

Menjembatani Green Premium: Strategi Kebijakan untuk Meningkatkan Daya Saing Industri Besi dan Baja Hijau Indonesia

© THC 2026

Publikasi ini dan materi yang terkandung di dalamnya merupakan milik The Habibie Center (THC). Materi dalam publikasi ini boleh digunakan, dibagikan, disalin, direproduksi, dicetak, dan/atau disimpan secara bebas, dengan syarat semua materi tersebut mencantumkan sumbernya secara jelas sebagai milik THC.

Diterbitkan Oleh:

The Habibie Center

Gedung The Habibie Center, Lantai 3

Jl. Kemang Selatan No. 98

Jakarta 12560, Indonesia

Telp: +62-21-781 7211 | Faks: +62-21-781 7212

Email: thc@habibiecenter.or.id

Website: www.habibiecenter.or.id

Kutipan:

THC. (2026). *Menjembatani 'Green Premium': Strategi Kebijakan untuk Meningkatkan Daya Saing Industri Besi dan Baja Hijau Indonesia*. The Habibie Center.

Tim Peneliti:

Irvan T. Harja

Muhammad A. Virgy

Ucapan Terima Kasih

Supervisi: Ucapan terima kasih khusus disampaikan kepada Mohammad Hasan Ansori, Ph.D., Direktur Eksekutif THC; Julia Novrita, Ph.D., Direktur Program dan Pengembangan THC; Ghazali H. Moesa, Direktur Keuangan dan Administrasi THC; serta Ir. Didit Agripinanto Ratam, DBA, MBA, anggota Dewan Pengurus The Habibie Center.

Desain dan Tata Letak: Kami ingin mengucapkan terima kasih kepada Ahmad atas kontribusinya yang kreatif dalam desain dan tata letak publikasi ini.

Dukungan Administrasi: Kami ingin mengucapkan terima kasih kepada Ifany Ratna Ekandini atas upayanya dalam menangani aspek administratif dan keuangan yang mendukung publikasi ini.

Dukungan Lainnya: Penghargaan khusus diberikan kepada Ir. Hafif Dafiqurrohman, M.T., Mitra Senior/Pimpinan di PT Geni Buana Nusantara, atas kontribusinya yang berharga dalam mendukung pelaksanaan penelitian ini.

Upaya kolaboratif ini mencerminkan dedikasi sekelompok individu yang beragam, dan kontribusi mereka sangat kami hargai.

Daftar Isi

Ringkasan Eksekutif	I
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Konteks Masalah.....	1
1.2. Research gap	1
BAB 2. KERANGKA KONSEPTUAL	3
2.1. Dekarbonisasi dan Transformasi Industri.....	3
2.2. Daya Saing dan Perdagangan dalam Ekonomi yang Dibatasi Emisi Karbon.....	3
2.3. Peran Instrumen Kebijakan: Perspektif Kebijakan Industri Hijau.....	4
BAB 3. METODE	5
3.1. Pendekatan Kualitatif.....	5
Teknik Pengumpulan Data	5
Teknik Analisis Data	6
3.2. Pendekatan Kuantitatif.....	6
Pengumpulan Data	7
Analisis Daya Saing Biaya	8
Trade & Market analysis Analisis Perdagangan dan Pasar	9
BAB 4. KOMPETIVITAS BIAYA DAN ANALISIS PASAR	10
4.1. Analisis Biaya	10
Analisis Levelized Cost of Steel and Iron (LCOS)	10
Analisis Finansial: NPV, EIRR, dan BCR	11
Analisis Daya Saing Biaya	13
Tingkat Kesiapan Teknologi dan Kondisi Pendukung	14
Pengadaan Barang dan Jasa Pemerintah Hijau (Green Public Procurement) sebagai Mekanisme Sisi Permintaan	18
Analisis Biaya Pengurangan Emisi Marjinal (Marginal Abatement Cost Analysis)	21
4.2. Analisis Pasar	26
Impor-Ekspor Besi dan Baja	26
Kondisi Pasar Setelah Dekarbonisasi Besi dan Baja	29
Pasar Baja Hijau: Jalur Transisi Menuju 2060	31
Sintesis Lintas Aspek: Mengintegrasikan Analisis Biaya, Pasar, dan Karbon	33
4.3. Analisis Kredit Karbon.....	35
Pendapatan Kredit Karbon dan Emisi yang Dihindari	35
BAU from Cost Advantage to Structural Liability	36
Transitional Pathways	36
Jalur Dekarbonisasi Mendalam	36
Sensitivitas IRR terhadap Harga Kredit Karbon	37

BAB 5. IMPLIKASI STRATEGIS UNTUK INOVASI KEBIJAKAN38

5.1. Imperatif Kebijakan: Menjembatani *Green Premium* dan Menjaga Daya Saing.....38

Desain Kebijakan dan Keberlanjutan Green Premium38

Lemahnya Sinyal Permintaan dan Hambatan Pembentukan Pasar38

Lingkungan Persaingan yang Terdistorsi39

Kesenjangan Kebijakan Penetapan Harga Karbon dan Hilangnya Sinyal Ekonomi39

Kendala Kelembagaan: MRV dan Kredibilitas Kebijakan39

5.2. Kerangka Kebijakan Lima Pilar Untuk Perlindungan dan Daya Saing Baja Hijau.....40

Pilar 1: Mengoordinasikan Sinyal Regulasi dan Horizon Investasi40

Pilar 2: Membangun Kredibilitas Pasar melalui Standar dan Klasifikasi40

Pilar 3: Mengatasi Green Premium Melalui Dukungan Keuangan yang Terarah41

Pilar 4: Mengelola Eksposur Perdagangan dan
Mencegah Kebocoran Karbon (Carbon Leakage)41

Pilar 5: Menciptakan Permintaan sebagai Fondasi Transformasi Pasar42

5.3. Menyusun Urutan Transisi: Pendekatan Kebijakan Bertahap.....42

Tahap Awal (2025–2030): Memungkinkan Transisi Berbiaya Rendah
dan Menghindari Lock-in42

Tahap Menengah (2030–2045): Secara Aktif Menjembatani Kesenjangan Biaya43

Tahap Akhir (2045–2060): Beralih Menuju Daya Saing yang Didorong oleh Pasar44

5.4. *Insight* Kebijakan Strategis.....44

Kebijakan sebagai Penentu Hasil Pasar45

Risiko Transisi yang Bersifat Pasif45

Biaya Akibat Penundaan Transisi46

Dari Beban Biaya Menuju Keunggulan Daya Saing46

Koherensi Kebijakan sebagai Prasyarat Transisi46

Kesimpulan47

Referensi49

Daftar Tabel

Tabel 1. Daftar Informan	6
Tabel 2. Input dan Variabel Kuantitatif	7
Tabel 3. LCOS dari masing-masing skenario	10
Tabel 4. Analisis keuangan pada setiap skenario	12
Tabel 5. Daya Saing Biaya pada Setiap Skenario	13
Tabel 6. Tingkat Kesiapan Teknologi dan Kondisi Pendukung Berdasarkan Skenario	15
Tabel 7. Kelayakan GPP dan estimasi dampaknya terhadap IRR pada setiap skenario	19
Tabel 8. Peringkat Marginal Abatement Cost (MAC) untuk setiap skenario diurutkan dari biaya pengurangan emisi terendah hingga tertinggi	21
Tabel 9. Penilaian realisasi implementasi berdasarkan skenario dan horizon waktu. Kategori “Tinggi” menunjukkan bahwa teknologi dapat diterapkan dalam skala signifikan dengan kondisi yang realistis	23
Tabel 10. Kerangka transisi dekarbonisasi industri baja Indonesia secara bertahap, periode 2025–2060.	25
Tabel 11. Evolusi pasar baja hijau hingga tahun 2060	31
Tabel 12. Pendapatan kredit karbon dan pengurangan emisi berdasarkan skenario pada harga karbon US\$25/tCO ₂	35
Tabel 13. Sensitivitas Internal Rate of Return (IRR) terhadap harga kredit karbon.	37

Daftar Gambar

Gambar 1. Impor Besi dan Baja Tahun 2019-2025	26
Gambar 2. Ekspor Besi dan Baja Tahun 2019-2025	27
Gambar 3. Impor Iron Ore dan Scrap Steel Tahun 2019-2025	28
Gambar 4. Proyeksi Pasar dan Permintaan Baja Hijau	29

Kata Pengantar

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga laporan penelitian berjudul “**Menjembatani Green Premium: Strategi Kebijakan untuk Meningkatkan Daya Saing Industri Besi dan Baja Hijau Indonesia**” dapat diselesaikan dan diterbitkan. Penelitian ini mengangkat salah satu tantangan paling mendesak dan strategis dalam agenda dekarbonisasi industri Indonesia, yaitu bagaimana mewujudkan industri baja hijau yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga layak secara ekonomi dan memiliki daya saing.

Green premium secara umum dipahami sebagai salah satu hambatan utama dalam mendorong adopsi teknologi produksi yang lebih bersih, termasuk di sektor industri besi dan baja. Bagi negara berkembang seperti Indonesia, yang industri bajanya memegang peranan penting dalam mendukung pembangunan infrastruktur, sektor manufaktur, serta penciptaan lapangan kerja, kesenjangan biaya tersebut menghadirkan dilema kebijakan yang kompleks: bagaimana Indonesia dapat memenuhi komitmen iklimnya tanpa mengorbankan daya saing maupun prospek pertumbuhan sektor yang memiliki nilai strategis bagi perekonomian nasional.

Publikasi ini berupaya menjawab dilema tersebut secara komprehensif. Melalui analisis yang mendalam, penelitian ini memetakan berbagai instrumen kebijakan serta pengalaman para pemangku kepentingan yang secara kolektif dapat memperkecil, bahkan menjembatani, *green premium*. Tujuan penelitian ini bukan untuk meromantisasi transisi hijau, melainkan menawarkan strategi kebijakan yang aplikatif dan sesuai dengan konteks Indonesia agar transisi menuju produksi baja rendah karbon dapat diwujudkan secara nyata, baik oleh pelaku industri maupun para pembuat kebijakan. Kami meyakini bahwa dengan dukungan ekosistem kebijakan yang tepat, industri baja Indonesia memiliki peluang untuk menjadi pemimpin regional dalam produksi baja rendah karbon, sekaligus membuka peluang ekspor baru dan memperkuat posisi Indonesia di pasar global yang semakin memperhatikan aspek emisi karbon.

Kami menyampaikan apresiasi yang setinggi-tingginya kepada tim peneliti atas dedikasi, ketelitian ilmiah, dan komitmen yang telah dicurahkan dalam penyusunan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada para pejabat pemerintah, pelaku industri, akademisi, serta perwakilan masyarakat sipil yang telah berkontribusi melalui pandangan, pengalaman, dan keahlian mereka sehingga memperkaya substansi serta relevansi publikasi ini. Kesiediaan mereka untuk berdiskusi secara terbuka dan kritis merupakan kontribusi yang sangat berharga.

Kami mempersembahkan publikasi ini bukan sebagai akhir dari sebuah pembahasan, melainkan sebagai undangan untuk memperdalam dialog di antara para pemangku kepentingan mengenai bagaimana Indonesia dapat merancang jalur transisi yang kredibel dan berdaya saing menuju industri baja rendah karbon. Transisi ini membutuhkan keberanian, inovasi, dan kolaborasi lintas sektor serta lintas institusi. Kami berharap penelitian ini dapat menjadi katalis bagi lahirnya langkah-langkah kolaboratif yang berani dan strategis dalam mempercepat daya saing industri besi dan baja Indonesia sekaligus mendorong agenda dekarbonisasi nasional.

Dr. Ilham Akbar Habibie

Ketua Dewan Pembina, The Habibie Center

Ringkasan Eksekutif

Industri besi dan baja Indonesia menempati posisi strategis dalam struktur perekonomian nasional sebagai sektor hulu yang menopang pembangunan infrastruktur, aktivitas manufaktur, dan kinerja ekspor. Meskipun memberikan kontribusi ekonomi yang signifikan, industri besi dan baja juga merupakan salah satu sektor dengan intensitas emisi karbon tertinggi. Tingginya intensitas emisi tersebut menjadikan sektor ini sebagai salah satu titik krusial dalam upaya dekarbonisasi nasional. Sejalan dengan komitmen Indonesia untuk mencapai target *net-zero emission* pada tahun 2060 atau lebih cepat, transformasi menuju produksi baja rendah karbon bukan lagi sekadar pilihan, melainkan sebuah keharusan.

Di tingkat global, tekanan untuk melakukan dekarbonisasi industri besi dan baja semakin meningkat seiring berkembangnya berbagai kebijakan perdagangan yang berbasis iklim. Uni Eropa, melalui *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM), telah menerapkan tarif berbasis emisi terhadap produk impor. Sementara itu, Amerika Serikat dan Inggris mulai mengintegrasikan pertimbangan lingkungan ke dalam instrumen perdagangan, termasuk melalui pendekatan berbasis biaya terhadap impor yang intensif karbon serta pembatasan impor yang berkaitan dengan risiko deforestasi. Dalam lanskap global yang terus berkembang ini, dinamika perdagangan internasional tidak lagi hanya ditentukan oleh keunggulan komparatif konvensional, tetapi semakin dipengaruhi oleh intensitas karbon dari proses produksi.

Meskipun urgensi dekarbonisasi industri besi dan baja semakin meningkat, masih terdapat ketegangan mendasar antara tujuan lingkungan dan daya saing ekonomi. Produksi baja hijau (*green steel*) saat ini masih menghadapi hambatan biaya yang signifikan. Dalam konteks

Indonesia, pendekatan kebijakan dekarbonisasi industri masih didominasi oleh strategi berbasis teknologi. Meskipun langkah tersebut penting, kerangka kebijakan yang ada belum dilengkapi dengan instrumen ekonomi yang lebih luas, seperti insentif fiskal, kebijakan perdagangan, dan mekanisme pembentukan pasar (*market-shaping mechanisms*) yang mampu mengatasi kegagalan pasar akibat eksternalitas karbon.

Dengan menggunakan pendekatan kuantitatif dan kualitatif, penelitian ini menganalisis dampak ekonomi dan lingkungan dari pengembangan industri besi dan baja hijau, sekaligus menggambarkan kondisi industri dan perspektif para pemangku kepentingan mengenai proses dekarbonisasi sektor besi dan baja. Selain itu, penelitian ini memberikan perhatian khusus pada perancangan mekanisme perlindungan serta strategi peningkatan daya saing baja hijau domestik melalui perbandingan antara skenario *business as usual* dengan berbagai skenario intervensi yang melibatkan insentif fiskal dan kebijakan perlindungan perdagangan.

Melalui empat skenario dekarbonisasi yakni: skenario *Electric Arc Furnace* (EAF), *Direct Reduced Iron–Electric Arc Furnace* (DRI-EAF) berbasis gas alam, DRI-EAF berbasis hidrogen, dan DRI-EAF berbasis hidrogen dengan energi terbarukan, penelitian ini menunjukkan bahwa jalur teknologi rendah karbon masih memiliki biaya produksi yang relatif tinggi, meskipun memberikan manfaat lingkungan yang jauh lebih besar. Sebaliknya, skenario *business as usual* memiliki *Levelized Cost of Steel* (LCOS) sebesar USD 589,21 per ton, sehingga tampak lebih kompetitif dalam jangka pendek. Namun, skenario ini menghasilkan emisi karbon yang sangat tinggi, yaitu lebih dari 48 juta ton CO₂, dengan intensitas karbon sebesar 1,46 ton CO₂ per ton baja, yang menunjukkan adanya *trade-off* mendasar antara efisiensi biaya dan keberlanjutan lingkungan.

Scenario	Total Emisi (tCO2)	Daya Saing Karbon	LCOS (USD/ton)
Business as Usual	48,021,312.40	Sangat Rendah (1.46 tCO2)	589.21
Skenario 1: EAF	12,558,131.60	Tinggi (0.38 tCO2)	582.98
Skenario 2: DRI-EAF berbasis Gas Alam	21,536,480.00	Sedang (0.66 tCO2)	721.33
Skenario 3: DRI-EAF berbasis Hidrogen	2,495,080.00		901.95
Skenario 4: DRI-EAF berbasis Hidrogren dan Energi Terbarukan	-	Sempurna (0.00 tCO2)	912.95

Di sisi lain, Indonesia berpotensi menghadapi situasi “Catch-22”: mempertahankan produksi yang intensif karbon memang dapat mendukung pertumbuhan ekonomi dalam jangka pendek, tetapi berisiko menghambat akses ekspor di masa depan apabila upaya dekarbonisasi tidak segera dilakukan. Sebagai contoh, kebijakan perdagangan internasional yang terkait dengan iklim, seperti CBAM Uni Eropa, dapat mengenakan tarif antara €40–€90 per ton terhadap produk yang intensif karbon. Kondisi ini menjadikan produksi baja hijau sebagai kebutuhan strategis bagi industri yang berorientasi ekspor. Untuk menghindari kondisi tersebut, transformasi menuju industri baja rendah karbon diproyeksikan berlangsung dalam tiga tahapan utama:

- **2025–2030 (Masa Transisi):** Produksi baja konvensional berbasis batu bara masih mendominasi karena memiliki keunggulan biaya (sekitar USD 589 per ton). Pangsa pasar baja hijau diperkirakan masih berada di bawah 5%, terutama didorong oleh tekanan regulasi eksternal seperti CBAM.
- **2030–2045 (Fase Akselerasi):** Pertumbuhan permintaan baja yang pesat (mendekati 100 juta ton) akan diiringi dengan peningkatan pangsa pasar baja hijau hingga mencapai sekitar 40–55%. Pada fase ini, pengelolaan *green premium* (selisih biaya sekitar 20–30% lebih tinggi dibanding baja konvensional) menjadi tantangan utama yang memerlukan dukungan kebijakan dan kemajuan teknologi.
- **2045–2060 (Menuju Net-Zero):** Baja hijau diproyeksikan menjadi standar utama industri dengan pangsa pasar lebih dari 95%, seiring semakin murahannya energi terbarukan dan penerapan harga karbon yang mampu menghilangkan kesenjangan biaya produksi.

Namun demikian, keberhasilan transformasi tersebut akan sangat ditentukan oleh sejumlah faktor pendorong dan kendala struktural. Berdasarkan wawancara dengan para pemangku kepentingan dan analisis empiris, penelitian ini mengidentifikasi lima hambatan utama yang saat ini menghambat transisi menuju baja hijau:

- **Desain Kebijakan:** Desain kebijakan yang kurang efektif karena insentif fiskal masih berbentuk pengurangan pajak penghasilan badan secara umum, bukan dukungan langsung terhadap biaya produksi baja rendah karbon.
- **Permintaan domestik yang lemah,** akibat belum adanya kewajiban pengadaan barang dan jasa pemerintah yang mengutamakan penggunaan baja hijau.
- **Persaingan yang tidak setara,** karena produk baja impor belum dikenakan biaya atau penalti atas emisi karbonnya, sehingga menciptakan ketidakadilan bagi produsen domestik yang telah berinvestasi dalam dekarbonisasi.
- **Harga karbon yang masih sangat rendah,** yaitu sekitar USD 2 per ton CO₂, sehingga belum mampu memberikan insentif ekonomi yang cukup untuk mendorong perubahan proses produksi.
- **Kelemahan kelembagaan,** terutama belum lengkapnya sistem data emisi serta kerangka *Measurement, Reporting, and Verification* (MRV) yang membatasi kredibilitas kebijakan sekaligus menyulitkan pemenuhan persyaratan CBAM.

Untuk mengatasi berbagai hambatan tersebut, penelitian ini mengusulkan suatu arsitektur kebijakan yang terintegrasi guna menjembatani *green premium* sekaligus memperkuat daya saing industri nasional, yang terdiri atas lima pilar utama:



Pilar 1	Sinyal Regulasi yang Terkoordinasi Menetapkan target emisi sektoral jangka panjang, peta jalan investasi, serta standar emisi yang mengikat untuk memberikan kepastian bagi pelaku industri.
Pilar 2	Standar dan Kredibilitas Pasar Mengembangkan klasifikasi wajib baja hijau yang dikaitkan dengan kelayakan pengadaan pemerintah dan pemberian insentif fiskal, serta diselaraskan dengan standar internasional seperti CBAM.
Pilar 3	Dukungan Keuangan yang Tepat Sasaran Memberikan instrumen penurunan biaya produksi, termasuk subsidi energi terbarukan, dukungan pasokan baja daur ulang (<i>scrap</i>), serta jaminan pembelian (<i>offtake guarantee</i>) hidrogen hijau untuk mengurangi <i>green premium</i> .
Pilar 4	Pengelolaan Risiko Perdagangan Mengembangkan mekanisme penyesuaian karbon di perbatasan serta merevisi kebijakan industri domestik, termasuk Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN), agar memasukkan kriteria kinerja emisi sehingga dapat mencegah <i>carbon leakage</i> dari produk impor yang memiliki standar lingkungan lebih rendah.
Pilar 5	Penguatan Permintaan Domestik Mewajibkan penggunaan baja hijau dalam proyek infrastruktur dan pengadaan pemerintah guna menciptakan permintaan domestik yang stabil serta mengurangi risiko investasi pada produksi baja rendah karbon.

Sebagai penutup, penelitian ini menegaskan bahwa *green premium* bukanlah hambatan yang bersifat permanen, melainkan kondisi transisional yang sangat dipengaruhi oleh desain kebijakan. Dengan penerapan harga karbon yang memadai, instrumen pembiayaan yang tepat sasaran, serta kerangka kelembagaan yang kredibel, Indonesia memiliki peluang untuk mengubah *green premium* dari beban daya saing menjadi keunggulan strategis. Pada hakikatnya, transisi menuju industri besi dan baja hijau lebih merupakan tantangan ekonomi dan kelembagaan daripada tantangan teknologi semata. Oleh karena itu, tindakan kebijakan yang dilakukan secara dini, terkoordinasi, dan konsisten akan menjadi faktor penentu apakah Indonesia mampu menjadi pemimpin atau justru tertinggal dalam pasar global produk industri rendah karbon yang terus berkembang.



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Konteks masalah

Industri besi dan baja Indonesia memegang posisi strategis dalam struktur ekonomi nasional sebagai sektor hulu yang mendukung pembangunan infrastruktur, kegiatan manufaktur, dan kinerja ekspor. Dalam beberapa tahun terakhir, sektor ini menunjukkan pertumbuhan yang relatif stabil, dengan konsumsi domestik mencapai 18,19 juta metrik ton pada tahun 2023 (IISIA, 2024). Namun, dengan kapasitas produksi nasional yang hanya mencapai 14,4 juta ton menunjukkan bahwa hal tersebut merupakan indikasi adanya kesenjangan struktural antara permintaan dan pasokan domestik. Kesenjangan ini menyebabkan ketergantungan yang signifikan terhadap impor yang diperkirakan mencapai sekitar 16 juta ton kebutuhan impor pada tahun 2024 (IESR, 2024). Di sisi lain, industri ini tetap menjadi kontributor utama bagi neraca perdagangan Indonesia, dengan nilai ekspor sekitar USD 25,8 miliar pada tahun 2024 dan USD 27,97 miliar pada tahun 2025 (Antara, 2026).

Terlepas dari kontribusinya yang substansial terhadap perekonomian, industri besi dan baja juga termasuk di antara sektor-sektor dengan intensitas karbon tertinggi. Dalam konteks Indonesia, sektor ini menyumbang sekitar 4,9% dari total emisi gas rumah kaca industri, yang berjumlah sekitar 20 hingga 30 juta ton CO₂ setiap tahun (IESR, 2024). Intensitas emisi yang tinggi ini menempatkan sektor ini sebagai titik kritis dalam upaya dekarbonisasi nasional. Sejalan dengan komitmen Indonesia untuk mencapai emisi nol bersih pada tahun 2060 atau lebih awal, transisi menuju produksi baja hijau bukanlah pilihan, melainkan suatu keharusan.

Di tingkat global, tekanan untuk mendekarbonisasi sektor besi dan baja semakin meningkat seiring dengan maraknya kebijakan perdagangan yang berkaitan dengan iklim. Uni Eropa, melalui Mekanisme Penyesuaian Perbatasan Karbon (*Carbon Border Adjustment Mechanism* atau CBAM), telah memberlakukan tarif berbasis emisi terhadap produk-produk impor. Sementara itu, Amerika Serikat juga telah mulai mengintegrasikan pertimbangan lingkungan ke dalam instrumen impor, dengan memberlakukan tarif impor berdasarkan jejak karbon produk (ICEL, 2025). Dalam lanskap yang terus berkembang ini, dinamika perdagangan global tidak lagi ditentukan semata-mata oleh keunggulan komparatif

tradisional, melainkan semakin dipengaruhi oleh intensitas karbon proses produksi.

Meskipun desakan untuk mendekarbonisasi industri besi dan baja semakin mendesak, persoalan mendasar tetap ada antara tujuan lingkungan dan daya saing ekonomi. Produksi baja rendah karbon (hijau) saat ini menghadapi hambatan biaya yang signifikan, dengan biaya produksi baja hijau sekitar 20–30% lebih tinggi daripada metode konvensional berbasis batu bara (Gunung Prisma, 2022). Perbedaan biaya ini menimbulkan risiko daya saing bagi produsen dalam negeri yang melakukan dekarbonisasi, terutama ketika bersaing dengan impor berbiaya rendah yang intensif karbon.

