

RUDYCT ACADEMIC SERIES • 2026

Inovasi Teknologi untuk Ekonomi Rendah Karbon

*Dari penemuan menuju difusi, transformasi industri, dan kemakmuran
berkelanjutan*

Oleh

Prof. Ir. Rudy C. Tarumingkeng, PhD

www.rudycr.com/cv.pdf

Bogor, Indonesia • Juli 2026

RUDYCT ACADEMIC SERIES • 2026

INOVASI TEKNOLOGI untuk Ekonomi Rendah Karbon

Dari Penemuan menuju Transformasi Sistem



Rendah Karbon
& Resilien



Produktivitas
Berkelanjutan



Inovasi &
Daya Saing



Kemandirian &
Kapasitas Nasional



Kolaborasi untuk
Masa Depan



Oleh: **Prof. Ir. Rudy C. Tarumingkeng, PhD**

 www.rudycct.com/cv.pdf

Abstrak

Ekonomi rendah karbon memerlukan perubahan mendasar pada cara energi diproduksi, barang dibuat, kota dibangun, manusia bergerak, dan sumber daya digunakan kembali. Artikel ini membahas inovasi teknologi sebagai sistem yang mencakup riset, demonstrasi, pembiayaan, infrastruktur, standar, pasar, keterampilan, dan difusi—bukan sekadar penemuan alat baru. Pembahasan meliputi energi surya, angin, panas bumi, jaringan listrik cerdas, penyimpanan energi, elektrifikasi, kendaraan listrik, hidrogen rendah emisi, bahan bakar berkelanjutan, pompa panas, industri baja dan semen, carbon capture, utilization and storage (CCUS), bioekonomi, ekonomi sirkular, digital twin, Internet of Things, kecerdasan buatan, serta teknologi pengukuran karbon. Analisis menekankan bahwa teknologi tidak netral: manfaat iklim bergantung pada sumber energi, desain sistem, daur hidup material, tata kelola data, biaya, dan distribusi manfaat. Konteks Indonesia dibahas melalui potensi energi terbarukan, geografi kepulauan, sistem kelistrikan, hilirisasi mineral, industri berat, UMKM, serta kebutuhan inovasi yang sesuai kondisi lokal. Keberhasilan transformasi memerlukan portofolio kebijakan: harga karbon, standar kinerja, pengadaan publik, pembiayaan risiko, perlindungan kekayaan intelektual yang seimbang, laboratorium uji, proyek percontohan, dan pengembangan kapasitas domestik. Artikel menyimpulkan bahwa inovasi rendah karbon harus dinilai berdasarkan penurunan emisi absolut, keterjangkauan, ketahanan, penciptaan nilai nasional, dan keadilan transisi. Teknologi menjadi pengungkit kemakmuran ketika terintegrasi dengan perubahan institusi, perilaku, dan model bisnis.

Kata Kunci: inovasi teknologi; ekonomi rendah karbon; energi bersih; elektrifikasi; penyimpanan energi; hidrogen; CCUS; digitalisasi; Indonesia

Pendahuluan: Teknologi sebagai Pengungkit Dekarbonisasi

Perubahan iklim sering dipahami sebagai masalah energi, tetapi pada hakikatnya ia adalah masalah sistem produksi dan konsumsi. Emisi terbentuk dari pembangkit listrik, kendaraan, gedung, industri, pertanian, perubahan penggunaan lahan, dan limbah. Tidak ada satu teknologi yang dapat menggantikan seluruh struktur tersebut. Ekonomi rendah karbon memerlukan portofolio inovasi yang saling terhubung melalui jaringan, infrastruktur, data, pasar, dan institusi.

Inovasi berbeda dari penemuan. Penemuan menghasilkan gagasan atau perangkat baru; inovasi menghasilkan nilai ketika perangkat itu dapat dibuat, dibiayai, dioperasikan, dirawat, diterima pengguna, dan diperluas. Banyak teknologi iklim gagal menembus pasar bukan karena sainsnya buruk, melainkan karena biaya awal tinggi, standar belum tersedia, jaringan tidak siap, risiko proyek sulit dinilai, atau manfaat publik tidak memperoleh imbalan komersial.

Transformasi rendah karbon juga bersifat terarah. Acemoglu dan rekan-rekan menunjukkan bahwa harga, kebijakan, dan pengetahuan memengaruhi arah perubahan teknologi. Jika sistem ekonomi terus memberi keuntungan pada aset beremisi tinggi, riset bersih saja tidak cukup. Sebaliknya, kombinasi harga karbon, standar, investasi publik, infrastruktur, dan permintaan awal dapat mengalihkan kemampuan kewirausahaan menuju teknologi yang lebih produktif dan rendah emisi.

Biaya teknologi terbaru dan baterai telah turun melalui pembelajaran, skala produksi, rantai pasok, dan perbaikan desain. Namun keberhasilan satu teknologi menciptakan kebutuhan inovasi baru: semakin besar surya dan angin, semakin penting transmisi, penyimpanan, respons permintaan, prakiraan, dan tata kelola sistem. Elektrifikasi kendaraan dan industri juga hanya rendah karbon apabila pasokan listriknya semakin bersih dan sumber materialnya dikelola bertanggung jawab.

Bagi Indonesia, pertanyaan pentingnya bukan apakah mengimpor atau membuat semua teknologi sendiri. Strategi yang realistis memilih bidang tempat Indonesia mempunyai kebutuhan besar, sumber daya, kemampuan industri, pasar domestik, dan peluang belajar. Kapasitas nasional dapat dibangun melalui adaptasi, rekayasa, integrasi sistem, manufaktur selektif, perangkat lunak, layanan pemeliharaan, standar, dan riset yang terhubung dengan masalah nyata.

1. Ekonomi Rendah Karbon dan Perubahan Sistem

Ekonomi rendah karbon bertujuan meningkatkan kesejahteraan sambil menurunkan emisi absolut hingga sesuai jalur iklim. Dekarbonisasi bukan hanya mengganti bahan bakar, tetapi merancang ulang sistem agar membutuhkan lebih sedikit energi dan material. Urutannya mencakup menghindari kebutuhan yang tidak produktif, meningkatkan efisiensi, mengalihkan ke listrik serta energi bersih, mengganti proses, dan menangani emisi residu yang benar-benar sulit dieliminasi.

Secara mekanistik, produk domestik bruto mencatat arus produksi tetapi tidak otomatis mengurangi depresiasi hutan, tanah, air, mineral, kesehatan, atau kohesi sosial. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika negara dapat tampak tumbuh ketika membatasi aset alam, sementara neraca kekayaan produktif dan kapasitas perlindungan bencananya justru menyusut. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, Indonesia memerlukan dashboard yang menggabungkan pendapatan, kualitas pekerjaan, kemiskinan multidimensi, emisi, tutupan ekosistem, kualitas air, kesehatan tanah, dan ketimpangan wilayah. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: anggaran dan rencana pembangunan harus diuji terhadap perubahan modal produksi, manusia, sosial, dan alam, sehingga pertumbuhan dinilai dari mutu serta daya tahannya. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

2. Dari Penemuan menuju Difusi Teknologi

Perjalanan teknologi melewati riset dasar, prototipe, demonstrasi, proyek pertama, komersialisasi, dan difusi massal. Risiko berubah di setiap tahap. Penelitian memerlukan hibah dan kebebasan eksplorasi; demonstrasi memerlukan fasilitas uji; proyek pertama membutuhkan pembagian risiko; sedangkan difusi memerlukan standar, pembiayaan murah, tenaga terampil, dan rantai pasok. Kebijakan yang hanya membiayai penelitian sering meninggalkan inovasi di lembah kematian.

