dimensi baru dalam sinergi antara produksi energi dan konservasi ekosistem air tawar. Rocha et al. (2024) dalam tinjauan sistematis mereka yang terindeks Scopus menemukan 422 bukti dampak FPV terhadap sistem air tawar, dengan 283 bukti terkait efek fisik, 96 bukti terkait efek kimia, dan 43 bukti terkait efek biologis. Temuan paling konsisten adalah bahwa FPV secara signifikan mengurangi laju evaporasi permukaan air melalui efek naungan panel, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan air di waduk dan danau, sebuah ko-manfaat krusial bagi wilayah semi-arid dan negara-negara yang rentan terhadap kekeringan berkepanjangan. Selain itu, naungan yang dihasilkan panel surya terbukti mengurangi frekuensi dan intensitas ledakan populasi alga (*algal blooms*) yang sering kali dipicu oleh suhu air yang terlalu tinggi dan limpasan nutrisi dari lahan pertanian di sekitarnya.

Pada ranah ekosistem terestrial, taman surya (*solar parks*) yang dikelola dengan baik menunjukkan kapasitas untuk meningkatkan kualitas tanah dan mendukung layanan ekosistem yang sebelumnya terdegradasi. Treasure et al. (2025) dalam penilaian global mereka terhadap dampak taman surya terhadap layanan ekosistem, yang didasarkan pada 622 bukti dari 167 artikel, mendokumentasikan bahwa hasil positif yang dominan meliputi peningkatan regulasi kualitas tanah di iklim kering, peningkatan dukungan siklus air, regulasi erosi tanah, dan regulasi penyerbukan selama fase operasional. Secara khusus, padang rumput dan sabana yang dikonversi menjadi taman surya dengan pengelolaan vegetasi asli di bawah panel menunjukkan pemulihan keanekaragaman polinator yang signifikan, mengindikasikan bahwa infrastruktur energi terbarukan dapat berfungsi ganda sebagai koridor ekologis dan habitat bagi spesies kunci.

Sistem agrivoltaik—yang mengintegrasikan produksi tanaman dengan pembangkit listrik surya pada lahan yang sama—merepresentasikan lompatan konseptual dalam mengatasi dikotomi antara produksi energi dan ketahanan pangan. Dengan menempatkan panel surya pada ketinggian dan kerapatan tertentu, sistem agrivoltaik menciptakan iklim mikro yang memoderasi suhu ekstrem, mengurangi evaporasi tanah, dan melindungi tanaman dari radiasi matahari berlebih, sehingga berpotensi meningkatkan produktivitas pertanian sekaligus menghasilkan listrik bersih. Kombinasi ini sangat relevan bagi negara-negara tropis dengan intensitas radiasi matahari tinggi namun lahan pertanian yang semakin langka akibat urbanisasi dan degradasi lahan, menawarkan jalan keluar dari kompetisi penggunaan lahan yang selama ini menjadi kritik utama terhadap pembangkit listrik tenaga surya skala utilitas.

Energi angin, terutama dalam konfigurasi lepas pantai (*offshore*), juga memberikan dampak positif yang kurang disadari terhadap ekosistem laut. Fondasi turbin angin lepas pantai dapat berfungsi sebagai terumbu karang buatan (*artificial reefs*) yang menyediakan substrat keras bagi organisme bentik untuk menempel dan berkembang biak. Struktur bawah air ini menciptakan habitat baru bagi ikan, krustasea, dan moluska yang sebelumnya langka di dasar laut berpasir yang homogen. Efek *reef effect* ini, dikombinasikan dengan zona larangan penangkapan ikan yang biasanya diterapkan di sekitar ladang angin lepas pantai demi keselamatan operasional, secara de facto menciptakan kawasan konservasi laut yang mendukung pemulihan stok ikan dan biodiversitas laut. Meskipun demikian, perlu dicatat bahwa dampak positif ini sangat bergantung pada desain fondasi, material konstruksi, dan lokasi penempatan turbin.

Manfaat positif energi terbarukan juga meluas ke ranah konservasi keanekaragaman hayati melalui mekanisme tidak langsung yang jarang dibahas dalam literatur kebijakan energi. Pengurangan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh transisi energi secara langsung memperlambat laju perubahan iklim, yang merupakan ancaman eksistensial bagi keanekaragaman hayati global. Proyeksi terkini menunjukkan bahwa pemanasan global tanpa mitigasi akan mendorong kepunahan hingga sepertiga spesies di bumi pada akhir abad ini, sehingga setiap pengurangan emisi yang dicapai melalui energi terbarukan secara fundamental merupakan tindakan konservasi spesies. Dalam kerangka ini, energi terbarukan bukan sekadar teknologi energi, melainkan instrumen konservasi global yang paling komprehensif dan memiliki jangkauan dampak paling luas.

Kualitas air permukaan dan air tanah juga menerima manfaat signifikan dari transisi energi. Pembangkit listrik tenaga batu bara dan nuklir konvensional memerlukan volume air pendingin yang sangat besar, yang setelah digunakan dikembalikan ke badan air pada suhu yang jauh lebih tinggi, menyebabkan polusi termal yang mengganggu ekosistem akuatik. Sebaliknya, teknologi surya fotovoltaik dan angin hampir tidak memerlukan air dalam operasinya, membebaskan sumber daya air yang langka untuk keperluan rumah tangga, pertanian, dan pemeliharaan aliran lingkungan. Di wilayah yang mengalami kelangkaan air kronis seperti Timur Tengah, Afrika Utara, dan sebagian Asia Selatan, penghematan air ini merupakan ko-manfaat lingkungan yang bahkan lebih mendesak daripada pengurangan emisi karbon.

Akhirnya, perlu ditekankan bahwa manfaat lingkungan dari energi terbarukan tidak bersifat otomatis, melainkan sangat bergantung pada perencanaan spasial, desain teknologi, dan tata kelola yang baik. Penempatan ladang angin di jalur migrasi burung tanpa studi dampak yang memadai, pembangunan bendungan hidroelektrik tanpa

memperhitungkan konektivitas sungai, atau konversi hutan primer untuk perkebunan biomassa adalah contoh-contoh kegagalan perencanaan yang dapat mengikis manfaat lingkungan yang diharapkan. Namun demikian, dengan pendekatan berbasis bukti yang mengintegrasikan pengetahuan ekologi, partisipasi masyarakat, dan kebijakan yang adaptif, energi terbarukan memiliki potensi luar biasa untuk tidak hanya menggantikan bahan bakar fosil, tetapi juga secara aktif meregenerasi dan memperkuat sistem ekologi yang menopang kehidupan di planet ini.

B. Pengurangan Emisi Karbon dan Pemanasan Global

Transisi dari energi konvensional berbasis fosil menuju energi bersih merupakan strategi paling fundamental dalam mitigasi perubahan iklim global. Penelitian empiris oleh Aliyev dan Guliyeva (2024) yang dipublikasikan di **Gondwana Research** dan terindeks Scopus menunjukkan bahwa teknologi iklim (**climate-tech**) dan transisi energi secara simultan mengurangi degradasi lingkungan melalui penurunan emisi CO₂ di 26 negara Uni Eropa. Temuan ini diperkuat oleh analisis kausalitas yang membuktikan bahwa tren pengambilan keputusan terkait teknologi iklim, transisi energi, dan regulasi lingkungan secara signifikan memengaruhi tingkat emisi karbon. Dengan kata lain, negara-negara yang secara proaktif mengembangkan teknologi hijau dan mempercepat transisi energi mampu memutus hubungan historis antara pertumbuhan ekonomi dan peningkatan emisi, sebuah pemutusan (**decoupling**) yang merupakan prasyarat bagi pembangunan berkelanjutan.

Pada skala global, Safitri et al. (2024) melalui tinjauan sistematis PRISMA yang diintegrasikan dengan analisis bibliometrik berbasis data Scopus mengidentifikasi empat langkah yang terbukti efektif dalam mencapai emisi nol bersih pada tahun 2050: dekarbonisasi sistem energi, transisi energi terbarukan, elektrifikasi transportasi, dan reforestasi.

Keempat langkah tersebut tidak beroperasi secara independen, melainkan membentuk jaringan umpan balik yang saling memperkuat; misalnya, elektrifikasi transportasi hanya akan menghasilkan pengurangan emisi yang signifikan jika listrik yang digunakan berasal dari sumber terbarukan, bukan dari pembangkit listrik tenaga batu bara. Temuan ini mengimplikasikan bahwa kebijakan mitigasi perubahan iklim harus dirancang secara holistik dan lintas-sektoral, bukan sebagai serangkaian intervensi yang terfragmentasi.

Sinergi antara energi terbarukan dan prinsip ekonomi sirkular membuka peluang pengurangan emisi yang bahkan lebih ambisius. Oni dan rekan-rekannya (2025) dalam tinjauan komprehensif yang terindeks Scopus menekankan bahwa integrasi praktik ekonomi sirkular—termasuk efisiensi sumber daya, valorisasi limbah, perpanjangan masa pakai produk, dan daur ulang—dapat meningkatkan efektivitas sistem energi terbarukan dan dekarbonisasi industri secara signifikan. Studi ini mengidentifikasi bahwa pencapaian netralitas karbon global memerlukan kerangka kerja terpadu yang menggabungkan langkah-langkah teknologi, ekonomi, dan kebijakan, serta menyoroti bahwa inovasi yang didorong oleh ekonomi sirkular mampu membangun ketahanan dalam sistem ekonomi rendah karbon. Implikasi penting dari temuan ini adalah bahwa transisi energi tidak boleh berhenti pada substitusi teknologi pembangkitan, melainkan harus meluas hingga ke desain ulang rantai pasok dan siklus hidup material.

Investasi dan teknologi energi terbarukan di negara-negara G7, demikian temuan studi ekonometrik yang dilakukan oleh peneliti dari Hatay Mustafa Kemal University (2023) dan terindeks Scopus, memiliki korelasi negatif yang kuat dan konsisten dengan emisi karbon di berbagai spesifikasi model. Lebih menarik lagi, studi ini menemukan bahwa indikator tata kelola seperti kualitas regulasi, stabilitas politik, dan demokrasi tidak secara langsung memengaruhi emisi karbon, menandakan bahwa instrumen teknologi dan

investasi memiliki pengaruh yang lebih determinan dalam pengurangan emisi. Konsekuensi kebijakannya jelas: negara-negara harus memprioritaskan peningkatan investasi energi terbarukan dan pengembangan teknologi bersih sebagai jalur utama menuju target netralitas karbon mereka, tanpa harus menunggu perbaikan tata kelola yang sering kali memakan waktu puluhan tahun.

Pada tataran sektoral, kontribusi energi terbarukan dalam pengurangan emisi sangat bervariasi, dengan sektor kelistrikan memimpin transformasi sementara sektor industri berat dan transportasi masih tertinggal. Pembangkit listrik tenaga surya dan angin telah mencapai biaya yang kompetitif atau bahkan lebih rendah dibandingkan pembangkit listrik tenaga batu bara dan gas alam baru di sebagian besar pasar global, sehingga adopsi kedua teknologi ini melaju pesat. Di sisi lain, dekarbonisasi sektor industri yang memerlukan panas bersuhu tinggi—seperti produksi semen, baja, dan petrokimia—masih menghadapi tantangan teknologi dan ekonomi yang signifikan, meskipun perkembangan dalam hidrogen hijau dan elektrifikasi proses termal mulai menunjukkan potensi yang menjanjikan.

Hernandez et al. (2014), dalam tinjauan komprehensif mereka di **Renewable and Sustainable Energy Reviews** yang terindeks Scopus, menegaskan kembali bahwa sistem energi surya skala utilitas memiliki potensi signifikan untuk mitigasi perubahan iklim melalui penggantian langsung pembangkitan listrik berbasis bahan bakar fosil. Namun, studi ini juga menyoroti pentingnya memahami umpan balik antara infrastruktur energi surya dan interaksi darat-atmosfer, seperti perubahan albedo permukaan dan pola konveksi lokal, yang jika tidak diperhitungkan dapat mengurangi efektivitas mitigasi iklim. Temuan ini menggarisbawahi perlunya pendekatan siklus hidup dan sistemik dalam mengevaluasi kontribusi energi terbarukan terhadap pengurangan emisi karbon.

Negara-negara berkembang, khususnya Indonesia, menghadapi dinamika yang unik dalam konteks pengurangan emisi melalui energi terbarukan. Di satu sisi, potensi energi terbarukan yang melimpah—terutama surya, geotermal, dan biomassa—menawarkan peluang lompatan teknologi (*leapfrogging*) yang memungkinkan negara-negara ini melewati fase ketergantungan pada batu bara. Di sisi lain, pertumbuhan permintaan energi yang cepat akibat industrialisasi dan urbanisasi dapat menggerus pengurangan emisi yang dicapai melalui penetrasi energi terbarukan jika tidak disertai dengan peningkatan efisiensi energi yang agresif. Paradoks ini menuntut kerangka kebijakan yang mampu menyelaraskan target pertumbuhan ekonomi, akses energi, dan mitigasi perubahan iklim secara simultan.

Secara keseluruhan, bukti empiris yang terakumulasi dari ratusan studi yang terindeks Scopus dan diterbitkan dalam dekade terakhir secara meyakinkan menunjukkan bahwa energi terbarukan merupakan instrumen yang paling efektif dan tersedia secara luas untuk mengurangi emisi karbon dan memperlambat laju pemanasan global. Namun, efektivitasnya sangat bergantung pada kecepatan dan skala implementasi, koherensi kebijakan, dan integrasi dengan strategi mitigasi lainnya. Waktu yang tersisa untuk mencegah dampak perubahan iklim yang paling katastrofik semakin menyempit, menjadikan akselerasi transisi energi terbarukan bukan lagi sekadar pilihan kebijakan, melainkan imperatif eksistensial bagi peradaban manusia.

C. Pengelolaan Limbah Energi Terbarukan

Salah satu ironi terbesar dalam transisi energi adalah bahwa teknologi yang dirancang untuk menyelamatkan planet dari polusi karbon ternyata dapat menciptakan krisis lingkungan baru dalam bentuk limbah padat yang sulit didaur ulang. Panel surya fotovoltaik, yang diproyeksikan mencapai kapasitas terpasang global 4.500 GW pada tahun 2050, memiliki masa pakai sekitar 25 hingga 30 tahun, setelah itu

panel-panel ini harus didekomisioner dan dikelola limbahnya. Tinjauan komprehensif yang terindeks Scopus memperkirakan bahwa limbah panel surya akan mencapai 78 juta ton pada tahun 2050, menciptakan tantangan pengelolaan limbah yang belum pernah terjadi sebelumnya dalam sejarah teknologi energi. Tanpa infrastruktur daur ulang yang memadai dan kerangka regulasi yang ketat, limbah panel surya berpotensi mencemari tanah dan air tanah dengan logam berat seperti timbal dan kadmium, menimbulkan ironi pahit bagi teknologi yang dipromosikan sebagai solusi lingkungan.

Kompleksitas material panel surya menjadi kendala utama dalam proses daur ulang. Modul silikon kristalin yang mendominasi pasar terdiri dari lapisan-lapisan yang direkatkan dengan etilena-vinil asetat (EVA), menyulitkan pemisahan mekanis untuk pemulihan material bernilai tinggi seperti silikon, perak, dan tembaga. Capraz dan Gungor (2025) dalam bab buku mereka yang terindeks Scopus menekankan bahwa logam bernilai tinggi dalam panel surya, termasuk logam kritis seperti indium dan galium serta logam berbahaya seperti timbal dan kadmium, membuat pendekatan daur ulang yang selaras dengan ekonomi sirkular semakin penting secara ekonomi dan lingkungan. Pasar energi surya utama diproyeksikan akan menghasilkan volume limbah panel yang signifikan pada tahun 2050, namun infrastruktur daur ulang di sebagian besar kawasan masih sangat tidak memadai.

Teknologi daur ulang panel surya dapat dikategorikan ke dalam tiga pendekatan utama: mekanis, termal, dan kimia. Metode mekanis melibatkan penghancuran dan pemisahan material berdasarkan sifat fisik, namun sering kali menghasilkan material dengan kemurnian rendah. Metode termal, seperti pirolisis, menggunakan suhu tinggi untuk mengurai lapisan EVA, tetapi berisiko melepaskan gas berbahaya jika tidak dikelola dengan benar. Metode kimia menggunakan pelarut seperti asam nitrat (HNO_3) untuk

melarutkan lapisan enkapsulan dan memungkinkan pemulihan material dengan kemurnian tinggi, meskipun dengan biaya yang lebih mahal dan potensi limbah cair yang memerlukan pengolahan lanjutan. Tinjauan yang diterbitkan di **Waste Management** (2025) menyoroti bahwa metode kimia menawarkan pemulihan material berkualitas tinggi yang lebih bersih, sementara metode termal dapat menghasilkan emisi gas beracun yang memerlukan penanganan khusus.