Dalam konteks Indonesia, pendekatan kebijakan saat ini terhadap dekarbonisasi industri masih didominasi oleh orientasi teknologi, dengan fokus pada langkah-langkah seperti peningkatan efisiensi energi, substitusi bahan baku, elektrifikasi industri, serta pengembangan teknologi penangkapan, pemanfaatan, dan penyimpanan karbon (*Carbon Capture, Utilisation, and Storage* atau CCUS) (Indonesia Economic Forum, 2025). Meskipun langkah-langkah ini penting, kerangka kebijakan yang ada belum dilengkapi dengan instrumen ekonomi yang lebih luas, termasuk insentif fiskal, kebijakan perdagangan, dan mekanisme pembentukan pasar yang mampu mengatasi kegagalan pasar yang terkait dengan eksternalitas karbon.

Selain itu, belum adanya kerangka kerja transisi yang komprehensif untuk mendukung produsen baja konvensional dalam beralih ke sistem produksi rendah karbon. Kurangnya dukungan ini berisiko memperlambat adopsi teknologi ramah lingkungan dan meningkatkan kerentanan industri dalam negeri terhadap tekanan persaingan global. Dalam kondisi seperti itu, produsen baja ramah lingkungan yang baru muncul menghadapi hambatan struktural, di mana upaya dekarbonisasi justru dapat secara paradoksal merusak daya saing pasar mereka.

1.2. Kesenjangan Penelitian

Literatur yang ada mengenai industri besi dan baja selama ini sebagian besar berfokus pada emisi gas rumah kaca dan timbunan limbah padat, dengan penekanan yang kuat pada jalur-jalur teknologi untuk mendukung dekarbonisasi. Di tingkat global, berbagai kajian akademik maupun kebijakan telah mengulas secara luas berbagai teknologi produksi rendah karbon, seperti

hydrogen-based direct reduced iron (H₂-DRI), carbon capture, utilisation and storage (CCUS), elektrifikasi melalui electric arc furnace (EAF) berbasis energi terbarukan, serta strategi ekonomi sirkular yang berfokus pada pemanfaatan baja bekas (scrap recycling) dan peningkatan efisiensi material (Material Economics, 2019). Melengkapi perspektif teknologi tersebut, semakin banyak kajian ekonomi yang menggunakan kerangka cost-benefit analysis (CBA) untuk mengevaluasi perbedaan biaya antara produksi baja hijau dan baja konvensional (IEA, 2022).

Di luar dimensi teknologi dan ekonomi, literatur juga semakin menyoroti peran kebijakan perdagangan internasional dalam membentuk jalur dekarbonisasi industri besi dan baja. Berbagai instrumen seperti CBAM Uni Eropa (European Commission, 2021), kebijakan penetapan harga karbon (*carbon pricing*) di Amerika Serikat (Shapiro & Metcalf, 2023), serta instrumen perdagangan berbasis keberlanjutan di Inggris menunjukkan bahwa kebijakan iklim kini semakin terintegrasi ke dalam rezim perdagangan global.

Namun demikian, dalam konteks Indonesia masih terdapat sejumlah kesenjangan penelitian yang penting. Pertama, meskipun literatur internasional semakin menekankan pentingnya instrumen kebijakan perdagangan dalam mendukung dekarbonisasi, Indonesia hingga saat ini belum memiliki kerangka perlindungan yang komprehensif bagi industri baja hijau. Instrumen kebijakan yang tersedia masih terbatas, misalnya pada skema pelabelan produk hijau untuk produk besi dan baja yang bersifat sukarela, sehingga belum memiliki kekuatan regulatif maupun kemampuan untuk membentuk pasar (*market-shaping capacity*). Akibatnya, produsen domestik menghadapi tekanan ganda, yaitu meningkatnya masuknya baja impor berbiaya rendah namun berintensitas karbon tinggi, terutama dari negara-negara produsen utama, serta risiko kehilangan akses pasar akibat penerapan kebijakan eksternal seperti CBAM.

Kedua, berbeda dengan berbagai studi internasional yang mulai mengkaji preferensi konsumen dan investor terhadap produk rendah karbon (BCG, 2023), penelitian empiris mengenai dinamika sisi permintaan (*demand-side dynamics*) terhadap besi dan baja hijau di Indonesia masih sangat terbatas. Kondisi ini menyebabkan pemahaman mengenai proses pembentukan pasar baja hijau belum utuh dan membatasi perumusan kebijakan yang mampu mendorong permintaan (*demand-pull policies*) secara efektif.

Secara keseluruhan, berbagai kesenjangan tersebut menunjukkan bahwa penelitian mengenai dekarbonisasi industri besi dan baja di Indonesia belum sepenuhnya mengintegrasikan dinamika pasar, instrumen kebijakan perdagangan, struktur biaya produksi, serta implikasi gabungan dari faktor-faktor tersebut terhadap daya saing industri dan kinerja perdagangan. Oleh karena itu, diperlukan suatu kerangka analisis yang lebih komprehensif yang mampu menjembatani dimensi teknologi, ekonomi, dan kebijakan secara terpadu.

Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut melalui pendekatan kuantitatif, meliputi cost-benefit analysis (CBA), analisis kesenjangan harga (*price gap assessment*), dan pemodelan berbagai skenario kebijakan—dan pendekatan kualitatif melalui *focus group discussion* (FGD) dan wawancara mendalam dengan para pemangku kepentingan. Pendekatan ini memungkinkan penelitian tidak hanya mengevaluasi dampak ekonomi dan lingkungan dari berbagai alternatif kebijakan, tetapi juga menangkap kondisi aktual industri besi dan baja serta perspektif para pemangku kepentingan terhadap proses dekarbonisasi.

Lebih lanjut, penelitian ini memberikan perhatian khusus pada perancangan mekanisme perlindungan dan strategi peningkatan daya saing industri baja hijau domestik, yang hingga saat ini masih relatif kurang dikaji dalam konteks Indonesia. Melalui pemodelan berbagai skenario kebijakan, penelitian ini membandingkan kondisi *business as usual* (BAU) dengan berbagai skenario intervensi yang mencakup pemberian insentif fiskal serta penerapan kebijakan perlindungan perdagangan. Dengan demikian, penelitian ini menyediakan dasar empiris yang kuat untuk mendukung penentuan prioritas kebijakan.

Dengan menempatkan Indonesia dalam lanskap global yang terus berkembang terkait instrumen perdagangan berbasis iklim—seperti CBAM maupun pembatasan impor berbasis standar keberlanjutan—penelitian ini mengidentifikasi berbagai tantangan strategis sekaligus peluang yang dapat dimanfaatkan. Pada akhirnya, penelitian ini menawarkan perspektif yang lebih terintegrasi dalam menyeimbangkan tujuan dekarbonisasi dengan peningkatan daya saing industri. Temuan penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi, baik secara teoretis maupun praktis, dengan menyediakan landasan berbasis bukti bagi para pembuat kebijakan dalam merancang kerangka regulasi yang

mampu melindungi sekaligus meningkatkan daya saing industri besi dan baja hijau Indonesia di tengah sistem perdagangan global yang semakin berorientasi pada prinsip keberlanjutan.

Berdasarkan kesenjangan penelitian yang telah diidentifikasi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan penelitian sebagai berikut.

1. Sejauh mana dekarbonisasi sektor besi dan baja memengaruhi daya saing industri besi dan baja Indonesia?
2. Apa saja biaya dan manfaat ekonomi maupun lingkungan yang terkait dengan produksi besi dan baja hijau di Indonesia?
3. Instrumen kebijakan apa yang paling efektif untuk meningkatkan daya saing produk besi dan baja hijau di pasar domestik?

BAB 2 KERANGKA KONSEPTUAL

2.1. Dekarbonisasi dan transformasi industri

Dekarbonisasi dalam industri besi dan baja mengacu pada pengurangan sistematis emisi gas rumah kaca (GRK)—khususnya karbon dioksida (CO_2)—di seluruh rantai nilai produksi. Transisi ini sangat penting mengingat sektor ini menyumbang sekitar 7–9% dari emisi CO_2 global yang terkait dengan bahan bakar fosil (IEA, 2020). Rata-rata, produksi satu ton baja menghasilkan sekitar 1,85 ton CO_2 , yang menegaskan sifat proses produksi konvensional yang intensif karbon (Muslemanni et al., 2021).

Ragam literatur telah mengidentifikasi berbagai jalur teknologi untuk mengurangi emisi di sektor besi dan baja, termasuk besi reduksi langsung berbasis hidrogen (H_2 -DRI), CCUS, serta elektrifikasi melalui electric arc furnace (EAF) berbasis energi terbarukan (Pauliuk et al., 2021). Teknologi-teknologi ini memiliki tingkat pengurangan emisi dan kematangan teknologi yang bervariasi. Dua jalur produksi utama menggambarkan trade-off antara emisi dan biaya

- Jalur *The Blast Furnace–Basic Oxygen Furnace* (BF-BOF) yang tetap menjadi standar industri namun sangat intensif karbon ($\sim 1,85$ ton CO_2 per ton baja).

- Jalur *Direct Reduction Iron–Electric Arc Furnace* (DRI-EAF) yang menawarkan emisi lebih rendah ($\sim 0,97$ ton CO_2 per ton) dan dianggap sebagai jalur transisi menuju produksi baja ramah lingkungan.

Selain itu, pendekatan ekonomi sirkular—terutama produksi baja berbasis *scrap*—memainkan peran penting dalam mengurangi intensitas emisi. Daur ulang *scrap* menyumbang sekitar 24% dari produksi baja global dan dapat secara signifikan mengurangi emisi karbon, meskipun skalabilitasnya dibatasi oleh keterbatasan pasokan, terutama di pasar yang bergantung pada impor seperti Indonesia (Pintowantoro et al., 2025).

Dari sudut pandang ekonomi, transisi teknologi ini dikaitkan dengan biaya modal dan operasional yang lebih tinggi. Produksi besi dan baja ramah lingkungan saat ini diperkirakan 20–30% lebih mahal daripada metode konvensional, terutama karena biaya hidrogen hijau, infrastruktur energi terbarukan, dan teknologi yang sedang berkembang (IEA, 2020). Perbedaan biaya ini menjadi komponen utama dalam kerangka konseptual, karena secara langsung memengaruhi daya saing harga dan hasil pasar.

2.2. Daya saing dan perdagangan dalam ekonomi yang dibatasi emisi karbon

Hubungan antara dekarbonisasi dan daya saing industri dapat dianalisis melalui perspektif keunggulan komparatif dalam ekonomi yang dibatasi oleh emisi karbon (*comparative advantage under carbon constraints*). Teori perdagangan tradisional menyatakan bahwa suatu negara akan memiliki spesialisasi berdasarkan keunggulan faktor-faktor produksinya. Namun, munculnya berbagai kebijakan iklim menjadikan intensitas karbon sebagai salah satu penentu baru dalam daya saing industri (Grossman & Krueger, 1991).

Dalam konteks ini, perusahaan yang mengadopsi teknologi rendah karbon berpotensi mengalami penurunan daya saing dalam jangka pendek akibat meningkatnya biaya produksi. Namun demikian, pada pasar yang telah menerapkan regulasi karbon—seperti mekanisme (CBAM)—produsen yang menggunakan teknologi rendah karbon justru dapat memperoleh keunggulan kompetitif dibandingkan produsen konvensional (European Commission, 2021).

Kondisi tersebut mencerminkan adanya ketegangan konseptual antara dua bentuk daya saing, yaitu:

- Daya saing statis (*static competitiveness*), yang berorientasi pada efisiensi biaya dalam jangka pendek; dan
- Daya saing dinamis (*dynamic competitiveness*), yang didorong oleh inovasi dan kemampuan beradaptasi dalam jangka panjang.

Dalam penelitian ini, analisis *Levelized Cost of Steel* (LCOS), *Internal Rate of Return* (IRR), *Economic Internal Rate of Return* (EIRR), *Marginal Abatement Cost* (MAC) Curve, serta analisis sensitivitas terhadap kredit karbon merupakan ukuran daya saing statis. Seluruh indikator tersebut menggambarkan struktur biaya pada satu titik waktu tertentu dengan asumsi teknologi yang bersifat tetap.

Sementara itu, proksi yang paling relevan untuk mengukur daya saing dinamis dalam konteks ini adalah kurva pembelajaran teknologi (*technology learning curve*), yaitu fenomena empiris yang menunjukkan bahwa biaya produksi per unit akan menurun sebesar persentase tertentu (*learning rate*) setiap kali kapasitas produksi kumulatif meningkat dua kali lipat. Berdasarkan Hukum Wright (*Wright's Law*), tingkat pembelajaran untuk teknologi elektroliser diperkirakan berada pada kisaran 16–21% (IRENA, 2020). Kajian yang lebih luas mengenai berbagai teknologi rendah karbon—seperti panel surya (*solar photovoltaic*), energi angin, penyimpanan baterai, serta elektroliser—bahkan menunjukkan penurunan biaya sebesar 16–34% setiap kali kapasitas terpasang meningkat dua kali lipat (Way et al., 2022).

Apabila model LCOS dalam penelitian ini dihitung menggunakan proyeksi biaya tahun 2030 dan 2040 yang telah memperhitungkan penurunan biaya akibat *learning curve*, alih-alih hanya menggunakan parameter biaya tahun 2026, maka analisis tersebut akan mampu merepresentasikan konsep daya saing dinamis. Dengan demikian, pertanyaan analisis tidak lagi hanya berfokus pada “teknologi mana yang paling murah saat ini”, melainkan bergeser menjadi “teknologi mana yang akan memperoleh peningkatan daya saing terbesar seiring berjalannya waktu.”

Skenario Green Hydrogen (Green-H₂) merupakan contoh yang paling mencerminkan konsep tersebut. Saat ini, skenario tersebut memiliki LCOS sebesar USD 806 per ton, namun nilainya diproyeksikan turun menjadi sekitar USD 620

per ton apabila harga hidrogen mencapai USD 2/kg, atau mengalami penurunan sekitar 23%. Penurunan biaya sebesar ini tidak dapat dicapai oleh teknologi *Electric Arc Furnace* (EAF) karena teknologi tersebut telah berada pada tahap kematangan (*technology maturity*). Proses konvergensi biaya inilah yang mencerminkan daya saing dinamis, meskipun konsep tersebut belum dibahas secara eksplisit dalam laporan ini. Dengan demikian, dekarbonisasi dapat dipandang sekaligus sebagai tantangan maupun peluang, bergantung pada bagaimana lingkungan kebijakan dan struktur pasar dibentuk.

2.3. Peran instrumen kebijakan: Perspektif kebijakan industri hijau

Transisi menuju industri baja hijau tidak dapat dijelaskan hanya melalui dinamika pasar. Literatur mengenai kebijakan industri hijau (*green industrial policy*) menekankan pentingnya peran negara dalam membentuk pasar, mendukung transformasi teknologi, serta mengatasi berbagai kegagalan pasar yang bersifat sistemik (Rodrik, 2015).

Secara umum, instrumen kebijakan dapat dikelompokkan ke dalam tiga kategori utama sebagai berikut.

1. Instrumen Fiskal

Instrumen ini mencakup subsidi, insentif perpajakan, serta mekanisme penetapan harga karbon (*carbon pricing*) yang bertujuan menurunkan biaya produksi sekaligus menginternalisasi eksternalitas karbon.

2. Instrumen Perdagangan

Instrumen ini meliputi tarif terhadap produk impor yang berintensitas karbon tinggi, mekanisme penyesuaian karbon di perbatasan (*carbon border adjustment*), serta persyaratan tingkat kandungan lokal (*local content requirements*), yang bertujuan melindungi industri domestik sekaligus menciptakan persaingan yang lebih adil (*level playing field*).

3. Instrumen Sisi Permintaan (*Demand-Side Instruments*)

Instrumen ini mencakup Pengadaan Barang dan Jasa Pemerintah Hijau (*Green Public Procurement/GPP*) serta penerapan standar wajib bagi produk rendah karbon. Instrumen

tersebut berfungsi menciptakan permintaan yang stabil terhadap produk-produk rendah karbon sehingga memberikan kepastian pasar bagi produsen.

Dalam kerangka konseptual penelitian ini, ketiga kelompok instrumen kebijakan tersebut berperan sebagai variabel moderasi yang memengaruhi hubungan antara struktur biaya produksi dengan tingkat daya saing industri. Dengan kata lain, efektivitas instrumen kebijakan akan menentukan sejauh mana peningkatan biaya akibat dekarbonisasi dapat diimbangi melalui peningkatan daya saing di pasar domestik maupun internasional.

BAB 3 METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dan kuantitatif. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk menganalisis daya saing biaya antara baja ramah lingkungan dan baja konvensional, serta untuk menganalisis dinamika pasar dengan asumsi bahwa industri besi dan baja Indonesia melakukan dekarbonisasi. Tujuannya adalah untuk menyediakan data dan mengidentifikasi hambatan utama terhadap daya saing dekarbonisasi industri besi dan baja melalui (i) analisis daya saing biaya antara baja ramah lingkungan dan baja konvensional serta (ii) analisis pasar dengan asumsi bahwa industri besi dan baja Indonesia melakukan dekarbonisasi.

Sementara itu, pendekatan kualitatif digunakan untuk menganalisis hambatan pasar bagi baja ramah lingkungan, serta inovasi strategi dan kebijakan untuk melindungi baja ramah

lingkungan. Melalui wawancara mendalam dan analisis dokumen kebijakan, pendekatan ini memungkinkan para peneliti untuk memahami konteks, hambatan, dan faktor pendukung implementasi kebijakan yang tidak dapat ditangkap secara memadai hanya melalui data kuantitatif saja (Dawadi et al., 2021).

3.1. Pendekatan kualitatif

Menurut Hennink dkk. (2020), pendekatan kualitatif memungkinkan para peneliti untuk mengkaji pengalaman individu atau kelompok secara mendetail dengan menggunakan berbagai metode penelitian spesifik, seperti wawancara mendalam (IDI), diskusi kelompok terfokus, analisis konten, serta riwayat hidup atau biografi. Pendekatan ini digunakan karena memungkinkan pemahaman yang lebih kontekstual mengenai hambatan pasar, khususnya di industri besi dan baja hijau, terutama dari perspektif pihak-pihak yang terlibat dalam industri baja. Dengan demikian, pengalaman, persepsi, dan tindakan yang diungkapkan oleh berbagai pemangku kepentingan dapat memberikan wawasan dan rekomendasi untuk inovasi kebijakan guna melindungi besi dan baja hijau.

Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini melakukan wawancara mendalam (IDI) untuk menggali lebih jauh pengalaman, persepsi, dan pandangan para pihak yang terlibat dalam industri besi dan baja. Pemilihan narasumber dilakukan secara *purposive* guna memperoleh informasi terperinci terkait topik-topik tertentu, dengan mempertimbangkan bahwa peserta yang dipilih memiliki pengalaman langsung dan keterkaitan dengan topik penelitian (Etikan, 2016).



Tabel 1. Daftar Informan¹

Institusi	Afiliasi Informan (Divisi/Direktorat/Bidang)	Kode Informan
Kementerian Perindustrian	Pusat Industri Hijau	N1
NGO Indonesia yang berfokus pada dekarbonisasi industri	Peneliti	N2
<i>Institute for Essential Services Reform</i> (IESR)	Peneliti	N3
<i>Indonesian Iron & Steel Industry Association</i> (IISIA)	Co-Executive Director	N4
Kamar Dagang dan Industri Indonesia (KADIN)	Wakil Ketua Bidang Pengembangan Hilirisasi Komoditas Besi dan Baja	N5
Kementerian Perdagangan	Pusat Kebijakan Perdagangan Internasional	N6
Kementerian Keuangan	Direktorat Jenderal Strategi Ekonomi dan Fiskal	N7

Dalam melaksanakan IDI, peneliti menggunakan wawancara semi-terstruktur (King & Horrocks, 2010). Meskipun IDI dilakukan dalam format semi-terstruktur, diskusi berlangsung secara adaptif, sehingga peneliti dapat mengajukan pertanyaan lanjutan berdasarkan tanggapan para informan. Hal ini dilakukan untuk memperoleh informasi yang lebih mendalam pada bidang pembahasan tertentu, mengklarifikasi ambiguitas, dan mengeksplorasi topik-topik khusus yang tidak tercakup dalam pertanyaan panduan wawancara. Pertanyaan-pertanyaan dalam panduan wawancara dikembangkan berdasarkan kerangka konseptual. Selain IDI, penelitian ini juga menggunakan sumber data sekunder seperti dokumen kebijakan, jurnal, artikel, dan laporan media massa.

Teknik analisis data

Setelah data wawancara dikumpulkan, peneliti melakukan analisis tematik untuk mengidentifikasi pola atau tema dalam data transkrip diskusi (Maguire & Delahunt, 2017). Proses ini melibatkan beberapa langkah, termasuk membiasakan diri dengan data, membuat kode awal, mengidentifikasi tema potensial, meninjau dan mendefinisikan tema-tema tersebut, serta kemudian menuliskan temuan-temuan (Maguire & Delahunt, 2017). Kode-kode tersebut diselaraskan dengan kerangka kerja analitis yang digunakan dalam penelitian ini.

Dalam analisis tematik—khususnya dalam pengkodean IDI—penelitian ini menggunakan pendekatan deduktif dan induktif. Pendekatan deduktif digunakan untuk memandu analisis temuan berdasarkan pertanyaan penelitian dan kerangka kerja yang telah ditentukan sebelumnya, sedangkan pendekatan induktif membantu mengeksplorasi temuan baru yang muncul dari para informan.

3.2. Pendekatan kuantitatif

Penelitian ini mengembangkan suatu model ekonomi dan emisi yang terintegrasi untuk mengevaluasi dua jalur utama produksi besi dan baja, yaitu:

1. Skenario Dasar (Konvensional): Jalur produksi *Blast Furnace–Basic Oxygen Furnace* (BF-BOF) yang saat ini masih mendominasi industri.
2. Skenario Hijau (Dekarbonisasi): Jalur produksi rendah karbon yang paling layak dikembangkan, terdiri atas empat skenario:
 - a. EAF
 - b. DRI-EAF berbasis Gas Alam
 - c. DRI-EAF berbasis Hidrogen Hijau
 - d. DRI EAF berbasis Hidrogen Hijau dan Energi Terbarukan

Analisis ini menerapkan metode tekno-ekonomi (*techno-economic analysis*) dan ekonomi kesejahteraan (*welfare-economic analysis*)

1. Sebagai informasi, tim peneliti telah mengirimkan surat permohonan wawancara kepada Divisi Tanggung Jawab Sosial dan Lingkungan BP BUMN, namun belum menerima tanggapan hingga penelitian ini diterbitkan.

dengan cakupan periode evaluasi selama 20 tahun (2026–2045). Model mencakup kapasitas produksi sebesar 44.450 ribu ton per tahun (kTPA) yang merupakan agregasi dari 14 pabrik besi dan baja di Indonesia yang terdapat dalam basis data penelitian.

Model disusun menggunakan pendekatan deterministik berbasis skenario, di mana masing-masing dari lima jalur teknologi diterapkan pada keseluruhan sektor dan dievaluasi menggunakan asumsi yang sama terkait harga baja acuan, tingkat utilisasi, tingkat diskonto, serta parameter valuasi eksternalitas. Selain itu, dilakukan analisis sensitivitas untuk menguji ketahanan hasil terhadap berbagai parameter yang memiliki tingkat ketidakpastian tinggi.

Pengumpulan data

a. Stratafikasi Data

Data kuantitatif diperoleh dari empat kelompok sumber utama yang dipilih berdasarkan otoritas dan kredibilitasnya pada masing-masing bidang:

Tabel 2. Input dan Variabel Kuantitatif

Kategori Input	Variabel	Sumber Utama
Inventaris Pabrik	Kapasitas produksi, teknologi, status operasional, konsumsi energi, bahan baku	SteelData Indonesia (GEM 2025 Tracker)
Koefisien Teknologi	Faktor emisi CO ₂ , SO ₂ , NO _x , PM _{2.5} ; CAPEX; OPEX; intensitas tenaga kerja	WSA 2024; IEA Iron & Steel Roadmap 2024; Columbia CKI 2024; MIT EPPA 2023
Valuasi Eksternalitas	Biaya sosial karbon, biaya kesehatan akibat polusi udara, pengganda PDB, tingkat upah	US EPA SC-GHG 2023; OECD/WHO; World Bank Indonesia I-O table; BPS Indonesia
Data makro dan pasar	Harga baja, tingkat diskonto, tarif pajak, nilai tukar, harga kredit karbon	World Steel Association 2025; Bank Indonesia; PwC Indonesia; IDX Carbon; Article 6 trades

Seluruh nilai moneter dinyatakan dalam dolar Amerika Serikat tahun 2026 (USD 2026), kecuali dinyatakan lain. Nilai yang semula menggunakan rupiah dikonversi menggunakan kurs tengah Bank Indonesia sebesar Rp15.800 per USD. Harga kredit karbon dikumpulkan dalam bentuk rentang, yaitu Rp32.612 (sekitar USD1,98) di IDX Carbon (Maret 2025), USD25–50 untuk transaksi internasional berdasarkan Pasal 6 Persetujuan Paris, serta USD40–80 untuk kredit karbon berkualitas tinggi yang telah diverifikasi. Berdasarkan informasi tersebut, penelitian ini menggunakan USD25 per ton CO₂ sebagai nilai dasar yang dianggap paling realistis untuk dapat diperoleh Indonesia selama periode analisis.

b. Teknik Pengumpulan Data

Untuk memastikan model dibangun berdasarkan kondisi empiris, penelitian ini menggunakan pendekatan pengumpulan data bertingkat sebagai berikut.:

A. Studi Literatur Sekunder dan Benchmarking (Metode Utama)

Sebagian besar parameter teknis dan ekonomi diperoleh melalui studi literatur sekunder, mengingat pemodelan industri baja sangat bergantung pada standar termodinamika dan parameter ekonomi yang telah mapan.