Secara mekanistik, hukum termodinamika menjelaskan mengapa ekonomi sirkular mengurangi kebutuhan bahan baku tetapi tidak pernah menghapus kebutuhan energi, material baru, dan tempat bagi residu. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika narasi sirkularitas seratus persen dapat menciptakan ilusi bahwa konsumsi material terus bertambah tanpa konsekuensi biofisik. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, bagi kepulauan Indonesia, keterhubungan darat-laut berarti sedimentasi, pupuk, plastik, dan limbah tambang di hulu akhirnya memengaruhi perikanan serta pariwisata pesisir. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: kebijakan industri harus memakai analisis siklus hidup dan neraca material agar pengurangan dampak pada satu tahap tidak sekadar memindahkannya ke wilayah atau tahap lain. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat

bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

3. Ekosistem Inovasi dan Arah Perubahan Teknologi

Ekosistem inovasi terdiri atas universitas, laboratorium, perusahaan, investor, pemerintah, pengguna, komunitas, dan lembaga standardisasi. Kinerja ditentukan bukan hanya oleh kualitas tiap aktor, tetapi oleh arus pengetahuan dan kepercayaan di antara mereka. Kebijakan misi memberi arah pada masalah publik—misalnya listrik kepulauan rendah karbon—tanpa menentukan terlalu dini satu pemenang teknologi. Portofolio dan pembelajaran lebih aman daripada taruhan tunggal.

Secara mekanistik, batas bukan ramalan titik kehancuran yang presisi, melainkan zona kehati-hatian ketika risiko perubahan nonlinier, umpan balik, dan kejutan meningkat. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika ketidakpastian sering dipakai untuk menunda tindakan, padahal ketidakpastian yang menyangkut kerugian besar dan sulit dipulihkan justru memperkuat alasan untuk berhati-hati. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, Indonesia mengalami interaksi batas melalui kebakaran gambut, kekeringan, banjir, gelombang panas laut, hilangnya habitat, serta tekanan nitrogen dan fosfor. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: target nasional perlu diturunkan menjadi anggaran karbon, air, lahan, dan pencemaran yang konsisten dengan karakter ekologis provinsi serta daerah aliran sungai. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

4. Efisiensi Energi sebagai Teknologi Pertama

Energi termurah dan terbersih sering kali adalah energi yang tidak perlu digunakan. Motor efisien, variable speed drive, insulasi, pendingin berkinerja tinggi, manajemen energi, pemulihan panas, dan desain proses dapat menurunkan kebutuhan sebelum kapasitas baru dibangun. Efisiensi juga memperkecil ukuran panel surya, baterai, jaringan, dan pembangkit yang dibutuhkan. Hambatan utamanya mencakup biaya awal, informasi, insentif terpisah, dan kurangnya layanan audit.

Secara mekanistik, nilai jasa ekosistem terlihat dalam pengurangan banjir, penyimpanan karbon, pemurnian air, perlindungan pantai, pembentukan tanah, dan reproduksi sumber daya hayati. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika monetisasi yang ceroboh dapat menyiratkan bahwa semua fungsi ekologis dapat diganti dengan uang atau teknologi, meskipun sebagian bersifat kritis dan tidak tersubstitusi. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, mangrove Indonesia memberi contoh aset yang mendukung perikanan, melindungi permukiman, menyimpan karbon, serta memelihara identitas dan mata pencaharian lokal. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: akuntansi modal alam harus menjadi alat keputusan bersama indikator biofisik dan ambang ekologis, bukan tiket untuk memperjualbelikan setiap unsur kehidupan. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

5. Revolusi Energi Surya dan Angin

Surya fotovoltaik dan angin mengubah ekonomi pembangkitan melalui modularitas, waktu konstruksi singkat, dan biaya operasi rendah. Inovasi meliputi material sel, inverter, turbin, prakiraan, operasi, serta integrasi. Indonesia memiliki peluang pada surya atap, utilitas, terapung, dan sistem hibrida.

Namun pengadaan lahan, perizinan, kepastian pembelian, kandungan lokal, kualitas instalasi, serta kesiapan jaringan menentukan apakah potensi teknis berubah menjadi listrik andal.

Secara mekanistik, pajak pencemaran, perdagangan emisi, tanggung jawab produsen, standar teknologi, dan kewajiban pemulihan berusaha memasukkan biaya sosial ke dalam keputusan. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika harga karbon yang berdiri sendiri dapat regresif, mudah dihindari, atau terlalu lemah ketika infrastruktur bersih dan pilihan transportasi belum tersedia. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, subsidi energi, izin lahan, dan biaya pemulihan tambang di Indonesia menunjukkan bahwa distorsi fiskal dan lemahnya jaminan reklamasi dapat mensosialisasikan kerugian privat. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: paket kebijakan harus menggabungkan harga, regulasi, investasi publik, informasi, penegakan hukum, serta kompensasi yang transparan kepada rumah tangga rentan. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

6. Panas Bumi, Hidro, dan Energi Kontekstual Indonesia

Panas bumi menyediakan daya stabil dengan emisi rendah, tetapi membutuhkan eksplorasi mahal dan pengelolaan risiko geologi. Hidro dapat memberi energi serta fleksibilitas, namun dampak sosial-ekologis harus dinilai pada skala DAS. Bioenergi hanya kredibel bila tidak mendorong deforestasi atau bersaing dengan pangan. Teknologi terbaik bergantung pada lokasi; negara kepulauan memerlukan kombinasi berbeda antara jaringan besar, microgrid, surya, penyimpanan, dan sumber lokal.

Secara mekanistik, perizinan dan penetapan nilai ekonomi dipengaruhi oleh hak kepemilikan, akses informasi, kekuatan tawar, dan siapa yang diakui sebagai pemilik pengetahuan. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat

meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika kebijakan hijau dapat kehilangan legitimasi apabila manfaatnya terkonsentrasi pada investor, sementara biaya lahan, tarif, atau kehilangan pekerjaan dibebankan kepada komunitas. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, konflik di sekitar hutan, perkebunan, tambang, dan pesisir Indonesia memperlihatkan pentingnya pengakuan tenurial, persetujuan bebas-didahulukan-diinformasikan, serta mekanisme keluhan. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: keadilan prosedural, distributif, pengakuan, dan antargenerasi harus menjadi kriteria eksplisit dalam analisis manfaat-biaya serta evaluasi proyek. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

7. Jaringan Cerdas dan Digitalisasi Sistem Listrik

Jaringan cerdas menghubungkan sensor, komunikasi, otomasi, prakiraan, dan kendali agar pasokan variabel dapat diseimbangkan. Advanced metering, demand response, dynamic line rating, dan distributed energy resource management meningkatkan pemanfaatan aset. Nilainya baru muncul jika aturan pasar memberi imbalan pada fleksibilitas. Keamanan siber, interoperabilitas, privasi, dan keandalan komunikasi harus dirancang sejak awal karena sistem digital memperluas permukaan risiko.