Sementara itu, limbah bilah turbin angin menyajikan tantangan yang bahkan lebih pelik. Bilah turbin angin modern terbuat dari komposit serat karbon atau serat kaca yang diperkuat dengan resin termoset, material yang dirancang untuk sangat tahan lama dan ringan, tetapi nyaris mustahil untuk didaur ulang secara konvensional. Khalid et al. (2023) dalam tinjauan mereka yang terindeks Scopus mencatat bahwa saat ini hanya 80% hingga 85% material turbin angin yang dapat didaur ulang, dan mencapai tingkat daur ulang 100% memerlukan perhatian serius pada pemulihan semua material serta adaptasi model ekonomi sirkular. Bilah turbin yang didekomisioner sering kali berakhir di tempat pembuangan akhir (**landfill**) atau dibakar, strategi yang tidak hanya menyia-nyiakan sumber daya berharga tetapi juga berpotensi menimbulkan masalah kesehatan dan lingkungan yang parah.

Berbeda dengan panel surya yang mengandung logam bernilai tinggi yang memberikan insentif ekonomi untuk daur ulang, bilah turbin angin memiliki nilai material daur ulang yang rendah, sehingga insentif pasar untuk mengembangkan infrastruktur daur ulang masih lemah. Karavida dan Peponi (2023) dalam artikel mereka di jurnal **Energies** yang terindeks Scopus mengusulkan kerangka konseptual untuk **upcycling** dan **downcycling** bilah turbin angin dalam konteks regenerasi perkotaan. Studi kasus yang mereka analisis menunjukkan bahwa bilah bekas pakai dapat digunakan dalam ko-pemrosesan semen untuk

menggantikan sebagian bahan baku dan bahan bakar, serta dalam proyek arsitektur seperti jembatan penyeberangan, furnitur perkotaan, dan elemen struktural bangunan, sehingga menutup lingkaran material sesuai dengan prinsip ekonomi sirkular dan keberlanjutan.

Inovasi dalam pemanfaatan kembali bilah turbin angin terus berkembang. Studi mutakhir yang diterbitkan di **Renewable and Sustainable Energy Reviews** (2025) mengeksplorasi potensi penggunaan kembali bilah turbin angin yang sudah didekomisioner sebagai komponen struktural untuk struktur rambu lalu lintas di jalan raya (**Highway Overhead Sign Structures**). Analisis teknis menunjukkan bahwa bilah turbin angin yang sudah tidak digunakan masih mempertahankan rasio kekuatan-terhadap-berat yang tinggi dan daya tahan yang baik. Dari segi ekonomi, penggunaannya mengurangi biaya material hingga 73% untuk struktur tersebut, sementara dari segi lingkungan, setiap struktur bentang 40 kaki mampu mengurangi emisi CO₂ sebesar 242 ton, memberikan kontribusi terhadap tujuan nol bersih global.

Mengatasi tantangan limbah energi terbarukan memerlukan pendekatan multi-cabang yang mencakup inovasi teknologi, instrumen ekonomi, dan kerangka regulasi yang koheren. Pada tingkat teknologi, penelitian tentang material alternatif yang dapat didaur ulang atau dapat terurai secara hayati untuk panel surya dan bilah turbin angin generasi berikutnya harus diprioritaskan. Pada tingkat ekonomi, mekanisme tanggung jawab produsen yang diperluas (**extended producer responsibility**) yang mewajibkan produsen untuk membiayai pengumpulan dan daur ulang produk mereka di akhir masa pakainya perlu segera diadopsi. Pada tingkat regulasi, standar minimum untuk tingkat daur ulang dan kandungan material daur ulang dalam produk baru harus ditetapkan untuk menciptakan permintaan pasar bagi material daur ulang. Tanpa tindakan bersamaan di ketiga lini ini, paradoks limbah energi

terbarukan akan terus menjadi noda yang mengotori narasi keberlanjutan transisi energi global.

D. Studi Kasus Dampak Lingkungan dari Penggunaan Energi Terbarukan

Studi kasus dari berbagai belahan dunia memberikan ilustrasi yang kaya tentang bagaimana dampak lingkungan dari energi terbarukan sangat bergantung pada konteks geografis, ekologis, dan sosial tempat teknologi tersebut diterapkan. Flecker et al. (2022) dalam studi mereka yang dipublikasikan di jurnal **Science** dan telah mengumpulkan 140 sitasi Scopus mendokumentasikan dampak ekspansi pembangkit listrik tenaga air di Lembah Amazon. Dengan menggunakan optimasi multiobjektif, studi ini menemukan bahwa pendekatan pembangunan bendungan secara tidak terkoordinasi telah mengorbankan berbagai layanan ekosistem yang berharga. Perencanaan yang mempertimbangkan dampak secara keseluruhan di seluruh cekungan sungai, alih-alih evaluasi bendungan per bendungan, dapat meminimalkan kerusakan pada konektivitas sungai, transportasi sedimen, keanekaragaman ikan, dan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh dekomposisi bahan organik di reservoir.

Di sisi lain dunia, studi mengenai pembangkit listrik tenaga air di Sungai Yangtze, Tiongkok, memberikan bukti lebih lanjut tentang perubahan hidrologi yang diakibatkan oleh bendungan. Ali et al. (2019) menganalisis dampak bendungan kaskade di hulu Bendungan Tiga Ngarai (**Three Gorges Dam**) menggunakan "Indikator Perubahan Hidrologi" (**Indicators of Hydrologic Alteration**). Temuan mereka menunjukkan bahwa bendungan kaskade memiliki dampak positif di bulan Juli karena peningkatan aliran, namun dampak negatif di bulan Oktober karena penurunan aliran yang signifikan. Aliran minimum satu hari ditemukan menurun hingga 7% di Stasiun Miaohe, menunjukkan bahwa operasi pembangkit listrik tenaga air harus disesuaikan

secara berkelanjutan untuk menjaga ekosistem sungai pada tingkat yang dapat diterima. Studi ini menawarkan pelajaran penting bagi negara-negara berkembang yang sedang merencanakan pembangunan bendungan skala besar: manfaat energi harus ditimbang secara cermat terhadap dampak ekologi yang sering kali tidak dapat dipulihkan.

Transformasi lanskap oleh pembangkit listrik tenaga surya skala utilitas di Belanda memberikan studi kasus yang relevan bagi negara-negara dengan kepadatan penduduk tinggi dan lahan yang langka. Analisis terhadap 46 pembangkit listrik tenaga surya di Belanda yang diterbitkan di **Renewable Energy** (2025) mengidentifikasi 43 jenis langkah spasial yang diterapkan untuk mengatasi tiga kekhawatiran utama: kompetisi penggunaan lahan, hilangnya keanekaragaman hayati, dan degradasi pengalaman lanskap. Studi ini mengungkapkan adanya sinergi dan juga trade-off antara berbagai langkah tersebut; misalnya, penanaman vegetasi di bawah panel surya yang dimaksudkan untuk meningkatkan keanekaragaman hayati sering kali diimbangi oleh penghilangan struktur vegetasi yang lebih luas di lokasi yang sama. Yang paling penting, dampak ekologis dari pengembangan pembangkit listrik tenaga surya sangat bergantung pada penggunaan lahan sebelumnya, di mana konversi lahan pertanian intensif menjadi taman surya yang dikelola dengan baik dapat memberikan peningkatan ekologis yang nyata.

Pengalaman dari gurun di Tiongkok barat laut menawarkan perspektif yang berbeda. Tong et al. (2025) melakukan analisis kuantitatif terhadap dampak ekologis pembangkit listrik tenaga surya Talatan di Provinsi Qinghai—salah satu ladang surya terbesar di dunia—terhadap ekosistem gurun. Hasilnya sangat mengejutkan: area di bawah panel surya menunjukkan peningkatan tutupan vegetasi sebesar 61,86% hingga 131,80% dibandingkan area di antara dan di luar panel, sementara biomassa di atas permukaan tanah meningkat sebesar 133,71% hingga

235,48%. Panel surya mengurangi albedo permukaan lebih dari 15% pada tiga pita spektral dan secara signifikan meningkatkan layanan ekosistem, termasuk penyerapan karbon yang meningkat 178,46%, fiksasi pasir sebesar 13,76%, dan retensi tanah sebesar 4,16%. Meskipun panel surya memberikan dampak negatif pada bahan organik tanah, studi ini secara keseluruhan menunjukkan bahwa ladang surya di daerah gurun dapat menciptakan mode penggunaan lahan berlapis yang meningkatkan lingkungan ekologis permukaan sekaligus menghasilkan energi.

Namun, tidak semua studi kasus memberikan gambaran yang sepenuhnya positif. Di California, Salazar (2025) mendokumentasikan bahwa pengembangan pembangkit listrik tenaga surya skala utilitas antara tahun 2013 dan 2023 telah mengakibatkan konversi lahan yang signifikan, dengan penurunan sekitar 15.451 hektar lahan semak belukar, 11.692 hektar lahan pertanian, dan 8.238 hektar padang rumput. Lebih mengkhawatirkan lagi, sebanyak 107 kemunculan spesies yang terancam punah tercatat di berbagai lokasi proyek surya, termasuk spesies yang terdaftar secara federal dan negara bagian. Proyek-proyek surya ini terkonsentrasi di Gurun Mojave, Lembah San Joaquin, dan Gurun Colorado, yaitu kawasan dengan potensi surya tinggi namun juga memiliki sensitivitas ekologis yang luar biasa. Temuan ini menekankan perlunya strategi penempatan (*siting*) yang lebih baik yang mampu menyeimbangkan target energi terbarukan dengan konservasi keanekaragaman hayati.

Di ranah energi geotermal, analisis siklus hidup yang dilakukan oleh Hackett dan de Witt (2026) dalam tinjauan sistematis yang terindeks Scopus memberikan bukti kuat tentang rendahnya jejak karbon teknologi ini. Studi terhadap 24 penelitian yang memenuhi kriteria inklusi dari 169 studi yang disaring menunjukkan bahwa emisi siklus hidup median adalah 43 g CO₂ eq/kWh untuk *hydrothermal flash*, 36 g CO₂ eq/kWh untuk *enhanced geothermal systems* (EGS),

dan 30 g CO₂ eq/kWh untuk *hydrothermal binary*. Nilai-nilai ini jauh lebih rendah dibandingkan pembangkit listrik berbahan bakar fosil, menegaskan peran geotermal dalam transisi energi rendah karbon. Namun, studi ini juga menekankan bahwa dampak lingkungan utama dari fasilitas geotermal berada pada dua domain: risiko terhadap sumber daya air akibat potensi efek pada laju aliran dan kemungkinan memicu ketidakstabilan seismik sejak tahap pengeboran, serta dampak siklus hidup yang terkait dengan konsumsi air, emisi udara dan air, serta emisi gas rumah kaca.

Kasus bioenergi memberikan pelajaran yang paling kompleks karena keterkaitannya yang erat dengan penggunaan lahan, ketahanan pangan, dan siklus karbon terestrial. Vera et al. (2022) dalam tinjauan ekstensif mereka yang diterbitkan di *Renewable and Sustainable Energy Reviews* dan terindeks Scopus menganalisis sinergi dan trade-off antara pengurangan emisi gas rumah kaca dan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) lainnya dalam konteks penggunaan lahan untuk tanaman energi. Dari 427 observasi yang diklasifikasikan, 170 menunjukkan sinergi, 176 menunjukkan trade-off, dan 81 tidak menunjukkan efek yang jelas. Sinergi terkuat dengan SDGs yang terkait lingkungan, seperti kualitas air dan konservasi keanekaragaman hayati, diamati ketika tanaman tahunan (*perennial crops*) ditanam di lahan subur, padang rumput, atau lahan marjinal di zona iklim "lembab sedang sejuk" dengan tanah liat aktivitas tinggi. Sebaliknya, trade-off paling sering terjadi pada dimensi ketahanan pangan dan ketersediaan air.

Pelajaran utama yang dapat ditarik dari berbagai studi kasus ini adalah bahwa generalisasi tentang dampak lingkungan dari energi terbarukan sangatlah berbahaya. Setiap teknologi, lokasi, dan skala proyek menghasilkan konstelasi dampak yang unik, dan penilaian yang bertanggung jawab harus dilakukan secara spesifik konteks dengan mempertimbangkan berbagai dimensi lingkungan,

sosial, dan ekonomi secara simultan. Yang lebih penting lagi, studi kasus-studi kasus ini menunjukkan bahwa banyak dampak negatif dari energi terbarukan dapat dihindari atau diminimalkan melalui perencanaan yang cermat, desain teknologi yang adaptif, pemantauan lingkungan yang ketat, dan keterlibatan pemangku kepentingan yang bermakna sejak tahap awal perencanaan proyek. Pendekatan yang memandang energi terbarukan secara monolitik—baik sebagai penyelamat lingkungan yang sempurna maupun sebagai ancaman ekologis yang harus ditolak—sama-sama tidak konstruktif dan tidak didukung oleh bukti ilmiah yang tersedia.

BAB VII

Tantangan dan Peluang dalam Pengembangan Energi Terbarukan

A. Dampak Positif Energi Terbarukan terhadap Lingkungan

Salah satu tantangan paling fundamental dalam pengembangan energi terbarukan terletak pada karakteristik intrinsik sumber energi seperti surya dan angin yang bersifat intermiten dan variabel, menciptakan ketidaksesuaian antara pasokan dan permintaan listrik secara *real-time*. Sumber energi konvensional seperti batu bara dan gas dapat dijadwalkan produksinya sesuai kebutuhan, sedangkan tenaga surya hanya tersedia saat matahari bersinar dan tenaga angin bergantung pada kecepatan angin yang fluktuatif. Malik et al. (2025) menegaskan bahwa listrik harus dikonsumsi pada saat yang sama saat diproduksi, sehingga peningkatan penetrasi sumber energi intermiten membuat pencocokan pasokan dan permintaan secara *real-time* semakin kompleks. Konsekuensinya, jaringan listrik yang dirancang untuk generasi terpusat yang stabil harus bertransformasi secara fundamental agar mampu mengakomodasi aliran daya dua arah dan variabilitas yang tinggi dari pembangkitan terdistribusi berbasis energi terbarukan. Tanpa penanganan yang tepat, intermitensi ini dapat memicu ketidakstabilan frekuensi, fluktuasi tegangan, dan bahkan pemadaman bergilir yang merugikan konsumen dan industri.

Kompleksitas integrasi energi terbarukan ke dalam jaringan listrik konvensional melahirkan kebutuhan akan infrastruktur transmisi dan distribusi yang jauh lebih canggih dibandingkan sistem yang ada saat ini. Mayoritas potensi energi terbarukan terletak di lokasi yang jauh dari pusat beban—ladang angin terbaik sering kali berada di lepas pantai atau dataran terpencil, sementara taman surya optimal berada di kawasan dengan iradiansi tinggi yang umumnya berjauhan dari kawasan industri dan perkotaan. Studi oleh tim peneliti dari University of Reading (2025) tentang perencanaan ekspansi transmisi mengungkapkan bahwa peningkatan pangsa energi terbarukan menciptakan tantangan besar dalam mentransmisikan listrik dari area terpencil ke kota-kota besar. Jaringan transmisi eksisting di banyak negara tidak memiliki kapasitas yang memadai untuk mengevakuasi listrik dari lokasi-lokasi ini, dan pembangunan jalur transmisi baru sering kali memerlukan waktu lebih dari satu dekade akibat kompleksitas pembebasan lahan, perizinan lingkungan, dan resistensi komunitas lokal.

Tantangan stabilitas jaringan semakin diperparah oleh berkurangnya inersia sistem (*system inertia*) seiring dengan pensiunnya pembangkit listrik konvensional berbasis turbin sinkron yang berat. Generator sinkron pada PLTU dan PLTA secara alami menyediakan inersia rotasional yang menstabilkan frekuensi jaringan saat terjadi gangguan mendadak. Sebaliknya, panel surya dan turbin angin yang terhubung melalui inverter elektronik daya tidak secara inheren menyediakan inersia ini. Obuseh et al. (2025) dalam tinjauan sistematis mereka terhadap hambatan integrasi energi terbarukan mengidentifikasi bahwa tantangan teknis mencakup kebutuhan akan alat peramalan yang lebih akurat, sistem penyimpanan energi yang dapat diskalakan, dan infrastruktur jaringan cerdas (*smart grid*). Tanpa investasi masif dalam teknologi-teknologi ini, jaringan dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi akan semakin rentan terhadap ketidakstabilan.

Teknologi penyimpanan energi muncul sebagai solusi kunci untuk menjembatani kesenjangan intermitensi, namun masih menghadapi tantangan teknis dan ekonomi yang signifikan. Audu et al. (2025) dalam tinjauan mereka tentang kemajuan teknologi penyimpanan energi mendokumentasikan bahwa baterai lithium-ion terus mendominasi pasar karena efisiensi dan densitas energinya yang tinggi, namun alternatif yang sedang berkembang seperti baterai *solid-state*, baterai sodium-ion, dan baterai aliran redoks menawarkan peningkatan yang menjanjikan dalam hal biaya, keamanan, dan keberlanjutan. Sistem penyimpanan hidrogen dan superkapasitor juga semakin mendapat perhatian sebagai solusi komplementer. Namun demikian, Kapasitas penyimpanan yang dibutuhkan untuk menyeimbangkan jaringan dengan penetrasi energi terbarukan di atas 80% masih jauh melampaui kapasitas terpasang global saat ini, dan biaya penyimpanan—meskipun menurun drastis—masih menjadi beban yang signifikan bagi operator jaringan.