- Standar dan pedoman industri, seperti *International Energy Agency* (IEA), *World Steel Association* (WSA), dan dokumen *Best Available Techniques* (BAT) Uni Eropa, digunakan sebagai dasar perhitungan neraca massa dan intensitas energi.
- Platform intelijen pasar, seperti S&P Global Platts, Argus Media, dan BloombergNEF, digunakan untuk memperoleh data historis maupun proyeksi harga komoditas, termasuk bijih besi 62% Fe, pelet bijih besi berkualitas DRI, batu bara kokas premium, dan scrap.
- Literatur akademik dan lembaga *think-tank* digunakan untuk memperoleh berbagai kajian tekno-ekonomi terkini mengenai biaya produksi hidrogen hijau (LCOS) serta jalur transisi DRI-EAF.

B. Telaah Dokumen Regulasi dan Kebijakan

Untuk memastikan model mencerminkan kondisi Indonesia, dilakukan penelaahan terhadap berbagai dokumen kebijakan, antara lain:

- tarif listrik industri dan harga energi terbarukan nasional;
- dokumen *Nationally Determined Contributions* (NDC);
- peta jalan kebijakan harga karbon yang digunakan sebagai dasar penyusunan variabel biaya karbon.

C. Data Proksi dan Spesifikasi Teknologi

Karena teknologi H₂-DRI-EAF masih relatif baru dan data historisnya terbatas, penelitian ini menggunakan:

- estimasi investasi (CAPEX) dari studi kelayakan dan publikasi perusahaan penyedia teknologi seperti Midrex, Tenova, SMS Group, serta produsen elektroliser;
- studi kasus proyek baja hijau pionir, seperti HYBRIT dan H2 Green Steel di Swedia, untuk memperkirakan kurva penurunan biaya dan asumsi operasional.

c. Validasi dan Harmonisasi Data

Sebelum digunakan dalam pemodelan, seluruh data melalui proses harmonisasi agar memiliki basis perbandingan yang sama, meliputi:

- Standarisasi satuan, yaitu mengonversi seluruh konsumsi energi ke satuan yang seragam (GJ atau MWh per ton baja) serta seluruh nilai keuangan ke mata uang dan tahun dasar yang sama.
- Sinkronisasi batas sistem, yaitu memastikan komponen CAPEX pada jalur BF-BOF maupun H₂-DRI-EAF mencakup ruang lingkup proses (*gate-to-gate*) yang identik, termasuk penanganan bahan baku dan proses pengecoran, sementara fasilitas produksi hidrogen diperlakukan secara terpisah apabila dihitung menggunakan pendekatan Levelized Cost of Hydrogen (LCOH).

Analisis daya saing biaya

Penelitian ini menggunakan kerangka Levelized Cost of Steel (LCOS) (Bataille, 2020) sebagai metode utama untuk menganalisis daya saing biaya. Pendekatan ini merupakan standar internasional dalam studi tekno-ekonomi karena mampu membandingkan biaya produksi sepanjang

umur proyek, sehingga lebih komprehensif dibandingkan sekadar membandingkan harga pada satu titik waktu.

Analisis LCOS difokuskan pada beberapa faktor utama yang membentuk green premium, yaitu:

1. Biaya energi, terutama kebutuhan listrik yang jauh lebih tinggi pada teknologi EAF maupun produksi hidrogen hijau melalui elektrolisis.
2. Biaya bahan baku, khususnya ketersediaan dan harga bijih besi berkualitas DRI yang saat ini masih kurang dari 5% dari total pasokan bijih besi dunia.
3. Biaya investasi (CAPEX), mengingat pembangunan fasilitas baja hijau generasi pertama memerlukan investasi awal yang tinggi serta menghadapi risiko teknologi yang lebih besar.
4. Instrumen kebijakan, seperti penerapan harga karbon maupun subsidi hidrogen hijau, yang disimulasikan untuk menentukan titik impas (*break-even point*) ketika baja hijau dapat bersaing dengan baja konvensional.

Analisis daya saing biaya menggunakan empat indikator utama yang saling melengkapi, yaitu:

- Levelized Cost of Steel (LCOS);
- Net Present Value (NPV), baik pada tingkat diskonto finansial (10%) maupun tingkat diskonto ekonomi (5%);
- Internal Rate of Return (IRR) dan Economic Internal Rate of Return (EIRR); serta
- Benefit-Cost Ratio (BCR).

Keempat indikator tersebut dihitung untuk seluruh lima skenario teknologi menggunakan horizon analisis yang sama selama 20 tahun.

LCOS — Levelized Cost of Steel

LCOS mengukur rata-rata biaya produksi satu ton baja selama umur proyek dan dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$LCOS = \frac{NPV(CAPEX + OPEX)}{NPV(Production)}$$

Baik biaya maupun volume produksi didiskontokan menggunakan tingkat diskonto finansial sebesar 10%. Investasi (CAPEX) diasumsikan dikeluarkan selama dua tahun pertama pembangunan, sedangkan biaya operasi (OPEX) mulai dihitung sejak tahun ketiga ketika fasilitas mulai beroperasi.

Model juga menghitung LCOS setelah memperhitungkan pendapatan dari kredit karbon, yaitu dengan mengurangi nilai sekarang (*present value*) dari pendapatan kredit karbon terhadap total biaya produksi.

Financial NPV and IRR

Financial NPV menghitung nilai kini dari arus kas yang diterima perusahaan, yang meliputi:

- Pendapatan dari penjualan baja (harga acuan USD650/ton);
- Pendapatan dari perdagangan kredit karbon berdasarkan emisi yang berhasil dihindari;
- Biaya operasional (OPEX);
- Biaya investasi (CAPEX) pembangunan baru maupun retrofit fasilitas yang sudah ada;
- Pembayaran pajak dan royalti sebesar 18% dari pendapatan.

Sementara itu, IRR dibandingkan dengan tingkat pengembalian minimum investasi swasta sebesar 10%. Skenario dengan IRR di atas 10% dianggap layak secara finansial.

Economic NPV and EIRR

Economic NPV memperluas analisis dengan memasukkan manfaat dan biaya sosial, antara lain:

- manfaat penciptaan lapangan kerja;
- dampak pengganda terhadap PDB;
- manfaat dari penurunan kerusakan lingkungan;
- biaya sosial karbon;
- biaya kesehatan akibat polusi udara.

Perhitungan menggunakan tingkat diskonto sosial sebesar 5%, sedangkan transfer keuangan seperti pajak maupun kredit karbon tidak dimasukkan karena hanya merupakan redistribusi sumber daya.

EIRR digunakan sebagai indikator kelayakan investasi dari perspektif masyarakat. Suatu skenario dinilai layak memperoleh dukungan pemerintah apabila memiliki EIRR lebih besar dari 5%, meskipun IRR finansialnya mungkin masih berada di bawah tingkat pengembalian yang diharapkan oleh sektor swasta.

Benefit-Cost Ratio (BCR)

BCR merupakan rasio antara nilai kini seluruh manfaat terhadap nilai kini seluruh biaya menggunakan tingkat diskonto ekonomi. Nilai BCR lebih besar dari 1 menunjukkan bahwa

investasi memberikan manfaat sosial yang lebih besar dibandingkan biayanya.

Analisis perdagangan dan pasar

Analisis perdagangan dan pasar digunakan untuk menempatkan hasil analisis daya saing biaya dalam konteks lingkungan eksternal yang dihadapi industri baja Indonesia. Analisis dilakukan melalui tiga perspektif utama.

• Posisi di Pasar Domestik

Kapasitas produksi agregat sebesar 44.450 kTPA dibandingkan dengan proyeksi pertumbuhan permintaan baja nasional untuk mengidentifikasi potensi surplus produksi dan kebutuhan ekspor selama periode analisis.

• Persaingan Impor dan Disiplin Harga

Harga acuan baja sebesar USD650 per ton dikalibrasi terhadap harga baja canai panas (*hot-rolled coil*) di kawasan Asia Timur yang menjadi acuan utama pasar Indonesia mengingat tingginya impor dari Tiongkok, Vietnam, dan Korea Selatan.

• Paparan terhadap CBAM

Mekanisme CBAM Uni Eropa yang mulai diterapkan secara penuh sejak tahun 2026 mengenakan biaya berdasarkan kandungan karbon produk baja impor. Oleh karena itu, setiap skenario dianalisis berdasarkan tingkat paparannya terhadap CBAM. Skenario BAU menghadapi beban karbon paling tinggi, sedangkan jalur DRI-EAF—khususnya yang menggunakan hidrogen biru maupun hidrogen hijau—menghadapi penyesuaian karbon yang jauh lebih rendah. Kondisi ini memberikan keunggulan kompetitif bagi teknologi rendah karbon di pasar ekspor, meskipun manfaat tersebut belum sepenuhnya tercermin dalam analisis NPV finansial domestik.

Pendapatan dari perdagangan kredit karbon diperlakukan sebagai insentif berbasis pasar, bukan sebagai subsidi. Pendapatan tersebut merefleksikan implementasi Peraturan Presiden Nomor 110 Tahun 2025 serta rencana perluasan sistem perdagangan karbon Indonesia ke sektor industri, termasuk industri besi dan baja, mulai tahun 2027. Selain itu, dilakukan analisis sensitivitas terhadap variasi harga kredit karbon pada kisaran USD0–120 per ton CO₂ untuk mengevaluasi efektivitas instrumen kebijakan tersebut dalam meningkatkan daya saing baja hijau.

BAB 4

DAYA SAING DAN ANALISIS PASAR

4.1. Analisis Biaya

Analisis biaya mengevaluasi setiap skenario berdasarkan lima dimensi yang saling melengkapi, yaitu LCOS, indikator finansial dan ekonomi (NPV, EIRR, dan BCR), daya saing biaya terhadap harga pasar yang berlaku, tingkat kesiapan teknologi beserta kondisi pendukungnya (*technology readiness and enabling conditions*), *Green Public Procurement* (GPP) sebagai mekanisme yang mendorong permintaan (*demand-side mechanism*), serta *Marginal Abatement Cost* (MAC). Secara keseluruhan, kelima dimensi tersebut memberikan gambaran yang terintegrasi mengenai struktur biaya sekaligus kondisi kelembagaan yang menentukan jalur dekarbonisasi mana yang paling realistis untuk diterapkan dalam konteks Indonesia.

Analisis LCOS

LCOS mengukur total biaya produksi baja sepanjang umur proyek yang dinormalisasi menjadi biaya per ton baja yang dihasilkan (Ellersdorfer et al., 2024). Hasil analisis menunjukkan adanya hierarki biaya yang jelas, mulai dari skenario *Business as Usual* (BAU) sebagai jalur dengan biaya terendah hingga DRI-EAF berbasis hidrogen hijau (*Green-Hydrogen DRI-EAF*) sebagai jalur dengan biaya tertinggi. Temuan ini mencerminkan besarnya *green premium* atau tambahan biaya dekarbonisasi yang saat ini masih harus ditanggung Indonesia berdasarkan kondisi teknologi yang ada.

Tabel 3. LCOS dari masing-masing skenario

Skenario	LCOS (gross)	LCOS (net of credits)	Premium vs BAU (gross)	Premium net of credits	Margin vs Harga Pasar \$650/t
S1 — BAU (BF-BOF Coal)	\$500	\$500	\$0	\$0	\$150
S2 — EAF (Scrap)	\$564	\$509	\$64	\$9	\$141
S3 — DRI-EAF (Gas Alam)	\$635	\$604	\$135	\$104	\$46
S4 — DRI-EAF (Hidrogen Hijan)	\$675	\$613	\$175	\$113	\$37
S5 — DRI-EAF (Hidrogen Hijau dan Listrik Energi Terbarukan)	\$806	\$730	\$306	\$230	(\$80)

Keterangan: LCOS per skenario (USD per ton baja kasar, harga tahun 2026). Kredit karbon diasumsikan sebesar USD25/tCO₂.

Terdapat tiga temuan utama dari hasil tersebut. Pertama, *green premium* sebelum memperhitungkan kredit karbon berkisar antara USD64 per ton pada teknologi EAF hingga USD306 per ton pada teknologi DRI-EAF berbasis hidrogen hijau. Perbedaan yang hampir enam kali lipat ini mencerminkan perbedaan tingkat kematangan teknologi (*technology maturity*) serta karakteristik ekonomi bahan baku pada masing-masing jalur produksi.

Kedua, penerapan kredit karbon sebesar USD25 per ton CO₂ mampu menurunkan *green premium* secara signifikan. Pada skenario EAF, tambahan biaya turun dari USD64 menjadi hanya USD9 per ton, sehingga secara praktis hampir mencapai tingkat biaya yang setara dengan skenario BAU.

Ketiga, hanya skenario DRI-EAF berbasis hidrogen hijau yang menghasilkan nilai LCOS di atas harga pasar baja saat ini sebesar USD650 per ton. Kondisi ini menunjukkan bahwa teknologi tersebut belum mampu menutup biaya produksinya tanpa adanya peningkatan nilai kredit karbon, penurunan harga hidrogen, maupun adanya premium harga untuk baja hijau di pasar.

Hasil penelitian ini juga mengonfirmasi temuan yang telah banyak dibuktikan dalam literatur internasional, yaitu bahwa *Electric Arc Furnace* (EAF) berbasis *scrap* merupakan jalur dekarbonisasi dengan biaya terendah, selama ketersediaan baja bekas (*scrap*) mencukupi. Dalam konteks Indonesia, keterbatasan pasokan *scrap* domestik masih menjadi hambatan utama bagi penerapan skenario EAF secara luas.

Analisis finansial: NPV, EIRR, dan BCR

Analisis finansial dan ekonomi dalam penelitian ini membedakan antara manfaat privat (*private returns*) dan manfaat sosial (*social returns*). Indikator finansial, yaitu *Net Present Value* (NPV) pada tingkat diskonto 10% dan *Internal Rate of Return* (IRR), merepresentasikan perspektif perusahaan sebagai pelaku investasi. Sebaliknya, indikator ekonomi berupa NPV pada tingkat diskonto sosial 5%, *Economic Internal Rate of Return* (EIRR), dan *Benefit-Cost Ratio* (BCR) merepresentasikan perspektif pemerintah sebagai perencana sosial yang memperhitungkan secara penuh biaya eksternal akibat emisi karbon dan polusi udara, sekaligus manfaat ekonomi berupa penciptaan lapangan kerja dan kontribusi terhadap Produk Domestik Bruto (PDB).

Parameter-parameter tersebut dijelaskan sebagai berikut.

- **NPV (*Net Present Value*)**

NPV mengukur total nilai yang diciptakan atau dikurangi oleh suatu proyek selama umur ekonominya dalam nilai uang saat ini. Karena nilai uang di masa depan lebih rendah dibandingkan nilai uang saat ini, seluruh arus kas masa depan didiskontokan ke nilai sekarang menggunakan tingkat diskonto tertentu. NPV yang bernilai positif menunjukkan bahwa proyek menghasilkan manfaat ekonomi yang lebih besar dibandingkan biayanya, sedangkan NPV negatif menunjukkan bahwa proyek mengurangi nilai ekonomi.

Dalam penelitian ini digunakan dua jenis NPV. NPV finansial dengan tingkat diskonto 10% merepresentasikan sudut pandang investor swasta, sedangkan NPV ekonomi dengan tingkat diskonto 5% mencerminkan perspektif pemerintah dan masyarakat. Tingkat diskonto sosial yang lebih rendah digunakan karena kebijakan publik perlu mempertimbangkan manfaat jangka panjang—seperti penurunan biaya kesehatan dan kerugian akibat perubahan iklim—yang umumnya belum tercermin dalam mekanisme pasar.

- **IRR (*Internal Rate of Return*)**

IRR finansial merupakan tingkat pengembalian investasi tahunan yang diperoleh investor. Secara teknis, IRR adalah tingkat diskonto yang menyebabkan nilai NPV sama dengan nol atau titik impas (*break-even*). Semakin tinggi nilai IRR, semakin menarik suatu investasi.

Dalam penelitian ini digunakan tingkat pengembalian minimum (*hurdle rate*) sebesar 10%, yang dianggap sebagai tingkat keuntungan minimum yang diharapkan investor swasta sebelum menanamkan modal pada proyek industri di Indonesia. Skenario yang memiliki IRR di bawah 10% diperkirakan tidak akan mampu menarik pembiayaan swasta tanpa dukungan kebijakan seperti subsidi, pinjaman berbunga rendah (*concessional loans*), maupun mekanisme penetapan harga karbon.

- **IRR vs 10% *hurdle***

Indikator ini menunjukkan selisih antara nilai IRR masing-masing skenario dengan *hurdle rate* sebesar 10%, yang dinyatakan dalam satuan *persentase poin* (*percentage points/pp*).

Nilai positif menunjukkan bahwa proyek melampaui tingkat keuntungan minimum yang diharapkan investor, sedangkan nilai negatif menunjukkan bahwa proyek belum memenuhi ekspektasi tersebut. Sebagai contoh, nilai $-6,2$ *pp* menunjukkan bahwa proyek hanya menghasilkan tingkat pengembalian sebesar 3,8%, sementara investor mengharapkan minimal 10%, sehingga terdapat kekurangan sebesar 6,2 poin persentase yang perlu ditutup melalui instrumen kebijakan.

- **EIRR (*Economic Internal Rate of Return*)**

EIRR menggunakan konsep yang sama dengan IRR, namun mengukur manfaat ekonomi secara lebih luas. Selain memperhitungkan arus kas finansial, EIRR juga memasukkan manfaat sosial dan lingkungan, seperti berkurangnya kematian dini akibat penurunan polusi udara, berkurangnya kerugian ekonomi akibat emisi karbon, penghematan impor energi, serta dampak terhadap penciptaan lapangan kerja.

Dengan demikian, EIRR menjawab pertanyaan: pada tingkat diskonto berapa manfaat sosial secara keseluruhan sama dengan total biaya sosial proyek? Nilai EIRR yang tinggi menunjukkan bahwa proyek memberikan manfaat yang besar bagi masyarakat meskipun belum tentu menarik bagi investor swasta. Seluruh skenario dalam penelitian ini memiliki nilai EIRR jauh di atas tingkat diskonto sosial sebesar 5%, yang menunjukkan bahwa seluruh jalur dekarbonisasi layak secara ekonomi dari perspektif kepentingan publik.

- **EIRR vs 5% social discount (pp)**

Indikator ini menghitung selisih antara nilai EIRR dan tingkat diskonto sosial sebesar 5%. Nilai tersebut menunjukkan seberapa jauh suatu proyek melampaui tingkat manfaat sosial minimum yang diharapkan. Seluruh skenario memiliki selisih positif yang cukup besar, yaitu antara +27,4 hingga +44,0 poin persentase, yang mengindikasikan bahwa seluruh alternatif dekarbonisasi menghasilkan manfaat sosial yang jauh lebih tinggi dibandingkan batas minimum. Temuan ini memperkuat justifikasi ekonomi bagi intervensi kebijakan pemerintah, terlepas dari teknologi yang dipilih.

- **BCR – Benefit-Cost Ratio (social, at 5%)**

Benefit-Cost Ratio (BCR) merupakan indikator ringkasan yang paling penting bagi pengambilan kebijakan. BCR dihitung sebagai rasio antara nilai kini seluruh manfaat sosial dengan nilai kini seluruh biaya sosial menggunakan tingkat diskonto sebesar 5%.

Nilai BCR = 1 menunjukkan bahwa manfaat sama dengan biaya. Nilai BCR > 1 menunjukkan bahwa setiap satu dolar yang dikeluarkan menghasilkan manfaat sosial lebih dari satu dolar sehingga investasi layak didukung dari perspektif alokasi sumber daya publik. Sebaliknya, nilai BCR < 1 menunjukkan bahwa proyek mengonsumsi sumber daya sosial lebih besar daripada manfaat yang dihasilkannya.

Seluruh skenario memiliki BCR di atas 1, yang mengindikasikan bahwa dukungan publik terhadap dekarbonisasi industri baja layak diberikan. Di antara seluruh alternatif, skenario EAF (S2) memiliki nilai BCR tertinggi sebesar 1,81, yang berarti setiap USD1 dana publik menghasilkan USD1,81 manfaat sosial. Hal ini menjadikan EAF sebagai alternatif dengan efisiensi penggunaan dana publik tertinggi.

Tabel 4. Analisis keuangan pada setiap skenario

Metrik	S1 BAU	S2 EAF	S3 DRI-EAF Gas Alam	S4 DRI EAF Green-H ₂	S5 DRI-EAF Green-H ₂ dan Listrik Energi Terbarukan
NPV (financial @ 10%) – \$M	7,978	5,819	(17,080)	(19,228)	(47,493)
IRR (Financial)	14.1%	12.2%	3.8%	4.0%	< 0%
<i>IRR vs 10% hurdle (pp)</i>	+4.1	+2.2	(6.2)	(6.0)	n/a
NPV (economic @ 5%) – \$M	116,632	222,731	150,518	208,082	196,952
EIRR (Economic)	39.3%	49.0%	32.5%	37.2%	32.4%
<i>EIRR vs 5% social discount (pp)</i>	+34.3	+44.0	+27.5	+32.2	+27.4
BCR (social, at 5%)	1.30x	1.81x	1.40x	1.59x	1.42x

Hasil analisis menunjukkan adanya perbedaan yang sangat jelas antara perspektif finansial dan perspektif ekonomi. Dari sudut pandang perusahaan, skenario *Business as Usual* (BAU) merupakan pilihan yang paling menarik karena menjadi satu-satunya skenario dengan NPV finansial yang sangat positif (USD8 miliar) dan IRR yang jauh melampaui tingkat pengembalian minimum sebesar 10% (14,1%). Di antara alternatif rendah karbon, hanya EAF yang juga memenuhi kriteria kelayakan finansial dengan IRR sebesar 12,2%. Sebaliknya, ketiga varian DRI-EAF belum memenuhi kelayakan investasi swasta berdasarkan asumsi dasar yang digunakan dalam penelitian ini.

Namun demikian, perspektif ekonomi menghasilkan kesimpulan yang berbeda. Dengan menggunakan tingkat diskonto sosial sebesar 5%, EAF menjadi skenario dengan kinerja terbaik karena memiliki NPV ekonomi tertinggi (USD222,7 miliar), EIRR tertinggi (49,0%), serta BCR tertinggi (1,81). Seluruh skenario juga memiliki nilai EIRR di atas tingkat diskonto sosial, yang menunjukkan bahwa seluruh jalur dekarbonisasi memberikan manfaat sosial yang positif pada tingkat valuasi eksternalitas saat ini. Meskipun demikian, perbedaan antar skenario cukup signifikan. Teknologi yang lebih bersih

menghasilkan manfaat sosial yang jauh lebih besar untuk setiap dolar investasi (CAPEX) setelah biaya eksternal lingkungan diperhitungkan.

Perbedaan antara hasil analisis finansial dan ekonomi tersebut menjadi justifikasi kuantitatif bagi perlunya intervensi kebijakan.

Skenario DRI-EAF berbasis hidrogen biru maupun hidrogen hijau memiliki kesenjangan terbesar antara kelayakan finansial dan manfaat

sosial, sehingga memiliki dasar ekonomi yang paling kuat untuk memperoleh subsidi langsung atau dukungan melalui mekanisme kredit karbon. DRI-EAF berbasis gas alam berada pada posisi menengah sebagai teknologi transisi, sedangkan EAF merupakan teknologi yang paling mendekati kelayakan investasi swasta dan akan memperoleh manfaat terbesar melalui kebijakan yang meningkatkan ketersediaan baja bekas (*scrap*) dibandingkan pemberian insentif finansial secara langsung.

Analisis daya saing biaya

Analisis daya saing biaya merupakan sintesis dari keseluruhan analisis sebelumnya, yaitu menjawab pertanyaan: pada harga pasar baja sebesar USD650 per ton, skenario mana yang memiliki daya saing secara ekonomi dan skenario mana yang masih bergantung pada dukungan kebijakan? Untuk menjawab pertanyaan tersebut, analisis ini mengintegrasikan hasil *Levelized Cost of Steel* (LCOS) dan analisis kelayakan finansial.