Secara mekanistik, inovasi, elektrifikasi, efisiensi, dan perubahan struktur ekonomi memungkinkan penurunan intensitas dampak, tetapi hasil absolut bergantung pada skala produksi dan pola konsumsi. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika efisiensi yang menurunkan biaya dapat menaikkan permintaan sehingga sebagian penghematan hilang melalui efek rebound. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, bagi Indonesia yang masih harus menghapus kemiskinan, agenda kecukupan bukan penghematan seragam, melainkan perluasan layanan dasar sambil membatasi konsumsi mewah berjejak tinggi. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: kebijakan perlu membedakan pertumbuhan yang perlu—kesehatan, pendidikan, sanitasi, energi bersih—dari ekspansi yang terutama memperbesar throughput dan ketimpangan. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

8. Penyimpanan Energi dan Fleksibilitas

Penyimpanan memindahkan energi melintasi waktu dan menyediakan layanan cepat bagi jaringan. Baterai lithium-ion unggul untuk banyak kebutuhan jam-ke-jam, sedangkan pumped hydro, penyimpanan termal, compressed air, flow battery, dan hidrogen menawarkan karakter berbeda. Pemilihan teknologi harus mengikuti durasi, siklus, lokasi, keselamatan, biaya sistem, dan daur hidup. Penyimpanan bukan pengganti transmisi, efisiensi, dan respons permintaan, melainkan bagian portofolio fleksibilitas.

Secara mekanistik, hierarki sirkular menempatkan pencegahan dan pengurangan material di atas daur ulang karena setiap putaran menuntut energi dan mengalami kehilangan kualitas. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika program yang hanya meningkatkan pengumpulan sampah tanpa mengubah desain produk dan model bisnis dapat mempertahankan budaya sekali pakai. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku

tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, Indonesia dapat mengembangkan ekosistem reparasi elektronik, kemasan guna ulang, simbiosis industri, kompos organik, dan pasar material sekunder yang melindungi pekerja informal. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang bertentangan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: tanggung jawab produsen yang diperluas perlu disertai target desain, transparansi aliran bahan, standar kandungan daur ulang, dan pengadaan pemerintah yang menciptakan permintaan. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

9. Elektrifikasi Transportasi

Kendaraan listrik mengubah energi transportasi, mengurangi polusi lokal, dan dapat terhubung dengan jaringan melalui pengisian cerdas. Manfaat iklimnya dipengaruhi bauran listrik, ukuran kendaraan, pola pemakaian, baterai, dan pergantian moda. Strategi tidak boleh hanya mengganti setiap mobil bermesin bakar dengan mobil listrik. Transportasi publik, berjalan kaki, bersepeda, tata ruang, logistik efisien, dan elektrifikasi armada intensif sering memberi manfaat yang lebih besar.

Secara mekanistik, sensor memungkinkan irigasi berbasis kebutuhan, jaringan listrik cerdas menyeimbangkan energi terbarukan, dan ketertelusuran membantu memeriksa asal komoditas. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika pusat data, perangkat keras, mineral, energi, dan e-waste menunjukkan bahwa digitalisasi sendiri bukan aktivitas tanpa jejak. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, di Indonesia, pemantauan satelit dapat mendeteksi kebakaran dan perubahan tutupan lahan, tetapi tindak lanjut tetap memerlukan kewenangan, anggaran, dan perlindungan pelapor. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat

menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: setiap inovasi harus dinilai berdasarkan dampak bersih sepanjang siklus hidup, tambahan konsumsi yang dipicu, akses kelompok kecil, serta kemampuan audit publik. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

10. Bangunan Rendah Karbon dan Pompa Panas

Bangunan mengunci kebutuhan energi selama puluhan tahun. Desain pasif, orientasi, ventilasi, material rendah karbon, peralatan efisien, kontrol pintar, dan energi terbarukan mengurangi beban. Pompa panas memindahkan panas dan dapat menghasilkan beberapa unit panas untuk setiap unit listrik, tetapi kinerja bergantung iklim, refrigeran, kualitas instalasi, dan jaringan. Di Indonesia, efisiensi pendinginan dan desain tropis merupakan peluang inovasi besar.

Secara mekanistik, transisi membutuhkan kombinasi penghematan energi, efisiensi, elektrifikasi, energi terbarukan, penyimpanan, jaringan, dan penghentian bertahap aset fosil. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika penutupan batubara tanpa strategi wilayah dapat menghancurkan basis pajak dan pekerjaan, sedangkan pembangunan energi terbarukan tanpa konsultasi dapat menimbulkan konflik lahan baru. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, Indonesia perlu menyelaraskan pensiun dini pembangkit, reformasi subsidi, penguatan jaringan antarpulau, panas bumi yang berhati-hati, tenaga surya, dan pengembangan keterampilan. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: dana transisi harus mendukung pekerja, UMKM, pemerintah daerah, reklamasi, dan diversifikasi ekonomi, bukan hanya mengganti teknologi pembangkitan. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

11. Hidrogen Rendah Emisi dan Power-to-X

Hidrogen dapat membantu sektor yang sulit dielektrifikasi, seperti pupuk, baja tertentu, pelayaran, atau penyimpanan musiman. Akan tetapi, hidrogen bukan sumber energi primer; produksinya membutuhkan listrik atau bahan bakar dan menimbulkan kehilangan konversi. Warna tidak cukup sebagai bukti. Penilaian harus melihat intensitas emisi aktual, kebocoran, air, tambahan energi terbarukan, transportasi, dan penggunaan akhir. Prioritasnya adalah aplikasi bernilai tinggi tanpa alternatif lebih efisien.

Secara mekanistik, pendekatan lanskap menghubungkan kawasan lindung, produksi, permukiman, koridor satwa, dan daerah aliran sungai dalam satu sistem keputusan. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika penanaman pohon monokultur tidak setara dengan pemulihan hutan alami, dan klaim net-zero tidak boleh menyamarkan kerusakan ekosistem bernilai tinggi. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, pengalaman Indonesia menunjukkan bahwa moratorium, restorasi gambut, perhutanan sosial, sertifikasi, dan penegakan dapat menurunkan tekanan jika hak serta insentif selaras. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: prioritas kebijakan ialah mencegah kehilangan hutan primer, menyelesaikan tenurial, meningkatkan produktivitas lahan yang ada, dan membayar hasil ekologis yang terukur. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat

bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

12. Bahan Bakar Berkelanjutan untuk Sektor Sulit

Penerbangan dan pelayaran memerlukan kepadatan energi tinggi. Sustainable aviation fuel, e-fuel, metanol, amonia, dan biofuel lanjut menawarkan jalur, tetapi ketersediaan bahan baku, tambahan listrik bersih, biaya, keselamatan, dan dampak daur hidup membatasi skala. Kebijakan harus mencegah penghitungan ganda serta klaim bahan baku. Efisiensi operasional, desain kendaraan, manajemen permintaan, dan perubahan logistik tetap diperlukan karena bahan bakar bersih tidak tak terbatas.