Infrastruktur digital yang menjadi tulang punggung operasional energi terbarukan modern juga membuka kerentanan terhadap ancaman siber yang belum pernah terjadi sebelumnya. Digitalisasi sistem energi melalui sensor IoT, sistem kontrol otomatis, dan platform berbasis awan menciptakan permukaan serangan yang luas bagi aktor jahat. Tinjauan komprehensif yang diterbitkan di *ScienceDirect* (2025) mengidentifikasi bahwa ekosistem energi terbarukan yang terintegrasi dengan penyimpanan baterai sangat rentan terhadap berbagai vektor serangan, termasuk injeksi data palsu, serangan *denial-of-service*, dan peretasan sistem kontrol industri. Yang lebih mengkhawatirkan, Dabo et al. (2024) mengungkapkan bahwa rantai pasok energi terbarukan yang semakin terintegrasi secara global mengekspos data sensitif seperti kekayaan intelektual, data operasional, dan strategi bisnis pada risiko pencurian dan sabotase. Serangan siber

terhadap ladang angin lepas pantai, misalnya, dapat menyebabkan *downtime* yang merugikan hingga puluhan ribu dolar per jam.

Perencanaan dan pengoperasian jaringan yang semakin kompleks memerlukan peningkatan kapasitas secara fundamental dalam peramalan dan manajemen ketidakpastian. Che et al. (2025) dalam studi mereka yang telah disitasi 90 kali di Scopus menekankan bahwa meskipun model prediksi berbasis pembelajaran mesin telah berkembang pesat, kekacauan (*chaos*) yang disebabkan oleh variabilitas angin dan surya masih belum memiliki solusi mitigasi yang lebih luas. Studi ini mengusulkan kerangka kerja konseptual tujuh poin yang melibatkan seluruh pemangku kepentingan energi untuk mengelola variabilitas, dengan *long-duration energy storage*, pembangkit virtual (*virtual power plants*), infrastruktur jaringan cerdas, interkoneksi lintas batas, dan *power-to-X* sebagai kunci keberhasilan. Negara-negara yang telah berhasil mengelola variabilitas tinggi dalam jaringan mereka—seperti Denmark, Portugal, dan Uruguay—menunjukkan bahwa kombinasi penyimpanan energi canggih, peningkatan jaringan, dan bauran energi yang fleksibel merupakan strategi yang terbukti efektif.

Digitalisasi melalui teknologi seperti kecerdasan buatan (AI), *Internet of Things* (IoT), *blockchain*, dan analitik data besar membuka peluang transformatif namun juga menuntut investasi infrastruktur digital yang besar. Jaramillo et al. (2025) dalam penilaian bibliometrik mereka yang terindeks Scopus menemukan bahwa AI muncul sebagai domain yang paling banyak diteliti, dengan puncak 1.209 makalah dan 15.667 sitasi pada tahun 2024, sementara IoT dan analitik data berkontribusi pada optimalisasi dan pemantauan sistem secara *real-time*. *Blockchain*, meskipun masih kurang umum, mendapatkan daya tarik dalam pasar energi terdesentralisasi yang aman. Namun, implementasi teknologi-teknologi ini mensyaratkan jaringan komunikasi

berkecepatan tinggi, pusat data, dan keahlian teknis yang mungkin belum tersedia di banyak negara berkembang, menciptakan kesenjangan digital yang berpotensi memperlebar disparitas dalam transisi energi global.

Akhirnya, tinjauan sistematis yang dilakukan oleh Khan et al. (2025) menantang asumsi yang berlaku tentang hambatan energi terbarukan, dengan mengungkapkan bahwa inovasi kelembagaan telah menjadi lebih kritis daripada solusi teknis. Analisis bibliometrik mereka terhadap 142 studi berkualitas tinggi menunjukkan pergeseran yang menentukan dari fokus integrasi teknis yang mendominasi 80% literatur pada tahun 2014 menuju desain pasar dan kerangka kebijakan yang mencakup 60% riset pada tahun 2024. Dengan kata lain, meskipun solusi teknis untuk intermitensi, penyimpanan, dan stabilitas jaringan terus berkembang, hambatan yang sesungguhnya kini lebih bersifat institusional: bagaimana menciptakan struktur pasar, regulasi, dan tata kelola yang memungkinkan teknologi-teknologi ini diterapkan secara optimal dan berkelanjutan.

B. Tantangan Ekonomi dan Pembiayaan

Biaya modal awal yang tinggi (*high upfront capital costs*) secara konsisten diidentifikasi sebagai salah satu penghalang paling signifikan bagi pengembangan energi terbarukan, terutama di negara-negara berkembang yang menghadapi keterbatasan fiskal dan akses terbatas ke pasar keuangan internasional. Berbeda dengan pembangkit listrik berbahan bakar fosil yang biaya operasionalnya didominasi oleh pembelian bahan bakar sepanjang masa pakainya, proyek energi terbarukan memerlukan investasi awal yang besar untuk pembelian dan instalasi peralatan, sementara biaya operasionalnya relatif rendah. Wilson et al. (2025) dalam studi mereka yang terindeks Scopus menemukan bahwa biaya energi terbarukan lebih sensitif terhadap biaya modal (*cost of capital*) dibandingkan bahan bakar fosil. Kenaikan suku bunga sebesar 1% dapat menambah 18%

pada *levelized cost of electricity* (LCOE) tenaga surya di Amerika Serikat, sementara hanya menambah 9% pada pembangkit gas siklus gabungan. Sensitivitas ini membuat proyek energi terbarukan sangat rentan terhadap kondisi pasar keuangan dan kebijakan moneter, terutama di negara-negara dengan premi risiko negara yang tinggi.

Akses terhadap pembiayaan yang terjangkau dan sesuai merupakan kendala struktural yang sangat akut di negara-negara berkembang dan pasar negara berkembang. Ramos Farroñán et al. (2025) dalam tinjauan sistematis mereka terhadap 50 studi *peer-reviewed* menemukan bahwa obligasi hijau (*green bonds*) telah memobilisasi sekitar USD 500 miliar, namun hanya berfungsi efektif di negara-negara dengan pengawasan regulasi yang kuat dan pasar keuangan yang likuid, sehingga menawarkan keuntungan yang terbatas bagi akses energi terdesentralisasi di negara-negara miskin. Studi ini juga mengungkapkan bahwa Afrika sub-Sahara hanya mewakili 16% dari seluruh studi, meskipun kawasan ini menghadapi hambatan pembiayaan yang paling akut, sebuah ketimpangan geografis yang mencerminkan kesenjangan pengetahuan sekaligus kesenjangan investasi. Di banyak negara Afrika dan Asia Selatan, persepsi risiko yang tinggi oleh investor internasional menghasilkan biaya modal yang dua hingga tiga kali lipat lebih mahal dibandingkan proyek serupa di Eropa, menggerogoti daya saing ekonomi energi terbarukan meskipun potensi sumber dayanya sangat melimpah.

Ketidakpastian kebijakan (*policy uncertainty*) dan risiko regulasi menciptakan lingkungan yang tidak kondusif bagi investasi jangka panjang di sektor energi terbarukan. Akdoğan dan Dinçer (2025) dalam studi mereka menggunakan *Fuzzy AHP* terhadap 30 hambatan investasi energi terbarukan di Turki menemukan bahwa hambatan politik dan regulasi menempati peringkat tertinggi, dengan sub-hambatan paling signifikan meliputi prosedur birokrasi dan proses hukum yang berlarut-larut, kerangka regulasi

yang tidak memadai, serta kurangnya kebijakan energi terbarukan yang harmonis. Investor yang menghadapi kemungkinan perubahan kebijakan retrospektif—seperti pemotongan *feed-in tariff* atau perubahan aturan akses jaringan—akan menerapkan premi risiko yang tinggi atau memilih untuk tidak berinvestasi sama sekali. Ketidakpastian ini memiliki dampak yang sangat merusak pada proyek energi terbarukan, yang memiliki periode pengembalian modal 15 hingga 25 tahun dan sangat bergantung pada prediktabilitas pendapatan.

Tantangan pembiayaan di negara berkembang juga diperparah oleh terbatasnya instrumen keuangan inovatif dan kapasitas institusional yang lemah. Studi komprehensif yang diterbitkan di *Energy Strategy Reviews* (2025) mengidentifikasi bahwa keuangan campuran (*blended finance*) yang menggabungkan modal publik dan swasta dapat mengurangi hambatan biaya pada tahap awal proyek energi bersih, sementara perencanaan inklusif menghubungkan energi bersih dengan keuntungan kesehatan dan kesetaraan. Namun, implementasi instrumen-instrumen ini memerlukan kapasitas institusional yang sering kali belum tersedia. Di banyak negara berkembang, ketiadaan kerangka hukum yang jelas untuk *public-private partnership*, pasar obligasi korporasi yang dangkal, dan bank-bank lokal yang kurang pengalaman dalam pembiayaan proyek energi semakin mempersulit mobilisasi modal domestik yang sangat diperlukan untuk transisi energi.

Subsidi bahan bakar fosil yang masih masif di banyak negara menciptakan distorsi pasar yang secara fundamental merusak daya saing energi terbarukan. Dana Moneter Internasional memperkirakan subsidi bahan bakar fosil global mencapai USD 7 triliun pada tahun 2024, jumlah yang jauh melampaui total investasi global dalam energi bersih. Subsidi ini secara artifisial menekan harga listrik dan bahan bakar dari sumber fosil, membuat energi terbarukan tampak kurang kompetitif dalam perbandingan harga langsung.

Penghapusan subsidi secara bertahap dan pengalihan sumber daya fiskal untuk mendukung energi terbarukan merupakan langkah kebijakan yang paling rasional secara ekonomi, namun paling sulit secara politik, sebagaimana telah dibuktikan oleh kerusuhan sosial yang dipicu oleh reformasi subsidi di negara-negara seperti Nigeria, Sudan, dan Ekuador.

Paradoks biaya dan akses juga muncul dalam konteks elektrifikasi pedesaan dan akses energi bagi populasi yang belum terlayani. Tackie-Otoo et al. (2025) dalam tinjauan mereka tentang kebutuhan energi terbarukan versus hidrogen menemukan bahwa meskipun energi terbarukan telah mencapai daya saing biaya dengan bahan bakar fosil di banyak pasar, sebagian besar negara berkembang masih menghadapi krisis energi parah terutama karena kendala keterjangkauan dan inefisiensi. Untuk negara-negara ini, penggunaan langsung energi terbarukan—seperti sistem surya rumah tangga dan *mini-grid*—lebih cocok dibandingkan solusi yang lebih kompleks dan mahal seperti hidrogen hijau. Namun, bahkan solusi-solusi ini memerlukan mekanisme pembiayaan yang inovatif, seperti model *pay-as-you-go* berbasis seluler yang telah berhasil di Afrika Timur, yang memungkinkan rumah tangga membayar listrik secara mencicil tanpa beban biaya awal yang memberatkan.

Transformasi sistem energi juga menimbulkan pertanyaan tentang *stranded assets* dan biaya transisi yang harus ditanggung oleh berbagai pihak. Pembangkit listrik tenaga batu bara yang dibangun dengan asumsi operasi selama 40 tahun atau lebih mungkin harus dipensiunkan lebih awal dalam skenario dekarbonisasi yang agresif, mengakibatkan kerugian finansial bagi investor, kreditur, dan pemerintah yang telah memberikan jaminan. Di Indonesia, misalnya, banyak PLTU yang relatif baru dan terikat dalam kontrak pembelian listrik jangka panjang dengan PLN, sehingga pensiun dini memerlukan kompensasi yang besar. Tanpa mekanisme pendanaan transisi yang memadai—

seperti yang dijanjikan melalui *Just Energy Transition Partnership* (JETP)—beban fiskal dari *stranded assets* ini dapat menghambat investasi dalam energi terbarukan dan memperlambat transisi secara keseluruhan.

Meskipun demikian, terdapat bukti yang semakin kuat bahwa transisi energi menawarkan peluang ekonomi yang signifikan sebagai kompensasi atas tantangan pembiayaannya. Analisis yang dilakukan oleh tim peneliti global (2025) menunjukkan bahwa biaya energi terbarukan terus menurun secara konsisten, dengan proyeksi bahwa energi terbarukan akan melampaui bahan bakar fosil sebagai sumber utama pembangkitan listrik pada pertengahan abad ini. Kebijakan yang mengurangi biaya modal untuk energi terbarukan—seperti jaminan pinjaman, insentif pajak, dan mekanisme pengurangan risiko—dapat mempercepat paritas biaya dengan bahan bakar fosil. Yang lebih penting, setiap dolar yang diinvestasikan dalam energi terbarukan menghasilkan lebih banyak pekerjaan dibandingkan investasi setara dalam bahan bakar fosil, menawarkan dividen ekonomi dan sosial yang melampaui sekadar pertimbangan biaya langsung.

C. Tantangan Sosial dan Kultural

Penerimaan sosial dan kultural terhadap proyek energi terbarukan telah muncul sebagai salah satu determinan paling krusial namun sering kali kurang diantisipasi dalam perencanaan transisi energi. Görsch et al. (2025) dalam tinjauan sistematis mereka terhadap 141 artikel mengenai persepsi publik terhadap sebelas sumber energi menemukan bahwa akseptabilitas tertinggi diberikan pada tenaga surya, hidroelektrik, dan angin, sementara bahan bakar fosil dan nuklir menempati posisi terendah. Namun, studi ini juga mengungkapkan perbedaan penting antara akseptabilitas pada level umum—yang cenderung positif untuk energi terbarukan—dan akseptabilitas pada level proyek lokal yang spesifik, yang sering kali jauh lebih rendah. Fenomena ini,

yang secara populer dikenal sebagai NIMBY (*Not In My Backyard*), mencerminkan bahwa masyarakat dapat mendukung transisi energi secara abstrak sambil secara aktif menolak implementasi konkret di lingkungan mereka sendiri, menciptakan paradoks yang menghambat pengembangan proyek di lapangan.

Faktor-faktor yang memengaruhi penerimaan lokal terhadap proyek energi terbarukan sangat multidimensi dan jauh melampaui pertimbangan ekonomi sederhana. Zaharuddin et al. (2025) dalam tinjauan sistematis mereka terhadap 212 studi berhasil mengidentifikasi 29 faktor yang memengaruhi penerimaan komunitas, yang dikategorikan ke dalam kerangka tujuh dimensi: sosial, ekonomi, lingkungan, politik, proses, detail proyek, dan temporal. Modal finansial yang mencerminkan keuntungan ekonomi memang muncul sebagai faktor yang paling sering disitasi, namun dimensi sosial—yang mencakup modal sosial, respons kognitif, dan modal budaya—secara keseluruhan menyumbang porsi terbesar dari faktor-faktor yang memengaruhi penerimaan. Dimensi politik dan temporal yang sering diabaikan juga menyoroti pentingnya kualitas tata kelola dan keterlibatan komunitas yang tepat waktu. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan transaksional semata—misalnya, menawarkan kompensasi finansial—tidaklah cukup untuk membangun dukungan komunitas yang langgeng.

Persepsi keadilan dan ekuitas dalam distribusi manfaat dan beban proyek energi terbarukan menjadi isu yang semakin menonjol dalam literatur terkini. Studi tentang proyek fotovoltaik surya di Taiwan yang dianalisis melalui lensa sosio-teknis mengungkapkan ketegangan antara penerimaan komunitas, transisi energi, dan keadilan energi. Masyarakat lokal yang menanggung beban visual, kebisingan, atau perubahan penggunaan lahan dari proyek energi terbarukan sering kali merasa tidak menerima manfaat yang proporsional, terutama ketika listrik yang dihasilkan diekspor ke wilayah lain atau ketika keuntungan proyek

terkonsentrasi pada pengembang eksternal. Konsep keadilan energi—yang mencakup keadilan distributif, prosedural, dan pengakuan—semakin diakui sebagai kerangka kerja esensial untuk memahami dan mengatasi penolakan komunitas terhadap proyek energi terbarukan.

Dimensi kultural dan identitas lokal memainkan peran yang sering kali diremehkan dalam membentuk respons masyarakat terhadap infrastruktur energi terbarukan. Lanskap dan bentang alam bukan sekadar ruang fisik, melainkan juga arena makna kultural, memori kolektif, dan identitas komunitas yang terbangun selama beberapa generasi. Pembangunan ladang angin di perbukitan yang dianggap sakral atau taman surya di lahan pertanian yang telah dikelola oleh keluarga selama berabad-abad dapat dipersepsikan sebagai ancaman eksistensial terhadap identitas lokal, terlepas dari argumen rasional tentang manfaat lingkungan dan ekonomi. Studi kasus di Swedia yang menganalisis bagaimana pemangku kepentingan melegitimasi transisi energi yang "dapat diterima" melalui imajinasi spasial menunjukkan bahwa kepercayaan sosio-spasial memainkan peran penting dalam melegitimasi atau mendelegitimasi penyebaran teknologi tertentu. Kegagalan untuk memahami dan menghormati makna kultural lanskap dapat mengubah komunitas yang secara prinsip mendukung energi terbarukan menjadi penentang yang gigih.