Tabel 5. Daya Saing Biaya pada Setiap Skenario

Skenario	Margin pada harga \$650/t	Harga Karbon yang Dibutuhkan agar IRR > 10%	Kesimpulan Daya Saing
S1 – BAU	+\$150/t (gross)	Sudah terpenuhi (IRR 14%)	Kompetitif secara finansial, tetapi rentan terhadap penerapan CBAM dan peningkatan <i>Social Cost of Carbon</i> (SCC)
S2 – EAF	+\$141/t (setelah kredit karbon)	~\$15/tCO ₂	Jalur rendah karbon yang paling kompetitif; kendala utama adalah ketersediaan scrap
S3 – NG-DRI-EAF	+\$46/t (setelah kredit karbon)	~\$80/tCO ₂	Kompetitif dari sisi biaya, tetapi belum memenuhi tingkat pengembalian minimum investor; memerlukan peningkatan harga karbon
S4 – Hidrogen Hijau	+\$37/t (with credits)	~\$60/tCO ₂	Memberikan pengurangan emisi terbesar di antara jalur berbasis gas, namun memerlukan dukungan harga karbon dan infrastruktur CCS
S5 – Hidrogen Hijau dan Listrik dari Energi Terbarukan	(-\$80/t)	~\$120/tCO ₂	Belum kompetitif; hanya layak apabila biaya hidrogen turun secara signifikan atau terdapat harga karbon yang tinggi

Hasil analisis menunjukkan adanya tiga kelompok utama daya saing. Pertama, teknologi yang telah kompetitif secara finansial saat ini (S1 dan S2). Skenario BAU dan EAF sama-sama memiliki IRR di atas tingkat pengembalian minimum (10%) serta menghasilkan margin keuntungan positif pada harga baja saat ini. Di antara keduanya, EAF merupakan satu-satunya teknologi rendah karbon yang telah memenuhi kriteria kelayakan investasi swasta.

Kedua, teknologi yang bergantung pada harga karbon (S3 dan S4). Skenario DRI-EAF berbasis gas alam dan DRI-EAF berbasis hidrogen biru (Blue-H₂) berada pada ambang kelayakan investasi swasta. Kedua teknologi tersebut akan mampu melampaui IRR sebesar 10% apabila harga karbon berada pada kisaran USD60–80 per tCO₂, yang masih berada dalam rentang harga *European Union Emissions*

Trading System (EU ETS).

Ketiga, teknologi jangka panjang (S5). Skenario DRI-EAF berbasis hidrogen hijau baru dapat memenuhi tingkat pengembalian minimum apabila harga hidrogen turun secara signifikan atau harga karbon meningkat hingga melebihi USD120 per tCO₂.

Dari perspektif dinamika pasar, implikasinya cukup jelas. Dalam jangka pendek, dekarbonisasi industri baja Indonesia kemungkinan besar akan dipimpin oleh ekspansi *Electric Arc Furnace (EAF)* pada wilayah yang memiliki ketersediaan *scrap*, serta pembangunan *Natural Gas DRI-EAF* pada proyek-proyek baru maupun retrofit fasilitas industri yang telah ada (*brownfield retrofits*). Sebaliknya, jalur produksi berbasis hidrogen diperkirakan belum akan diterapkan secara luas sebelum tahun 2030, kecuali apabila harga karbon meningkat secara signifikan, terdapat premium harga baja hijau yang dijamin melalui kontrak pembelian (*offtake agreements*), atau biaya produksi hidrogen mengalami penurunan yang substansial.

Tingkat kesiapan teknologi dan kondisi pendukung

Indikator biaya saja tidak cukup untuk menentukan apakah suatu teknologi dapat diimplementasikan. Suatu teknologi juga harus memiliki tingkat kematangan yang memadai untuk diterapkan pada skala industri, serta didukung oleh ekosistem yang memadai di Indonesia, termasuk ketersediaan bahan baku, infrastruktur, sumber daya manusia, dan kerangka regulasi.

Bagian ini mengevaluasi setiap skenario berdasarkan empat dimensi utama, yaitu *Technology Readiness Level (TRL)*, keterbatasan bahan baku dan infrastruktur, keselarasan dengan kebijakan industri nasional, serta risiko utama dalam implementasinya.



Tabel 6. Tingkat Kesiapan Teknologi dan Kondisi Pendukung Berdasarkan Skenario

Skenario	TRL	Kendala Bahan Baku/Energi	Infrastruktur yang Dibutuhkan	Kesesuaian dengan Kebijakan	Risiko Utama Implementasi
S1 BAU	9	Ketergantungan pada impor batu bara kokas serta volatilitas biaya pengangkutan	Infrastruktur yang ada; tidak memerlukan pembangunan baru	Bertentangan dengan target NDC dan rentan terhadap CBAM	Eskalasi biaya CBAM setelah 2026 serta risiko menjadi <i>stranded asset</i> pada 2035–2040
S2 EAF	9	Ketersediaan <i>scrap</i> : hanya sekitar 4,5 juta ton per tahun dibandingkan kebutuhan sekitar 35 juta ton per tahun	Peningkatan kapasitas jaringan listrik hingga 80% serta penguatan sistem logistik <i>scrap</i>	Selaras dengan agenda efisiensi sumber daya dan ekonomi sirkular	Defisit <i>scrap</i> sekitar 30 juta ton per tahun sehingga memerlukan impor maupun peningkatan sistem pengumpulan domestik
S3 NG-DRI	8–9	Ketergantungan pada gas alam; jaringan pipa Pertamina/Pertagas telah menjangkau klaster industri utama	Tungku poros DRI (<i>shaft furnace</i>), pabrik pelet, serta jaringan pipa gas	Sejalan dengan kebijakan transisi energi berbasis gas dan mendukung pembangunan pabrik baru di Morowali	Volatilitas harga gas serta risiko gas lock-in apabila transisi menuju hidrogen tertunda
S4 Green -H₂	6–7	Membutuhkan pasokan gas domestik dan fasilitas Carbon Capture and Storage (CCS); terdapat 19 proyek CCS yang direncanakan Kementerian ESDM hingga 2030	Infrastruktur pipa dan penyimpanan CCS, distribusi hidrogen, serta tungku DRI hijau	Selaras dengan Peraturan Presiden Nomor 14 Tahun 2024 tentang CCS dan Nota Kesepahaman Indonesia–Singapura	Ketidakpastian kapasitas penyimpanan geologi untuk CCS serta penurunan biaya produksi hidrogen biru
S5 Hidrogen Hijau dan Listrik dari Energi Terbarukan	5–6	Membutuhkan listrik energi terbarukan; RUPTL PLN 2025–2034 menargetkan tambahan kapasitas 71 GW energi terbarukan	Kawasan elektroliser berskala besar, sistem transportasi dan penyimpanan hidrogen, serta fasilitas DRI	Selaras dengan target Net Zero Emissions 2060 dan kebijakan industri hijau Kementerian Perindustrian	Biaya hidrogen masih jauh di atas titik impas (USD4–6/kg dibandingkan kebutuhan USD1,4–1,7/kg) serta perlunya pengembangan kapasitas elektroliser

BAU (S1) — Terbukti secara Komersial, tetapi Semakin Terpinggirkan oleh Perkembangan Kelembagaan

Teknologi *Blast Furnace–Basic Oxygen Furnace* (BF-BOF) memiliki *Technology Readiness Level* (TRL) 9 dan tidak memerlukan pembangunan infrastruktur baru. Teknologi ini juga merupakan konfigurasi yang digunakan oleh sebagian besar kapasitas produksi baja Indonesia yang telah diumumkan, yaitu sekitar 44.450 kTPA. Namun demikian, kondisi pendukung bagi teknologi ini semakin melemah. Biaya impor batu bara kokas sangat rentan terhadap volatilitas biaya pengangkutan (*freight cost*) dan perubahan kebijakan ekspor batu bara Indonesia. Lebih penting lagi, *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM) Uni Eropa—yang mulai mengenakan biaya karbon atas emisi yang terkandung dalam baja impor sejak tahun 2026—secara efektif menciptakan tarif implisit yang terus meningkat terhadap baja yang diproduksi melalui skenario BAU dan diekspor ke pasar Eropa.

Kementerian Perindustrian Indonesia juga mengakui kerentanan tersebut (Mongabay, Februari 2026), dengan menyatakan bahwa tanpa adanya batas wajib intensitas emisi serta mekanisme verifikasi oleh pihak ketiga, produsen baja Indonesia berisiko kehilangan akses ke pasar ekspor premium. Selain itu, Peraturan Kementerian Perindustrian tahun 2024 telah menetapkan batas intensitas emisi pada tingkat produk untuk baja lembaran (*flat steel*) melalui kerangka Standar Industri Hijau (SIH). Regulasi tersebut menandai dimulainya tekanan regulatif terhadap produksi baja melalui jalur BAU.

EAF (S2) — Terbukti secara Komersial, tetapi Terkendala Ketersediaan Bahan Baku

Teknologi *Electric Arc Furnace* (EAF) juga telah mencapai TRL 9 dan telah digunakan secara luas, baik di tingkat global maupun di Indonesia, antara lain oleh PT Gunung Raja Paksi, PT Ispat Indo, dan perusahaan lainnya. Kendala utama yang dihadapi teknologi ini adalah ketersediaan baja bekas (*scrap*).

Pada tahun 2023, permintaan *scrap* di Indonesia meningkat 10,7% dibandingkan tahun sebelumnya menjadi 18,5 juta ton. Kebutuhan tersebut sebagian besar masih dapat dipenuhi oleh pasokan domestik, sementara impor justru menurun 8,5% menjadi 1,1 juta ton (SEIASI, 2023). Namun demikian, penerapan skenario EAF secara penuh pada seluruh sektor diperkirakan

membutuhkan sekitar 35 juta ton *scrap* per tahun, sehingga terdapat kesenjangan sekitar tujuh kali lipat dibandingkan ketersediaan saat ini.

Menutup kesenjangan tersebut memerlukan kombinasi beberapa langkah, yaitu: (i) pembangunan sistem pengumpulan dan pengolahan *scrap* yang terorganisasi di dalam negeri; (ii) pengaturan impor *scrap*, yang memungkinkan mengingat ketersediaannya di kawasan seperti Jepang dan Korea Selatan; serta (iii) peningkatan bertahap cadangan *scrap* domestik selama beberapa dekade seiring bertambahnya stok baja yang digunakan di Indonesia.

Dalam jangka pendek, penerapan EAF secara bertahap masih realistis. Kapasitas sekitar 8–12 juta ton dari proyek-proyek yang telah diumumkan—terutama pada pabrik yang telah menggunakan atau memang dirancang menggunakan teknologi EAF—diperkirakan dapat terealisasi pada tahun 2030. *Global Efficiency Intelligence (GEI) Net-Zero Roadmap for Indonesia's Steel Industry* (2024) bahkan menempatkan ekspansi EAF sebagai prioritas utama dekarbonisasi industri baja Indonesia dalam jangka pendek.

DRI-EAF berbasis Gas Alam (S3) — Teknologi yang Matang dan Selaras dengan Sektor Gas Indonesia

Teknologi *Direct Reduced Iron–Electric Arc Furnace* (DRI-EAF) berbasis gas alam (proses Midrex dan Energiron) telah mencapai TRL 8–9, dengan kapasitas operasi global sekitar 150 juta ton per tahun, serta menjadi teknologi standar pada pusat-pusat industri baja di kawasan Timur Tengah.

Di Indonesia, infrastruktur milik Pertamina dan Pertamina telah menjangkau kluster industri utama di Cilegon, Ciwandan, dan Morowali, yang merupakan lokasi utama ekspansi DRI yang telah diumumkan. Proyek PT Dexin Cilegon berkapasitas 14.000 kTPA, serta beberapa proyek baru di Morowali, sejak awal telah dirancang menggunakan konfigurasi DRI-EAF berbasis gas alam.

Kendala utama implementasi teknologi ini meliputi: (i) kebutuhan akan pabrik pelet khusus untuk menghasilkan pelet bijih besi berkualitas tinggi sebagai bahan baku DRI (bukan bijih besi bongkah/lump ore); serta (ii) struktur tarif gas yang mampu menjaga keekonomian proses DRI. Saat ini, harga gas industri di Pulau Jawa berada pada

kisaran USD6–7/MMBTU, yang telah mendekati batas atas tingkat harga yang masih dapat ditoleransi oleh industri DRI. Rencana pemerintah untuk merevisi regulasi hilirisasi gas (yang masih dalam proses pada tahun 2026) berpotensi mendukung penurunan harga gas industri bagi investasi strategis dekarbonisasi.

Selain itu, DRI-EAF berbasis gas alam merupakan teknologi yang paling ideal sebagai jembatan menuju penggunaan hidrogen. Fasilitas shaft furnace yang sama dapat mulai menggunakan campuran hidrogen (*co-firing*) ketika pasokannya tersedia, dengan tingkat pencampuran yang meningkat secara bertahap (20%, 50%, hingga 100%). Dengan demikian, fasilitas yang dibangun saat ini telah siap bertransisi sepenuhnya menuju hidrogen pada masa mendatang. Pendekatan desain “H₂-ready DRI” ini secara eksplisit direkomendasikan dalam IEA Iron and Steel Roadmap 2024 maupun *Global Efficiency Intelligence Indonesia Net-Zero Roadmap 2024*.

DRI-EAF berbasis Hidrogen Hijau (S4) — Kondisi Pendukung Sedang Dibangun

Hidrogen biru (*Blue Hydrogen*)—yang diproduksi dari gas alam dengan teknologi *Carbon Capture and Storage* (CCS)—berada pada TRL 6–7 untuk aplikasi industri baja berbasis DRI.

Kondisi pendukung utama bagi teknologi ini adalah tersedianya infrastruktur CCS, yang saat ini tengah dikembangkan secara aktif di Indonesia. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) telah mengidentifikasi 19 proyek CCS potensial yang ditargetkan mulai beroperasi pada tahun 2030, dengan proyek utama antara lain Tangguh CCUS di Papua Barat (BP) dan Gundih CCS di Jawa Tengah (Pertamina).

Selain itu, Peraturan Presiden Nomor 14 Tahun 2024 telah menyediakan kerangka hukum bagi implementasi CCS, sedangkan Nota Kesepahaman Indonesia–Singapura yang ditandatangani pada Juni 2025 membuka peluang perdagangan karbon lintas negara melalui mekanisme penangkapan dan penyimpanan karbon.

Skenario Blue-H₂ DRI-EAF merupakan jalur yang paling selaras dengan arah pengembangan infrastruktur CCS di Indonesia. Teknologi ini juga menawarkan kombinasi terbaik antara pengurangan emisi yang sangat besar (78% dibandingkan BAU) dengan tambahan investasi modal (CAPEX) yang masih relatif moderat

dibandingkan DRI-EAF berbasis gas alam, yaitu sekitar USD225 per ton. Meskipun demikian, risiko utama implementasinya adalah kepastian ketersediaan formasi geologi yang memadai untuk penyimpanan karbon di lokasi yang cukup dekat dengan kluster industri baja.

DRI-EAF berbasis Hidrogen Hijau (S5) — Long-horizon enablement

Hidrogen hijau yang diproduksi melalui proses elektrolisis menggunakan listrik dari energi terbarukan, saat ini berada pada TRL 5–6 untuk aplikasi industri baja berskala besar. Keberhasilan implementasinya bergantung pada dua prasyarat utama, yaitu ketersediaan listrik dari energi terbarukan serta pengembangan kapasitas elektroliser. Melalui RUPTL PLN 2025–2034, pemerintah merencanakan penambahan kapasitas energi terbarukan sebesar 71 GW, dengan sekitar 70% berasal dari tenaga surya, air, panas bumi, dan bioenergi. Rencana tersebut menjadi fondasi utama penyediaan listrik hijau di masa depan. Namun demikian, kebutuhan energi sektor baja berbasis Green-H₂ DRI-EAF akan sangat besar. Industri DRI-EAF berkapasitas 35 juta ton per tahun diperkirakan memerlukan sekitar 70–80 TWh listrik terbarukan setiap tahun serta 6–7 juta ton hidrogen hijau per tahun, yang jauh melampaui kapasitas pengembangan elektroliser Indonesia dalam jangka pendek. Saat ini, biaya produksi hidrogen hijau di Indonesia masih berada pada kisaran USD4–6/kg, sedangkan titik impas (*break-even*) agar Green-H₂ DRI-EAF layak secara ekonomi diperkirakan hanya sekitar USD1,4–1,7/kg (Rosner et al., 2023). Dengan demikian, Green-H₂ DRI-EAF merupakan teknologi yang secara realistis baru dapat diterapkan secara luas di Indonesia setelah tahun 2035. Meskipun demikian, proyek-proyek percontohan (*pilot projects*) serta pembangunan fasilitas DRI yang telah siap menggunakan hidrogen (*hydrogen-ready DRI*) sudah dapat dimulai sejak saat ini untuk membangun kesiapan kelembagaan, rantai pasok, dan kapasitas industri pada masa mendatang.

Pengadaan barang dan jasa pemerintah hijau (Green Public Procurement) sebagai mekanisme sisi permintaan

Green Public Procurement (GPP) merupakan pemanfaatan daya beli pemerintah untuk menciptakan dan mempertahankan permintaan terhadap material rendah emisi, sehingga dapat mengurangi risiko investasi swasta pada teknologi yang lebih bersih. Indonesia merupakan pasar infrastruktur sektor publik terbesar di Asia Tenggara. Belanja pengadaan pemerintah mencakup lebih dari 45% total pengeluaran pemerintah, atau sekitar USD78,5 miliar per tahun, yang setara dengan 6,6% dari Produk Domestik Bruto (PDB) (IISD, November 2024). Sektor infrastruktur, konstruksi, dan pekerjaan umum—yang merupakan konsumen utama baja—mendominasi nilai pengadaan tersebut. Oleh karena itu, penerapan GPP untuk baja hijau merupakan salah satu instrumen sisi permintaan yang paling kuat yang dimiliki pemerintah Indonesia.

Kerangka GPP di Indonesia Saat Ini

Indonesia telah membangun kerangka kebijakan GPP melalui Peraturan Presiden Nomor 16 Tahun 2018 tentang Pengadaan Barang/Jasa Pemerintah, Peraturan LKPP Nomor 12 Tahun 2021, serta Standar Industri Hijau (SIH) yang sejak tahun 2024 telah menetapkan batas intensitas emisi pada tingkat produk untuk baja lembaran (*flat steel*).

Lembaga Kebijakan Pengadaan Barang/Jasa Pemerintah (LKPP) memimpin kebijakan pengadaan nasional, sementara Kementerian Perindustrian bertanggung jawab atas kebijakan Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN) dan Pusat Industri Hijau mengembangkan standar industri hijau yang spesifik untuk setiap sektor.

Kementerian Perindustrian secara eksplisit telah mengidentifikasi GPP sebagai salah satu instrumen utama untuk mendorong dekarbonisasi

industri baja. Dalam sebuah lokakarya UNIDO, Kepala Pusat Industri Hijau, A.P. Nugraha, menyatakan bahwa:

“Saat ini permintaan dan penerimaan pasar terhadap baja hijau masih rendah dan kita perlu mengubah kondisi tersebut. Dari sisi pemerintah, salah satu caranya adalah melalui green public procurement.”

Meskipun demikian, kerangka GPP di Indonesia masih menghadapi berbagai kesenjangan implementasi. Studi IISD mengenai GPP Indonesia (November 2024) menemukan bahwa pemahaman mengenai GPP di kalangan pejabat pengadaan maupun pelaku industri masih terbatas, mekanisme penegakan kebijakan masih lemah, serta belum terdapat ambang batas intensitas karbon yang bersifat wajib dalam tender pengadaan baja pemerintah.

Secara prinsip, GPP saat ini memang telah mensyaratkan *penyertaan Environmental Product Declaration* (EPD) atau data jejak karbon dalam dokumen tender. Namun, pelaksanaan verifikasi terhadap pemasok maupun penegakan ketentuan tersebut masih berada pada tahap awal. Program Legislasi Nasional Prioritas Tahun 2025 juga memasukkan Rancangan Undang-Undang Pengadaan Barang/Jasa, yang berpotensi memperkuat ketentuan-ketentuan tersebut.

Dampak GPP terhadap Keekonomian Setiap Skenario

GPP menciptakan nilai bagi produsen baja hijau melalui dua mekanisme utama, yaitu:

1. Saluran volume, berupa permintaan yang terjamin sehingga mengurangi risiko pendapatan.
2. Saluran harga, berupa pemberian premi harga bagi baja bersertifikat rendah karbon.

Besarnya dampak terhadap keekonomian setiap skenario bergantung pada tingkat premi GPP serta proporsi pasar pengadaan pemerintah yang dapat dijangkau oleh masing-masing teknologi.



Tabel 7. Kelayakan GPP dan estimasi dampaknya terhadap IRR pada setiap skenario

Skenario	Memenuhi Syarat GPP?	Intensitas emisi dibanding SIH (batas SIH = 1 tCO ₂ /t)	Potensi premi harga	Kenaikan IRR dengan premi GPP USD30/t	Penilaian GPP
S1 BAU	Tidak (tidak memenuhi batas SIH)	2,3 tCO ₂ /t (2–3 kali di atas batas SIH)	Tidak ada	Tidak meningkat	Tidak memenuhi syarat
S2 EAF	Ya	0,7 tCO ₂ /t (70% di bawah batas SIH)	USD20–50/t untuk baja tulangan dan baja struktural rendah karbon bersertifikat	+1,8 poin persentase (IRR menjadi 14,0%)	Sangat sesuai
S3 NG-DRI	Ya	1,4 tCO ₂ /t (memenuhi batas SIH yang diperketat)	USD15–30/t untuk baja rendah karbon transisi	+1,3 poin persentase (IRR menjadi 5,1%)	Cukup sesuai
S4 Hidrogen Hijau	Ya	0,5 tCO ₂ /t (sangat memenuhi standar)	USD30–60/t untuk baja hampir nol emisi	+2,1 poin persentase (IRR menjadi 6,1%)	Sangat sesuai
S5 Hidrogen Hijau dan Listrik dari Energi Terbarukan	Ya	0,1 tCO ₂ /t (terbaik di kelasnya)	USD50–100/t untuk baja hampir nol emisi yang telah diverifikasi	+3,5 poin persentase (IRR masih negatif)	Cocok untuk jangka panjang

Keterangan: Premi GPP dimodelkan sebesar USD30 per ton untuk 30% output yang dijual ke proyek-proyek pemerintah. Estimasi kenaikan IRR dihitung menggunakan harga dasar kredit karbon sebesar USD25/tCO₂.

Saluran harga melalui GPP secara langsung mengurangi kesenjangan LCOS bagi teknologi rendah karbon. Dengan premi baja hijau sebesar USD30 per ton—yang masih berada pada kisaran bawah estimasi internasional untuk baja tulangan rendah karbon bersertifikat—teknologi EAF mampu mencapai IRR sebesar 14%, setara dengan BAU. Dengan demikian, EAF menjadi benar-benar kompetitif secara komersial tanpa memerlukan kenaikan harga karbon.

Sementara itu, Blue-H₂ DRI-EAF mencapai IRR sebesar 6,1%. Walaupun masih berada di bawah ambang kelayakan investasi swasta sebesar 10%, peningkatan tersebut cukup signifikan. Jika dikombinasikan dengan kredit karbon sebesar USD25/tCO₂, IRR diperkirakan meningkat hingga sekitar 8%, yaitu tingkat yang mulai dapat diterima untuk proyek industri strategis dengan dukungan kebijakan.

Jalur Implementasi GPP Jangka Pendek di Indonesia

Global Efficiency Intelligence Net-Zero Roadmap for Indonesia's Steel Industry (2024) dan kerangka IDDI GPP Pledge mengusulkan pendekatan bertahap yang realistis bagi Indonesia yang diantaranya adalah sebagai berikut:

- **Jangka Pendek (2025–2027):** Mewajibkan penyertaan *Environmental Product Declaration* (EPD) atau deklarasi intensitas karbon pada seluruh tender pengadaan baja pemerintah dengan nilai di atas Rp10 miliar. Menerbitkan panduan indikatif mengenai premi harga baja hijau. Menyesuaikan implementasi dengan *IDDI GPP Pledge Level 1*, yang berfokus pada kesiapan pasar dan pengumpulan data. Mengintegrasikan kriteria efisiensi material ke dalam standar perancangan infrastruktur.

- **Jangka Menengah (2028–2032):** Menerapkan batas intensitas emisi yang bersifat wajib dalam pengadaan baja pemerintah, dengan pengetatan bertahap mengikuti revisi Standar Industri Hijau (SIH). Memperluas penerapan GPP pada proyek-proyek infrastruktur utama, seperti Jalan Tol Trans Sumatra, pembangunan Ibu Kota Nusantara, serta ekspansi jaringan listrik PLN. Membentuk aliansi pembeli di antara BUMN, seperti PT Krakatau Steel, PT Waskita Karya, dan PT PP, guna mengonsolidasikan permintaan terhadap baja hijau.
- **Jangka Panjang (2033–2045):** Mewajibkan penggunaan baja hijau pada seluruh proyek infrastruktur pemerintah. Mendorong penerapan kode bangunan (*building codes*) dan persyaratan keterbukaan informasi bagi investor yang secara implisit mensyaratkan penggunaan baja rendah karbon bersertifikat. Berkoordinasi dengan negara-negara ASEAN dalam penyusunan standar regional untuk baja hijau.

Studi IISD (2024) mencatat bahwa pengadaan pemerintah mencakup lebih dari 45% belanja pemerintah Indonesia. Dengan demikian, bahkan pergeseran sebagian kecil anggaran pengadaan baja infrastruktur menuju produk baja hijau bersertifikat akan memberikan sinyal permintaan yang sangat kuat bagi pasar.

Secara konservatif, apabila 15–20% kebutuhan baja konstruksi pemerintah telah menggunakan kriteria intensitas karbon pada tahun 2030, maka akan tercipta permintaan terhadap baja hijau bersertifikat sebesar sekitar 2,5–3 juta ton per tahun. Volume tersebut diperkirakan cukup untuk menopang kelayakan bisnis sekitar 3–4 pabrik EAF atau NG-DRI-EAF berskala menengah.