Secara mekanistik, agroforestri, diversifikasi, pengelolaan hara presisi, perlindungan penyerbuk, dan pengurangan kehilangan pangan dapat meningkatkan resiliensi sekaligus produksi. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika intensifikasi yang bergantung pada input berlebih dapat meningkatkan hasil jangka pendek namun merusak struktur tanah, kualitas air, dan kemampuan menghadapi kekeringan. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, Indonesia perlu mengurangi ketergantungan pada perluasan lahan, memperkuat penyuluhan, benih lokal, irigasi adaptif, logistik dingin, dan pasar yang adil bagi petani kecil. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: kebijakan pangan harus mengukur kualitas gizi, pendapatan produsen, kesehatan tanah, air, emisi, serta kehilangan pangan—bukan hanya tonase komoditas. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

13. Dekarbonisasi Industri Baja, Semen, dan Kimia

Industri berat menghasilkan emisi dari energi dan reaksi proses. Baja dapat beralih melalui efisiensi material, scrap, electric arc furnace, dan direct reduced iron berbasis hidrogen. Semen membutuhkan substitusi klinker, bahan pengikat baru, desain hemat material, serta CCUS untuk emisi residu. Industri kimia membutuhkan listrik bersih, hidrogen, circular feedstock, dan optimasi proses. Infrastruktur bersama dan permintaan produk hijau membantu proyek pertama mencapai skala.

Secara mekanistik, perikanan berbasis sains, kawasan konservasi efektif, mangrove, pengendalian limbah darat, dan pariwisata terbatas daya dukung saling memperkuat. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika label biru dapat menjadi greenwashing ketika reklamasi, ekstraksi pasir, budidaya intensif, atau pariwisata massal mengabaikan dampak kumulatif. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, sebagai negara kepulauan, Indonesia memerlukan data stok ikan, pengawasan kapal, perlindungan nelayan kecil, sanitasi pesisir, dan konektivitas rantai dingin. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: perencanaan ruang laut harus transparan, mengakui wilayah kelola tradisional, dan menjaga zona penting untuk pemijahan, perlindungan pantai, serta adaptasi kenaikan muka laut. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

14. CCUS: Potensi, Batas, dan Tata Kelola

CCUS menangkap karbon dari sumber besar atau udara, kemudian memanfaatkan atau menyimpannya secara geologis. Teknologi ini relevan bagi emisi proses tertentu dan mungkin sebagian aset eksisting, tetapi menambah energi, biaya, infrastruktur, dan tanggung jawab jangka panjang. CCUS tidak boleh menjadi alasan menunda teknologi yang lebih sederhana. Keberhasilan memerlukan

sumber terkonsentrasi, penyimpanan terbukti, jaringan CO₂, monitoring, aturan kebocoran, dan pembagian liabilitas.

Secara mekanistik, hilirisasi mampu meningkatkan nilai tambah, pembelajaran teknologi, ekspor, dan pekerjaan jika keterkaitan domestik serta standar lingkungan berkembang. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika penggunaan listrik berbasis batubara, tailing, deforestasi, kebutuhan air, keselamatan kerja, dan konflik sosial dapat mengurangi legitimasi manfaat industri baterai. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, kasus nikel Indonesia menuntut transparansi rantai pasok, batas kawasan terlarang, energi rendah karbon, pengelolaan residu, jaminan pemulihan, dan pembagian manfaat lokal. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: strategi industri harus bergerak dari ekspor volume menuju produktivitas, riset, daur ulang baterai, keterampilan, dan standar jejak lingkungan yang dapat diverifikasi. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

15. Bioekonomi, Bioteknologi, dan Solusi Berbasis Alam

Bioteknologi dapat menghasilkan enzim, material, bahan kimia, pangan alternatif, dan proses yang bekerja pada suhu lebih rendah. Bioekonomi Indonesia mempunyai basis biodiversitas dan residu pertanian, tetapi harus menghindari ekspansi lahan, eksploitasi genetik, dan klaim karbon berlebihan. Solusi berbasis alam bukan teknologi mekanis, namun inovasi monitoring, pembiayaan, dan tata kelola dapat meningkatkan restorasi. Integritas ekologis harus menjadi tujuan, bukan sekadar ton karbon.

Secara mekanistik, kepadatan yang terencana, angkutan umum, bangunan efisien, ruang hijau-biru, pengelolaan air, dan perumahan terjangkau menghasilkan manfaat ganda. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat

meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika jalan baru yang memicu perjalanan tambahan dan pembangunan di dataran banjir dapat mengunci emisi serta biaya bencana selama puluhan tahun. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, kota-kota Indonesia memerlukan integrasi tata ruang dengan transportasi, perlindungan daerah resapan, sistem sampah dari sumber, dan peningkatan kampung tanpa penggusuran. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: uji ketahanan iklim dan karbon terkandung harus diwajibkan sebelum infrastruktur disetujui, termasuk skenario operasi, pemeliharaan, dan penghentian aset. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

16. Ekonomi Sirkular dan Teknologi Material

Teknologi material rendah karbon mencakup desain ringan dan tahan lama, substitusi aman, daur ulang bermutu tinggi, remanufaktur, serta pelacakan komposisi. Digital product passport dan sensor dapat mendukung pemulihan, tetapi desain produk menentukan apakah material dapat dibongkar. Circularity tidak otomatis rendah karbon jika pengumpulan atau pemrosesan sangat intensif energi. Prioritas tetap mengurangi kebutuhan material dan mempertahankan nilai produk selama mungkin.

Secara mekanistik, taksonomi, obligasi hijau, pembiayaan campuran, jaminan risiko, dan pengungkapan dapat mengarahkan modal ketika kriteria teknis serta verifikasi kuat. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika risiko greenwashing meningkat apabila indikator hanya mengukur dana tersalur, bukan emisi yang dihindari, ekosistem dipulihkan, atau kelompok yang menerima manfaat. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan

pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, Indonesia dapat memanfaatkan APBN, perbankan, pasar modal, dana desa, pembiayaan syariah, dan dana internasional untuk proyek yang siap serta berintegritas. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: setiap instrumen perlu menyatakan baseline, additionality, risiko kebocoran, permanensi, perlindungan sosial, dan mekanisme koreksi bila hasil tidak tercapai. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

17. IoT, Digital Twin, dan Kecerdasan Buatan

IoT menyediakan data real-time; digital twin merepresentasikan aset atau sistem; AI menemukan pola, memprediksi kegagalan, mengoptimalkan jadwal, dan membantu desain. Aplikasi dapat mengurangi energi, kemacetan, kebocoran, dan limbah. Namun pusat data, perangkat, serta pelatihan model juga membutuhkan energi dan material. Manfaat bersih harus diukur terhadap baseline. Tata kelola data, keamanan, interoperabilitas, kualitas sensor, dan kemampuan operator menentukan hasil.