Di negara-negara berkembang dan kawasan pedesaan, tantangan sosial dan kultural mengambil bentuk yang berbeda dan sering kali lebih kompleks. Studi tentang hambatan adopsi energi terbarukan di Afrika Sub-Sahara mengidentifikasi bahwa resistensi sosio-kultural, bersama dengan infrastruktur yang tidak memadai, mekanisme pembiayaan yang terbatas, dan kerangka kebijakan yang tidak konsisten, merupakan penghalang utama. Di banyak komunitas, skeptisisme terhadap teknologi baru, preferensi terhadap sumber energi tradisional yang sudah dikenal, dan ketidakpercayaan terhadap aktor eksternal—termasuk

pemerintah dan perusahaan multinasional—dapat menghambat adopsi bahkan ketika solusi energi terbarukan secara teknis dan ekonomis layak. Pengalaman dari proyek *mini-grid* di pedesaan India dan Afrika menunjukkan bahwa keberhasilan sangat bergantung pada kemampuan pengembang untuk membangun hubungan kepercayaan jangka panjang dengan komunitas, melibatkan para pemimpin lokal, dan menyesuaikan desain proyek dengan norma dan nilai setempat.

Kesenjangan pengetahuan dan misinformasi publik merupakan hambatan yang signifikan terhadap penerimaan sosial. Khurshid et al. (2025) dalam studi mereka tentang akseptabilitas inovasi surya di kota pintar menemukan bahwa kampanye kesadaran yang efektif yang menyoroti manfaat sistem surya dan kompatibilitasnya dengan teknologi eksisting sangat penting dalam membentuk sikap dan niat adopsi yang positif. Keakraban dan pengalaman penggunaan yang berkepanjangan juga terbukti meningkatkan akseptabilitas, menunjukkan bahwa resistensi awal sering kali mencair seiring dengan meningkatnya paparan dan pemahaman. Namun, menyebarkan informasi yang akurat dan melawan misinformasi—termasuk klaim yang dilebih-lebihkan tentang dampak kesehatan dari turbin angin atau kekhawatiran yang tidak berdasar tentang limbah panel surya—memerlukan strategi komunikasi yang canggih dan kredibel, yang melibatkan tidak hanya pemerintah tetapi juga institusi akademik, organisasi masyarakat sipil, dan tokoh masyarakat yang dipercaya.

Dinamika gender dan inklusi sosial juga semakin diakui sebagai dimensi penting dari tantangan sosial dalam pengembangan energi terbarukan. Perempuan dan kelompok marjinal sering kali memiliki akses yang lebih terbatas terhadap informasi, sumber daya, dan proses pengambilan keputusan terkait proyek energi, sehingga kebutuhan dan perspektif mereka kurang terwakili. Penelitian yang muncul di *Energy Research & Social*

Science menunjukkan bahwa pendekatan partisipatif yang secara eksplisit melibatkan perempuan dan kelompok rentan dalam perencanaan dan implementasi proyek energi terbarukan tidak hanya lebih adil, tetapi juga cenderung lebih berhasil karena memanfaatkan pengetahuan dan jaringan lokal yang lebih luas. Di Bangladesh, misalnya, program sistem surya rumah tangga yang secara khusus menargetkan perempuan sebagai agen penjualan dan teknisi telah mencapai tingkat adopsi yang jauh lebih tinggi dibandingkan program serupa yang mengabaikan dimensi gender.

Mengatasi tantangan sosial dan kultural ini memerlukan pergeseran paradigma dari pendekatan *decide-announce-defend* yang top-down menuju model tata kelola yang lebih partisipatif, transparan, dan responsif. Konsep *societal responsiveness* yang diusulkan oleh peneliti dari University of East Anglia (2025) melampaui narasi penerimaan publik yang sempit untuk menekankan responsivitas sistemik infrastruktur nol bersih terhadap kebutuhan dan kekhawatiran masyarakat. Pendekatan ini mengakui bahwa penolakan publik tidak selalu irasional atau egois, melainkan sering kali merupakan respons yang sah terhadap proses perencanaan yang tidak memadai, distribusi manfaat yang tidak adil, atau kegagalan untuk mengakui nilai-nilai dan prioritas lokal. Dengan merancang proses yang memungkinkan deliberasi yang bermakna, negosiasi yang jujur, dan adaptasi desain sebagai respons terhadap umpan balik komunitas, pengembang dan pembuat kebijakan dapat mentransformasi konflik potensial menjadi kemitraan yang produktif.

D. Peluang dalam Sektor Energi Terbarukan

Meskipun tantangan yang dihadapi sektor energi terbarukan sangatlah besar, peluang yang terbuka seiring dengan transisi energi global bahkan jauh lebih besar, menjangkau dimensi ekonomi, teknologi, sosial, dan

lingkungan secara simultan. Peluang paling fundamental terletak pada kenyataan bahwa potensi sumber daya energi terbarukan—terutama surya dan angin—jauh melampaui total konsumsi energi umat manusia saat ini dan di masa mendatang. Studi yang diterbitkan di *Energy Strategy Reviews* (2025) menunjukkan bahwa proyeksi terkini mengindikasikan energi terbarukan akan melampaui bahan bakar fosil sebagai sumber utama pembangkitan listrik pada pertengahan abad ini. Pertumbuhan eksponensial kapasitas terpasang energi terbarukan dalam satu dekade terakhir, yang didorong oleh penurunan biaya yang dramatis dan perbaikan teknologi yang berkelanjutan, menegaskan bahwa transisi ini bukan lagi pertanyaan tentang "apakah" melainkan "seberapa cepat."

Digitalisasi dan integrasi teknologi Industri 4.0 membuka peluang transformasional yang memungkinkan optimalisasi, prediktabilitas, dan efisiensi sistem energi terbarukan pada tingkat yang sebelumnya tidak terbayangkan. Jaramillo et al. (2025) dalam tinjauan bibliometrik mereka mendokumentasikan bahwa AI telah muncul sebagai domain yang paling dominan dalam riset sistem tenaga berorientasi energi terbarukan, dengan aplikasi yang mencakup peramalan produksi, deteksi anomali, penjadwalan penyimpanan, dan perdagangan energi otomatis. IoT dan analitik data besar memungkinkan pemantauan dan kontrol *real-time* atas jutaan aset energi terdistribusi, sementara *blockchain* membuka kemungkinan pasar energi *peer-to-peer* yang sepenuhnya terdesentralisasi. *Digital twins*—replika virtual dari sistem energi fisik—memungkinkan operator untuk menguji berbagai skenario dan strategi secara aman sebelum implementasi, mempercepat siklus pembelajaran dan inovasi secara dramatis.

Integrasi prinsip ekonomi sirkular dengan pengembangan energi terbarukan merepresentasikan peluang besar yang sebagian besar masih belum tergarap.

Analisis scientometric terhadap 2.074 artikel yang terindeks Scopus (2025) yang dipublikasikan di *Energy Nexus* mengungkapkan bahwa riset di persimpangan ekonomi sirkular dan energi terbarukan telah tumbuh secara eksponensial sejak 2018, didorong oleh inisiatif keberlanjutan global seperti Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) dan Perjanjian Paris. Namun, bidang-bidang yang sedang berkembang seperti hidrogen hijau dan bioekonomi sirkular masih sangat kurang dieksplorasi, menawarkan peluang riset dan investasi yang substansial. Integrasi ini mencakup daur ulang dan penggunaan kembali komponen energi terbarukan di akhir masa pakainya, pemanfaatan limbah sebagai bahan baku untuk bioenergi, dan desain produk dan sistem energi yang sejak awal mempertimbangkan seluruh siklus hidup material.

Hidrogen hijau—yang diproduksi melalui elektrolisis air menggunakan listrik dari sumber terbarukan—muncul sebagai peluang yang berpotensi merevolusi sektor-sektor yang sulit didekarbonisasi, seperti industri berat, pelayaran, dan penerbangan. Tackie-Otoo et al. (2025) mencatat bahwa meskipun energi terbarukan telah mencapai daya saing biaya dengan bahan bakar fosil, intermitensi tetap menjadi isu yang dapat diatasi oleh produksi dan penyimpanan hidrogen, meskipun dengan biaya yang tinggi. Hidrogen dapat berfungsi sebagai media penyimpanan energi jangka panjang, bahan baku industri, dan bahan bakar transportasi, menciptakan jembatan antara sektor kelistrikan dan sektor-sektor lain yang sebelumnya sulit dijangkau oleh energi terbarukan. Namun, viabilitas ekonomi hidrogen hijau masih terbatas, terutama di negara-negara berpenghasilan rendah, dan memerlukan investasi besar-besaran dalam infrastruktur produksi, transportasi, dan penyimpanan.

Potensi penciptaan lapangan kerja dari transisi energi terbarukan merupakan peluang sosio-ekonomi yang sangat signifikan, terutama bagi negara-negara dengan populasi muda yang besar dan tingkat pengangguran yang tinggi.

Badan Energi Terbarukan Internasional (IRENA) memperkirakan bahwa sektor energi terbarukan dapat menciptakan lebih dari 40 juta pekerjaan secara global pada tahun 2050, jauh melampaui potensi penciptaan lapangan kerja dari sektor bahan bakar fosil yang semakin terotomatisasi. Pekerjaan-pekerjaan ini mencakup spektrum yang luas, dari manufaktur dan instalasi hingga operasi, pemeliharaan, dan layanan profesional, menawarkan peluang bagi pekerja dengan berbagai tingkat keterampilan. Bagi negara-negara berkembang, peluang untuk melompati (*leapfrog*) infrastruktur bahan bakar fosil dan langsung menuju sistem energi terdesentralisasi berbasis terbarukan dapat membawa manfaat ganda: akses energi yang lebih luas dan penciptaan lapangan kerja lokal.

Di kawasan pedesaan dan negara-negara berkembang, sistem energi terdesentralisasi seperti *solar home systems* dan *mini-grid* menawarkan peluang untuk mencapai akses energi universal tanpa harus menunggu perluasan jaringan listrik konvensional yang mahal dan lambat. Studi tentang transisi energi bersih di negara berkembang yang diterbitkan di *Energy Strategy Reviews* (2025) menunjukkan bahwa sistem terbarukan terdesentralisasi menawarkan alternatif yang terjangkau untuk bahan bakar fosil di daerah pedesaan dan *off-grid*, meningkatkan penciptaan lapangan kerja, ketahanan energi, dan pengurangan kemiskinan. Contoh-contoh sukses dari Kenya, India, dan Asia Tenggara menunjukkan pentingnya konsistensi kebijakan, inovasi keuangan, dan kesiapan kelembagaan dalam mempromosikan penyebaran energi bersih. Peluang untuk mengintegrasikan akses energi dengan layanan produktif lainnya—seperti pendinginan untuk penyimpanan hasil pertanian, pemompaan air untuk irigasi, dan konektivitas digital—dapat menciptakan dampak pembangunan yang berlipat ganda.

Interkoneksi jaringan lintas batas dan perdagangan energi regional membuka peluang untuk mengoptimalkan

pemanfaatan sumber daya energi terbarukan di tingkat yang lebih luas, melampaui batas-batas nasional. Che et al. (2025) mengidentifikasi interkoneksi lintas batas sebagai salah satu dari tujuh strategi kunci untuk mencapai jaringan yang andal, tangguh, dan stabil dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi. Dengan menghubungkan jaringan listrik antarnegara, surplus energi terbarukan dari satu wilayah dapat diekspor untuk memenuhi defisit di wilayah lain, mengurangi kebutuhan akan penyimpanan dan kapasitas cadangan yang mahal. Di kawasan seperti Asia Tenggara, di mana *ASEAN Power Grid* sedang dikembangkan, interkoneksi ini dapat memungkinkan negara-negara dengan potensi hidro yang besar—seperti Laos—untuk mengekspor listrik ke negara-negara dengan permintaan yang tinggi namun keterbatasan lahan untuk energi terbarukan—seperti Singapura.

Secara keseluruhan, peluang yang ditawarkan oleh sektor energi terbarukan bersifat sistemik dan saling memperkuat. Penurunan biaya teknologi, digitalisasi, integrasi sektoral, penciptaan lapangan kerja, dan akses energi universal bukanlah peluang yang terisolasi, melainkan tren yang saling terkait yang secara kolektif memperkuat kasus untuk akselerasi transisi energi. Studi oleh Ahmed et al. (2025) tentang ekonomi sirkular di sektor energi terbarukan menekankan bahwa mengintegrasikan teknologi digital yang sedang berkembang seperti AI, *blockchain*, dan IoT, bersama dengan mengeksplorasi dampak sosio-ekonomi dari transisi energi sirkular, sangat penting untuk memajukan upaya keberlanjutan. Pembuat kebijakan harus memprioritaskan kerangka regulasi yang disesuaikan dan mekanisme keuangan, terutama di negara-negara berpenghasilan rendah, untuk mendorong adopsi yang adil dari prinsip-prinsip ini dan menjembatani disparitas yang ada antara negara maju dan berkembang.

E. Peran Sumber Daya Manusia dan Pendidikan dalam Pengembangan Energi Terbarukan

Transisi energi global yang ambisius menuntut transformasi fundamental dalam basis keterampilan dan pengetahuan tenaga kerja di seluruh dunia, sebuah dimensi yang sering kali terabaikan dalam diskusi tentang teknologi dan pembiayaan. Dekarbonisasi dan transisi energi memerlukan jutaan pekerja di industri energi konvensional untuk mentransformasi basis pengetahuan dan keterampilan mereka. Studi yang diterbitkan di *The Journal of Continuing Higher Education* (2025) menekankan bahwa program *upskilling* dan *reskilling* yang mengatasi kesenjangan keterampilan dan menawarkan peluang untuk pendidikan berkelanjutan sangat penting untuk pengembangan tenaga kerja dan keadilan sosial. Penelitian ini mengevaluasi enam program *micro-credential* daring terkait transisi energi dan menemukan bahwa program-program tersebut berhasil mendukung pendidikan berkelanjutan dengan menawarkan area pengetahuan baru dan memenuhi ekspektasi mahasiswa akan peningkatan pengetahuan dan keterampilan dasar.

Kesenjangan keterampilan (*skills gap*) di sektor energi terbarukan mencakup defisit yang akut baik dalam keterampilan teknis spesifik maupun kompetensi lunak yang lebih luas. Davidson et al. (2025) dalam analisis pemetaan keterampilan energi terbarukan dan pasar tenaga kerja di Western Cape, Afrika Selatan, mengidentifikasi beberapa temuan penting: tingkat keterampilan teknis yang tinggi dibutuhkan di seluruh sektor, dengan tumpang tindih yang cukup besar antarsektor; sebagian besar bisnis mengidentifikasi kekurangan keterampilan lunak (*soft skills*) sebagai tantangan tenaga kerja yang kritis; serta akses terbatas ke pembiayaan dan permintaan yang tidak dapat diprediksi sebagai hambatan inti pertumbuhan. Wawasan bisnis dari studi ini juga menyoroti pentingnya tenaga kerja yang

serbaguna dan tangkas yang mampu merespons secara efektif terhadap perubahan permintaan pasar, sebuah kebutuhan yang tidak dapat dipenuhi oleh program pelatihan konvensional yang kaku dan terspesialisasi secara sempit.

Sistem pendidikan formal di banyak negara belum mampu mengimbangi laju perubahan dalam industri energi, menciptakan ketidaksesuaian antara kurikulum yang diajarkan dan keterampilan yang dibutuhkan oleh pemberi kerja. Penelitian yang dilakukan di Polandia (2025) dan terindeks Scopus menganalisis kondisi terkini dan tantangan ketenagakerjaan energi terbarukan, meneliti perubahan dalam sumber daya energi terbarukan Polandia dan posisinya dalam peringkat dibandingkan dengan negara-negara Eropa lainnya. Temuan ini mencerminkan tantangan yang lebih luas di seluruh Eropa dan global: lembaga pendidikan sering kali tertinggal dalam memperbarui kurikulum, melatih ulang staf pengajar, dan berinvestasi dalam peralatan laboratorium dan pelatihan yang relevan untuk mempersiapkan siswa bagi pekerjaan di sektor energi terbarukan yang berkembang pesat. Keterlambatan ini menciptakan situasi paradoks di mana pengangguran tetap tinggi di banyak negara, sementara industri energi terbarukan melaporkan kesulitan kronis dalam mengisi posisi-posisi kunci.

Pelatihan kejuruan dan teknis (*Technical and Vocational Education and Training/TVET*) memainkan peran yang sangat penting namun belum dimanfaatkan secara optimal dalam menyiapkan tenaga kerja energi terbarukan. Studi tentang transisi pekerjaan di sektor energi surya Afrika Selatan meneliti bagaimana individu beralih ke sektor surya, sifat pasar tenaga kerja okupasional, dan lanskap penyediaan pelatihan yang sedang berkembang. Di Western Cape, analisis terhadap perguruan tinggi TVET mengungkapkan bahwa meskipun perguruan tinggi berbeda dalam pendekatan mereka terhadap pelatihan

energi terbarukan, semua telah menunjukkan komitmen untuk menyediakan pelatihan ini. Rekomendasi untuk menyematkan konten energi terbarukan ke dalam kualifikasi TVET yang ada, alih-alih menciptakan program yang benar-benar baru, dapat membantu menghasilkan lulusan dengan ketangkasan dan keahlian dasar yang diperlukan untuk memenuhi dinamika permintaan yang terus berubah—sebuah strategi yang dapat direplikasi di negara-negara berkembang lainnya.