Analisis biaya pengurangan emisi marjinal (Marginal abatement cost analysis)

Marginal Abatement Cost (MAC) merupakan biaya yang diperlukan untuk menghindari tambahan satu ton emisi CO₂, yang diukur sebagai selisih *Net Present Value* (NPV) privat yang dikorbankan per satuan pengurangan emisi dibandingkan skenario BAU. MAC merupakan indikator yang paling banyak digunakan dalam kebijakan iklim untuk mengurutkan berbagai opsi dekarbonisasi berdasarkan efisiensi biaya. Semakin rendah nilai MAC, semakin efisien biaya pengurangan emisi yang dihasilkan.

Suatu teknologi dengan nilai MAC yang berada di bawah harga karbon yang berlaku akan menguntungkan secara finansial untuk diadopsi tanpa memerlukan dukungan tambahan. Sebaliknya, apabila nilai MAC melebihi harga karbon, maka diperlukan subsidi atau insentif sebesar selisih tersebut agar investasi menjadi layak secara ekonomi.

Tabel 8. Peringkat Marginal Abatement Cost (MAC) untuk setiap skenario, diurutkan dari biaya pengurangan emisi terendah hingga tertinggi

Skenario	Total emisi CO ₂ yang dihindari (Mt)	NPV yang hilang dibanding BAU (USD juta)	MAC (USD/tCO ₂)	Dibanding harga kredit karbon (USD25/tCO ₂)	Implikasi kebijakan
S1 BAU	—	—	<i>Acuan</i>	—	Tidak ada pengurangan emisi; sepenuhnya terekspos terhadap CBAM mulai 2026
S2 EAF	1,024	2,159	\$2	Menguntungkan	Sudah layak secara ekonomi pada harga kredit karbon USD25/tCO ₂ ; menjadi prioritas utama untuk segera diperluas hingga batas ketersediaan scrap
S4 Hidrogen Hijau	1,152	27,206	\$24	Sedikit menguntungkan	Opsi kedua paling efisien; nilai MAC sedikit di bawah USD25/tCO ₂ sehingga sudah layak pada harga karbon saat ini
S5 Hidrogen Hijau dan Listrik dari Energi Terbarukan Renewable Electricity	1,408	55,471	\$39	Di atas harga karbon	Memerlukan subsidi sebesar USD39/tCO ₂ atau harga karbon di atas USD39/tCO ₂ agar layak secara finansial
S3 NG-DRI	576	25,058	\$43	Di atas harga karbon	Opsi pengurangan emisi paling mahal, tetapi tetap penting sebagai teknologi transisi yang siap menggunakan hidrogen

MAC Ranking and Policy Implications

Berdasarkan urutan yang ditetapkan oleh MAC, peringkat efisiensi pengurangan emisi adalah: EAF (\$2/t) >> Blue-H₂ DRI-EAF (\$24/t) > Green-H₂ DRI-EAF (\$39/t) > Natural-Gas DRI-EAF (\$43/t). Peringkat ini memiliki implikasi langsung terhadap urutan penetapan kebijakan di Indonesia.

Pertama, EAF jelas merupakan prioritas utama. Dengan biaya \$2/tCO₂, EAF merupakan opsi pengurangan emisi termurah hingga 12 kali lipat, sudah menguntungkan pada harga kredit dasar \$25/tCO₂, dan menggunakan teknologi teruji yang dapat diterapkan dalam jangka waktu proyek saat ini.

Kedua, Green-H₂ DRI-EAF merupakan opsi dekarbonisasi mendalam paling efisien berikutnya. MAC sebesar \$24/t sedikit di bawah harga kredit dasar \$25/t, sehingga menempatkannya tepat di dalam zona kelayakan berdasarkan kebijakan saat ini — batas paling penting dalam kurva MAC. Ini berarti bahwa untuk setiap ton CO₂ yang dikurangi oleh Green-H₂ DRI-EAF, sistem kredit karbon pada harga dasar sudah cukup untuk memberikan kompensasi kepada produsen. Opsi ini juga memberikan pengurangan emisi mendalam (78%), mendekati apa yang akan dicapai oleh Green-H₂, dengan biaya yang jauh lebih rendah.

Ketiga, Natural-Gas DRI-EAF memiliki MAC tertinggi (\$43/t) di antara opsi-opsi dekarbonisasi, sehingga tampaknya menjadi pilihan pengurangan emisi yang paling tidak efisien secara biaya. Namun, analisis ini hanya mempertimbangkan biaya finansial langsung, bukan fleksibilitas strategis. Kemampuan untuk memodifikasi DRI berbahan bakar gas agar dapat menggunakan hidrogen di masa mendatang — pada dasarnya tanpa biaya tambahan selain penyesuaian tungku — memberikan nilai opsi riil bagi S3 yang tidak tercermin sepenuhnya dalam nilai MAC statis. Peta Jalan Net-Zero dari Global Efficiency Intelligence secara eksplisit merekomendasikan desain DRI yang siap menggunakan H₂ untuk semua pabrik DRI baru guna mempertahankan fleksibilitas ini.

Interpretasi Kurva MAC: Struktur Biaya Pengurangan Emisi

Kurva biaya pengurangan emisi menggambarkan di mana Indonesia sebaiknya berinvestasi terlebih dahulu agar dapat mendekarbonisasi sektor baja secara paling efisien dari segi biaya. Jika dibaca dari yang termurah hingga yang termahal:

- **Zona \$0–\$25/tCO₂ (EAF, Blue-H₂):** Sudah ekonomis pada harga dasar kredit karbon. Tidak diperlukan kebijakan tambahan di luar kerangka kerja IDX Carbon saat ini (setelah baja dimasukkan pada tahun 2027) untuk membenarkan investasi. Prioritas: memaksimalkan penerapan EAF hingga batas ketersediaan besi tua; memulai proyek DRI Blue-H₂ yang selaras dengan rencana proyek CCS.
- **Zona \$25–\$60/tCO₂ (Green-H₂, NG-DRI):** Membutuhkan harga kredit karbon dalam kisaran \$25–60 atau dukungan langsung yang setara. GPP dengan premi tambahan sebesar \$30/t juga dapat menjembatani kesenjangan ini.
- **Zona \$60–\$120/tCO₂:** Diperlukan pengurangan biaya teknologi sebelum kebijakan domestik dapat secara efisien mendukung zona ini. Green-H₂ dengan biaya hidrogen sebesar \$2–3/kg akan masuk ke zona ini; biaya Green-H₂ Indonesia saat ini sebesar \$4–6/kg membuatnya tidak masuk ke zona ini.



Realisasi implementasi: Teknologi mana yang dapat diterapkan?

Analisis sebelumnya telah menguraikan profil biaya, kelayakan finansial, manfaat ekonomi, tingkat kesiapan teknologi, serta efisiensi pengurangan emisi dari setiap skenario. Subbagian terakhir ini mensintesis seluruh temuan tersebut ke dalam suatu penilaian realisme implementasi, dengan mempertimbangkan seluruh kendala secara simultan, untuk menjawab teknologi mana yang secara realistis dapat diterapkan dalam skala yang bermakna di Indonesia pada jangka pendek (hingga 2030), jangka menengah (2030–2040), dan jangka panjang (2040–2045), serta kondisi-kondisi yang menentukan keberhasilannya.

Tabel 9. Penilaian realisasi implementasi berdasarkan skenario dan horizon waktu.

Kategori “Tinggi” menunjukkan bahwa teknologi dapat diterapkan dalam skala signifikan dengan kondisi yang realistis

Skenario	Jangka Pendek (hingga 2030)	Jangka Menengah (2030–40)	Jangka Panjang (2040–45)	Kendala Utama	Skala Realistis jika Kendala Terpenuhi
S1 BAU	TINGGI	SEDANG	RENDAH	Harga karbon, CBAM, pengetatan kebijakan NDC	Kemungkinan tetap beroperasi pada kapasitas sekitar 17 Mt/tahun hingga 2035, kecuali terdapat insentif penghentian operasi dini (early retirement).
S2 EAF	TINGGI	TINGGI	TINGGI	Ketersediaan scrap (~4,5 Mt/tahun tersedia dibanding kebutuhan 35 Mt/tahun)	8–12 Mt/tahun pada 2030; 15–20 Mt/tahun pada 2040 dengan rantai pasok scrap yang terorganisasi; hingga 30 Mt/tahun pada 2045 apabila cadangan scrap domestik berkembang dalam jangka panjang.
S3 NG-DRI	SEDANG	TINGGI	SEDANG	Keseimbangan harga gas dan harga karbon; fasilitas pellet; IRR memerlukan harga karbon sekitar US\$80/t	5–8 Mt/tahun pada 2030 (proyek Morowali/Cilegon); 15–25 Mt/tahun pada 2040 jika harga karbon meningkat; kemudian menurun setelah 2040 seiring hidrogen menggantikan gas alam sebagai bahan bakar.
S4 Green-H₂	RENDAH	SEDANG	TINGGI	Penyelesaian proyek CCS (2026–2030); penurunan biaya Blue Hydrogen	<1 Mt/tahun pada 2030 (sebatas proyek percontohan); 5–10 Mt/tahun pada 2040; lebih dari 20 Mt/tahun pada 2045 apabila infrastruktur CCS telah matang.
S5 Green-H₂ dan Listrik dari Energi Terbarukan	SANGAT RENDAH	RENDAH	SEDANG	Biaya hidrogen (US\$4–6/kg dibanding kebutuhan US\$1,4/kg); skala elektroliser; pembangunan energi terbarukan	Demonstration scale only by 2030; 1–3 Mt/yr by 2040; full deployment requires \$2/kg H ₂ target

Jangka Pendek (hingga 2030)

Lintasan dekarbonisasi industri baja Indonesia dalam jangka pendek kemungkinan akan mengikuti realitas jalur ganda (*dual-track reality*). Kapasitas BAU akan tetap dibangun karena sebagian besar proyek telah memperoleh pembiayaan dan perizinan. Data dari *Global Energy Monitor* (GEM) menunjukkan

lebih dari 27.000 kTPA kapasitas baru yang telah diumumkan atau sedang dibangun, yang mayoritas menggunakan teknologi BF-BOF. Pada saat yang sama, kapasitas EAF dan NG-DRI-EAF akan terus bertambah, meskipun dalam volume yang masih terbatas.

Dengan demikian, hasil paling realistis dalam jangka pendek bukanlah transisi menuju industri baja bersih secara menyeluruh, melainkan penurunan intensitas emisi secara bertahap, seiring mulai beroperasinya fasilitas EAF dan NG-DRI-EAF di tengah ekspansi BAU yang masih berlanjut. Tanpa target pengurangan emisi sektoral yang bersifat mengikat—yang hingga kini masih belum diadopsi oleh Kementerian Perindustrian—lintasan ini tetap akan meningkatkan emisi absolut, meskipun intensitas emisi per ton baja mengalami penurunan.

Jalur Berbasis Scrap: EAF Sebagai Pilar Utama Implementasi

Di antara kelima skenario, EAF merupakan teknologi yang secara bersamaan paling hemat biaya, paling layak secara finansial (pada harga karbon yang moderat), paling matang secara teknologi, dan memberikan manfaat ekonomi terbesar. Selain itu, EAF juga merupakan teknologi yang paling realistis untuk diterapkan dalam jangka pendek.

Kendala utamanya bukanlah teknologi, modal, maupun kebijakan, melainkan ketersediaan *scrap* baja. Oleh karena itu, kebijakan pendukung yang paling penting bagi dekarbonisasi industri baja Indonesia adalah membangun rantai pasok *scrap* nasional melalui:

- pembangunan infrastruktur pengumpulan *scrap*;
- penghapusan hambatan ekspor *scrap* domestik;
- pengembangan sistem pelacakan baja akhir masa pakai (*end-of-life steel tracking*); dan
- penyusunan perjanjian impor *scrap* jangka panjang dengan Jepang dan Korea Selatan.

GEI Net-Zero Roadmap memperkirakan bahwa pasokan *scrap* domestik Indonesia dapat meningkat menjadi 15–20 Mt per tahun pada 2035 apabila sistem tersebut berhasil dibangun, sehingga mampu menutup sekitar separuh kesenjangan antara pasokan *scrap* saat ini dan kebutuhan sektor EAF secara penuh. Dengan demikian, kebijakan pengembangan rantai pasok *scrap* memberikan tingkat pengembalian investasi kebijakan (*policy return*) tertinggi dibandingkan intervensi lainnya.

NG-DRI-EAF yang Siap Bertransisi ke Hidrogen
Meskipun memiliki *Marginal Abatement Cost* (MAC) yang lebih tinggi dan tingkat IRR yang masih berada di bawah ambang investasi swasta, NG-DRI-EAF memainkan peran struktural yang sangat penting sebagai teknologi transisi.

Pabrik DRI-EAF baru yang dibangun saat ini di Morowali, Cilegon, maupun kawasan industri lainnya dapat langsung dirancang sebagai *hydrogen-ready*, dengan tambahan biaya investasi yang sangat kecil pada *shaft furnace*. Pendekatan ini memungkinkan fasilitas tersebut beralih ke *Blue Hydrogen* maupun *Green Hydrogen* ketika kedua opsi tersebut telah mencapai tingkat keekonomian yang memadai.

Pendekatan tersebut mempertahankan fleksibilitas teknologi Indonesia di masa depan tanpa harus menanggung biaya penuh hidrogen pada saat ini. Oleh karena itu, rekomendasi kebijakan yang diusulkan adalah menjadikan spesifikasi *hydrogen-ready* sebagai persyaratan dalam pemberian izin investasi seluruh fasilitas DRI baru. Intervensi ini merupakan kebijakan berbiaya rendah namun memiliki nilai strategis tinggi, sebagaimana direkomendasikan oleh IEA maupun *Global Efficiency Intelligence* (GEI).

Jembatan Menuju Blue Hydrogen: Menghubungkan CCS dan Industri Baja

Blue-H₂ DRI-EAF secara realistis dapat diterapkan pada skala percontohan hingga komersial antara 2035–2040, bergantung pada keberhasilan pembangunan program CCS di Indonesia.

Meskipun terdapat ketidaksesuaian geografis antara lokasi penyimpanan CCS—yang sebagian besar berada di Sumatra dan Papua—dengan klaster industri baja yang terkonsentrasi di Pulau Jawa, MoU Indonesia–Singapura mengenai CCS lintas batas pada tahun 2025 membuka peluang alternatif penyimpanan karbon.

Blue-H₂ DRI-EAF dipandang sebagai jalur yang paling mungkin menghasilkan dekarbonisasi mendalam bagi industri baja terintegrasi Indonesia pada periode 2035–2045, dengan asumsi infrastruktur CCS berkembang sesuai rencana. Nilai MAC sebesar US\$24/tCO₂ menunjukkan bahwa teknologi ini telah layak secara ekonomi pada harga dasar kredit karbon saat ini, sehingga menjadi kandidat utama untuk memperoleh dukungan awal melalui program pembiayaan infrastruktur maupun perdagangan kredit karbon

bilateral berdasarkan Pasal 6 Persetujuan Paris.

Green-H₂: The Long Frontier, The Right Destination

Green-H₂ DRI-EAF merupakan satu-satunya skenario yang mampu menghasilkan baja dengan emisi mendekati nol (0,1 ton CO₂ per ton baja, atau sekitar 96% lebih rendah dibandingkan BAU). Teknologi ini merupakan tujuan akhir yang diperlukan untuk mencapai target Net Zero Emissions Indonesia 2060.

Namun demikian, biaya produksi hidrogen hijau saat ini masih berada pada kisaran US\$4–6/kg, jauh di atas titik impas sebesar US\$1,4–1,7/kg. Selain itu, kapasitas elektroliser dan pembangkit listrik terbarukan masih dalam tahap pembangunan. Oleh sebab itu, Green-H₂ DRI-EAF baru akan realistis diterapkan secara luas setelah tahun 2040.

Ringkasan: Kerangka Transisi Bertahap (Sequenced Transition Framework)

Dengan mensintesis hasil analisis teknologi, GPP, dan MAC, jalur dekarbonisasi industri baja Indonesia yang paling realistis dan efisien adalah melalui pendekatan bertahap yang spesifik terhadap teknologi.

Tabel 10. Kerangka transisi dekarbonisasi industri baja Indonesia secara bertahap, periode 2025–2060

Tahap	Periode	Teknologi/Tindakan Utama	Kebijakan Pendukung
1 — Scrap-first	2025–2030	Meningkatkan kapasitas EAF hingga batas ketersediaan scrap (8–12 Mt/tahun); seluruh pabrik EAF dan DRI baru wajib <i>hydrogen-ready</i>	Mandat GPP untuk EPD; kebijakan nasional pengumpulan scrap; persyaratan hydrogen-ready; integrasi sektor baja ke IDX Carbon (2027)
2 — Gas-bridge	2028–2035	Ekspansi NG-DRI-EAF di Morowali, Cilegon, dan klaster baru; uji coba co-firing hidrogen; proyek percontohan Blue-H ₂	Kenaikan harga kredit karbon menuju US\$50–60/tCO ₂ ; reformasi tarif gas; penyelesaian proyek CCS; perdagangan karbon bilateral Pasal 6
3 — Integrasi CCS	2033–2045	Retrofit DRI <i>hydrogen-ready</i> dari gas ke Blue Hydrogen; implementasi Blue-H ₂ DRI-EAF skala besar; demonstrasi Green Hydrogen	Harga karbon >US\$60/tCO ₂ ; verifikasi kapasitas penyimpanan CCS; meningkatnya permintaan baja hijau akibat CBAM dan pembeli internasional
4 — Ekspansi Green H ₂	2040–2060	Green-H ₂ DRI-EAF menggantikan gas ketika biaya hidrogen mencapai sekitar US\$2/kg; produksi baja mendekati nol emisi	Netralitas karbon wajib bagi industri baja; surplus listrik terbarukan PLN; kepatuhan penuh terhadap CBAM untuk pasar ekspor

Kerangka transisi bertahap ini bersifat realistis karena setiap fase dipimpin oleh teknologi yang paling hemat biaya dan paling siap diterapkan pada waktunya masing-masing. Setiap transisi dipicu oleh ambang biaya yang dapat diukur—seperti harga karbon dan harga hidrogen—bukan sekadar target yang bersifat aspiratif. Selain itu, setiap fase membangun infrastruktur pendukung yang diperlukan bagi fase berikutnya.

Dalam jangka pendek, kebijakan sebaiknya difokuskan pada:

- mempertahankan investasi penelitian dan pengembangan (R&D);
- mendukung proyek-proyek demonstrasi;
- membangun kapasitas manufaktur elektroliser.

Langkah-langkah tersebut sejalan dengan RUPTL PLN2025–2034 dan Peta Jalan Hidrogen Nasional. Indonesia tidak seharusnya mengorbankan peluang dekarbonisasi jangka pendek melalui EAF dan NG-DRI-EAF hanya karena menunggu Green Hydrogen menjadi ekonomis. Sebaliknya, kedua jalur tersebut perlu dikembangkan secara paralel, dengan Green Hydrogen sebagai tujuan akhir, sedangkan EAF dan NG-DRI-EAF menjadi jalur transisinya.

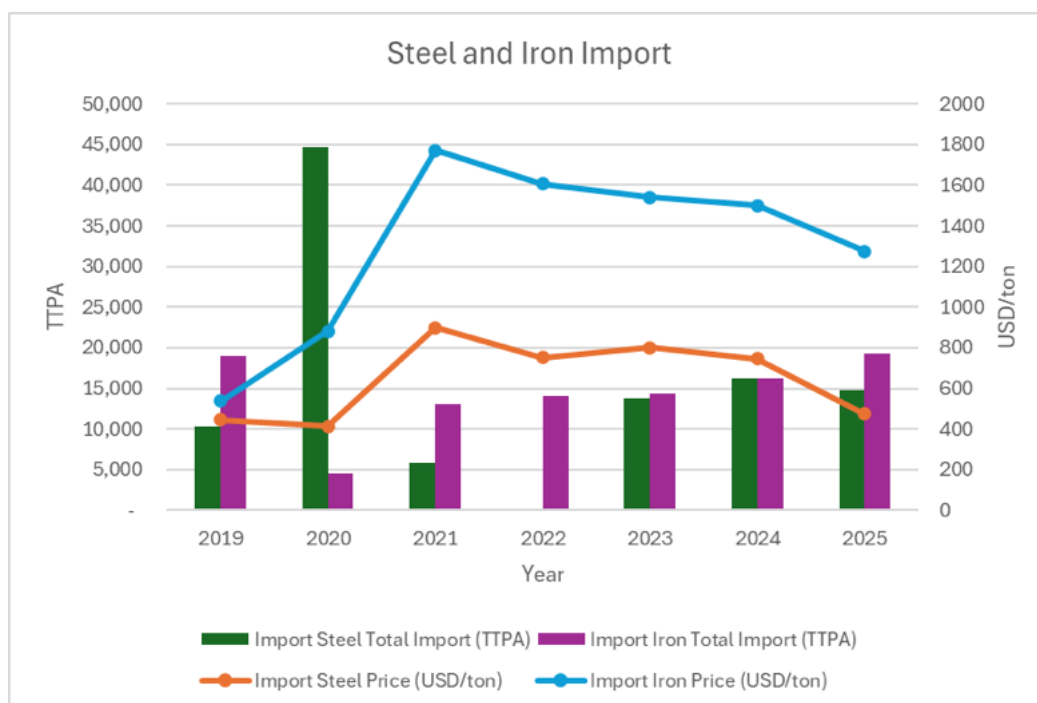
Pendekatan ini mampu menghindari dua risiko utama dalam lintasan pembangunan industri baja Indonesia saat ini, yaitu: (1) mengunci ekspansi BAU tanpa kendali, atau (2) melompat langsung menuju Green Hydrogen sebelum kondisi pendukungnya tersedia. Kerangka ini sejalan dengan empat skenario dalam GEI Net-Zero Roadmap, jalur transisi negara berkembang dalam IEA *Iron and Steel Roadmap*, serta komitmen Indonesia terhadap *Nationally Determined Contribution* (NDC) di bawah UNFCCC.

4.2. Analisis pasar

Impor-Ekspor Besi dan Baja

Berdasarkan Gambar 1 volume impor besi dan baja, menunjukkan volatilitas yang signifikan selama periode 2019–2025. Anomali yang paling mencolok adalah lonjakan volume impor baja yang sangat besar pada tahun 2020, yang meningkat hingga hampir 45.000 TTPA, sebelum kemudian turun secara drastis pada tahun 2021 dan mencapai nol pada tahun 2022. Sebaliknya, impor besi mengalami kontraksi tajam pada periode yang sama di tahun 2020, namun sejak itu menunjukkan pemulihan yang stabil dan tangguh, meningkat dari sekitar 13.000 TTPA pada tahun 2021 menjadi hampir 20.000 TTPA pada tahun 2025. Pada akhir periode proyeksi tahun 2025, volume impor baja dan besi tampak mulai stabil pada kisaran 15.000–20.000 TTPA.

Gambar 1. Impor Besi dan Baja Tahun 2019-2025



Sumber: IISIA (2025), SEAISI (2025), World Steel Association (2025)

Gambar di atas memperlihatkan adanya guncangan pasar yang sangat besar dengan puncaknya terjadi pada tahun 2021. Harga impor besi dan baja pada awalnya relatif seimbang pada tahun 2019, berada di kisaran USD 400–500 per ton. Namun, pada tahun 2021 terjadi divergensi yang sangat tajam; harga besi melonjak hingga sekitar USD 1.750 per ton, sementara harga baja hampir dua kali lipat menjadi sekitar USD 900 per ton. Setelah mencapai puncak inflasi tersebut, harga kedua komoditas memasuki fase penurunan yang berlangsung selama beberapa tahun. Pada tahun 2025, harga baja impor kembali mendekati tingkat dasar tahun 2019, yaitu sekitar USD 500 per ton, sedangkan harga besi, meskipun mengalami penurunan, masih berada pada tingkat yang relatif tinggi, yaitu sekitar USD 1.300 per ton.