Secara mekanistik, strategi berkelanjutan mengintegrasikan risiko alam ke desain produk, investasi, pengadaan, remunerasi, serta pengelolaan pemasok. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika laporan keberlanjutan dapat menjadi ritual komunikasi bila target bersifat relatif, ruang lingkup sempit, data pemasok diabaikan, atau kompensasi menggantikan pengurangan nyata. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, perusahaan Indonesia perlu memetakan ketergantungan dan dampak, menetapkan target berbasis sains, membuka data material, dan memperkuat uji tuntas hak asasi. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: dewan direksi harus mengawasi risiko iklim dan alam sebagai risiko strategis, sementara insentif eksekutif dikaitkan dengan hasil absolut dan audit independen. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

18. Pengukuran, Pelaporan, dan Verifikasi Digital

Dekarbonisasi memerlukan bukti. Smart meter, sensor emisi kontinu, citra satelit, remote sensing, dan platform data dapat meningkatkan measurement, reporting, and verification. Sistem yang baik menyimpan definisi, batas, faktor emisi, ketidakpastian, serta jejak audit. Blockchain hanya berguna bila ada masalah koordinasi dan integritas catatan; ia tidak membuat data awal menjadi benar. Teknologi MRV harus melayani keputusan operasional dan akuntabilitas, bukan sekadar laporan.

Secara mekanistik, kualitas kebijakan bergantung pada konsistensi perencanaan, data lintas lembaga, kapasitas daerah, pengadaan, pengawasan, pengadilan, dan sanksi yang kredibel. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika regulasi yang tumpang tindih atau berubah tanpa transisi dapat menciptakan ketidakpastian, sedangkan deregulasi berlebihan memindahkan biaya kepada publik. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, desentralisasi Indonesia membuka ruang inovasi tetapi juga menghasilkan variasi kapasitas, insentif pendapatan ekstraktif, dan masalah lintas batas administratif. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi

kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: penguatan institusi harus mencakup satu peta yang dapat diaudit, perizinan berbasis daya dukung, anggaran ekologis daerah, keterbukaan pemilik manfaat, dan pengawasan warga. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

19. Dampak Daur Hidup dan Risiko Rebound

Teknologi bersih memiliki jejak dari tambang, manufaktur, penggunaan, hingga akhir masa pakai. Life-cycle assessment mencegah pemindahan emisi atau toksisitas antar tahap. Efisiensi juga dapat menimbulkan rebound ketika biaya penggunaan turun dan konsumsi meningkat. Karena itu, indikator intensitas perlu dilengkapi emisi absolut, kebijakan permintaan, dan batas sistem. Solusi digital atau elektrifikasi hanya disebut rendah karbon jika dibandingkan secara konsisten dengan alternatifnya.

Secara mekanistik, partisipasi meningkatkan kualitas data, mengungkap dampak tersembunyi, membangun rasa memiliki, dan memungkinkan penyesuaian kebijakan. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika konsultasi yang dilakukan setelah keputusan utama dibuat hanya memberi legitimasi semu dan memperbesar ketidakpercayaan. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, praktik mapalus, sasi, subak, hutan adat, dan bentuk kelola komunal lain di Indonesia menunjukkan bahwa norma sosial dapat menopang aksi kolektif. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: pemerintah dan perusahaan perlu menyediakan informasi yang dapat dipahami, waktu yang memadai, dukungan ahli independen, serta hak masyarakat untuk memengaruhi keputusan. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan

tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

20. Pekerjaan, Keterampilan, dan Transisi Teknologi

Inovasi menciptakan pekerjaan baru sekaligus mengubah atau menghilangkan pekerjaan lama. Kebutuhan mencakup teknisi surya, operator jaringan digital, ahli baterai, auditor energi, ilmuwan data, geolog penyimpanan karbon, dan pekerja manufaktur presisi. Pendidikan vokasi harus terhubung dengan proyek nyata dan sertifikasi kompetensi. Transisi adil menyediakan reskilling, perlindungan sosial, mobilitas, serta diversifikasi ekonomi bagi wilayah yang bergantung pada aset beremisi tinggi.

Secara mekanistik, literasi ekologis menghubungkan pilihan sehari-hari dengan rantai pasok, energi, pangan, air, kesehatan, dan keadilan. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika kampanye moral yang menyalahkan individu tidak memadai ketika pilihan bersih mahal, transportasi publik buruk, atau produk dirancang cepat rusak. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, perguruan tinggi Indonesia dapat menjadikan kampus laboratorium hidup bagi energi, sampah, pangan, biodiversitas, pengadaan, dan inovasi sosial. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: kurikulum manajemen perlu memasukkan ekonomi ekologi, analisis siklus hidup, etika, skenario, sistem kompleks, dan kepemimpinan transisi. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

21. Pembiayaan Inovasi dan Lembah Kematian

Teknologi iklim sering membutuhkan modal besar, waktu panjang, dan aset fisik, sehingga tidak cocok dengan semua model modal ventura. Hibah, pinjaman lunak, jaminan, blended finance, kontrak pembelian, contracts for difference, dan pembiayaan proyek mengisi tahap berbeda. Pemerintah perlu berbagi risiko awal tanpa mensosialisasikan kerugian dan memprivatisasi seluruh keuntungan. Kriteria penghentian penting agar portofolio belajar dari kegagalan.

Secara mekanistik, penginderaan jauh, sensor, statistik, audit warga, dan pelaporan korporasi dapat membangun gambaran terpadu tentang perubahan aset serta aliran pencemaran. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika data agregat nasional dapat menyembunyikan hotspot lokal, ketimpangan paparan, atau kerusakan yang tak dapat dipulihkan. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, Indonesia memerlukan interoperabilitas data lahan, izin, emisi, air, biodiversitas, kesehatan, dan belanja publik dengan perlindungan privasi yang tepat. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: dashboard publik harus menampilkan hasil absolut, ketidakpastian, distribusi, dan kemajuan terhadap ambang, serta menyediakan jalur koreksi ketika target meleset. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

22. Kebijakan Misi dan Pengadaan Publik

Negara dapat membentuk pasar melalui misi terukur, standar kinerja, regulasi, dan pengadaan. Permintaan awal untuk baja hijau, semen rendah karbon, bus listrik, pendingin efisien, dan energi bersih memberi kepastian bagi investasi. Kebijakan harus netral terhadap banyak jalur yang memenuhi hasil, tetapi tidak netral terhadap emisi. Eksperimen, evaluasi, transparansi biaya, dan persaingan mencegah misi berubah menjadi perlindungan permanen bagi teknologi yang tidak berkembang.

Secara mekanistik, urutan kebijakan dimulai dari menghapus insentif merusak, melindungi aset kritis, membangun alternatif, lalu menaikkan standar sejalan dengan kapasitas. Konsekuensinya, analisis kebijakan harus mengikuti stok dan aliran sekaligus. Arus pendapatan pada satu tahun dapat meningkat, tetapi stok aset yang menopang pendapatan berikutnya mungkin turun. Perspektif ini mengubah pertanyaan manajerial dari “berapa besar hasil sekarang?” menjadi “hasil apa, bagi siapa, dengan risiko apa, dan apakah kapasitas menghasilkan kesejahteraan masih tersedia sesudahnya?”

Masalah utama muncul ketika daftar proyek hijau tanpa perubahan fiskal, tata ruang, dan penegakan akan menghasilkan pulau-pulau perbaikan di tengah sistem yang tetap ekstraktif. Di sinilah pendekatan kehati-hatian relevan. Ia bukan penolakan terhadap inovasi, melainkan aturan pengambilan keputusan ketika dampak berpotensi besar, tidak pasti, saling berhubungan, atau tidak dapat dipulihkan. Beban pembuktian seharusnya meningkat seiring besarnya risiko, sehingga pelaku tidak cukup menunjukkan kepatuhan dokumen; mereka juga harus menunjukkan hasil ekologis dan sosial yang terukur.