Analisis bibliometrik global yang dilakukan oleh para peneliti dari Istanbul Ticaret University (2025) tentang keterampilan hijau (*green skills*) dan transformasi pasar tenaga kerja mengidentifikasi beberapa tema yang muncul, termasuk kebijakan transisi yang adil (*just transition*), ketidaksesuaian keterampilan di sektor hijau (*green sector skill mismatch*), dan pengarusutamaan kompetensi keberlanjutan dalam pendidikan formal dan kejuruan. Studi ini mendeteksi badan literatur yang semakin berkembang dengan kontribusi signifikan dari bidang-bidang interdisipliner, terutama ilmu lingkungan, pendidikan, dan ekonomi tenaga kerja. Jaringan rekan penulis (*co-authorship*) dan pola kolaborasi di tingkat negara juga mendukung sifat global dari perdebatan ini, memberikan panduan berharga bagi pembuat kebijakan, pendidik, dan peneliti yang berfokus pada menghubungkan kebijakan pengembangan tenaga kerja dengan tuntutan keberlanjutan ekonomi dan ekologis.

Just transition—atau transisi yang adil—merupakan kerangka kerja yang semakin penting dalam diskusi tentang tenaga kerja dan pendidikan di sektor energi terbarukan. Konsep ini mengakui bahwa transisi energi tidak boleh meninggalkan pekerja dan komunitas yang selama ini bergantung pada industri bahan bakar fosil. Hal ini memerlukan program pelatihan ulang yang komprehensif, dukungan pendapatan, dan strategi diversifikasi ekonomi untuk daerah-daerah yang terdampak oleh penutupan

tambang batu bara atau pembangkit listrik. Di Afrika Selatan, misalnya, transisi sistem energi ke energi terbarukan dan khususnya energi surya memerlukan pergeseran keterampilan yang memfasilitasi kesiapan tenaga kerja saat ini dan masa depan, untuk memastikan bahwa transisi tersebut adil. Kegagalan untuk mengatasi dimensi keadilan dari transisi tenaga kerja berisiko memicu resistensi politik yang kuat dan memperlambat laju transisi energi.

Kemitraan antara industri, institusi pendidikan, dan pemerintah merupakan elemen kunci dalam mengatasi kesenjangan keterampilan di sektor energi terbarukan. Perusahaan energi perlu secara aktif terlibat dalam desain kurikulum, menyediakan peluang magang dan pelatihan kerja, serta mendukung pengembangan profesional berkelanjutan bagi tenaga kerja mereka. Pada saat yang sama, pemerintah perlu menciptakan kerangka kebijakan yang memberikan insentif bagi investasi perusahaan dalam pelatihan, mendukung modernisasi fasilitas pendidikan kejuruan, dan memastikan bahwa informasi tentang kebutuhan keterampilan masa depan tersedia secara luas dan akurat. Pengalaman dari negara-negara seperti Jerman dan Denmark, di mana sistem pendidikan kejuruan ganda (*dual vocational training*) telah berhasil beradaptasi dengan kebutuhan industri energi angin dan surya, menawarkan model yang dapat diadaptasi oleh negara-negara lain dengan penyesuaian konteks lokal.

Penelitian dan pengembangan sumber daya manusia juga perlu didukung oleh data pasar tenaga kerja yang lebih baik dan mekanisme peramalan kebutuhan keterampilan yang lebih canggih. Ketidakpastian tentang keterampilan apa yang akan dibutuhkan di masa depan, dalam jumlah berapa, dan pada jangka waktu apa, menghambat perencanaan yang efektif oleh institusi pendidikan dan individu. Inisiatif seperti pemetaan keterampilan energi terbarukan di Western Cape, yang mengintegrasikan

persyaratan pekerjaan dan keterampilan, tren ketenagakerjaan nasional dan provinsi, wawasan dari perguruan tinggi TVET, dan perspektif dari industri, memberikan model untuk analisis pasar tenaga kerja yang komprehensif yang dapat diadopsi di wilayah lain. Investasi dalam sistem informasi pasar tenaga kerja yang kuat dan responsif sangat penting untuk memastikan bahwa investasi dalam pendidikan dan pelatihan energi terbarukan tepat sasaran dan efektif. Pada akhirnya, kesiapan sumber daya manusia akan menjadi faktor penentu apakah transisi energi global dapat berlangsung dengan kecepatan yang diperlukan untuk mengatasi krisis iklim, dan sejauh mana manfaat dari transisi ini dapat didistribusikan secara adil di seluruh masyarakat.

BAB VII

Tantangan dan Peluang dalam Pengembangan Energi Terbarukan

A. Tren dan Prediksi Masa Depan Energi Terbarukan

Lanskap energi global sedang mengalami transformasi yang bersifat struktural dan tak terelakkan, dengan energi terbarukan bergerak dari pinggiran menuju inti sistem energi dunia. Dalam satu dekade terakhir, penambahan kapasitas energi terbarukan secara konsisten melampaui penambahan kapasitas bahan bakar fosil, sebuah tren yang diproyeksikan tidak hanya berlanjut tetapi juga berakselerasi secara dramatis. Badan Energi Internasional (IEA) dalam *World Energy Outlook 2025* memperkirakan bahwa kapasitas terpasang energi terbarukan global akan mencapai lebih dari 9.000 GW pada tahun 2030, hampir tiga kali lipat dari kapasitas pada tahun 2022. Pertumbuhan eksponensial ini didorong oleh kombinasi faktor yang saling memperkuat: penurunan biaya teknologi yang tiada henti, kebijakan pemerintah yang semakin ambisius, tekanan dari krisis iklim yang semakin mendesak, serta dinamika geopolitik yang mendorong negara-negara untuk mencari kemandirian energi. Energi surya dan angin memimpin perlombaan ini, namun teknologi lain seperti hidrogen hijau, bioenergi maju, dan penyimpanan energi juga mulai mencatatkan pertumbuhan yang signifikan.

Prediksi mengenai pangsa energi terbarukan dalam bauran energi global pada pertengahan abad ini menunjukkan konsensus yang semakin bullish di kalangan peneliti dan lembaga internasional. Kumar dan Singh (2025) dalam tinjauan komprehensif mereka yang terindeks Scopus menganalisis berbagai skenario dan menyimpulkan bahwa energi terbarukan akan melampaui bahan bakar fosil sebagai sumber utama pembangkitan listrik global sebelum tahun 2035, dan akan memasok lebih dari 70% listrik dunia pada tahun 2050 dalam skenario kebijakan yang ambisius. Lebih jauh lagi, dengan akselerasi elektrifikasi di sektor transportasi, pemanasan, dan industri, pangsa energi terbarukan dalam konsumsi energi final diproyeksikan meningkat dari sekitar 15% saat ini menjadi lebih dari 50% pada tahun 2050. Namun, studi ini juga menekankan bahwa pencapaian proyeksi ini sangat bergantung pada kemauan politik, investasi dalam infrastruktur jaringan dan penyimpanan, serta reformasi pasar energi yang fundamental.

Kontur utama yang membentuk lintasan masa depan energi terbarukan adalah penurunan biaya teknologi yang tampaknya tidak terbendung. Harga modul surya fotovoltaik telah turun lebih dari 90% dalam satu dekade terakhir, dan litani pembelajaran teknologi (*learning curves*) menunjukkan bahwa setiap penggantian kapasitas terpasang kumulatif menghasilkan penurunan biaya sekitar 20-24% untuk tenaga surya dan 15-18% untuk tenaga angin. Penelitian yang diterbitkan di *Nature Energy* oleh Green dan Staffell (2025) memproyeksikan bahwa biaya listrik dari tenaga surya akan mencapai kurang dari USD 15 per MWh di lokasi-lokasi dengan iradiansi tinggi pada tahun 2035, menjadikannya sumber listrik termurah dalam sejarah peradaban manusia. Penurunan biaya yang serupa juga terjadi pada baterai lithium-ion, yang harganya turun hingga di bawah USD 60 per kWh pada tahun 2025 dan diproyeksikan mencapai USD 30 per kWh pada tahun

2035, membuka jalan bagi penyimpanan energi yang ekonomis dalam skala besar. Dengan biaya yang terus menurun, argumen ekonomi untuk transisi energi menjadi semakin tak terbantahkan.

Digitalisasi merupakan mega-tren kedua yang akan mendefinisikan masa depan energi terbarukan, mentransformasi sistem energi dari hierarki terpusat yang kaku menjadi ekosistem terdistribusi yang adaptif dan cerdas. Jaramillo et al. (2025) dalam analisis bibliometrik mereka mendokumentasikan ledakan riset pada persimpangan antara energi terbarukan dan teknologi Industri 4.0, dengan kecerdasan buatan (AI) muncul sebagai domain yang paling dominan. AI digunakan untuk peramalan produksi energi surya dan angin dengan akurasi yang belum pernah terjadi sebelumnya, memungkinkan operator jaringan untuk mengantisipasi dan mengelola variabilitas alih-alih sekadar bereaksi. *Internet of Things* (IoT) menghubungkan jutaan sensor yang tersebar di panel surya, turbin angin, baterai, dan peralatan konsumen, menciptakan aliran data *real-time* yang memungkinkan optimalisasi presisi. Sementara itu, *blockchain* membuka kemungkinan pasar energi *peer-to-peer* yang sepenuhnya terdesentralisasi, di mana rumah tangga dan bisnis dapat memperdagangkan listrik secara langsung tanpa melalui utilitas tradisional. *Digital twins*—replika virtual dari sistem energi fisik—memungkinkan operator untuk menguji skenario dan strategi secara aman sebelum implementasi.

Integrasi sektoral melalui konsep *power-to-X* dan ekonomi hidrogen akan menjadi ciri khas sistem energi masa depan, menjembatani sektor kelistrikan dengan sektor-sektor yang sebelumnya sulit didekarbonisasi. Hidrogen hijau, yang diproduksi melalui elektrolisis air menggunakan listrik dari sumber terbarukan, muncul sebagai *game changer* potensial. Studi oleh Tackie-Otoo et al. (2025) menegaskan bahwa hidrogen dapat mengatasi

intermitensi energi terbarukan dengan berfungsi sebagai media penyimpanan energi jangka panjang, sekaligus sebagai bahan baku industri dan bahan bakar untuk transportasi berat, pelayaran, dan penerbangan. Proyeksi menunjukkan bahwa permintaan hidrogen global dapat meningkat dari sekitar 90 juta ton pada tahun 2024 menjadi lebih dari 500 juta ton pada tahun 2050, dengan sebagian besar berasal dari produksi hijau. *Power-to-X* juga mencakup produksi amonia hijau untuk pupuk dan bahan bakar, metanol hijau untuk industri kimia, dan *e-fuels* sintetis untuk sektor-sektor yang sulit dielektrifikasi. Negara-negara dengan potensi energi terbarukan yang melimpah, seperti Australia, Chili, dan negara-negara Afrika Utara, diposisikan untuk menjadi pengeksport energi utama dalam ekonomi hidrogen global, mengubah geopolitik energi secara fundamental.

Desentralisasi dan demokratisasi energi merupakan tren transformasional lain yang akan semakin menguat di masa depan. Model tradisional di mana sejumlah kecil pembangkit listrik besar memasok listrik ke konsumen pasif sedang digantikan oleh sistem di mana jutaan konsumen juga menjadi produsen (*prosumers*), dilengkapi dengan panel surya atap, baterai rumah tangga, dan kendaraan listrik yang dapat mengembalikan listrik ke jaringan. Komunitas energi terbarukan (*Renewable Energy Communities*), di mana warga secara kolektif memiliki dan mengelola aset energi lokal, berkembang pesat di Eropa dan mulai menjamur di berbagai belahan dunia. Basilico et al. (2025) menunjukkan bahwa komunitas energi ini tidak hanya meningkatkan penerimaan sosial terhadap energi terbarukan, tetapi juga menawarkan manfaat ekonomi yang signifikan bagi anggotanya, meskipun memerlukan mekanisme distribusi yang hati-hati untuk memastikan keadilan. Proyeksi menunjukkan bahwa pada tahun 2040, lebih dari 50% rumah tangga di negara-negara maju akan menjadi *prosumer* energi, secara fundamental mengubah

hubungan antara konsumen dan utilitas serta menciptakan model bisnis baru dalam sektor energi.

Sistem penyimpanan energi akan menjadi tulang punggung yang memungkinkan integrasi mendalam energi terbarukan, dan inovasi di bidang ini diprediksi akan berlangsung dengan kecepatan yang menakjubkan. Audu et al. (2025) dalam tinjauan mereka tentang kemajuan teknologi penyimpanan energi mengidentifikasi beberapa teknologi yang menjanjikan di luar baterai lithium-ion. Baterai *solid-state*, yang menggantikan elektrolit cair dengan material padat, menawarkan densitas energi yang lebih tinggi, keamanan yang lebih baik, dan potensi biaya yang lebih rendah, dengan komersialisasi yang diantisipasi pada akhir dekade ini. Baterai sodium-ion, yang menggunakan natrium yang melimpah dan murah sebagai pengganti litium, sangat menjanjikan untuk aplikasi stasioner di mana berat dan ukuran tidak terlalu kritis. Baterai aliran redoks vanadium, dengan kemampuannya untuk menyimpan energi dalam tangki elektrolit eksternal, menawarkan skalabilitas dan umur pakai yang sangat panjang, cocok untuk penyimpanan grid skala besar. Selain baterai, teknologi penyimpanan mekanis seperti *pumped hydro storage* dan *compressed air energy storage* (CAES) akan terus memainkan peran penting, sementara penyimpanan termal dalam garam leleh atau material perubahan fase menawarkan solusi untuk aplikasi panas industri.

Kesimpulannya, masa depan energi terbarukan bukan hanya tentang menggantikan bahan bakar fosil dengan sumber energi bersih dalam sistem yang ada, melainkan tentang menciptakan sistem energi yang sepenuhnya baru: lebih bersih, lebih cerdas, lebih terdistribusi, dan lebih demokratis. Jendela peluang untuk membentuk masa depan ini masih terbuka, tetapi menyempit dengan cepat seiring dengan berlanjutnya akumulasi emisi karbon di atmosfer. Keputusan investasi yang diambil dalam lima

hingga sepuluh tahun ke depan akan sangat menentukan apakah dunia dapat mencapai target *net-zero emissions* pada pertengahan abad ini, atau justru terjebak dalam lintasan pemanasan global yang berbahaya. Dengan biaya teknologi yang terus menurun, inovasi yang berkembang pesat, dan dukungan publik yang semakin kuat, masa depan energi terbarukan bukanlah pertanyaan tentang "apakah" melainkan "seberapa cepat"—dan kecepatan ini akan sangat bergantung pada keberanian dan visi para pembuat kebijakan di seluruh dunia.

8.2 Pengembangan Energi Terbarukan di Negara Berkembang

Negara-negara berkembang menempati posisi yang unik sekaligus paradoksal dalam transisi energi terbarukan global. Di satu sisi, mereka diberkahi dengan potensi sumber daya energi terbarukan yang sangat melimpah—radiasi surya yang tinggi di sabuk tropis, rezim angin yang kuat di berbagai kawasan pesisir, biomassa yang melimpah dari sektor pertanian, serta potensi geotermal dan hidro yang signifikan. Di sisi lain, mereka sering kali menghadapi kendala struktural yang akut: infrastruktur jaringan yang lemah atau tidak ada, kapasitas fiskal yang terbatas, akses yang buruk ke pasar modal internasional, serta kerangka kelembagaan dan regulasi yang belum matang. Tackie-Otoo et al. (2025) mencatat bahwa meskipun energi terbarukan telah mencapai daya saing biaya dengan bahan bakar fosil di banyak pasar global, sebagian besar negara berkembang masih bergulat dengan krisis energi yang parah akibat kendala keterjangkauan dan inefisiensi sistemik. Paradoks ini menciptakan peluang sekaligus tantangan: negara-negara berkembang memiliki kesempatan untuk melompati (*leapfrog*) infrastruktur bahan bakar fosil yang mencemari dan langsung menuju sistem energi terdesentralisasi berbasis terbarukan, namun membutuhkan dukungan internasional yang masif dan

reformasi domestik yang fundamental untuk mewujudkannya.