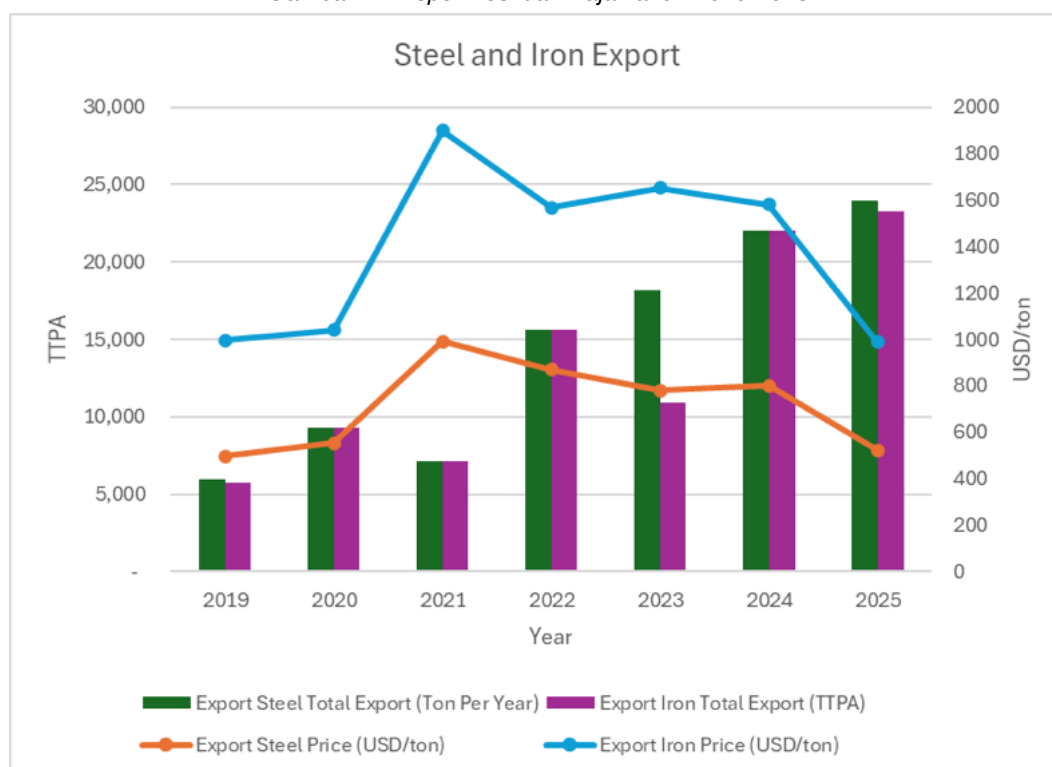
Untuk tahun 2020, lonjakan volume impor tersebut dapat dijelaskan oleh efek *front-loading* atau *stockpiling* akibat pandemi COVID-19. Pada awal tahun 2020, importir Indonesia mengantisipasi terganggunya rantai pasok global dengan mempercepat pemesanan dari Tiongkok dan Jepang sebelum kebijakan *lockdown* diberlakukan. Akibatnya, volume impor yang seharusnya tersebar pada kuartal II hingga kuartal IV terkonsentrasi pada kuartal I, sehingga meningkatkan total volume impor tahunan. Pada saat yang sama, penurunan harga baja hingga sekitar USD 450 per ton, yang merupakan titik terendah dalam seri data, konsisten dengan kondisi ketika produsen baja di Tiongkok menjual kelebihan persediaan akibat anjloknya permintaan domestik, sehingga memungkinkan pembelian dalam volume besar dengan harga yang sangat murah.

Sintesis antara data volume dan harga menunjukkan adanya hubungan yang berlawanan (*inverse relationship*) yang didorong oleh mekanisme penawaran dan permintaan. Lonjakan volume impor baja yang belum pernah terjadi sebelumnya pada tahun 2020 terjadi tepat ketika harga baja berada pada titik terendahnya, yang mengindikasikan bahwa pembeli memanfaatkan harga komoditas yang murah. Sebaliknya, puncak

harga yang ekstrem pada tahun 2021 bertepatan dengan kontraksi tajam volume impor baja serta rendahnya volume impor besi pada tahun yang sama, yang mengindikasikan bahwa tingginya harga menekan permintaan. Seiring dengan penurunan bertahap harga kedua komoditas dari puncaknya pada tahun 2021 hingga tahun 2025, volume impor juga menunjukkan pola stabilisasi, yang mencerminkan kembalinya pasar menuju kondisi keseimbangan setelah mengalami volatilitas yang ekstrem.

Sementara itu, berdasarkan Gambar 2, volume ekspor kedua komoditas menunjukkan tren pertumbuhan yang kuat dan konsisten, khususnya pada paruh kedua periode pengamatan. Berawal dari tingkat yang relatif rendah, yaitu sekitar 5.000–6.000 TTPA pada tahun 2019, ekspor baja dan besi mengalami sedikit penurunan secara bersamaan pada tahun 2021 hingga sekitar 7.000 TTPA. Namun, setelah periode stagnasi singkat tersebut, pasar memasuki fase ekspansi yang agresif dan berkelanjutan. Volume ekspor kedua komoditas meningkat secara konsisten dari tahun ke tahun sejak 2022 dan diproyeksikan mencapai puncaknya pada tahun 2025, dengan ekspor baja mendekati 25.000 TTPA dan ekspor besi melampaui 20.000 TTPA.

Gambar 2. Ekspor Besi dan Baja Tahun 2019-2025



Sumber: IISIA (2025), SEAISI (2025), World Steel Association (2025)

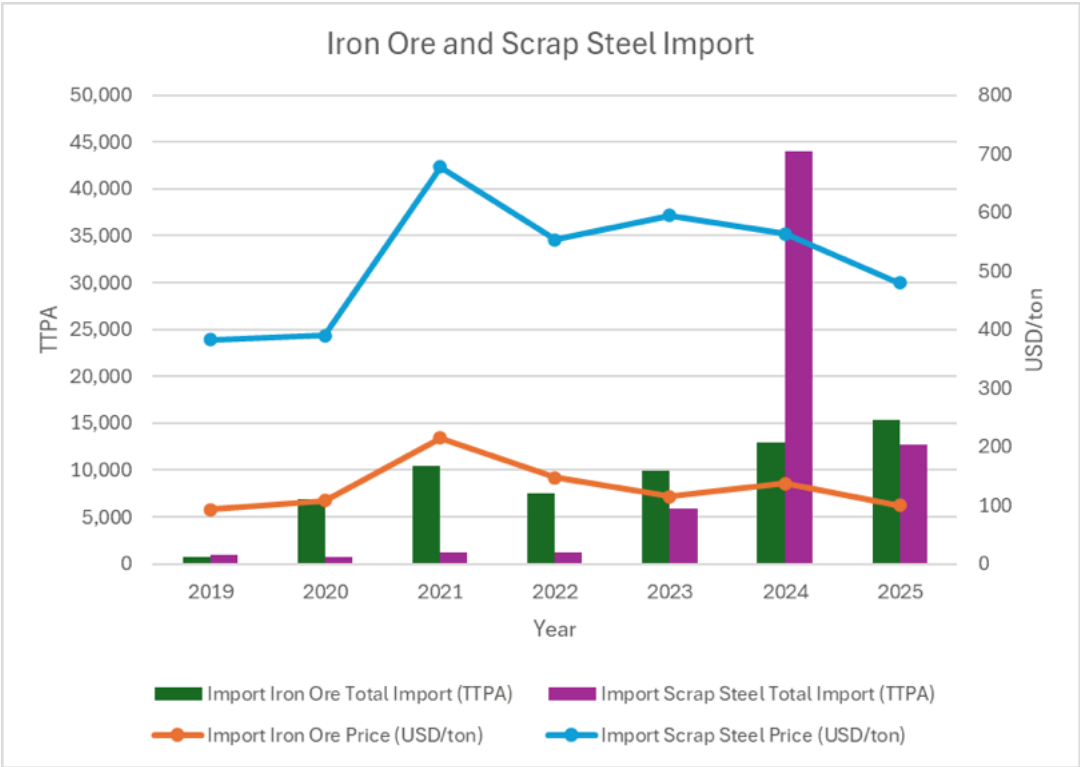
Gambar di atas memperlihatkan periode volatilitas pasar yang sangat tinggi dengan puncaknya terjadi pada tahun 2021. Pada tahun 2019 dan 2020, harga ekspor relatif stabil, dengan harga baja berada di sekitar USD 500 per ton dan harga besi sekitar USD 1.000 per ton. Pada tahun 2021 terjadi lonjakan inflasi yang sangat tajam, di mana harga ekspor besi meningkat hingga hampir USD 1.900 per ton, sementara harga baja hampir dua kali lipat menjadi sekitar USD 1.000 per ton. Setelah mencapai puncak historis tersebut, harga kedua komoditas memasuki fase penurunan bertahap antara tahun 2022 hingga 2024, sebelum kembali turun secara signifikan pada tahun 2025. Pada tahun tersebut, harga baja kembali ke tingkat historisnya sekitar USD 500 per ton, sedangkan harga besi turun kembali ke kisaran USD 1.000 per ton.

Analisis gabungan antara volume dan harga ekspor mengungkapkan adanya hubungan terbalik yang mencerminkan perubahan kondisi makroekonomi dari sisi penawaran dan permintaan. Kontraksi volume ekspor yang paling tajam terjadi pada tahun 2021, bertepatan dengan puncak harga komoditas global, yang menunjukkan bahwa tingginya harga sementara waktu menekan permintaan internasional. Sebaliknya, ketika harga secara bertahap menurun sepanjang periode 2022–2025, volume ekspor mengalami

peningkatan yang sangat pesat dan berkelanjutan. Peningkatan ekspor dalam jumlah besar di tengah tren penurunan harga menunjukkan adanya ekspansi kapasitas produksi domestik yang signifikan, sehingga produsen mampu mengompensasi penurunan margin keuntungan per unit melalui peningkatan volume ekspor ke pasar global.

Berdasarkan Gambar 3, volume impor kedua bahan baku utama industri baja menunjukkan pola perkembangan yang berbeda sepanjang periode 2019–2025. Impor bijih besi memperlihatkan tren pertumbuhan yang relatif stabil dan bersifat struktural, meningkat dari tingkat yang hampir tidak signifikan pada tahun 2019 menjadi sekitar 15.000 TTPA pada tahun 2025, dengan lonjakan awal yang mulai terlihat pada tahun 2020 dan pertumbuhan yang konsisten setelah tahun 2022. Sebaliknya, volume impor *scrap* baja relatif rendah dan cenderung stagnan sepanjang periode 2019–2022, sebelum mengalami lonjakan luar biasa pada tahun 2024 hingga melampaui 40.000 TTPA. Setelah lonjakan tersebut, volume impor *scrap* kembali terkoreksi secara tajam pada tahun 2025 menjadi sekitar 13.000 TTPA, sehingga berada pada tingkat yang hampir setara dengan volume impor bijih besi pada tahun yang sama.

Gambar 3. Impor Iron Ore dan Scrap Steel Tahun 2019-2025



Sumber: IISIA (2025), SEAISI (2025), World Steel Association (2025)

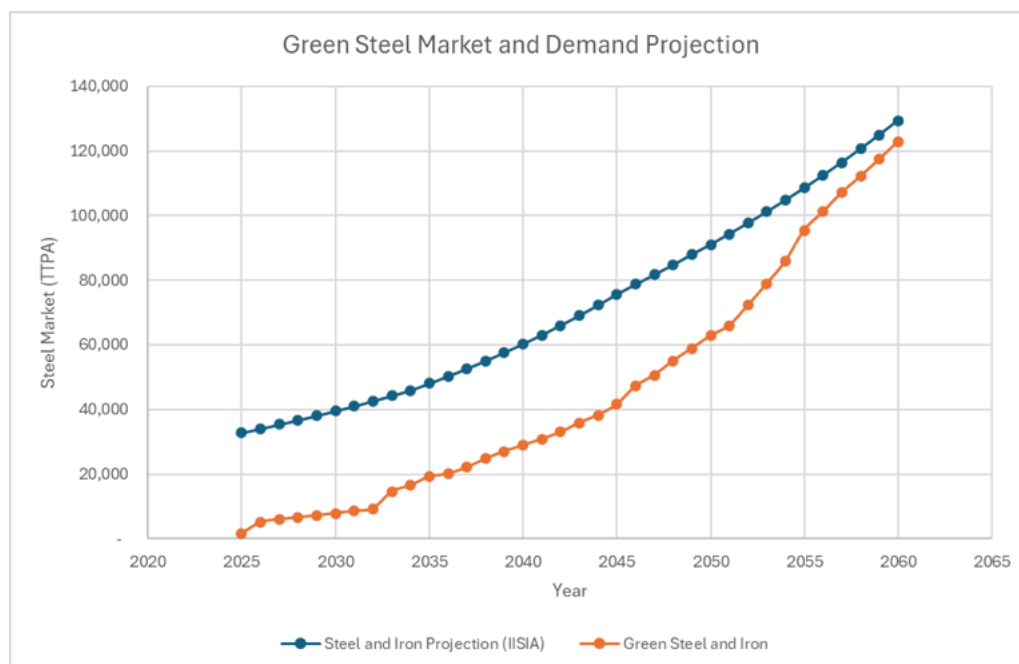
Dinamika harga kedua bahan baku tersebut, yang ditampilkan melalui grafik garis pada sumbu sekunder, menunjukkan volatilitas yang tinggi dengan puncak inflasi terjadi pada tahun 2021. Pada tahun 2019, harga bijih besi dan scrap baja relatif stabil masing-masing berada di sekitar USD 100 per ton dan USD 380 per ton. Pada tahun 2021, kedua komoditas mengalami lonjakan harga yang signifikan; harga bijih besi meningkat lebih dari dua kali lipat menjadi di atas USD 200 per ton, sedangkan harga scrap baja melonjak hingga sekitar USD 680 per ton. Setelah mencapai puncak tersebut, harga kedua bahan baku secara bertahap menurun selama beberapa tahun berikutnya. Pada tahun 2025, harga bijih besi kembali mendekati tingkat historisnya sekitar USD 100 per ton, sedangkan harga scrap baja turun menjadi sekitar USD 480 per ton.

Sintesis antara data volume dan harga memberikan gambaran mengenai perubahan strategi operasional dan pengadaan bahan baku dalam industri baja domestik. Peningkatan impor bijih besi yang berlangsung secara konsisten, bahkan ketika harga sedang tinggi, mencerminkan ekspansi kapasitas yang berkelanjutan pada pabrik baja terintegrasi berbasis BF–BOF, yang membutuhkan pasokan bijih besi secara terus-menerus dan relatif tidak fleksibel. Sebaliknya, pola impor *scrap* baja yang sangat fluktuatif mengindikasikan perilaku pembelian yang lebih oportunistik oleh produsen berbasis EAF. Lonjakan volume impor *scrap* pada tahun 2024 bertepatan dengan periode ketika harga scrap telah turun secara signifikan dari puncak historisnya, sehingga produsen memanfaatkan kondisi tersebut untuk melakukan penimbunan (*stockpiling*) bahan baku sekunder sebelum volume impor kembali ke tingkat yang lebih normal pada tahun 2025..

Kondisi pasar setelah dekarbonisasi besi dan baja

Di Indonesia dan kawasan Asia Tenggara (ASEAN) secara lebih luas, transisi menuju baja rendah karbon dihadapkan pada dilema kebijakan yang mendasar. Di satu sisi, kawasan ini sedang mengalami ekspansi pesat produksi baja berbasis batu bara untuk memenuhi permintaan infrastruktur dan industri yang terus meningkat. Di sisi lain, para eksportir semakin terpapar oleh kebijakan iklim internasional—terutama CBAM—yang mengenakan biaya tambahan terhadap produk dengan intensitas karbon tinggi. Kondisi ini menciptakan situasi *Catch-22*: mempertahankan produksi konvensional memang mendukung pertumbuhan industri dalam jangka pendek, tetapi berisiko melemahkan daya saing ekspor dalam jangka panjang.

Gambar 4. Proyeksi Pasar dan Permintaan Baja Hijau



Sumber: IISIA dan perhitungan peneliti

Untuk menangkap tekanan ganda tersebut secara lebih akurat, proyeksi permintaan baja hijau di Indonesia perlu melampaui model-model global. Proyeksi tersebut harus mempertimbangkan dua realitas utama:

- Permintaan domestik masih sangat sensitif terhadap harga dan regulasi karbon masih relatif lemah; serta
- Pasar ekspor semakin dipengaruhi oleh kebijakan perdagangan berbasis karbon.

Beberapa dinamika struktural akan menentukan seberapa cepat dan efektif Indonesia dapat bertransisi menuju baja hijau:

- **Pertumbuhan Emisi yang Sangat Cepat**

Emisi dari sektor baja di Asia Tenggara diproyeksikan meningkat dua kali lipat hingga melampaui 300 juta ton CO₂ pada tahun 2030. Di Indonesia sendiri, emisi diperkirakan mencapai 24,9 juta ton CO₂, sehingga semakin menegaskan urgensi upaya dekarbonisasi sektor ini.

- **Jendela Reinvestasi Tahun 2040**

Lebih dari 90% blast furnace yang saat ini beroperasi di Asia Tenggara akan memerlukan investasi ulang sebelum tahun 2040. Kondisi ini menjadi titik keputusan yang sangat penting, yaitu apakah perusahaan akan:

- Meningkatkan teknologi menuju sistem beremisi rendah (misalnya EAF berbasis *scrap*), atau
- Tetap menggunakan sistem berbasis karbon yang intensif dan berisiko menciptakan aset terlanter (*stranded assets*) seiring semakin ketatnya regulasi iklim.

- **Lanskap Kebijakan Karbon yang Mulai Berkembang**

Kawasan Asia Tenggara secara bertahap bergerak menuju penerapan harga karbon, meskipun dengan kecepatan yang berbeda-beda:

- Singapura menjadi pelopor dengan pajak karbon yang telah berlaku sejak 2019.
- Indonesia berencana menerapkan pasar karbon wajib untuk sektor baja mulai tahun 2027.
- Vietnam sedang menguji coba *Emission Trading System* (ETS) dan menargetkan implementasi penuh pada tahun 2029.

Perkembangan kebijakan ini akan semakin memengaruhi struktur biaya produksi dan keputusan investasi di seluruh kawasan.

Salah satu kendala utama dalam seluruh proyeksi adalah *adanya green premium*, yaitu biaya tambahan yang diperlukan untuk memproduksi baja rendah karbon. Sebagai contoh, produksi baja berbasis hidrogen (H₂-DRI) saat ini diperkirakan masih 20–30% lebih mahal dibandingkan metode konvensional berbasis batu bara. Oleh karena itu:

- **Strategi jangka pendek**

Sebagian besar peta jalan nasional memprioritaskan EAF berbasis *scrap* karena mampu memberikan pengurangan emisi secara langsung dengan biaya yang relatif kompetitif.

- **Jalur Jangka Panjang**

Produksi baja berbasis hidrogen diperkirakan baru dapat berkembang secara luas ketika:

- biaya energi terbarukan turun secara signifikan; dan
- penerapan harga karbon atau kebijakan perdagangan karbon mampu mempersempit kesenjangan biaya produksi.

Lintasan transisi Indonesia saat ini mencerminkan pendekatan bertahap tersebut, dengan target bahwa *Scrap-EAF* akan menyumbang sekitar 70% produksi baja nasional pada tahun 2060.



Pasar baja hijau: Jalur transisi menuju 2060

Bagian ini menyintesis proyeksi pasar baja hijau yang disajikan dalam studi *Green Steel Market* (IISIA/Penliti, 2025) dengan hasil analisis *Levelized Cost of Steel* (LCOS), daya saing biaya, dan kredit karbon, sehingga menghasilkan gambaran berbasis bukti dan kuantitatif mengenai evolusi sektor baja Indonesia hingga tahun 2060.

Tabel 11. Evolusi pasar baja hijau hingga tahun 2060

Indikator Pasar	2025 (Tahap Awal)	2045 (Puncak Pertumbuhan)	2060 (net zero)
Pangsa Pasar Baja Hijau	< 5%	40%–55%	> 95%
Total Permintaan Baja	~32,000 TTPA	~75,000 TTPA	~130,000 TTPA
Teknologi Utama	BF-BOF (Coal)	H ₂ -DRI & Scrap-EAF	Full Green Hydrogen
Green Premium (EAF vs BAU LCOS)	\$100–150/t	\$20–40/t	Near zero / parity
Harga Kredit Karbon (Indikatif)	\$2–25/t (IDX Carbon)	\$50–80/t	\$80–120/t
IRR for EAF (termasuk kredit karbon)	12.2% (peneliti)	16–21% (proyeksi)	> 20% (proyeksi)

Keterangan: Baris 1–4 diadaptasi dari IISIA/Authors (2025); sedangkan Green Premium, harga kredit karbon, dan IRR EAF berasal dari analisis sensitivitas. Proyeksi harga karbon mengacu pada perkembangan IDX Carbon (2025) dan tren perdagangan bilateral berdasarkan Pasal 6 Perjanjian Paris.

Fase transisi (2025-2030): Pasar masih didominasi persaingan berbasis biaya

Studi *Green Steel Market* menggambarkan periode ini sebagai fase “market locked in cost-based competition”, yaitu pasar yang masih didominasi persaingan harga (IISIA/Peneliti, 2025). Dalam kondisi ini, teknologi BF-BOF tetap mendominasi dengan biaya sekitar US\$589/ton, sementara EAF menjadi satu-satunya pesaing yang memiliki biaya relatif setara sekitar US\$583/ton.

Model LCOS yang dikalibrasi menggunakan acuan *World Steel Association* (WSA, 2024) menghasilkan biaya US\$500/ton untuk BAU dan US\$564/ton untuk EAF. Selisih biaya yang sedikit lebih besar ini disebabkan oleh penggunaan intensitas emisi global BF-BOF yang lebih tinggi sebagai dasar perhitungan. Meski demikian, kedua analisis menghasilkan kesimpulan yang sama, yaitu bahwa pangsa baja hijau masih berada di bawah 5% tanpa adanya dukungan kebijakan, sementara produksi konvensional BF-BOF tetap mendominasi pasar (IISIA/Peneliti, 2025; GEI, 2024).

Sinyal permintaan eksternal pada fase ini—terutama dari CBAM Uni Eropa yang mulai mengenakan biaya atas emisi karbon yang terkandung dalam baja impor sejak tahun 2026 (European Commission, 2023)—dinilai belum cukup kuat untuk mengubah struktur pasar domestik secara keseluruhan (IISIA/Peneliti, 2025). Temuan ini sejalan dengan hasil analisis sensitivitas *Internal Rate of Return* (IRR), yang menunjukkan bahwa pada harga kredit karbon US\$0–25/tCO₂, hanya BAU dan EAF yang layak secara finansial, sementara berbagai varian DRI-EAF masih berada di bawah ambang IRR sebesar 10%.

Namun demikian, studi *Green Steel Market* menegaskan bahwa EAF merupakan pengecualian yang langka, karena teknologi ini lebih bersih sekaligus sedikit lebih murah dibandingkan BAU (IISIA/Peneliti, 2025). Temuan tersebut diperkuat oleh hasil penelitian ini yang menunjukkan bahwa *Marginal Abatement Cost* (MAC) EAF hanya sebesar US\$2/tCO₂, sehingga menjadikannya pilihan investasi prioritas untuk dekarbonisasi sektor baja dalam jangka pendek.

Fase perluasan (2030-2045): mengelola *green premium*

Seiring permintaan baja Indonesia diproyeksikan mencapai sekitar 75 juta ton pada tahun 2045 (IISIA/Peneliti, 2025), studi *Green Steel Market* mengidentifikasi periode ini sebagai “*critical scaling window*”, yaitu jendela waktu yang menentukan apakah Indonesia mampu menjadi pemimpin regional dalam produksi baja hijau. Keberhasilan fase ini sangat bergantung pada konsistensi kebijakan dan kemampuan memobilisasi investasi.

Pangsa pasar baja hijau diperkirakan meningkat menjadi 40–55%, didorong oleh implementasi proyek percontohan H₂-DRI serta ekspansi pesat energi terbarukan, khususnya tenaga air dan panas bumi (IISIA/Peneliti, 2025; PLN, 2025). Pada saat yang sama, *green premium* diproyeksikan turun dari US\$100–150/ton menjadi hanya US\$20–40/ton.

Lintasan penurunan biaya ini konsisten dengan proyeksi *learning curve* dalam IEA *Iron and Steel Technology Roadmap* (IEA, 2024) dan GEI Net-Zero Roadmap (GEI, 2024), yang memperkirakan biaya elektroliser akan turun 60–70% pada tahun 2035 dalam skenario percepatan implementasi.

Analisis sensitivitas LCOS menunjukkan bahwa Green-H₂ DRI-EAF dapat mencapai IRR sebesar 8,3% pada harga karbon US\$80/tCO₂, yaitu mendekati tingkat yang dapat diterima untuk investasi industri strategis. Dengan demikian, argumen studi *Green Steel Market* mengenai adanya “*transition bottleneck*”—bahwa mekanisme pasar semata tidak mampu menutup kesenjangan biaya—terbukti secara kuantitatif. Selama harga hidrogen masih berada pada kisaran US\$4–6/kg, tidak ada tingkat harga karbon yang mampu mendorong transisi secara spontan tanpa intervensi kebijakan.

Kurva MAC (Bagian 4.1.6) menunjukkan bentuk intervensi yang diperlukan. Kombinasi kredit karbon Pasal 6 sebesar US\$40–60/tCO₂ dan Green Public Procurement (GPP) dengan premium US\$30/ton mampu menjembatani kesenjangan biaya bagi teknologi EAF dan NG-DRI, sehingga membentuk kerangka kebijakan yang koheren sebagaimana direkomendasikan oleh studi *Green Steel Market* (IISIA/Peneliti, 2025).

Fase net zero (2045–2060): Dari pasar yang didorong kebijakan menuju pasar yang didorong mekanisme ekonomi

Studi *Green Steel Market* memproyeksikan bahwa pada tahun 2060, baja hijau akan menyumbang lebih dari 95% total produksi, dengan total permintaan mencapai sekitar 130 juta ton (IISIA/ Peneliti, 2025). Sementara itu, Kementerian Perindustrian menargetkan sektor baja mencapai emisi nol bersih pada tahun 2050, lebih cepat dibanding target nasional tahun 2060 (Mol, 2024).