Dalam konteks nasional, Indonesia memiliki peluang menyatukan restorasi alam, industrialisasi rendah karbon, pekerjaan bermutu, ketahanan pangan, ekonomi biru, dan inovasi digital. Kasus Indonesia mengingatkan bahwa kebijakan yang sama dapat menghasilkan akibat berbeda antarwilayah. Pulau kecil, daerah gambut, kawasan karst, kota pesisir, dan hulu daerah aliran sungai mempunyai ambang serta fungsi ekologis yang berlainan. Karena itu, standar nasional perlu memberi kepastian minimum, sementara desain implementasi harus peka terhadap ekologi lokal, mata pencaharian, kapasitas pemerintah daerah, dan pengetahuan masyarakat.

Arah tindakan yang lebih kokoh ialah: peta jalan perlu memiliki target 2030 dan 2045, penanggung jawab, anggaran, indikator hasil, forum sosial, evaluasi independen, serta mekanisme belajar adaptif. Rekomendasi tersebut memerlukan koordinasi antara negara, bisnis, perguruan tinggi, komunitas, dan konsumen. Pembagian peran harus jelas: pemerintah menetapkan tujuan dan pagar pengaman; bisnis berinovasi serta menanggung biaya dampaknya; lembaga pengetahuan memperkuat bukti; masyarakat ikut menentukan dan mengawasi; sedangkan mekanisme pembiayaan memberi penghargaan kepada hasil, bukan sekadar aktivitas.

23. Strategi Inovasi Rendah Karbon Indonesia

Indonesia memerlukan strategi yang menghubungkan kebutuhan nasional dengan kemampuan yang dapat dibangun. Prioritas mencakup surya tropis, microgrid kepulauan, panas bumi, baterai dan daur ulang, efisiensi pendinginan, kendaraan publik listrik, industri mineral rendah karbon, MRV lahan, dan bioekonomi. Kebijakan kandungan lokal harus berorientasi pembelajaran, mutu, ekspor, dan produktivitas—bukan hanya perakitan. Kolaborasi internasional perlu menghasilkan transfer pengetahuan nyata.

Tetapkan kesejahteraan inklusif dan ketahanan sosial-ekologis sebagai sasaran tingkat tertinggi. PDB tetap berguna untuk membaca aktivitas, tetapi harus didampingi neraca kekayaan, indikator distribusi, kesehatan, emisi, material, biodiversitas, dan kualitas ekosistem. Setiap kementerian dan daerah perlu melihat hubungan antara keluaran sektoral dan perubahan aset bersama.

23.2 Pagar pengaman ekologis

Identifikasi ekosistem kritis, ambang pencemaran, anggaran karbon, daya dukung air, dan zona yang tidak layak dikonversi. Pagar pengaman membatasi pilihan yang berisiko tidak dapat dipulihkan, sementara instrumen ekonomi bekerja di dalam ruang yang masih dapat dinegosiasikan. Pendekatan ini mencegah harga dipakai untuk membenarkan kehancuran aset yang tidak tergantikan.

23.3 Reformasi insentif

Petakan subsidi, keringanan, kredit, pengadaan, dan pendapatan daerah yang mendorong ekstraksi berlebih. Reformasi dilakukan bertahap dengan perlindungan rumah tangga miskin, bantuan penyesuaian bagi pekerja, dan investasi alternatif. Penerimaan dari pajak lingkungan sebaiknya transparan serta dikembalikan untuk transisi, layanan dasar, dan pemulihan.

23.4 Investasi transformatif

Prioritaskan jaringan listrik, transportasi umum, efisiensi bangunan, restorasi ekosistem, sanitasi, riset, pendidikan, dan infrastruktur data. Penilaian proyek harus mencakup biaya operasi, risiko iklim, karbon terkandung, kehilangan biodiversitas, pilihan penghentian aset, dan manfaat distribusional. Proyek yang tampak murah dapat menjadi mahal ketika eksternalitas dan lock-in dihitung.

23.5 Tata kelola adaptif

Gunakan siklus menetapkan target, bertindak, mengukur, mengevaluasi, dan mengoreksi. Ketidakpastian tidak diatasi dengan rencana kaku, tetapi dengan pemantauan dini, eksperimen bertanggung jawab, batas penghentian, dan pembelajaran lintas daerah. Transparansi membuat koreksi menjadi tanda kapasitas, bukan pengakuan kegagalan.

24. Skenario Naratif: Ekosistem Teknologi Indonesia 2045

Pada 2045, laboratorium dan politeknik Indonesia terhubung dengan kawasan industri serta kebutuhan daerah. Microgrid andal melayani pulau kecil, kendaraan publik bersih mendominasi kota, industri memakai listrik rendah karbon, dan material baterai kembali melalui sistem sirkular. Data emisi dapat diverifikasi, perusahaan rintisan mengeksplor solusi tropis, dan pekerja lama memperoleh jalur kompetensi baru. Keunggulan lahir bukan dari satu teknologi, melainkan kemampuan belajar sebagai sistem.

Tahap pertama melindungi daerah resapan, memperbaiki izin bermasalah, memulihkan sempadan sungai, dan memberi kepastian hak kelola. Pada saat yang sama, belanja publik dialihkan ke transportasi, energi surya untuk fasilitas umum, pengolahan organik, penyuluhan agroforestri, dan inkubator reparasi. Bank pembangunan daerah memberi kredit berbasis kinerja kepada koperasi dan UMKM. Sekolah kejuruan menyiapkan teknisi energi, pengolahan pangan, pemetaan, dan pemeliharaan mesin. Pendapatan tidak lagi bergantung sepenuhnya pada penjualan bahan mentah.

Pada 2035, pertumbuhan kabupaten mungkin tidak selalu menjadi yang tertinggi menurut PDRB, tetapi kualitasnya berubah. Kerugian banjir turun; pengeluaran kesehatan akibat polusi berkurang; produktivitas air membaik; usaha lokal tumbuh; perempuan dan pemuda lebih terlibat; serta

pendapatan petani lebih stabil karena diversifikasi. Pemerintah menerbitkan dashboard yang memperlihatkan juga kegagalan, termasuk lokasi kualitas air yang belum pulih. Warga dapat mengajukan koreksi anggaran berdasarkan data tersebut.

Pada 2045, kemakmuran kabupaten tampak sebagai portofolio kemampuan: ekosistem yang menjaga produksi, penduduk sehat dan terampil, bisnis yang beradaptasi, infrastruktur rendah karbon, institusi terpercaya, serta ruang budaya yang hidup. Narasi ini bukan utopia tanpa konflik. Perubahan harga, cuaca ekstrem, dan kepentingan politik tetap ada. Perbedaannya ialah kabupaten memiliki aset, data, forum, dan aturan yang memungkinkan guncangan dihadapi tanpa mengorbankan kelompok terlemah atau menjual masa depan.

25. Sepuluh Agenda Inovasi 2026–2035

Membangun portofolio misi teknologi: Tetapkan masalah prioritas, target kinerja, horizon waktu, anggaran, eksperimen, serta aturan penghentian yang transparan.