Sistem energi terdesentralisasi—terutama *solar home systems* (SHS) dan *mini-grid* tenaga surya—telah muncul sebagai solusi transformatif untuk mengatasi defisit akses energi yang kronis di negara-negara berkembang. Lebih dari 700 juta orang di seluruh dunia masih belum memiliki akses listrik pada tahun 2025, sebagian besar terkonsentrasi di Afrika sub-Sahara dan Asia Selatan. Sistem terdistribusi berbasis energi terbarukan menawarkan jalur yang lebih cepat, lebih murah, dan lebih bersih menuju elektrifikasi universal dibandingkan perluasan jaringan konvensional. Penelitian yang dilakukan oleh tim dari *Energy Strategy Reviews* (2025) menunjukkan bahwa *mini-grid* tenaga surya kini dapat menyediakan listrik dengan biaya yang kompetitif atau bahkan lebih rendah daripada ekstensi jaringan di daerah pedesaan terpencil, terutama dengan penurunan harga baterai dan munculnya model bisnis *pay-as-you-go* berbasis seluler yang inovatif. Keberhasilan program seperti *National Solar Mission* di India, program SHS di Bangladesh yang telah menjangkau lebih dari 20 juta rumah tangga, dan proliferasi *mini-grid* di Kenya dan Tanzania mendemonstrasikan potensi model energi terdesentralisasi untuk mentransformasi kehidupan di pedesaan.

Namun, pembiayaan tetap menjadi hambatan paling kritis yang menghalangi pengembangan energi terbarukan skala besar di negara-negara berkembang. Ramos Farroñán et al. (2025) dalam tinjauan sistematis mereka menemukan bahwa meskipun instrumen seperti obligasi hijau (*green bonds*) telah memobilisasi sekitar USD 500 miliar secara global, manfaatnya sangat terkonsentrasi di negara-negara dengan pengawasan regulasi yang kuat dan pasar keuangan yang matang, sehingga menawarkan keuntungan yang terbatas bagi akses energi terdesentralisasi di negara-negara paling miskin. Lebih

mengkhawatirkan lagi, studi ini mengungkapkan bahwa Afrika sub-Sahara hanya mewakili 16% dari seluruh studi yang dianalisis, meskipun kawasan ini menghadapi hambatan pembiayaan yang paling akut. Biaya modal (*cost of capital*) untuk proyek energi terbarukan di negara-negara berkembang sering kali dua hingga tiga kali lipat lebih tinggi dibandingkan proyek serupa di Eropa atau Amerika Utara, akibat persepsi risiko politik dan mata uang yang tinggi. Hal ini secara fundamental merusak daya saing energi terbarukan, meskipun potensi sumber dayanya jauh lebih besar. Inovasi keuangan seperti *blended finance*, jaminan risiko, dan agregasi proyek-proyek kecil diperlukan untuk menurunkan biaya modal dan membuka potensi besar energi terbarukan di negara-negara berkembang.

Kendala infrastruktur dan kapasitas kelembagaan merupakan lapisan tantangan tambahan yang tidak kalah pentingnya. Jaringan transmisi dan distribusi di banyak negara berkembang, jika ada, sering kali sudah tua, kelebihan beban, dan dirancang untuk generasi terpusat dari pembangkit listrik konvensional. Integrasi energi terbarukan variabel dalam jumlah besar ke dalam jaringan semacam itu memerlukan modernisasi fundamental yang membutuhkan investasi miliaran dolar. Selain itu, lembaga-lembaga yang bertanggung jawab atas perencanaan, regulasi, dan pengoperasian sektor energi sering kali kekurangan staf yang terlatih, peralatan yang memadai, dan otonomi politik yang diperlukan. Studi oleh Khan et al. (2025) menekankan bahwa inovasi kelembagaan—termasuk desain pasar, kerangka regulasi, dan mekanisme tata kelola—kini menjadi lebih kritis daripada solusi teknis semata, dengan pergeseran fokus riset yang signifikan dari integrasi teknis pada dekade lalu menuju desain pasar dan kerangka kebijakan pada tahun-tahun terkini.

Transfer teknologi dan kemitraan internasional memainkan peran krusial dalam menjembatani kesenjangan kapasitas antara negara maju dan

berkembang. Mekanisme seperti *Technology Mechanism* di bawah UNFCCC, *Mission Innovation*, dan kemitraan bilateral dirancang untuk memfasilitasi aliran pengetahuan, keahlian, dan teknologi energi bersih ke negara-negara berkembang. Namun, implementasinya sering kali terhambat oleh birokrasi, pendanaan yang tidak memadai, dan ketidakcocokan antara teknologi yang ditawarkan dan kebutuhan lokal. Penelitian yang dipublikasikan di *World Development* (2025) menganalisis efektivitas kemitraan transfer teknologi dan menemukan bahwa keberhasilan sangat bergantung pada kapasitas absorptif penerima—kemampuan institusi, bisnis, dan individu lokal untuk mengadopsi, mengadaptasi, dan pada akhirnya berinovasi berdasarkan teknologi yang ditransfer. Oleh karena itu, investasi dalam pendidikan, pelatihan, dan penelitian domestik sama pentingnya dengan transfer teknologi itu sendiri.

Studi kasus dari berbagai negara berkembang memberikan bukti empiris yang meyakinkan tentang kelayakan pengembangan energi terbarukan dalam konteks keterbatasan sumber daya. Kenya telah menjadi pemimpin global dalam energi geotermal, dengan pembangkit listrik Olkaria yang memasok sekitar sepertiga dari listrik negara tersebut, sekaligus mengembangkan salah satu pasar *mini-grid* tenaga surya paling dinamis di Afrika. India telah mencapai penurunan biaya tenaga surya yang fenomenal melalui lelang kompetitif yang agresif, dengan tarif yang mencapai rekor rendah Rs 1,99 per kWh (sekitar USD 2,4 sen) pada tahun 2024. Vietnam, sebelum hambatan kebijakan baru-baru ini, berhasil memasang lebih dari 16 GW kapasitas tenaga surya hanya dalam waktu dua tahun melalui skema *feed-in tariff* yang dirancang dengan baik. Namun, pengalaman Vietnam juga menjadi peringatan tentang pentingnya perencanaan jaringan yang memadai: ledakan kapasitas yang terlalu cepat tanpa peningkatan transmisi yang sesuai menyebabkan

pembatasan (*curtailment*) yang signifikan. Pelajaran dari kasus-kasus ini menunjukkan bahwa kebijakan yang stabil dan terprediksi, proses yang transparan, dan perencanaan infrastruktur yang terintegrasi adalah kunci keberhasilan.

Dimensi keadilan sosial, gender, dan inklusi semakin diakui sebagai elemen integral dari pengembangan energi terbarukan di negara-negara berkembang. Tanpa perhatian yang sadar terhadap distribusi manfaat, transisi energi berisiko memperlebar ketimpangan yang ada. Perempuan dan anak perempuan, yang secara tidak proporsional menanggung beban kemiskinan energi—seperti pengumpulan kayu bakar dan paparan polusi udara dalam ruangan—harus menjadi penerima manfaat utama dari akses energi bersih. Program yang secara eksplisit melibatkan perempuan sebagai pengusaha, teknisi, dan agen penjualan dalam rantai nilai energi terbarukan, seperti yang dilakukan oleh *Solar Sister* di Afrika dan *Grameen Shakti* di Bangladesh, telah menunjukkan hasil yang unggul baik dalam hal adopsi teknologi maupun pemberdayaan ekonomi. Pendekatan yang sensitif gender dan inklusif bukan hanya masalah keadilan, tetapi juga strategi yang cerdas untuk mempercepat penyebaran energi terbarukan dengan memanfaatkan jaringan dan pengetahuan lokal yang lebih luas.

Untuk mewujudkan potensi energi terbarukan di negara-negara berkembang, kerangka kebijakan yang komprehensif dan terpadu sangat diperlukan. Kebijakan-kebijakan ini harus mencakup beberapa elemen kunci: target energi terbarukan yang ambisius namun realistis yang memberikan sinyal jangka panjang kepada investor; mekanisme dukungan harga seperti *feed-in tariff* atau lelang kompetitif yang disesuaikan dengan tahap kematangan pasar; reformasi subsidi bahan bakar fosil yang dilakukan secara bertahap dan disertai kompensasi sosial untuk melindungi kelompok rentan; penyederhanaan prosedur perizinan dan perbaikan iklim investasi; serta

investasi publik dalam infrastruktur jaringan dan sumber daya manusia. Yang tidak kalah pentingnya, negara-negara berkembang perlu memperkuat posisi mereka dalam negosiasi internasional untuk memastikan bahwa arsitektur keuangan dan teknologi global mendukung—bukan menghambat—transisi energi mereka. *Just Energy Transition Partnerships* (JETP) yang diluncurkan untuk Afrika Selatan, Indonesia, Vietnam, dan Senegal, meskipun masih dalam tahap awal dan menghadapi berbagai tantangan implementasi, menawarkan model kemitraan yang dapat diperluas dan direplikasi di seluruh dunia berkembang.

8.3 Inovasi yang Menjanjikan dalam Sektor Energi

Pada batas-batas terdepan riset dan pengembangan energi, serangkaian inovasi yang menjanjikan tengah bergerak dari laboratorium menuju demonstrasi dan komersialisasi awal, membawa potensi untuk mengatasi keterbatasan teknologi energi terbarukan saat ini dan membuka kemungkinan-kemungkinan baru. Sel surya perovskit merupakan salah satu inovasi yang paling banyak menarik perhatian dan investasi. Material perovskit, dengan struktur kristal yang unik, menawarkan efisiensi konversi yang melonjak dari sekitar 3% pada tahun 2009 menjadi lebih dari 33% dalam konfigurasi tandem silikon-perovskit pada tahun 2025, sebuah laju peningkatan yang belum pernah terjadi sebelumnya dalam sejarah teknologi fotovoltaik. Abdel-Aziz dan ElBahloul (2025) menekankan bahwa sel perovskit dapat diproduksi melalui proses larutan berbiaya rendah, berpotensi mengurangi biaya manufaktur secara signifikan dibandingkan silikon kristalin. Tantangan utama yang tersisa adalah stabilitas jangka panjang dan skalabilitas manufaktur, namun dengan investasi besar-besaran dari perusahaan-perusahaan seperti Oxford PV, Saule Technologies, dan raksasa energi global,

komersialisasi skala penuh diperkirakan akan dimulai sebelum akhir dekade ini.

Di ranah energi angin, inovasi paling menarik terjadi di sektor lepas pantai, khususnya turbin angin terapung (*floating offshore wind turbines*) yang membuka potensi area laut dalam yang sebelumnya tidak dapat dijangkau oleh turbin dengan fondasi tetap. Turbin angin terapung, yang ditambat ke dasar laut dengan kabel dan jangkar pada kedalaman lebih dari 60 meter, memungkinkan eksploitasi rezim angin yang lebih kuat dan lebih konsisten di lepas pantai jauh. Proyek-proyek percontohan seperti Hywind Scotland dan WindFloat Atlantic telah membuktikan kelayakan teknis, dengan kapasitas turbin individual yang terus meningkat menuju 15-20 MW. Biaya energi dari angin terapung saat ini masih lebih tinggi dibandingkan angin lepas pantai dengan fondasi tetap, namun proyeksi menunjukkan penurunan yang signifikan seiring dengan standarisasi desain, efek pembelajaran, dan skala ekonomi. Sementara itu, turbin angin sumbu vertikal (VAWT) untuk aplikasi urban juga terus disempurnakan, dengan desain heliks dan material ringan baru yang mengurangi getaran dan meningkatkan efisiensi pada kondisi angin turbulen yang khas di lingkungan perkotaan.

Hidrogen hijau, yang diproduksi melalui elektrolisis air menggunakan listrik terbarukan, menduduki posisi sentral dalam visi sistem energi masa depan yang terintegrasi. Inovasi dalam teknologi elektroliser berkembang pesat di tiga jalur utama: *alkaline electrolysis* yang matang dan berbiaya rendah, *proton exchange membrane* (PEM) yang menawarkan respons cepat dan kompatibilitas dengan input variabel dari energi surya dan angin, serta *solid oxide electrolysis* (SOEC) yang menjanjikan efisiensi tertinggi dengan beroperasi pada suhu tinggi. Tackie-Otoo et al. (2025) mencatat bahwa hidrogen hijau dapat menyimpan energi musiman dan mentransportasikan energi terbarukan dari lokasi dengan sumber daya melimpah ke pusat-pusat

permintaan, namun biaya produksinya yang masih tinggi—terutama karena biaya elektroliser dan listrik—membutuhkan investasi besar-besaran dan dukungan kebijakan. Proyek-proyek skala gigawatt yang diumumkan di Australia, Timur Tengah, dan Amerika Selatan menunjukkan keyakinan pasar terhadap potensi hidrogen hijau, meskipun banyak yang masih dalam tahap perencanaan dan menunggu keputusan investasi final.

Teknologi penyimpanan energi generasi berikutnya akan sangat menentukan seberapa dalam dan seberapa cepat energi terbarukan dapat menembus bauran energi. Audu et al. (2025) mengidentifikasi beberapa inovasi yang paling menjanjikan. Baterai *solid-state* menggantikan elektrolit cair yang mudah terbakar dengan material padat, menawarkan peningkatan keamanan, densitas energi yang lebih tinggi, dan potensi masa pakai yang lebih lama—sangat relevan untuk kendaraan listrik dan penyimpanan grid. Baterai sodium-ion, yang menggunakan natrium yang melimpah dan murah sebagai pengganti litium yang lebih langka dan mahal, telah mencapai kemajuan pesat, dengan CATL, raksasa baterai China, telah memulai produksi komersial untuk aplikasi stasioner. Baterai aliran redoks, yang menyimpan energi dalam tangki elektrolit cair yang terpisah, menawarkan skalabilitas dan masa pakai yang hampir tak terbatas, ideal untuk penyimpanan grid jangka panjang. Selain teknologi elektrokimia, *compressed air energy storage* (CAES) yang ditingkatkan, *liquid air energy storage* (LAES), dan penyimpanan energi gravitasi menawarkan alternatif mekanis yang menjanjikan untuk penyimpanan skala besar.

Revolusi digital dalam sektor energi terus melahirkan inovasi yang mentransformasi cara sistem energi direncanakan, dioperasikan, dan dioptimalkan. Kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin kini digunakan tidak hanya untuk peramalan produksi dan permintaan yang lebih akurat, tetapi juga untuk deteksi anomali dan pemeliharaan

prediktif yang secara signifikan mengurangi *downtime* dan biaya operasional. Jaramillo et al. (2025) mendokumentasikan bahwa AI telah menjadi domain riset yang paling dominan di sektor energi terbarukan. *Digital twins*—replika virtual dari aset fisik seperti ladang angin, taman surya, atau bahkan seluruh jaringan kota—memungkinkan operator untuk menguji berbagai skenario operasi, memprediksi kegagalan sebelum terjadi, dan mengoptimalkan strategi penawaran di pasar listrik. Sementara itu, *blockchain* dan kontrak pintar (*smart contracts*) membuka kemungkinan pasar energi lokal yang sepenuhnya otomatis, di mana tetangga dapat saling memperdagangkan listrik surya atap tanpa perantara. Integrasi teknologi-teknologi digital ini menciptakan sistem energi yang semakin otonom, adaptif, dan efisien.

Bioenergi maju menawarkan jalur inovasi yang berbeda, berfokus pada konversi biomassa non-pangan menjadi bahan bakar dan produk bernilai tinggi dengan efisiensi yang lebih tinggi dan dampak lingkungan yang lebih rendah. Mikroalga, yang dapat tumbuh di air asin atau air limbah dan menghasilkan lipid hingga 70% dari berat keringnya, telah lama dijanjikan sebagai bahan baku biofuel generasi ketiga yang unggul. Kemajuan dalam rekayasa genetika dan desain fotobioreaktor telah meningkatkan produktivitas alga secara signifikan, meskipun biaya produksi masih perlu diturunkan lebih lanjut untuk mencapai daya saing komersial. Pada sisi yang berbeda, biogas dari limbah organik—termasuk limbah pertanian, limbah makanan, dan kotoran ternak—semakin diintegrasikan dengan konsep ekonomi sirkular. Pabrik biogas modern tidak hanya menghasilkan listrik dan panas, tetapi juga dapat ditingkatkan menjadi biometana untuk injeksi ke jaringan gas atau digunakan sebagai bahan bakar transportasi, sementara residunya menjadi pupuk organik berkualitas tinggi. Inovasi dalam katalisis dan biologi sintetik juga membuka jalur untuk memproduksi bahan

kimia *platform* dan material dari biomassa, menggantikan bahan baku fosil dalam rantai nilai industri.

Energi laut—yang mencakup energi pasang surut, energi gelombang, dan konversi energi termal lautan (OTEC)—selama ini merupakan sepupu yang kurang diperhatikan dalam keluarga energi terbarukan, namun inovasi terkini menunjukkan potensi yang semakin nyata. Turbin pasang surut, yang pada dasarnya adalah versi bawah air dari turbin angin, telah mencapai tahap komersial awal dengan proyek-proyek seperti MeyGen di Skotlandia. Pengonversi energi gelombang, yang menangkap gerakan naik-turun permukaan laut, telah mengalami proliferasi desain yang beragam, meskipun belum ada satu desain pun yang muncul sebagai pemenang yang jelas. OTEC, yang memanfaatkan perbedaan suhu antara air permukaan yang hangat dan air dalam yang dingin di daerah tropis, menawarkan potensi pembangkitan listrik *baseload* yang stabil 24 jam—sebuah keunggulan unik di antara energi terbarukan. Namun, teknologi ini masih berada pada tahap demonstrasi awal dengan biaya yang tinggi. Ke depannya, energi laut diperkirakan akan memainkan peran yang semakin penting, terutama bagi negara-negara pulau dan kawasan pesisir yang memiliki sumber daya laut yang melimpah.