Pernyataan dalam studi bahwa *green premium* pada akhirnya akan menghilang didukung oleh hasil penelitian ini. Pada harga karbon US\$80/tCO₂, LCOS bersih Green-H₂ DRI-EAF (setelah memperhitungkan pendapatan dari kredit karbon) mendekati US\$700/ton, atau hampir setara dengan harga pasar baja sebesar US\$650/ton. Ketika harga karbon mencapai US\$120/tCO₂—sesuai jalur *Net Zero* IEA untuk tahun 2050—LCOS bersih turun hingga berada di bawah harga pasar baja. Dengan demikian, baja hijau menjadi pilihan ekonomi yang paling rasional bahkan tanpa subsidi (IEA, 2024).

Dua faktor konvergensi tambahan semakin memperkuat prospek tersebut. Pertama, potensi energi terbarukan Indonesia sebesar 3.600 GW (KESDM, 2023) menyediakan fondasi bagi produksi hidrogen hijau berbiaya kompetitif, terutama ketika RUPTL PLN 2025–2034 menambahkan 71 GW kapasitas energi terbarukan baru (PLN, 2025), yang secara langsung menurunkan biaya produksi hidrogen hijau.

Kedua, internalisasi penuh harga karbon melalui Sistem Perdagangan Emisi (ETS) Indonesia berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 110 Tahun 2025, ditambah perdagangan karbon bilateral berdasarkan Pasal 6 Perjanjian Paris, akan secara struktural menghilangkan keunggulan biaya BAU. Dengan demikian, transisi menuju pasar baja hijau akan digerakkan oleh mekanisme pasar, sebagaimana diproyeksikan dalam studi *Green Steel Market* (IISIA/Peneliti, 2025).

Pendorong utama pasar: Validasi kuantitatif terhadap studi *Green Steel Market*

Studi *Green Steel Market* mengidentifikasi tiga keunggulan struktural utama Indonesia (IISIA/Authors, 2025), yang dapat dijelaskan secara kuantitatif sebagai berikut.

- Potensi energi terbarukan (3.600 GW)

Pada biaya produksi hidrogen sebesar US\$2/kg, yang dimungkinkan melalui pemanfaatan energi terbarukan berbiaya rendah, LCOS Green-H₂ DRI-EAF turun dari US\$806/ton menjadi sekitar US\$620/ton, sehingga berada di bawah harga pasar baja sebesar US\$650/ton. Penambahan 71 GW kapasitas energi terbarukan dalam RUPTL PLN 2025–2034 merupakan prasyarat penting, namun belum cukup. Diperlukan pula penyusunan *Power Purchase Agreements* (PPA) khusus untuk sektor baja agar pasokan listrik hijau dapat dipastikan (GEI, 2024).

- Integrasi sumber daya (nikel dan bijih besi)

Cadangan nikel berkadar tinggi Indonesia—yang sangat penting bagi industri baterai kendaraan listrik—serta sumber daya bijih besi magnetit yang ideal untuk produksi pelet DRI, menciptakan peluang membangun ekonomi hijau yang terintegrasi secara vertikal. Baik teknologi EAF maupun DRI-EAF menggunakan bijih besi sebagai bahan baku, sehingga dapat memanfaatkan infrastruktur pertambangan yang telah ada serta mendukung agenda hilirisasi pemerintah (Lowy Institute, 2025).

- Mekanisme harga karbon (IDX Carbon dan ETS)

Peraturan Presiden Nomor 110 Tahun 2025 telah membentuk kerangka hukum bagi penerapan ETS, dengan sektor baja direncanakan mulai masuk dalam sistem tersebut pada tahun 2027 (IDX Carbon, 2025; KLHK, 2025). Analisis sensitivitas IRR menunjukkan bahwa setiap kenaikan harga karbon sebesar US\$25/tCO₂ meningkatkan IRR teknologi rendah karbon sekitar 2–4 poin persentase, dengan peningkatan yang relatif lebih besar pada teknologi EAF dibandingkan DRI-EAF untuk setiap dolar tambahan harga karbon. Oleh karena itu, penerapan jadwal kenaikan harga karbon yang kredibel dan bertahap merupakan instrumen kebijakan tunggal yang memiliki daya ungkit terbesar untuk mempercepat transisi menuju baja hijau di Indonesia.

Sintesis lintas aspek: Mengintegrasikan analisis biaya, pasar, dan karbon

Dengan mengintegrasikan model LCOS, analisis finansial-ekonomi, serta proyeksi perkembangan pasar baja hijau, terdapat lima kesimpulan utama yang menjelaskan dinamika dekarbonisasi industri baja di Indonesia. Kesimpulan-kesimpulan ini menjembatani kerangka tahapan perkembangan pasar yang disampaikan dalam *Green Steel Market Study* (IISIA/Peneliti, 2025) dengan bukti kuantitatif mengenai biaya produksi dan mekanisme karbon yang disajikan dalam laporan ini.

Kesimpulan 1 — Kesenjangan antara manfaat privat dan manfaat sosial merupakan kegagalan pasar yang utama

Seluruh skenario layak secara sosial, dengan *Economic Internal Rate of Return* (EIRR) berkisar antara 32–49%, seluruhnya berada di atas ambang kelayakan sosial sebesar 5%. Namun, berdasarkan asumsi dasar, hanya BAU dan EAF yang layak secara finansial bagi investor swasta.

Kesenjangan antara *Internal Rate of Return* (IRR) privat dan EIRR sosial—yang paling besar terjadi pada skenario Green-H₂ (IRR negatif dibandingkan EIRR sebesar 32,4%)—merupakan ukuran nyata dari kegagalan pasar yang diidentifikasi dalam tesis *lock-in* pada *Green Steel Market Study* (IISIA/Authors, 2025). Kegagalan pasar inilah yang menjadi alasan keberadaan berbagai instrumen kebijakan seperti pasar karbon, *Green Public Procurement* (GPP), serta mekanisme kredit karbon bilateral.

Besaran subsidi yang diperlukan—yakni sebesar *Marginal Abatement Cost* (MAC) (antara US\$2–43/tCO₂, tergantung skenario) dikurangi harga karbon yang berlaku—mewakili biaya kebijakan (*policy price*) yang harus ditanggung untuk mendorong transisi menuju baja rendah karbon.

Kesimpulan 2 — EAF merupakan teknologi utama pada seluruh tahapan transisi

Dengan MAC sebesar US\$2/tCO₂, IRR 12,2% pada harga karbon US\$25/tCO₂, EIRR 49%, pengurangan emisi 70%, tingkat kesiapan teknologi (TRL) 9, serta NPV pendapatan kredit karbon sebesar US\$13,2 miliar, teknologi EAF menunjukkan kinerja terbaik pada hampir seluruh indikator yang dianalisis.

Baik *Green Steel Market Study* (IISIA/Peneliti, 2025) maupun GEI Net-Zero Roadmap (GEI, 2024) menempatkan EAF sebagai prioritas investasi jangka pendek. Satu-satunya kendala utama adalah ketersediaan *scrap* baja, yang merupakan persoalan logistik dan kebijakan, bukan keterbatasan teknologi maupun pembiayaan. Oleh karena itu, kebijakan pengelolaan *scrap* menjadi faktor kunci yang akan menentukan keberhasilan keseluruhan program dekarbonisasi industri baja Indonesia pada tahap awal.

Kesimpulan 3 — Kisaran harga karbon US\$25–60/tCO₂ merupakan titik balik yang paling menentukan

- Pada harga karbon di bawah US\$25/tCO₂, hanya BAU dan EAF yang layak secara finansial.
- Pada kisaran US\$25–60/tCO₂, EAF menjadi teknologi yang paling kompetitif, sementara Blue-H₂ DRI-EAF mulai mendekati tingkat kelayakan investasi.
- Di atas US\$60/tCO₂, seluruh keluarga teknologi DRI-EAF menjadi kompetitif.

Kisaran harga ini sejalan dengan proyeksi perkembangan pasar karbon Indonesia, yaitu:

- IDX Carbon saat ini sekitar US\$2/tCO₂ (2025),
- meningkat melalui perdagangan bilateral Article 6 sekitar US\$25–50/tCO₂, hingga
- mencapai harga yang selaras dengan Emission Trading System (ETS) sekitar US\$60–80/tCO₂ pada tahun 2035.

Temuan ini menunjukkan bahwa Indonesia tidak memerlukan harga karbon setinggi EU ETS untuk mentransformasi industri bajanya. Yang dibutuhkan adalah kenaikan harga karbon yang konsisten, kredibel, dan bertahap menuju kisaran US\$25–80/tCO₂ dalam satu dekade mendatang (IDX Carbon, 2025; Peraturan Presiden No. 110 Tahun 2025; COP29, 2024).

Kesimpulan 4 — Green Public Procurement (GPP) dan kredit karbon saling melengkapi, bukan saling menggantikan

Green Steel Market Study menempatkan penetapan harga karbon sebagai instrumen kebijakan utama (IISIA/Authors, 2025). Analisis ini menunjukkan bahwa GPP merupakan instrumen tambahan yang bersifat komplementer.

Premium GPP sebesar US\$30 per ton yang dikombinasikan dengan kredit karbon sebesar US\$25/tCO₂ mampu meningkatkan:

- IRR EAF menjadi sekitar 14%, setara dengan skenario BAU, dan

- IRR Blue-H₂ DRI-EAF menjadi sekitar 8%.

Masing-masing instrumen secara terpisah belum cukup untuk mencapai tingkat kelayakan investasi tersebut. Namun, apabila diterapkan secara bersamaan, keduanya menghasilkan sinyal pasar yang setara dengan penerapan harga karbon sekitar US\$60/tCO₂, tetapi dengan biaya politik yang jauh lebih rendah karena GPP memanfaatkan anggaran pengadaan pemerintah yang sudah tersedia (IISD, 2024; IDDI, 2025).

Dengan demikian, kombinasi GPP dan pasar karbon merupakan jawaban praktis terhadap kebutuhan akan “kerangka kebijakan yang koheren” sebagaimana disampaikan dalam *Green Steel Market Study* (IISIA/Peneliti, 2025).

Kesimpulan 5 — Blue-H₂ DRI-EAF merupakan teknologi jembatan menuju net-zero yang dimungkinkan oleh program CCS Indonesia

Green-H₂ DRI-EAF merupakan tujuan akhir dekarbonisasi pada tahun 2060, dengan:

- pengurangan emisi 96%,
- NPV kredit karbon sebesar US\$18,2 miliar, serta
- pangsa pasar diproyeksikan melebihi 95% (IISIA/Peneliti, 2025).

Namun demikian, teknologi ini baru layak apabila harga hidrogen hijau turun menjadi sekitar US\$1,4–1,7/kg (Rosner et al., 2023), sedangkan saat ini masih berada pada kisaran US\$4–6/kg (MEMR, 2023).

Sebagai alternatif transisi, Blue-H₂ DRI-EAF mampu mengurangi emisi hingga 78% dengan MAC sebesar US\$24/tCO₂, yang telah berada di bawah harga dasar kredit karbon saat ini. Teknologi ini juga sangat selaras dengan pengembangan 19 proyek Carbon Capture and Storage (CCS) Indonesia yang ditargetkan beroperasi sebelum tahun 2030 (MEMR, 2024; Perpres No. 14 Tahun 2024).

Dengan demikian, Blue-H₂ DRI-EAF berfungsi sebagai teknologi jembatan yang memungkinkan Indonesia mencapai target produksi baja berbasis Green-H₂ pada tahun 2060.

Kerangka transisi bertahap (Tabel 10)—Scrap-first → Gas-bridge → Integrasi CCS → Skala Green-H₂

—mencerminkan logika tersebut dan konsisten dengan rekomendasi GEI (2024), IEA (2024), serta struktur tahapan yang diusulkan dalam *Green Steel Market Study* (IISIA/Peneliti, 2025). Kerangka ini menyediakan peta jalan dekarbonisasi industri baja Indonesia menuju tahun 2060 yang kredibel dan berbasis bukti.

4.3. Analisis kredit karbon

Dalam pasar karbon yang diatur, emisi karbon tidak lagi dipandang semata sebagai eksternalitas lingkungan, melainkan telah menjadi variabel ekonomi yang memiliki harga dan dapat diperdagangkan, sehingga secara langsung memengaruhi biaya produksi maupun daya saing industri (IISIA/Authors, 2025). Analisis berikut melengkapi kerangka konseptual tersebut dengan hasil kuantitatif berupa Internal IRR NPV yang diperoleh dari model LCOS.

Pendapatan kredit karbon dan emisi yang dihindari

Tabel 12. Pendapatan kredit karbon dan pengurangan emisi berdasarkan skenario pada harga karbon US\$25/tCO₂

Indikator	S1 BAU	S2 EAF	S3 NG-DRI	S4 Blue-H ₂	S5 Green-H ₂
Intensitas CO ₂ (tCO ₂ /t baja)	2.30	0.70	1.40	0.50	0.10
Intensitas menurut IISIA/ Peneliti (2025)	1.46	0.38	0.66	0.09	~0.00
Emisi CO2 selama umur proyek (Mt/tahun)	1,472	448	896	320	64
Emisi yang dihindari dibanding BAU (Mt)	baseline	1,024	576	1,152	1,408
Penurunan Emisi vs BAU	—	70%	39%	78%	96%
NPV pendapatan kredit karbon pada harga US\$25/ tCO ₂ (US\$ juta)	0	13,231	7,442	14,885	18,192
Biaya pengurangan emisi marjinal (MAC) (US\$/tCO ₂)	baseline	\$2	\$43	\$24	\$39

Catatan: Intensitas CO₂ pada baris pertama berasal dari model penulis (berdasarkan data WSA/IEA), sedangkan baris kedua berasal dari Green Steel Market Study (IISIA/Peneliti, 2025) yang menggunakan data emisi domestik BPS/IISIA. Sumber: Model peneliti; IISIA/Peneliti (2025); WSA (2024); IEA (2024).

Perbedaan nilai intensitas emisi pada baris pertama dan kedua dalam Tabel 12 muncul karena Green Steel Market Study (IISIA/Authors, 2025) menggunakan data tingkat pabrik dari BPS/IISIA Indonesia, yang mencatat intensitas emisi BAU sebesar 1,46 tCO₂/t baja, mencerminkan armada BF-BOF Indonesia yang relatif lebih efisien.

Sebaliknya, model dalam penelitian ini menggunakan rata-rata global World Steel Association (WSA, 2024) sebesar 2,30 tCO₂/t baja sebagai acuan.

Kedua pendekatan tersebut sama-sama valid:

- nilai yang lebih rendah merepresentasikan kondisi aktual industri baja Indonesia;
- sedangkan nilai yang lebih tinggi digunakan sebagai pembanding internasional yang menjadi dasar dalam penerapan CBAM dan penetapan baseline kredit karbon.

Selain itu, estimasi intensitas emisi untuk EAF (0,38 tCO₂/t) dan Green-H₂ (mendekati nol) dalam Green Steel Market Study konsisten dengan benchmark yang diterbitkan oleh IEA (2024) dan MIT EPPA (2023).

BAU: Dari keunggulan biaya ke beban struktural

Studi *Green Steel Market* berpendapat bahwa skenario BAU akan menjadi kurang menguntungkan begitu penetapan harga karbon mulai berlaku (IISIA/Penulis, 2025). Tanpa penetapan harga karbon, skenario BAU menghasilkan NPV finansial sebesar \$8,0 miliar dan IRR 14,1% — yang terbaik di antara kelima skenario. Pada harga kredit dasar sebesar \$25/tCO₂, skenario BAU tidak memperoleh pendapatan kredit sama sekali (ini merupakan baseline kontrafaktual). Studi *Green Steel Market* memproyeksikan emisi skenario BAU akan meningkat dari ~48 Mt CO₂ pada tahun 2025 menjadi ~140 Mt CO₂ pada tahun 2060 (IISIA/Penulis, 2025), yang dengan kewajiban karbon sebesar \$60/tCO₂ (dapat dicapai pada tahun 2035 berdasarkan lintasan IDX Carbon) setara dengan biaya karbon tahunan sekitar \$8,4 miliar — sehingga menghilangkan sepenuhnya keunggulan biaya yang ada saat ini. CBAM memperparah situasi ini: harga karbon UE sebesar ~\$75/tCO₂ (rata-rata tahun 2025) yang diterapkan pada emisi tertanam sebesar 2,30 tCO₂/t setara dengan tarif implisit ~\$173/t, jauh melebihi margin kotor \$150/t pada harga baja saat ini. Hal ini mengonfirmasi peringatan mengenai ‘risiko aset terlantar’ dalam studi *Green Steel Market* (IISIA/Penulis, 2025), yang didukung oleh pemodelan skenario dalam Peta Jalan Net-Zero GEI (GEI, 2024) serta laporan investigasi terbaru Mongabay mengenai celah regulasi di Indonesia (Mongabay, 2026).

Jalur transisional

Studi *Green Steel Market* (2025) mengidentifikasi EAF berbasis skrap (0,38 tCO₂/t) dan DRI berbasis gas (0,66 tCO₂/t) sebagai ‘pemenang awal’ di pasar karbon, yang menghasilkan kredit surplus yang menjadi pendapatan tambahan. Analisis ini mengukur aliran kredit EAF sebesar \$13.2 miliar NPV pada harga dasar \$25/t — sehingga mengurangi LCOS efektifnya dari \$564/t menjadi \$509/t. Pada harga \$50/tCO₂, NPV pendapatan kredit EAF meningkat dua kali lipat menjadi sekitar \$26 miliar, sehingga menurunkan net-LCOS setelah dikurangi kredit menjadi sekitar \$454/t, di bawah skenario BAU — titik persimpangan yang menentukan di mana pasar menyesuaikan diri tanpa subsidi lebih lanjut.

Studi *Green Steel Market* secara tepat mengidentifikasi risiko aset terlantar (*stranded asset*) untuk NG-DRI (IISIA/Penulis, 2025): seiring dengan semakin ketatnya batas emisi

menuju net-zero pada tahun 2050, angka 0,66 tCO₂/t mungkin melampaui ambang batas yang diperbolehkan, sehingga mengubah posisi NG-DRI dari penjual kredit menjadi pembeli kredit. Analisis ini memperkirakan bahwa NG-DRI akan melampaui ambang batas netral kredit ketika batas emisi sektoral Indonesia mencapai sekitar 0,66 tCO₂/t — yang diproyeksikan terjadi sekitar tahun 2040–2045 berdasarkan konvergensi linier dari skenario BAU saat ini. Oleh karena itu, rekomendasi desain DRI yang siap menggunakan H₂ (IEA, 2024; GEI, 2024) bukan sekadar pilihan optimalisasi biaya, melainkan strategi manajemen risiko aset terlantar: hal ini memungkinkan NG-DRI beralih ke bahan bakar hidrogen sebelum kewajiban karbon menjadi terlalu memberatkan.

Jalur Dekarbonisasi Mendalam

Green Steel Market Study memperkenalkan konsep efek “monopoli kredit” (*credit monopoly*) (IISIA/Peneliti, 2025), yaitu kondisi ketika batas emisi (*emissions cap*) semakin diperketat menuju target net-zero, sehingga hanya produsen dengan tingkat emisi yang sangat rendah (*ultra-low-emission producers*) yang tetap berada di bawah ambang batas regulasi dan berhak menghasilkan kredit karbon.

Pada periode 2050–2060, produsen Blue-H₂ DRI-EAF dan Green-H₂ DRI-EAF diproyeksikan menjadi penghasil utama—bahkan berpotensi menjadi satu-satunya—kredit karbon di sektor baja. Setiap ton baja yang diproduksi oleh teknologi tersebut dapat menghasilkan hingga 1,46 tCO₂ dalam bentuk kredit karbon dibandingkan dengan skenario dasar Business as Usual (BAU).

Model kuantitatif dalam penelitian ini menerjemahkan manfaat tersebut ke dalam nilai ekonomi. Pada harga karbon sebesar US\$25/tCO₂, teknologi Green-H₂ DRI-EAF menghasilkan Net Present Value (NPV) pendapatan kredit karbon sebesar US\$18.2 miliar selama periode 20 tahun. Ketika harga karbon meningkat menjadi US\$80/tCO₂—setara dengan rata-rata harga EU ETS pada periode 2023–2025—nilai tersebut meningkat menjadi sekitar US\$58 miliar.

Dengan mengacu pada LCOS sebesar US\$913/ton sebagaimana digunakan dalam *Green Steel Market Study* (IISIA/Peneliti, 2025), maka NPV kredit karbon sebesar US\$58 miliar terhadap NPV total biaya sebesar US\$194 miliar menghasilkan LCOS bersih sekitar US\$700/ton. Nilai ini sudah mendekati harga pasar baja saat ini, yaitu sekitar US\$650/ton, sehingga secara kuat memvalidasi

proyeksi *Green Steel Market Study* bahwa *green premium* pada akhirnya akan “secara efektif menghilang” seiring semakin matangnya mekanisme penetapan harga karbon (IISIA/Peneliti, 2025).

Temuan ini juga memperkuat kesimpulan IEA *Iron and Steel Roadmap* (2024) bahwa harga karbon yang berfungsi secara efektif pada kisaran US\$80–130/tCO₂ merupakan faktor tunggal yang paling penting dalam meningkatkan daya saing baja hijau di negara-negara berkembang.

Sensitivitas IRR terhadap harga kredit karbon

Tabel 13. Sensitivitas Internal Rate of Return (IRR) terhadap harga kredit karbon

Harga Kredit Karbon	S1 BAU IRR	S2 EAF IRR	S3 NG-DRI	S4 Blue-H ₂	S5 Green-H ₂	Skenario Terbaik
\$0/tCO ₂	14.1%	6.8%	0.0%	(3.2%)	< 0%	Hanya S1
\$25/t (base)	14.1%	12.2%	3.8%	4.0%	< 0%	S1, S2
\$50/tCO ₂	14.1%	16.4%	6.8%	8.8%	2.4%	S2 mendominasi
\$80/tCO ₂	14.1%	20.9%	9.8%	13.3%	8.3%	S2, S4
\$120/tCO ₂	14.1%	26.1%	13.2%	18.4%	14.3%	Seluruh skenario layak

Keterangan: Warna kuning menunjukkan **kasus dasar (base case)**; warna hijau menunjukkan **IRR di atas ambang kelayakan investasi sebesar 10%**, sedangkan warna merah menunjukkan **IRR di bawah ambang tersebut**. Sumber: model penulis; benchmark **EU ETS** berdasarkan **BloombergNEF (2025)**.

Tabel diatas secara langsung mengoperasionalkan salah satu wawasan kebijakan utama (*cross-cutting policy insight*) yang dikemukakan dalam *Green Steel Market Study* (IISIA/Peneliti, 2025), yaitu bahwa efektivitas pasar karbon ditentukan oleh tingkat harga karbon sekaligus desain kebijakannya.

Tanpa adanya harga karbon, hanya skenario BAU yang layak secara finansial. Pada tingkat harga karbon menengah (US\$25–50/tCO₂), teknologi EAF menjadi pilihan yang paling kompetitif. Ketika harga karbon mencapai US\$80–120/tCO₂, seluruh kelompok teknologi DRI-EAF menjadi menarik bagi investor swasta.

Analisis ini juga menunjukkan ambang harga karbon minimum agar masing-masing teknologi menjadi layak secara finansial, yaitu:

- EAF pada sekitar US\$15/tCO₂;
- Blue-H₂ DRI-EAF pada sekitar US\$60/tCO₂;
- NG-DRI-EAF pada sekitar US\$80/tCO₂; dan
- Green-H₂ DRI-EAF pada sekitar US\$120/tCO₂.

Angka-angka tersebut menerjemahkan tujuan kebijakan menjadi kriteria investasi yang konkret, sehingga dapat menjadi acuan bagi sektor swasta maupun pemerintah dalam merancang strategi investasi dan kebijakan dekarbonisasi industri baja.



BAB 5

IMPLIKASI STRATEGIS UNTUK INOVASI KEBIJAKAN

5.1. Kebijakan inperatif: Menjembatani *green premium* dan menjaga daya saing

Transisi menuju industri besi dan baja hijau di Indonesia tidak terkendala oleh kelayakan teknologi, melainkan oleh ketidaksesuaian yang terus berlanjut antara biaya produksi, insentif pasar, dan desain kebijakan. Manifestasi utama dari ketidaksesuaian tersebut adalah *green premium*, yaitu tambahan biaya yang harus ditanggung untuk memproduksi baja rendah karbon dibandingkan dengan produksi baja konvensional berbasis batu bara.

Analisis LCOS menunjukkan bahwa produksi konvensional masih menjadi tolok ukur biaya terendah (sekitar USD 589/ton), sedangkan produksi baja berbasis hidrogen masih jauh lebih mahal (lebih dari USD 900/ton). Dalam kondisi tersebut, perusahaan secara ekonomi terdorong untuk terus berinvestasi pada produksi yang intensif karbon, sehingga menciptakan keseimbangan pasar dengan tingkat emisi yang tinggi. Kondisi struktural ini bukan sekadar asumsi teoretis, tetapi juga diperkuat oleh bukti empiris. Sebagaimana disampaikan oleh salah satu perwakilan industri:

“Beban utama terletak pada investasi awal (capital expenditure). Beralih ke baja hijau memerlukan investasi baru secara menyeluruh; pabrik yang sudah ada tidak dapat begitu saja mengganti teknologinya.” — Pemangku kepentingan industri (Indonesian Iron and Steel Association/IISIA)

Desain kebijakan dan keberlanjutan *Green Premium*

Instrumen kebijakan yang ada di Indonesia belum secara efektif mengatasi perbedaan biaya antara baja hijau dan baja konvensional. Insentif fiskal saat ini terutama berbentuk pengurangan pajak penghasilan badan bagi perusahaan yang mengadopsi teknologi ramah lingkungan. Keterbatasan ini tercermin dalam pandangan KADIN:

“Ketika perusahaan berinvestasi pada teknologi mitigasi yang mahal tetapi tidak memperoleh insentif yang berarti—baik untuk investasinya maupun melalui harga produk—aka biaya tambahan tersebut akan dibebankan kepada produk sehingga menjadi tidak kompetitif.”—Perwakilan industri (KADIN Indonesia)

Hal ini menegaskan bahwa insentif yang ada hanya memperbaiki kondisi keuangan secara tidak langsung dan gagal mengatasi kerugian biaya per ton yang dihadapi baja hijau. Akibatnya, dekarbonisasi masih menjadi pertimbangan sekunder dalam keputusan investasi.