Memperkuat riset hingga demonstrasi: Hubungkan universitas, laboratorium, industri, dan pemerintah melalui fasilitas uji serta proyek pertama berskala nyata.

Memodernisasi jaringan listrik: Percepat transmisi, interkoneksi, digitalisasi, penyimpanan, respons permintaan, dan aturan pasar fleksibilitas.

Menjadikan efisiensi sebagai prioritas: Terapkan standar minimum, audit, insentif, pembiayaan ESCO, dan pengadaan peralatan berkinerja tinggi.

Mengembangkan industri teknologi selektif: Pilih bidang yang memiliki pasar domestik, kemampuan belajar, bahan, layanan, dan peluang ekspor yang masuk akal.

Membiayai lebah kematian: Gunakan hibah, jaminan, kontrak pembelian, blended finance, dan pengadaan untuk mengurangi risiko tahap awal.

Membangun talenta dan sertifikasi: Perbarui kurikulum teknik, manajemen, vokasi, serta pelatihan pekerja berdasarkan kompetensi yang dibutuhkan proyek.

Menjamin integritas daur hidup: Ukur emisi absolut, material, air, biodiversitas, limbah, keselamatan, dan aspek sosial dari hulu hingga akhir masa pakai.

Menyediakan data terbuka dan MRV: Bangun standar, interoperabilitas, laboratorium kalibrasi, registri, serta assurance untuk keputusan dan akuntabilitas.

Menjaga transisi tetap adil: Pastikan teknologi meningkatkan akses, keterjangkauan, pekerjaan bermartabat, partisipasi komunitas, dan pembagian manfaat.

Kesimpulan

Inovasi teknologi merupakan syarat penting bagi ekonomi rendah karbon, tetapi bukan jalan pintas yang membebaskan masyarakat dari pilihan politik dan perubahan perilaku. Teknologi bekerja di dalam sistem harga, regulasi, jaringan, keterampilan, dan kekuasaan. Karena itu, keberhasilan harus dinilai

dari kemampuan menurunkan emisi absolut sambil meningkatkan kesejahteraan, ketahanan, dan akses.

Portofolio teknologi perlu mengikuti prinsip efisiensi, elektrifikasi, energi bersih, penggantian proses, sirkularitas, serta penanganan emisi residu. Surya, angin, panas bumi, penyimpanan, hidrogen, bahan bakar berkelanjutan, dan CCUS mempunyai fungsi berbeda. Penggunaan yang tepat bergantung pada konteks, biaya sistem, kesiapan infrastruktur, serta alternatif yang tersedia; tidak ada teknologi universal.

Tantangan terbesar sering berada pada difusi, bukan laboratorium. Proyek demonstrasi, standar, pembiayaan, pengadaan, data, dan tenaga terampil menentukan apakah pengetahuan menjadi transformasi ekonomi. Negara perlu mengambil risiko awal secara disiplin, membangun pasar, dan memastikan manfaat publik memperoleh imbalan, sambil tetap menjaga persaingan, transparansi, serta kemampuan menghentikan program yang tidak efektif.

Bagi Indonesia, inovasi rendah karbon dapat menjadi strategi industrialisasi generasi baru. Keunggulan akan muncul jika sumber daya alam diubah menjadi pengetahuan, rekayasa, manufaktur bermutu, perangkat lunak, layanan, dan tenaga kerja terampil. Masa depan tidak ditentukan oleh banyaknya teknologi yang diumumkan, melainkan oleh kapasitas nasional untuk memilih, mengadaptasi, mengintegrasikan, mengoperasikan, dan terus memperbaikinya.

Glosarium

Additionality: Manfaat lingkungan yang terjadi karena suatu intervensi dan tidak akan muncul dalam skenario dasar.

Analisis siklus hidup: Penilaian dampak produk sejak ekstraksi bahan, produksi, distribusi, penggunaan, hingga akhir masa pakai.

Batas planet: Pagar pengaman proses sistem Bumi yang dimaksudkan menjaga ruang operasi aman bagi manusia.

Daya dukung: Kemampuan ekosistem menopang aktivitas atau populasi tanpa kehilangan fungsi pentingnya.

Dekarbonisasi: Penurunan emisi karbon melalui efisiensi, energi bersih, elektrifikasi, dan perubahan sistem.

Ekonomi biru: Kegiatan ekonomi laut yang menjaga kesehatan ekosistem dan kesejahteraan masyarakat pesisir.

Ekonomi sirkular: Sistem yang mengurangi ekstraksi dan limbah dengan mempertahankan nilai produk serta material.

Eksternalitas: Biaya atau manfaat suatu aktivitas yang tidak sepenuhnya ditanggung pelaku transaksi.

Efek rebound: Kenaikan konsumsi yang mengurangi sebagian atau seluruh penghematan dari efisiensi.

Greenwashing: Klaim lingkungan yang menyesatkan, tidak lengkap, atau tidak didukung hasil terverifikasi.

Hilirisasi: Peningkatan pengolahan domestik untuk memperbesar nilai tambah, kemampuan, dan keterkaitan industri.

Jasa ekosistem: Manfaat yang diperoleh manusia dari fungsi ekosistem, baik penyediaan, pengaturan, budaya, maupun penopang.

Keadilan antargenerasi: Prinsip bahwa keputusan kini tidak boleh secara tidak adil mempersempit pilihan generasi mendatang.

Kekayaan inklusif: Gabungan modal produksi, manusia, sosial, dan alam yang menopang kesejahteraan lintas waktu.

Ketahanan: Kemampuan sistem menyerap gangguan, beradaptasi, dan tetap mempertahankan fungsi penting.

Lock-in: Keterikatan jangka panjang pada teknologi atau pola pembangunan akibat aset, aturan, dan kebiasaan.

Modal alam: Stok sumber daya dan sistem alam yang menghasilkan aliran manfaat bagi masyarakat.

Net-zero: Kondisi ketika emisi antropogenik yang tersisa diseimbangkan oleh penghilangan yang kredibel.

Prinsip kehati-hatian: Tindakan pencegahan ketika terdapat risiko serius meskipun bukti belum sepenuhnya pasti.

Restorasi ekologis: Upaya membantu pemulihan struktur, fungsi, dan resiliensi ekosistem yang terdegradasi.

Transisi berkeadilan: Perubahan menuju ekonomi rendah karbon yang melindungi pekerja, komunitas, dan kelompok rentan.

Throughput material: Aliran total bahan dan energi yang masuk, diproses, dan keluar sebagai produk atau residu.

Additionality: Keadaan ketika proyek atau energi bersih benar-benar menambah pengurangan emisi di luar kondisi acuan.

Carbon capture, utilization and storage: Rangkaian penangkapan, penggunaan, pengangkutan, dan penyimpanan karbon.

Demand response: Perubahan konsumsi listrik sebagai respons terhadap harga atau kebutuhan sistem.

Digital twin: Representasi digital dinamis dari aset atau proses fisik untuk simulasi dan optimasi.

Difusi teknologi: Penyebaran dan penggunaan teknologi secara luas di antara organisasi, pasar, atau masyarakat.