Meskipun bukan energi terbarukan dalam pengertian konvensional, fusi nuklir layak disebut sebagai inovasi yang paling revolusioner dan transformatif dalam horizon energi jangka panjang. Fusi, yang mereplikasi reaksi yang menggerakkan matahari, menjanjikan energi yang hampir tak terbatas, aman, dan bersih, tanpa limbah radioaktif berumur panjang yang terkait dengan fisi nuklir. Terobosan bersejarah dicapai pada tahun 2022 ketika Lawrence Livermore National Laboratory di Amerika Serikat berhasil mencapai *ignition*—menghasilkan lebih banyak energi dari reaksi fusi daripada energi yang dimasukkan. Proyek ITER di Prancis, kolaborasi internasional terbesar dalam sejarah

sains, terus membuat kemajuan menuju demonstrasi fusi berkelanjutan pada tahun 2030-an. Sementara itu, puluhan *start-up* swasta, didukung oleh miliaran dolar investasi ventura, mengejar pendekatan alternatif yang lebih kecil dan berpotensi lebih cepat. Meskipun komersialisasi fusi masih berjarak beberapa dekade, keberhasilannya akan secara fundamental mengubah tidak hanya lanskap energi tetapi juga seluruh peradaban manusia, memberikan energi bersih yang berlimpah tanpa batasan sumber daya yang selama ini mendefinisikan konflik dan ketidaksetaraan global.

8.4 Peran Energi Terbarukan dalam Mewujudkan Ketahanan Energi Nasional

Ketahanan energi nasional—yang didefinisikan sebagai ketersediaan akses terhadap pasokan energi yang andal, terjangkau, dan berkelanjutan—merupakan pilar fundamental kedaulatan dan keamanan suatu negara. Dalam kerangka konvensional, ketahanan energi sering kali dipahami dalam konteks mengamankan pasokan bahan bakar fosil impor, yang rentan terhadap volatilitas harga global, gangguan geopolitik, dan kelelahan sumber daya. Namun, paradigma ini sedang mengalami pergeseran fundamental seiring dengan meningkatnya peran energi terbarukan. Malik et al. (2025) menekankan bahwa energi terbarukan menawarkan dimensi ketahanan yang berbeda secara kualitatif: sumber daya yang tersedia secara lokal dan melimpah, tidak dapat habis, dan tidak tunduk pada embargo atau manipulasi pasar oleh negara pengekspor. Bagi negara-negara yang saat ini bergantung pada impor energi, transisi menuju energi terbarukan domestik merepresentasikan lompatan strategis menuju kemandirian energi yang sesungguhnya.

Diversifikasi sumber energi merupakan prinsip inti ketahanan energi, dan energi terbarukan secara inheren mendukung diversifikasi yang jauh lebih besar daripada

ketergantungan pada sejumlah kecil bahan bakar fosil. Portofolio energi terbarukan yang beragam—mencakup surya, angin, hidro, biomassa, geotermal, dan energi laut—yang tersebar secara geografis di berbagai wilayah suatu negara, menciptakan redundansi dan mengurangi kerentanan terhadap gangguan pada satu sumber atau lokasi tertentu. Che et al. (2025) mengidentifikasi interkoneksi lintas batas dan diversifikasi sumber daya sebagai strategi kunci untuk mencapai jaringan yang andal dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi. Dengan kombinasi sumber daya yang saling melengkapi—misalnya, surya yang berlimpah di musim kemarau dan angin yang kuat di musim hujan—variabilitas masing-masing sumber dapat saling menyeimbangkan. Negara-negara kepulauan seperti Indonesia, dengan ribuan pulau yang tersebar, dapat memanfaatkan sistem energi terdistribusi berbasis sumber daya lokal yang sesuai dengan karakteristik masing-masing pulau, mengurangi ketergantungan pada rantai pasok energi yang panjang dan rentan.

Desentralisasi sistem energi yang dimungkinkan oleh energi terbarukan memiliki implikasi mendalam bagi ketahanan energi, terutama dalam menghadapi gangguan alam, serangan siber, atau kegagalan infrastruktur. Sistem energi terpusat konvensional dengan sejumlah kecil pembangkit besar sangat rentan terhadap *single point of failure*—satu gangguan pada pembangkit utama atau jalur transmisi kunci dapat menyebabkan pemadaman meluas. Sebaliknya, sistem energi terdistribusi yang terdiri dari ribuan atau jutaan pembangkit kecil, penyimpanan lokal, dan *microgrid* yang dapat beroperasi secara otonom (*islanding*) menawarkan resiliensi yang jauh lebih tinggi. Dabo et al. (2024) menyoroti bahwa meskipun digitalisasi membuka kerentanan baru terhadap serangan siber, arsitektur terdistribusi dari energi terbarukan secara fundamental lebih tangguh karena tidak memiliki pusat kendali tunggal yang dapat

dilumpuhkan. *Microgrid* berbasis energi terbarukan dengan penyimpanan baterai dapat mempertahankan pasokan listrik ke fasilitas-fasilitas kritis seperti rumah sakit, pusat tanggap darurat, dan infrastruktur komunikasi bahkan ketika jaringan utama mengalami gangguan.

Dalam konteks Indonesia, potensi energi terbarukan untuk memperkuat ketahanan energi nasional sangatlah signifikan dan mendesak. Sebagai negara yang masih bergantung pada batu bara untuk lebih dari 60% pembangkitan listriknya dan merupakan importir minyak yang semakin besar, Indonesia menghadapi risiko ganda: volatilitas harga komoditas global dan penurunan permintaan batu bara yang tak terelakkan seiring dengan akselerasi dekarbonisasi global. Budiarto dan Surjosatyo (2025) mendokumentasikan bahwa Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang sangat besar dan beragam: lebih dari 400 GW potensi tenaga surya, 29 GW potensi geotermal (terbesar kedua di dunia), 75 GW potensi hidro, dan 60 GW potensi angin. Pengembangan sumber daya ini tidak hanya akan mengurangi ketergantungan pada impor dan melindungi ekonomi nasional dari guncangan harga energi global, tetapi juga menciptakan fondasi bagi pertumbuhan ekonomi berkelanjutan yang tidak terikat pada sumber daya yang akan habis.

Keamanan pasokan energi di daerah-daerah terpencil, pulau-pulau kecil, dan wilayah perbatasan merupakan dimensi ketahanan energi yang sering kali terabaikan dalam perencanaan nasional yang terpusat. Di Indonesia, dengan lebih dari 17.000 pulau, banyak komunitas mengandalkan generator diesel yang mahal, bising, dan mencemari, dengan bahan bakar yang harus diangkut melalui rantai pasok yang panjang dan rentan terhadap cuaca buruk serta gangguan logistik. Energi terbarukan, terutama sistem hibrida surya-diesel atau *mini-grid* tenaga surya dengan penyimpanan baterai, menawarkan alternatif yang tidak hanya lebih bersih tetapi juga lebih andal dan dalam banyak

kasus lebih murah. Studi oleh Schlör et al. (2025) di Afrika Barat mendemonstrasikan bahwa sistem energi terbarukan terdistribusi yang didukung oleh skema subsidi yang ditargetkan dapat secara signifikan mengurangi biaya listrik di daerah pedesaan, memberikan pelajaran yang relevan bagi konteks kepulauan Indonesia. Dengan mengurangi atau menghilangkan kebutuhan akan pengiriman bahan bakar yang terus-menerus, energi terbarukan menciptakan kemandirian energi yang sesungguhnya bagi komunitas-komunitas yang selama ini terpinggirkan.

Volatilitas harga energi fosil, yang diperparah oleh ketegangan geopolitik, perang, dan krisis ekonomi, merupakan sumber kerentanan utama bagi negara-negara pengimpor energi. Invasi Rusia ke Ukraina pada tahun 2022 dan konsekuensinya yang berkepanjangan hingga tahun 2025 secara dramatis mengilustrasikan bagaimana ketergantungan pada energi impor dapat mengekspos suatu negara pada risiko keamanan yang akut. Gawlikowska-Fyk et al. (2025) menganalisis bagaimana krisis energi Eropa mempercepat narasi keamanan energi sebagai *driver* transisi energi terbarukan. Energi terbarukan domestik, dengan biaya marginal yang mendekati nol setelah konstruksi, menyediakan lindung nilai (*hedge*) yang kuat terhadap volatilitas harga ini. Sinar matahari dan angin tidak memiliki harga, dan tidak ada kartel yang dapat memanipulasi pasokannya. Dengan investasi awal yang besar tetapi biaya operasional yang sangat rendah dan terprediksi, energi terbarukan menawarkan stabilitas harga energi jangka panjang yang sangat berharga bagi perencanaan ekonomi nasional, perlindungan konsumen dari guncangan harga, dan daya saing industri.

Integrasi jaringan listrik regional, seperti *ASEAN Power Grid* yang telah lama dicita-citakan, menambahkan dimensi multilateral pada ketahanan energi berbasis energi terbarukan. Interkoneksi memungkinkan negara-negara dengan sumber daya yang berbeda dan pola permintaan

yang beragam untuk saling melengkapi: kelebihan tenaga air dari Laos dan Myanmar selama musim hujan dapat diekspor ke Thailand dan Singapura, sementara tenaga surya dari Indonesia dan Filipina dapat mengisi kebutuhan siang hari di negara-negara tetangga. Che et al. (2025) menekankan bahwa interkoneksi lintas batas adalah salah satu strategi paling efektif untuk mengelola variabilitas dan meningkatkan ketahanan sistem. Namun, realisasi visi ini memerlukan tidak hanya investasi besar-besaran dalam infrastruktur transmisi, tetapi juga harmonisasi regulasi, standar teknis, dan mekanisme perdagangan yang kompleks. Kepercayaan politik dan kerangka kerja sama yang kuat adalah prasyarat yang tidak kalah pentingnya, terutama di kawasan dengan sejarah ketegangan dan persaingan seperti Asia Tenggara.

Untuk sepenuhnya merealisasikan peran energi terbarukan dalam mewujudkan ketahanan energi nasional, serangkaian langkah kebijakan dan strategis diperlukan. Pertama, pemerintah harus menetapkan peta jalan transisi energi yang jelas dan mengikat secara hukum, dengan target dan tonggak pencapaian yang terukur untuk memberikan kepastian kepada investor dan pemangku kepentingan. Kedua, investasi besar-besaran dalam infrastruktur jaringan transmisi dan distribusi, termasuk interkoneksi antar-pulau dan sistem kontrol cerdas, harus diprioritaskan untuk mengakomodasi aliran energi terbarukan dari lokasi pembangkitan ke pusat-pusat permintaan. Ketiga, mekanisme pasar dan regulasi—termasuk harga karbon, reformasi subsidi, dan insentif untuk penyimpanan energi dan respons permintaan—harus dirancang ulang untuk menghilangkan bias terhadap bahan bakar fosil dan menciptakan *level playing field*. Keempat, strategi transisi energi harus secara eksplisit mengintegrasikan dimensi ketahanan, dengan memastikan bahwa sistem energi masa depan tidak hanya bersih tetapi juga tangguh terhadap guncangan alam dan buatan

manusia. Terakhir, kerjasama internasional dan regional harus diperdalam untuk memanfaatkan potensi diversifikasi geografis dan interkoneksi yang lebih luas. Pada akhirnya, energi terbarukan bukan hanya instrumen untuk mitigasi perubahan iklim, tetapi juga fondasi bagi kemandirian, keamanan, dan kedaulatan energi nasional di abad ke-21.

8.5 Energi Terbarukan dan Pencapaian SDG (Sustainable Development Goals)

Energi terbarukan menempati posisi yang unik dan sentral dalam kerangka Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) Perserikatan Bangsa-Bangsa. Tidak hanya menjadi fokus dari SDG 7 yang secara eksplisit menargetkan akses terhadap energi yang terjangkau, andal, berkelanjutan, dan modern bagi semua, energi terbarukan juga berfungsi sebagai pengungkit (*enabler*) yang sangat kuat bagi pencapaian hampir semua tujuan lainnya. Safitri et al. (2024) dalam tinjauan sistematis PRISMA yang terintegrasi dengan analisis bibliometrik berbasis Scopus mengidentifikasi hubungan yang mendalam antara energi terbarukan dan 13 SDGs, dengan penekanan khusus pada empat langkah utama menuju emisi nol bersih: dekarbonisasi sistem energi, transisi energi terbarukan, elektrifikasi transportasi, dan reforestasi. Sifat lintas-sektoral dari energi—yang mendasari produksi industri, pertanian, transportasi, layanan kesehatan, pendidikan, dan hampir setiap aspek kehidupan modern—menjadikan transisi energi terbarukan sebagai salah satu intervensi dengan pengaruh paling luas terhadap agenda pembangunan berkelanjutan.

Kontribusi paling langsung dan nyata dari energi terbarukan adalah terhadap pencapaian SDG 7, yang mencakup tiga target utama: akses universal terhadap layanan energi modern, peningkatan substansial pangsa energi terbarukan dalam bauran energi global, dan penggandaan laju peningkatan efisiensi energi. Pada tahun

2025, dunia masih jauh dari target akses universal, dengan lebih dari 700 juta orang tanpa listrik dan lebih dari 2 miliar orang bergantung pada bahan bakar memasak yang tidak bersih. Sistem energi terbarukan terdesentralisasi—terutama *solar home systems* dan *mini-grid*—telah terbukti menjadi solusi paling efektif dan cepat untuk memperluas akses listrik di daerah pedesaan dan terpencil yang tidak mungkin dijangkau oleh perluasan jaringan konvensional dalam waktu dekat. Selain akses, keterjangkauan energi juga merupakan komponen kunci SDG 7. Penurunan biaya teknologi yang dramatis, yang didokumentasikan oleh banyak studi, telah membuat energi terbarukan menjadi sumber listrik termurah di sebagian besar dunia. Namun, untuk populasi termiskin sekalipun, biaya awal yang tinggi untuk peralatan energi terbarukan—seperti panel surya atau kompor bersih—dapat menjadi penghalang yang tidak terjembatani tanpa adanya mekanisme pembiayaan inovatif seperti *pay-as-you-go* dan subsidi yang ditargetkan.

Keterkaitan antara energi terbarukan dan SDG 13 tentang penanganan perubahan iklim bersifat fundamental dan tidak dapat dipisahkan. Sektor energi menyumbang sekitar tiga perempat dari emisi gas rumah kaca global, menjadikan dekarbonisasi sistem energi sebagai syarat mutlak untuk mencapai target-target Perjanjian Paris. Aliyev dan Guliyeva (2024) memberikan bukti empiris yang kuat dari 26 negara Uni Eropa bahwa teknologi iklim dan transisi energi secara simultan dan signifikan mengurangi emisi CO₂. Tanpa transisi yang cepat dan mendalam menuju energi terbarukan, menjaga kenaikan suhu global di bawah ambang batas 1,5°C atau bahkan 2°C akan menjadi mustahil. Namun, hubungan ini juga memiliki dimensi keadilan iklim yang penting: negara-negara berkembang yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim—banjir, kekeringan, kenaikan permukaan laut—adalah mereka yang paling sedikit berkontribusi terhadap emisi historis dan yang paling membutuhkan dukungan untuk

menjalani jalur pembangunan rendah karbon. Di sinilah prinsip *common but differentiated responsibilities* menjadi relevan, menuntut negara-negara maju untuk menyediakan pendanaan, teknologi, dan peningkatan kapasitas bagi negara-negara berkembang.

Manfaat energi terbarukan meluas secara langsung ke ranah ekonomi, mendukung pencapaian SDG 1 (pengentasan kemiskinan) dan SDG 8 (pertumbuhan ekonomi dan pekerjaan yang layak). Akses terhadap listrik yang andal dan terjangkau merupakan fondasi bagi aktivitas ekonomi produktif, memungkinkan bisnis untuk beroperasi di luar jam siang hari, mendukung pendidikan melalui pencahayaan dan akses informasi, serta meningkatkan produktivitas pertanian melalui irigasi dan pendinginan. Studi yang diterbitkan di *Energy Strategy Reviews* (2025) menekankan bahwa sistem energi terbarukan terdesentralisasi di negara-negara berkembang menawarkan alternatif yang terjangkau untuk bahan bakar fosil di daerah pedesaan, secara langsung meningkatkan penciptaan lapangan kerja, ketahanan energi, dan pengurangan kemiskinan. Lebih jauh lagi, rantai nilai energi terbarukan—dari manufaktur dan instalasi hingga operasi dan pemeliharaan—menciptakan lebih banyak pekerjaan per unit energi yang dihasilkan dibandingkan dengan bahan bakar fosil. IRENA memperkirakan sektor energi terbarukan dapat mendukung lebih dari 40 juta pekerjaan pada tahun 2050, menawarkan potensi besar bagi negara-negara dengan populasi muda yang besar dan tingkat pengangguran yang tinggi.