Ekonomi rendah karbon: Sistem ekonomi yang menghasilkan kesejahteraan dengan emisi gas rumah kaca yang terus menurun.

Elektrolisis: Proses menggunakan listrik untuk memisahkan senyawa, termasuk menghasilkan hidrogen dari air.

Elektrifikasi: Penggantian penggunaan bahan bakar langsung dengan layanan berbasis listrik.

Green premium: Selisih biaya solusi rendah karbon dibandingkan alternatif konvensional.

Lembah kematian: Tahap ketika inovasi kekurangan modal antara riset, demonstrasi, dan komersialisasi.

MRV: Measurement, reporting, and verification atas emisi, pengurangan, atau kinerja lingkungan.

Power-to-X: Konversi listrik menjadi hidrogen, bahan bakar, panas, atau produk kimia.

Risiko rebound: Kenaikan konsumsi yang mengurangi sebagian manfaat efisiensi teknologi.

TRL: Technology readiness level yang menunjukkan tingkat kematangan suatu teknologi.

Daftar Pustaka

- Arrow, K. J., Dasgupta, P., Goulder, L. H., Mumford, K. J., & Oleson, K. (2012). Sustainability and the measurement of wealth. *Environment and Development Economics*, 17(3), 317–353. <https://doi.org/10.1017/S1355770X12000137>
- Barbier, E. B. (2019). The concept of natural capital. *Oxford Review of Economic Policy*, 35(1), 14–36. <https://doi.org/10.1093/oxrep/gry028>
- Castro, C. G., Trevisan, A. H., Pigosso, D. C. A., & Mascarenhas, J. (2022). The rebound effect of circular economy: Definitions, mechanisms and a research agenda. *Journal of Cleaner Production*, 345, 131136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131136>
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., Farber, S., & Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
- Dasgupta, P. (2007). Nature and the economy. *Journal of Applied Ecology*, 44(3), 475–487. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01316.x>
- Dasgupta, P. (2009). The welfare economic theory of green national accounts. *Environmental and Resource Economics*, 42, 3–38. <https://doi.org/10.1007/s10640-008-9223-y>

- Dasgupta, P. (2022). The economics of biodiversity: Afterword. *Environmental and Resource Economics*, 83, 1017–1037. <https://doi.org/10.1007/s10640-022-00731-9>
- Folke, C., Polasky, S., Rockström, J., Galaz, V., Westley, F., Lamont, M., Scheffer, M., Österblom, H., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Seto, K. C., Weber, E. U., Crona, B. I., Daily, G. C., Dasgupta, P., Gaffney, O., Gordon, L. J., Hoff, H., Levin, S. A., ... Walker, B. H. (2021). Our future in the Anthropocene biosphere. *Ambio*, 50, 834–869. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01544-8>
- Georgescu-Roegen, N. (1975). Energy and economic myths. *Southern Economic Journal*, 41(3), 347–381. <https://doi.org/10.2307/1056148>
- Hickel, J., & Kallis, G. (2020). Is green growth possible? *New Political Economy*, 25(4), 469–486. <https://doi.org/10.1080/13563467.2019.1598964>
- Kirchherr, J., Yang, N.-H. N., Schulze-Spüntrup, F., Heerink, M. J., & Hartley, K. (2023). Conceptualizing the circular economy (revisited): An analysis of 221 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 194, 107001. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001>
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(33), 13268–13272. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>
- Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325(5939), 419–422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P., & Smith, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532, 49–57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>
- Persson, L., Carney Almroth, B. M., Collins, C. D., Cornell, S., de Wit, C. A., Diamond, M. L., Fantke, P., Hassellöv, M., MacLeod, M., Ryberg, M. W., Søgaaard Jørgensen, P., Villarrubia-Gómez, P., Wang, Z., & Hauschild, M. Z. (2022). Outside the safe operating space of the planetary boundary for novel entities. *Environmental Science & Technology*, 56(3), 1510–1521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kumm, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., ... Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37), eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- Rockström, J., Donges, J. F., Fetzer, I., Martin, M. A., Wang-Erlandsson, L., & Richardson, K. (2024). Planetary boundaries guide humanity's future on Earth. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5, 773–788. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00597-z>
- Rockström, J., Edenhofer, O., Gaertner, J., & DeClerck, F. (2020). Planet-proofing the global food system. *Nature Food*, 1, 3–5. <https://doi.org/10.1038/s43016-019-0010-4>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., ... Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Siderius, T., Poldner, K., & van Stijn, A. (2021). Reconsidering the circular economy rebound effect: Propositions from a case study of the Dutch circular textile valley. *Journal of Cleaner Production*, 293, 125996. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125996>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>

- Wahyono, Y., Hadiyanto, H., Budihardjo, M. A., & others. (2024). Evaluating the impacts of environmental and human health from mining and processing activities in Indonesia. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100944. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100944>
- Wijaya, T., & others. (2025). Indonesia, nickel, and the political economy of the global energy transition. *Third World Quarterly*. <https://doi.org/10.1080/01436597.2025.2465514>
- Böbner, S., Surya, I. R. F., Mendrofa, M. J. S., & Arond, E. (2024). Just energy transitions and coal in Indonesia: Policy recommendations to move forward. Stockholm Environment Institute. <https://doi.org/10.51414/sei2024.037>
- Hilbrich, S., Schwab, J., & others. (2025). Implementing sustainability taxonomies to redirect capital flows: Evidence and policy lessons. *Climate Policy*. <https://doi.org/10.1080/14693062.2024.2415382>
- Kural, O., & others. (2026). Toward a just and robust energy transition in Indonesia. *Environmental Research*. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2026.122778>
- Wijaya, T., & others. (2025). Indonesia, nickel, and the political economy of the global energy transition. *Third World Quarterly*. <https://doi.org/10.1080/01436597.2025.2465514>
- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., & Hemous, D. (2012). The environment and directed technical change. *American Economic Review*, 102(1), 131–166. <https://doi.org/10.1257/aer.102.1.131>
- Hanson, E., Nwakile, C., & Hammed, V. O. (2025). Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies: Evaluating the effectiveness of advanced CCUS solutions for reducing CO2 emissions. *Results in Surfaces and Interfaces*, 18, 100381. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2024.100381>
- McLaughlin, H., Littlefield, A. A., Menefee, M., Kinzer, A., Hull, T., Sovacool, B. K., Bazilian, M. D., & Kim, J. (2023). Carbon capture utilization and storage in review: Sociotechnical implications for a carbon reliant world. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 177, 113215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113215>
- Nnabuike, S. G., Ugbeh-Johnson, J., Okeke, N. E., & Ogbonnaya, C. (2023). The prospects of hydrogen in achieving net zero emissions by 2050: A critical review. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 2, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100024>
- Stern, N., & Valero, A. (2021). Innovation, growth and the transition to net-zero emissions. *Research Policy*, 50(9), 104293. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2021.104293>
- Worku, M. Y. (2022). Recent advances in energy storage systems for renewable source grid integration: A comprehensive review. *Sustainability*, 14(10), 5985. <https://doi.org/10.3390/su14105985>
- Li, Z., Li, X., Xue, G., & Gou, X. (2025). Digital economy, technological innovation, and carbon productivity: Empirical evidence from the Yellow River Basin. *Sustainable Futures*, 100861. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100861>