Dampak positif energi terbarukan terhadap kesehatan manusia dan kualitas lingkungan perkotaan secara langsung mendukung SDG 3 (kehidupan sehat dan sejahtera) dan SDG 11 (kota dan komunitas berkelanjutan). Polusi udara, yang sebagian besar berasal dari pembakaran bahan bakar fosil di pembangkit listrik, kendaraan, dan industri, diperkirakan menyebabkan sekitar

7 juta kematian prematur setiap tahunnya secara global. Penggantian pembangkit listrik batu bara dengan energi surya dan angin, serta elektrifikasi transportasi yang ditenagai oleh sumber terbarukan, akan menghasilkan pengurangan dramatis dalam konsentrasi partikulat halus (PM2.5), nitrogen oksida, dan sulfur dioksida di udara perkotaan. Manfaat kesehatan dari transisi energi, yang sering kali tidak dimasukkan dalam perhitungan ekonomi konvensional, dapat sangat besar: penghematan biaya kesehatan, peningkatan produktivitas tenaga kerja, dan pengurangan angka kematian dini. Bagi kota-kota di negara berkembang seperti Jakarta, Delhi, dan Beijing yang bergulat dengan krisis polusi udara kronis, transisi energi terbarukan bukan lagi sekadar masalah lingkungan, tetapi juga imperatif kesehatan masyarakat yang mendesak.

Dimensi keadilan sosial dan gender dari transisi energi terbarukan berhubungan erat dengan SDG 5 (kesetaraan gender) dan SDG 10 (pengurangan ketimpangan). Kemiskinan energi memiliki wajah perempuan: di banyak masyarakat tradisional, perempuan dan anak perempuan menanggung beban utama dari pengumpulan bahan bakar biomassa untuk memasak—sebuah tugas yang memakan waktu berjam-jam setiap hari, membatasi kesempatan untuk pendidikan dan aktivitas ekonomi, serta mengekspos mereka pada risiko kekerasan dan masalah kesehatan dari membawa beban berat. Akses terhadap energi bersih untuk memasak dan listrik untuk penerangan dan peralatan produktif secara langsung mengurangi beban waktu ini, membebaskan perempuan untuk mengejar pendidikan dan pekerjaan, serta meningkatkan kesehatan pernapasan mereka dan anak-anak mereka. Namun, manfaat ini tidak terjadi secara otomatis. Basilico et al. (2025) memperingatkan bahwa tanpa desain kebijakan yang sadar gender dan pro-kaum miskin, subsidi dan program energi terbarukan dapat secara tidak proporsional menguntungkan rumah tangga berpenghasilan tinggi. Oleh

karena itu, diperlukan pendekatan yang inklusif, partisipatif, dan ditargetkan untuk memastikan bahwa transisi energi mengurangi, bukan memperlebar, ketimpangan yang ada.

Meskipun sinergi antara energi terbarukan dan berbagai SDG sangatlah kuat, penting untuk mengakui dan mengelola potensi *trade-off* dan dampak negatif yang dapat muncul. Pengembangan energi terbarukan skala besar, jika tidak direncanakan dan dikelola dengan baik, dapat menimbulkan dampak lingkungan dan sosial yang merugikan. Bendungan hidroelektrik besar dapat mengganggu ekosistem sungai, menggusur komunitas, dan menghasilkan emisi metana dari dekomposisi bahan organik di reservoir. Taman surya skala utilitas dan perkebunan tanaman energi dapat bersaing dengan lahan pertanian untuk produksi pangan dan mengancam keanekaragaman hayati jika ditempatkan di habitat yang sensitif. Treasure et al. (2025) mendokumentasikan bahwa dampak taman surya terhadap layanan ekosistem sangat bergantung pada pengelolaan lahan dan penggunaan lahan sebelumnya, dengan potensi dampak positif maupun negatif. Penambangan material yang diperlukan untuk baterai dan panel surya—seperti litium, kobalt, dan elemen tanah jarang—dapat dikaitkan dengan degradasi lingkungan dan pelanggaran hak asasi manusia jika tidak diatur dengan ketat. Oleh karena itu, transisi energi harus dipandu oleh prinsip-prinsip keberlanjutan yang holistik, penilaian dampak yang ketat, dan keterlibatan pemangku kepentingan yang bermakna untuk memaksimalkan sinergi dan meminimalkan *trade-off* antara berbagai tujuan pembangunan berkelanjutan.

Sebagai kesimpulan, energi terbarukan merupakan salah satu pengungkit paling kuat dan serbaguna yang tersedia bagi komunitas internasional untuk mempercepat pencapaian Agenda 2030 dan SDGs. Kontribusinya melampaui sekadar menyediakan listrik bersih; energi terbarukan mendorong pertumbuhan ekonomi,

menciptakan lapangan kerja, meningkatkan kesehatan, melindungi ekosistem, memberdayakan perempuan, dan mengurangi ketimpangan. Namun, potensi ini tidak akan terwujud dengan sendirinya. Diperlukan pendekatan kebijakan yang terpadu dan koheren yang secara sadar menghubungkan transisi energi dengan tujuan-tujuan pembangunan yang lebih luas, didukung oleh pendanaan yang memadai—baik domestik maupun internasional—dan dilaksanakan melalui tata kelola yang inklusif dan partisipatif. Bagi negara-negara berkembang seperti Indonesia, integrasi energi terbarukan ke dalam strategi pembangunan nasional merupakan peluang bersejarah untuk mengatasi defisit akses energi, meningkatkan daya saing ekonomi, memperbaiki kualitas lingkungan, dan pada akhirnya mewujudkan visi pembangunan berkelanjutan yang berkeadilan bagi seluruh rakyat. Dengan komitmen politik yang kuat, dukungan internasional yang solid, dan partisipasi aktif dari seluruh lapisan masyarakat, energi terbarukan dapat menjadi mesin penggerak bagi masa depan yang lebih bersih, lebih sejahtera, dan lebih berkelanjutan untuk semua.

Daftar Pustaka

- Abdel-Aziz, M. M., & ElBahloul, A. A. (2025). Innovations in improving photovoltaic efficiency: A review of performance enhancement techniques. *Energy Conversion and Management*, 119589.
- Aliyev, M., & Guliyeva, S. (2024). Modeling the linkage between climate-tech, energy transition, and CO₂ emissions: Do environmental regulations matter? *Gondwana Research*, 127, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.04.003>
- Audu, G. A., Mafo, A. R., Jegede, R. E., Tarasenko, M., & Kozak, K. (2025). Advances in energy storage technologies for renewable energy systems: Bridging intermittency and sustainable integration. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*, 9(2), 79–96.
- Bahrar, M., et al. (2025). Comparative analysis of renewable and fossil-based electricity generation costs in Morocco. *Energy Strategy Reviews*.
- Basilico, A., Camoletto, S., & Delmastro, C. (2025). Economic implications of subsidies for renewable energy communities in sustainable cities. *Applied Energy*, 358, 122592. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122592>
- Bilgili, M., Yasar, A., & Simsek, E. (2011). Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 905–915. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.006>
- Brownson, J. R. S., et al. (2015). Solar resource classification and economic assessment approaches for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Budiarto, A. W., & Surjosatyo, A. (2019). Indonesia's road to fulfill national renewable energy plan target in 2025 and 2050: Current progress, challenges, and management recommendations – A small review. *Energy Procedia*, 158, 3465–3470. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.926>

- Capellán-Pérez, I., de Castro, C., & Arto, I. (2019). Assessing vulnerabilities and limits in the transition to renewable energies. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100397. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100397>
- Che, E. E., Abeng, K. R., Iweh, C. D., Tsekouras, G. J., & Fopah-Lele, A. (2025). The impact of integrating variable renewable energy sources into grid-connected power systems: Challenges, mitigation strategies, and prospects. *Energies*, 18(3), Article 689. <https://doi.org/10.3390/en18030689>
- Child, M., Kemfert, C., Bogdanov, D., & Breyer, C. (2019). Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100% renewable energy system in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110705.
- Dabo, A.-A. A., Amin, H., & Adisa, O. (2024). Securing renewable energy supply chains: Challenges and opportunities for information security. *International Journal of Electronic Security and Digital Forensics*, 16(1), 1–18. <https://doi.org/10.1504/IJESDF.2026.10067348>
- Dupraz, C., et al. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10), 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Gawlikowska-Fyk, A., Nowak, B., & Zajac, K. (2025). Energy security narratives and renewable energy deployment in the European Union after the energy crisis. *Energy Policy*, 186, 114100. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114100>
- Gibson, L., Wilman, E. N., & Laurance, W. F. (2017). How green is 'green' energy? Trends in biodiversity offsetting and renewable energy development. *BioScience*, 67(5), 412–423.
- Green, R., & Staffell, I. (2025). The future cost trajectory of solar photovoltaics. *Nature Energy*, 10, 345–355. <https://doi.org/10.1038/s41560-025-01600-4>

- Guerrero-Lemus, R., et al. (2022). Bifacial solar photovoltaics: Technology, applications, and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Hertwich, E. G., et al. (2015). Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(20), 6277–6282. <https://doi.org/10.1073/pnas.1312753111>
- International Energy Agency. (2020). *World energy outlook 2020*. IEA.
- International Energy Agency. (2021). *Global EV outlook 2021*. IEA.
- International Energy Agency. (2024). *Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030*. IEA.
- International Labour Organization. (2020). *World employment and social outlook 2020*. ILO.
- International Renewable Energy Agency. (2020). *Global renewables outlook: Energy transformation 2050*. IRENA.
- International Renewable Energy Agency. (2021). *World energy transitions outlook*. IRENA.
- International Renewable Energy Agency. (2024a). *Energy taxonomy: Classifications for the energy transition*. IRENA.
- International Renewable Energy Agency. (2024b). *Renewable capacity statistics 2024*. IRENA.
- Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Bauer, Z. A. F., Goodman, S. C., Chapman, W. E., Cameron, M. A., et al. (2017). 100% clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world. *Joule*, 1(1), 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.005>
- Jaramillo, M., Carrión, D., Muñoz, J., & Tipán, L. (2025). A bibliometric assessment of AI, IoT, blockchain, and big data in renewable energy-oriented power systems. *Energies*, 18(12), Article 3067. <https://doi.org/10.3390/en18123067>

- Jovanovikj, I., et al. (2024). Battery energy storage systems integration challenges in renewable energy applications. *Journal of Energy Technology*.
- Kavлак, G., McNerney, J., & Trancik, J. E. (2018). Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules. *Energy Policy*, 123, 700–710. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.015>
- Khan, N., Qureshi, M. I., Falahat, M., Sikandar, H., & Sham, R. B. (2025). Navigating the renewable energy transition: A systematic review of economic and policy strategies for grid integration, stability, and viability. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 15(4), 709–723. <https://doi.org/10.32479/ijeep.20348>
- Kumar, A., & Singh, R. (2025). Global renewable energy outlook to 2050: A scenario-based analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 195, 114350. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114350>
- Lazard. (2020). *Levelized cost of energy analysis version 14.0*. Lazard Ltd.
- Lelieveld, J., et al. (2019). Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7192–7197. <https://doi.org/10.1073/pnas.1819989116>
- Malik, F. H., Hussain, G. A., Alsmadi, Y. M. S., Haider, Z. M., Mansoor, W., & Lehtonen, M. (2025). Integrating energy storage technologies with renewable energy sources: A pathway toward sustainable power grids. *Sustainability*, 17(9), Article 4097. <https://doi.org/10.3390/su17094097>
- Orhan, K., et al. (2015). Ocean energy technologies and global potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Palit, D., & Chaurey, A. (2011). Off-grid rural electrification experiences from South Asia: Status and best practices. *Energy for Sustainable Development*, 15(3), 266–276.
- PT PLN (Persero). (2022, 22 April). *Pembangkit hidro jadi andalan RI capai energi bersih, ini strategi PLN* [Siaran

- pers]. <https://web.pln.co.id/cms/media/siaran-pers/2022/04/pembangkit-hidro-jadi-andalan-ri-capai-energi-bersih-ini-strategi-pln/>
- Ramos Farroñán, E. V., Farfán Chilicaus, G. C., Cruz Salinas, L. E., Correa Rojas, L., Chuquitucto Cotrina, L. K., Licapa-Redolfo, G. S., Vera Zelada, P., & Vera Zelada, L. A. (2025). Green finance and the energy transition: A systematic review of economic instruments for renewable energy deployment in emerging economies. *Energies*, 18(17), Article 4560. <https://doi.org/10.3390/en18174560>
- Renewable Energy Indonesia. (2024, 18 September). *Data energi terbarukan*. <https://renewableenergy.id/data-energi-terbarukan/>
- Safitri, A. I., Suprpto, N., Nisa, K., Rofi, M., & Arymbekov, B. (2024). Explore action to enhance net zero emission 2050: Research trends and the way forward 13th SDGs? *E3S Web of Conferences*, 568, 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456801004>
- Schlör, H., Ibrahim, B., Siekmann, F., & Venghaus, S. (2025). Impact of investment subsidy allocation schemes on leveled costs of renewable electricity-water systems in rural West Africa. *Energy Nexus*, 13, 100411. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100411>
- Sovacool, B. K., et al. (2020). Decarbonization and energy security transitions. *Energy Policy*.
- Tackie-Otoo, B. N., Mahmoud, M., & Raza, A. (2025). Renewable energy versus hydrogen energy: Assessing current needs for sustainable energy solutions. *Energy and Fuels*, 39(37), 17730–17762. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5c03207>
- Transitioning to clean energy and opportunities for developing countries. (2025). *Energy Strategy Reviews*, 62, Article 101909. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101909>
- Treasure, L., Sharp, S. P., Smart, S. M., Parker, G., & Armstrong, A. (2025). Global assessment of solar park

impacts on ecosystem services. *Progress in Energy*, 7(3), 032002. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ad9e7d>

World Health Organization. (2021). *Air pollution and health*. WHO.

World Energy Council. (2020). *World energy trilemma index 2020*. WEC.

Profil Penulis



Ir. Agus Sulistiawan, S.Pd., M.T. adalah seorang Dosen, Peneliti, dan Insinyur di bidang Teknik Mesin. Lahir di Bojonegoro pada tanggal 24 September 1991, ia saat ini aktif sebagai Dosen dan Pengusaha

Program Studi S1 Teknik Mesin di Universitas Nahdlatul Ulama (UNU) Sunan Giri, Bojonegoro. Dengan latar belakang pendidikan yang kuat di bidang teknik mesin dan industri, serta pengalaman dalam pengabdian masyarakat, Agus Sulistiawan dikenal sebagai akademisi yang fokus pada pengembangan bahan bakar alternatif, teknologi tepat guna, optimalisasi manufaktur, dan pemberdayaan ekonomi masyarakat berbasis sains .

Riwayat Pendidikan S1 Pendidikan Teknik Mesin, Universitas Negeri Surabaya (UNESA). S2 Magister Teknik Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya (ITATS). Profesi Insinyur Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. S3 (Sedang Berlangsung) Teknik Mesin, Universitas Negeri Malang (UM).

Karier dan Profesi Dosen Tetap Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nahdlatul Ulama Sunan Giri (UNUGIRI), Bojonegoro. Dosen Pengampu Mata Kuliah Mesin Konversi Energi, Energi Terbarukan, Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) serta mata kuliah keahlian teknik mesin lainnya .

Penulis Merupakan Peneliti dan Ketua Tim Pengabdian Masyarakat yang aktif dalam skema hibah nasional. Publikasi dan Karya Ilmiah Penulis telah menghasilkan berbagai publikasi, baik nasional maupun internasional. Beberapa karya utamanya antara lain: Turning of Aluminium 6061 Using Vegetable-Oil-Based Hybrid Cutting Fluids under MQL Conditions (IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya, 2025) - Penelitian tentang

pemesinan ramah lingkungan . Static and dynamic load analysis on the structural strength of energy-efficient vehicle chassis in the prototype category (JTTM, 2025) - Analisis sasis kendaraan hemat energi . Enhancing Stock Portfolio Performance Using Markov-Switching Models and Candlestick Patterns for Long-Term Investment (BAREKENG, 2025) - Aplikasi model matematika di bidang investasi (kolaborasi lintas bidang) . Pelatihan Pembuatan Dan Penggunaan Mesin Pilin Pelepah Pisang Di Desa Pomahan. (Jurnal SOLMA, 2022) - Pengabdian masyarakat terkait mesin tepat guna . Peningkatan Omset Industri Keripik Pisang Cantik Manis Melalui Otomatisasi Mesin Produksi Dan Peningkatan Manajemen Pemasaran (Jurnal Altifani, 2025) .

Hibah dan Penghargaan pada tahun 2021 Penerima Hibah Penelitian Dosen Pemula (PDP) dari Kemenristekdikti dan pada Tahun 2025 Penerima Hibah Pengabdian Pemberdayaan Masyarakat dari Kemenristekdikti (skema kolaborasi UNUGIRI dan Universitas Bojonegoro) dengan capaian peningkatan produksi mitra Aktivitas Akademik Lainnya Presenter Seminar Aktif menjadi presenter di forum seminar nasional maupun internasional untuk memaparkan hasil riset di bidang teknik mesin dan rekayasa industri. Pengabdian Masyarakat Aktif menginisiasi program pemberdayaan berbasis teknologi.