Lebih penting lagi, struktur insentif saat ini tidak secara langsung menargetkan *green premium*, yang didorong oleh tingginya biaya energi bersih, bahan baku rendah karbon, dan teknologi maju. Tidak adanya instrumen yang secara spesifik menurunkan biaya—seperti subsidi energi terbarukan, dukungan terhadap pasokan *scrap*, atau kontrak energi jangka panjang—menyebabkan baja hijau tetap tidak kompetitif secara struktural di pasar.

Lemahnya sinyal permintaan dan hambatan pembentukan pasar

Keberlanjutan *green premium* semakin diperkuat oleh minimnya instrumen kebijakan yang mendorong sisi permintaan. Saat ini belum terdapat kewajiban penggunaan baja hijau dalam proyek infrastruktur publik maupun kerangka GDP yang berfungsi secara efektif. Wawancara dengan para pemangku kepentingan menunjukkan belum terbentuknya pasar domestik:

“Saat ini belum ada pasar untuk baja hijau di Indonesia. Permintaan terutama berasal dari Eropa, bukan dari pasar domestik.”—Ahli transisi energi (*Institute for Essential Services Reform/IESR*)

“Konsumen domestik masih lebih menyetor harga dibandingkan keberlanjutan; kesadaran terhadap baja hijau masih rendah.” — Pemangku kepentingan pemerintah (Kementerian Perindustrian)

Temuan ini menunjukkan bahwa produsen menghadapi risiko investasi yang tinggi akibat ketidakpastian permintaan dan tidak adanya premium harga, sehingga memperlambat pembentukan pasar. Dengan demikian, muncul kesenjangan yang signifikan: produsen harus

menanggung biaya investasi awal yang tinggi, tetapi tidak memiliki kepastian adanya permintaan pasar.

Akibatnya, perusahaan menghadapi risiko besar dalam mengadopsi teknologi rendah karbon meskipun tersedia insentif di sisi penawaran. Lemahnya sinyal permintaan ini menghambat terbentuknya pasar domestik baja hijau yang layak dan memperlambat penurunan biaya melalui peningkatan skala produksi.

Lingkungan persaingan yang terdistorsi

Tantangan terhadap daya saing semakin diperparah oleh adanya kesenjangan kebijakan di bidang perdagangan dan sertifikasi. Pertama, sistem sertifikasi hijau memang telah tersedia, tetapi masih bersifat sukarela sehingga efektivitasnya terbatas. Perusahaan yang berinvestasi dalam produksi rendah karbon menanggung biaya lebih tinggi, namun tidak memperoleh harga premium maupun keunggulan pasar.

“Baik produsen yang sudah hijau maupun yang belum, keduanya menghadapi permintaan pasar yang sama.”—Pemangku kepentingan industri (IISIA)

Kedua, baja impor—yang sering kali diproduksi dengan standar lingkungan yang lebih rendah—tetap dapat masuk ke pasar domestik tanpa dikenakan sanksi terkait kandungan karbonnya. Dikombinasikan dengan belum adanya mekanisme penetapan harga karbon yang efektif, kondisi ini menciptakan lingkungan persaingan yang terdistorsi, di mana produk beremisi tinggi tetap lebih murah sementara produk rendah emisi justru mengalami kerugian ekonomi.

“Industri domestik menghadapi tekanan yang sangat besar akibat masuknya produk impor berharga murah, yang secara signifikan melemahkan daya saing.”—Perwakilan asosiasi industri (IISIA)

Distorsi ini melemahkan baik tujuan lingkungan maupun daya saing industri nasional.

Kesenjangan kebijakan penetapan harga karbon dan hilangnya sinyal ekonomi

Meskipun Indonesia telah memiliki landasan hukum untuk penerapan harga karbon, implementasinya masih sangat terbatas. Harga karbon yang direncanakan saat ini (sekitar USD 2/ tCO₂) masih jauh di bawah tingkat yang diperlukan

untuk memengaruhi keputusan produksi. Lemahnya sinyal ekonomi ini tercermin dalam persepsi pelaku usaha:

“Dari sudut pandang bisnis, dekarbonisasi masih dipandang sebagai tambahan biaya, bukan sebagai sumber nilai ekonomi.”—Perwakilan industri (KADIN Indonesia)

Sebagaimana ditunjukkan dalam analisis LCOS dan kredit karbon, harga karbon di bawah sekitar USD 50/tCO₂ hampir tidak memberikan dampak terhadap keputusan investasi. Perubahan yang berarti baru terjadi pada tingkat harga karbon yang lebih tinggi.

Tanpa penerapan harga karbon yang efektif, biaya lingkungan tidak terinternalisasi, tidak ada diferensiasi ekonomi antara baja hijau dan baja konvensional, dan *green premium* tetap bertahan. Hal ini melemahkan keseluruhan ekosistem transisi dan menunda investasi dalam teknologi rendah karbon.

Kendala kelembagaan: MRV dan kredibilitas kebijakan

Kendala lain terletak pada masih terbatasnya pengembangan sistem *Measurement, Reporting, and Verification* (MRV) di Indonesia. Kesenjangan dalam data emisi, standar pelaporan, dan mekanisme verifikasi mengurangi kredibilitas kebijakan serta menciptakan ketidakpastian bagi pelaku pasar. Para pemangku kepentingan menyoroti kelemahan kelembagaan tersebut:

“Sertifikat energi terbarukan Indonesia belum sepenuhnya diakui secara internasional karena masih terdapat keraguan terkait kredibilitas, keterlacakan, dan mekanisme verifikasi.” — Ahli kebijakan energi (IESR)

“Fragmentasi kelembagaan dan tantangan koordinasi antar sektor menghambat implementasi kebijakan secara efektif.”—Pemangku kepentingan pemerintah (Kementerian Perindustrian)

Kondisi ini memiliki dua implikasi utama. Di tingkat domestik, kelemahan tersebut membatasi efektivitas penerapan harga karbon dan penegakan regulasi. Di tingkat internasional, kondisi tersebut melemahkan kemampuan produk baja Indonesia untuk memenuhi persyaratan kebijakan seperti CBAM. Dalam konteks ini, sistem MRV bukan hanya merupakan kebutuhan teknis, tetapi juga menjadi prasyarat utama bagi daya saing Indonesia di pasar global.

5.2. Kerangka kebijakan lima pilar untuk perlindungan dan daya saing baja hijau

Analisis dalam studi ini menunjukkan bahwa transisi menuju baja hijau di Indonesia tidak hanya terkendala oleh perbedaan biaya produksi, tetapi juga oleh instrumen kebijakan yang terfragmentasi dan tidak selaras. Meskipun telah tersedia berbagai instrumen kebijakan—mulai dari insentif fiskal, sistem sertifikasi, hingga regulasi perdagangan—desain kebijakan saat ini belum secara kolektif mampu menjawab tantangan utama transisi, yaitu menjembatani *green premium* sekaligus mempertahankan daya saing industri.

Bukti empiris menunjukkan bahwa berbagai instrumen tersebut masih berjalan secara terpisah, dengan interaksi yang sangat terbatas antara struktur biaya, pembentukan permintaan, dan regulasi pasar.

“Kebijakan antar kementerian masih terfragmentasi; tantang koordinasi membuat implementasinya menjadi kurang efektif.”

— Pemangku kepentingan pemerintah (Kementerian Perindustrian)

Fragmentasi ini mengurangi efektivitas kebijakan secara keseluruhan dan memperkuat keberlanjutan jalur produksi yang berintensitas karbon tinggi.

Pilar 1: Mengoordinasikan sinyal regulasi dan horizon investasi

Hambatan utama yang teridentifikasi baik melalui pemodelan maupun bukti empiris adalah belum adanya sinyal investasi yang koheren dan kredibel. Walaupun insentif fiskal untuk teknologi ramah lingkungan telah tersedia, insentif tersebut belum dirancang untuk memprioritaskan hasil dekarbonisasi. Ketidaksesuaian ini tercermin dalam pandangan KADIN:

“Perusahaan pada dasarnya merespons besarnya investasi dan tingkat keuntungan ekonomi, bukan kriteria lingkungan, karena insentif yang ada belum disusun berdasarkan pengurangan emisi.”

— Perwakilan industri (KADIN Indonesia)

Skema insentif saat ini tidak memberikan bobot signifikan terhadap kriteria lingkungan, mensyaratkan ambang kelayakan yang tinggi, dan terutama diberikan dalam bentuk pengurangan pajak penghasilan badan. Akibatnya, perusahaan

lebih terdorong untuk mengoptimalkan besarnya investasi atau penciptaan lapangan kerja dibandingkan pengurangan emisi. Hal ini melemahkan peran kebijakan sebagai pendorong perubahan struktural dan berkontribusi pada berlanjutnya investasi dalam produksi yang intensif karbon.

Oleh karena itu, penguatan kerangka kebijakan dan regulasi menjadi sangat penting untuk membangun kepastian investasi. Penetapan target sektoral yang jelas, jadwal implementasi yang pasti, serta standar emisi yang dapat ditegakkan akan mengurangi ketidakpastian dan memungkinkan perusahaan menyelaraskan alokasi modal dengan jalur transisi jangka panjang.

Tanpa sinyal yang jelas tersebut, bahkan insentif keuangan yang dirancang dengan baik pun berisiko tidak dimanfaatkan secara optimal karena perusahaan cenderung menunda keputusan investasi sambil menunggu kepastian kebijakan.

Pilar 2: Membangun kredibilitas pasar melalui standar dan klasifikasi

Analisis juga menunjukkan adanya kesenjangan yang signifikan dalam pelembagaan standar baja hijau. Walaupun Indonesia telah menerbitkan beberapa regulasi terkait material hijau, ketentuan tersebut sebagian besar masih bersifat sukarela dan belum terhubung secara efektif dengan insentif ekonomi. Temuan ini diperkuat oleh pandangan para pemangku kepentingan:

“Sertifikasi hijau memang sudah ada, tetapi karena tidak bersifat wajib dan tidak dikaitkan dengan harga maupun pengadaan, sertifikasi tersebut tidak memengaruhi perilaku pasar.”

— Ahli kebijakan energi (IESR)

Dalam praktiknya, perusahaan yang mengadopsi teknologi rendah karbon harus menanggung biaya produksi yang lebih tinggi tanpa memperoleh manfaat ekonomi yang sepadan, sekaligus harus bersaing dengan produk berbiaya lebih rendah namun beremisi tinggi. Kesenjangan ini menyebabkan kinerja pengurangan emisi tidak dapat diterjemahkan menjadi sinyal harga maupun keunggulan kompetitif. Tanpa standar wajib atau integrasi dengan kebijakan pengadaan pemerintah dan perdagangan, sertifikasi hijau hanya akan menjadi instrumen simbolis.

Dengan mendefinisikan secara jelas apa yang dimaksud dengan baja hijau dan menyelaraskan definisi tersebut dengan standar internasional, pembuat kebijakan dapat menciptakan diferensiasi

harga, mempermudah akses ke pasar ekspor, serta mendukung berfungsinya pasar karbon dan sistem pengadaan hijau. Tanpa sistem tersebut, produsen rendah karbon tidak dapat sepenuhnya memperoleh manfaat ekonomi dari keunggulan emisi yang mereka miliki.

Efektivitas kerangka kebijakan juga dibatasi oleh kelemahan kelembagaan, khususnya dalam sistem MRV. Tantangan yang dihadapi saat ini meliputi data emisi yang belum lengkap, standar pelaporan yang belum konsisten, serta mekanisme verifikasi yang masih lemah.

Pilar 3: Mengatasi green premium melalui dukungan keuangan yang terarah

Keberlanjutan *green premium* semakin diperkuat oleh belum adanya instrumen yang secara langsung menurunkan biaya produksi. Kebijakan yang berlaku belum mampu mengatasi faktor-faktor utama yang menentukan biaya produksi, seperti tarif listrik bagi fasilitas EAF, ketersediaan dan harga bahan baku *scrap*, serta akses terhadap energi rendah karbon dengan harga yang terjangkau. Kondisi ini tercermin jelas dalam pandangan IISIA:

“Permasalahan utama adalah biaya—energi, bahan baku, dan teknologi semuanya secara signifikan meningkatkan biaya produksi baja hijau.”

— Pemangku kepentingan industri (IISIA)

Akibatnya, kesenjangan biaya yang ditunjukkan dalam analisis LCOS pada praktiknya tetap bertahan. Penetapan harga karbon yang secara teori dapat membantu mengatasi kesenjangan tersebut saat ini masih berada pada tingkat yang terlalu rendah (sekitar USD 2/tCO₂) sehingga belum mampu memengaruhi keputusan produksi. Melalui penurunan biaya investasi awal dan pemberian dukungan terhadap implementasi tahap awal, berbagai instrumen keuangan dapat mendorong investasi swasta, mempercepat proses pembelajaran teknologi (*learning effects*), serta menurunkan biaya sistem secara keseluruhan dalam jangka panjang.

Pilar 4: Mengelola eksposur perdagangan dan mencegah kebocoran karbon (carbon leakage)

Daya saing produsen domestik juga semakin melemah akibat adanya kesenjangan dalam kebijakan perdagangan dan industri. Indonesia

masih mengimpor baja dalam jumlah besar, yang sebagian besar diproduksi dengan standar lingkungan yang lebih rendah dan struktur biaya yang lebih murah. Pada saat yang sama, produsen domestik harus menanggung biaya tambahan ketika mengadopsi teknologi rendah karbon, sementara belum terdapat mekanisme yang menginternalisasikan kandungan karbon pada produk impor.

Para pemangku kepentingan menyoroti ketimpangan tersebut:

“Produsen dalam negeri menghadapi biaya yang lebih tinggi akibat upaya dekarbonisasi, sementara produk impor tidak dikenakan persyaratan lingkungan yang sama.”

— Perwakilan asosiasi industri (IISIA)

Selain itu:

“Hingga saat ini belum terdapat mekanisme yang memperhitungkan kandungan karbon pada baja impor.”

— Pemangku kepentingan pemerintah (Kementerian Perindustrian)

Kebijakan yang ada, seperti Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN), masih berfokus pada kandungan lokal dan belum mempertimbangkan kinerja emisi. Akibatnya, kebijakan tersebut belum mampu mendorong produksi baja hijau maupun memberikan perlindungan kepada produsen domestik yang beremisi rendah.

Situasi ini menciptakan persaingan yang tidak seimbang, di mana upaya dekarbonisasi justru dapat mengurangi daya saing industri domestik. Oleh karena itu, langkah-langkah perlindungan perdagangan dan kebijakan industri menjadi penting untuk menjaga stabilitas proses transisi. Dengan menyelaraskan standar domestik dengan rezim internasional serta memastikan bahwa produk impor menghadapi pembatasan karbon yang setara, pemerintah dapat menciptakan persaingan yang adil sekaligus mencegah relokasi produksi yang berintensitas emisi tinggi ke Indonesia (*carbon leakage*). Kebijakan semacam ini menjadi sangat penting terutama pada fase transisi menengah ketika perbedaan biaya antar teknologi masih cukup besar.

Pilar 5: Menciptakan permintaan sebagai fondasi transformasi pasar

Kesenjangan penting lainnya adalah belum adanya instrumen kebijakan dari sisi permintaan. Hingga

saat ini belum terdapat kewajiban penggunaan baja hijau dalam pengadaan barang dan jasa pemerintah maupun proyek infrastruktur nasional. Kondisi ini ditegaskan oleh IESR:

“Tanpa adanya permintaan dari pemerintah—terutama melalui pengadaan publik—tidak ada insentif yang kuat bagi produsen untuk beralih ke baja hijau.”

— Ahli transisi energi (IESR)

Akibatnya, permintaan terhadap baja hijau tetap lemah dan tidak pasti, insentif bagi perusahaan untuk meningkatkan kapasitas produksi menjadi terbatas, serta penurunan biaya melalui skala ekonomi tertunda.

Tanpa sinyal permintaan yang dapat diandalkan, kebijakan yang hanya berfokus pada sisi penawaran tidak akan cukup untuk mendorong transformasi pasar. Dalam konteks ini, kebijakan publik memiliki peran penting dalam menciptakan pasar. Instrumen seperti GPP dapat menyediakan permintaan yang stabil dan dapat diprediksi, menciptakan aliran pendapatan awal bagi produsen baja rendah karbon, serta memberikan sinyal positif bagi pembeli sektor swasta. Dengan bertindak sebagai pembeli utama (*lead purchaser*), pemerintah dapat mengurangi ketidakpastian pasar dan mempercepat transisi dari produksi skala kecil menuju implementasi industri dalam skala besar.

5.3. Menyusun urutan transisi: Pendekatan kebijakan bertahap

Transisi menuju baja hijau di Indonesia tidak hanya ditentukan oleh dinamika biaya dan kesiapan teknologi, tetapi juga oleh waktu pelaksanaan, koherensi, dan kapasitas kelembagaan dalam implementasi kebijakan. Analisis LCOS dan penetapan harga karbon menunjukkan bahwa setiap teknologi menjadi layak secara ekonomi pada tingkat biaya yang berbeda. Namun, bukti empiris di Indonesia menunjukkan bahwa instrumen kebijakan yang ada saat ini belum selaras dengan kebutuhan yang terus berkembang tersebut.

“Kita masih berada pada tahap awal, dimana banyak kebijakan masih dalam tahap pembahasan, sementara implementasinya belum sepenuhnya berjalan.”

— Pemangku kepentingan pemerintah (Kementerian Perindustrian)

Ketidaksesuaian ini menunjukkan bahwa keberhasilan dekarbonisasi tidak hanya bergantung pada kebijakan apa yang diterapkan, tetapi juga kapan dan bagaimana kebijakan tersebut diimplementasikan sesuai dengan kondisi pasar. Oleh karena itu, transisi perlu dipandang sebagai proses yang bertahap dan adaptif, di mana intensitas serta desain kebijakan berkembang seiring dengan perubahan struktur biaya dan kesiapan kelembagaan.

Tahap awal (2025–2030): Memungkinkan transisi berbiaya rendah dan menghindari lock-in

Dalam jangka pendek, proses transisi masih dibatasi oleh kendala ekonomi maupun kelembagaan. Hasil analisis LCOS menunjukkan bahwa hanya teknologi berbasis *scrap* yang telah kompetitif secara biaya, sementara jalur dekarbonisasi yang lebih mendalam masih memiliki biaya yang sangat tinggi.

Pada saat yang sama, bukti empiris menunjukkan bahwa kerangka kebijakan Indonesia belum mampu mendorong bahkan jalur transisi berbiaya rendah tersebut secara efektif. Beberapa kendala utama meliputi:

- Sinyal harga karbon yang masih sangat lemah (sekitar USD 2/tCO₂), sehingga belum mampu memengaruhi keputusan produksi;
- Insentif fiskal yang bersifat tidak langsung (berbasis pengurangan pajak penghasilan badan), sehingga tidak menurunkan biaya produksi per satuan produk;
- Belum adanya kebijakan dari sisi permintaan, seperti kewajiban pengadaan baja hijau;
- Sistem sertifikasi yang masih bersifat sukarela sehingga belum mampu menciptakan diferensiasi pasar.

Para pemangku kepentingan menyoroti lemahnya sinyal kebijakan pada tahap awal ini:

“Harga karbon saat ini masih terlalu rendah untuk memengaruhi keputusan industri; belum menjadi pertimbangan ekonomi yang nyata bagi produsen.”

— Pemangku kepentingan pemerintah (Kementerian Perindustrian)

Selain itu, sistem pendukung yang menjadi fondasi transisi juga masih belum berkembang secara memadai:

“Kita masih belum memiliki sistem data emisi dan verifikasi yang kuat, padahal hal tersebut merupakan prasyarat agar pasar karbon dapat berfungsi secara efektif.”

— Ahli kebijakan energi (IESR)

Kesenjangan tersebut menunjukkan bahwa, bahkan pada tahap awal ketika solusi berbiaya relatif rendah telah tersedia, lingkungan kebijakan masih belum sepenuhnya mendukung implementasinya.

Oleh karena itu, tujuan utama pada fase ini bukan hanya mendorong transisi yang hemat biaya, tetapi juga membangun fondasi kelembagaan dan kebijakan yang diperlukan untuk tahap-tahap berikutnya. Hal tersebut mencakup:

- penguatan sistem *Measurement, Reporting, and Verification* (MRV);
- penyusunan baseline emisi yang kredibel; dan
- pengembangan kerangka regulasi bagi pasar karbon serta standar baja hijau.

Tanpa fondasi tersebut, kebijakan pada tahap berikutnya—khususnya penetapan harga karbon dan sistem sertifikasi—akan kehilangan kredibilitas dan efektivitasnya.

Tahap menengah (2030–2045): secara aktif menjembatani kesenjangan biaya

Seiring berkembangnya proses transisi, kelemahan kerangka kebijakan yang ada menjadi semakin nyata. Permintaan baja meningkat, sementara paparan terhadap kebijakan karbon internasional juga semakin besar. Namun demikian, bukti empiris menunjukkan bahwa kebijakan yang ada masih belum sejalan dengan besarnya transformasi yang diperlukan.

Pada fase ini, analisis LCOS menunjukkan bahwa *green premium* masih bertahan, khususnya pada teknologi berbasis hidrogen, sehingga harga karbon perlu meningkat secara signifikan agar mampu memengaruhi daya saing. Namun, instrumen kebijakan yang ada belum dirancang untuk menghasilkan perubahan tersebut. Secara khusus:

- mekanisme penetapan harga karbon masih belum berkembang dan menghadapi berbagai kendala politik;
- kebijakan perdagangan belum memperhitungkan intensitas karbon produk impor; dan

- kebijakan industri, seperti TKDN, masih lebih menekankan kandungan lokal dibandingkan kinerja emisi.

Sebagaimana disampaikan oleh salah satu narasumber:

“Masih belum ada peta jalan yang secara jelas menghubungkan kebijakan industri, transisi energi, dan penetapan harga karbon ke dalam satu strategi yang terkoordinasi.”

— Ahli kebijakan (IESR)

Pada saat yang sama, pelaku industri masih menghadapi ketidakpastian dalam meningkatkan investasi pada teknologi rendah karbon:

“Pelaku industri masih ragu untuk berinvestasi pada teknologi baru karena arah kebijakan belum cukup jelas dan konsisten.”

— Perwakilan industri (KADIN Indonesia)

Kondisi ini menciptakan hambatan struktural. Di satu sisi, kebutuhan untuk melakukan transisi semakin mendesak, tetapi di sisi lain kerangka kebijakan belum mampu menjembatani kesenjangan biaya maupun menyelaraskan kembali insentif pasar.

Selain itu, belum terintegrasinya desain kebijakan juga menimbulkan berbagai risiko, antara lain:

- ketergantungan yang berkepanjangan pada teknologi transisi seperti gas-based DRI tanpa arah jangka panjang yang jelas;
- rendahnya investasi pada infrastruktur hidrogen dan energi terbarukan; serta
- implementasi teknologi yang tidak merata antar perusahaan maupun subsektor.

Oleh karena itu, fase ini membutuhkan perubahan dari sekadar pengembangan kebijakan secara bertahap menuju perluasan implementasi kebijakan secara aktif, melalui:

- penguatan lintasan harga karbon;
- penerapan instrumen perdagangan berbasis karbon; serta
- integrasi sistem sertifikasi dengan mekanisme pembiayaan dan pengadaan pemerintah.

Tanpa langkah-langkah tersebut, transisi berisiko mengalami stagnasi, sehingga hanya menghasilkan pengurangan emisi secara parsial tanpa mampu mencapai kompatibilitas dengan target *net-zero*.

Tahap akhir (2045–2060): Beralih menuju daya saing yang didorong pasar

Dalam jangka panjang, keberhasilan transisi sangat bergantung pada kematangan dan kredibilitas kelembagaan yang telah dibangun pada tahap-tahap sebelumnya. Analisis LCOS menunjukkan bahwa *green premium* akan semakin mengecil seiring dengan turunnya biaya teknologi dan semakin ketat penerapannya harga karbon. Namun demikian, kondisi tersebut hanya dapat dicapai apabila didukung oleh pengembangan kebijakan yang berkelanjutan.

Berbagai komponen kelembagaan penting—khususnya sistem MRV—hingga saat ini masih belum berkembang secara optimal. Tanpa sistem MRV yang kuat:

- pasar karbon tidak dapat berfungsi secara efektif;
- batas emisi tidak dapat ditegakkan secara kredibel; dan
- pengakuan internasional terhadap produk Indonesia tetap terbatas.

Sebagaimana disampaikan oleh salah satu narasumber:

“Sistem sertifikasi dan pelacakan Indonesia masih belum sepenuhnya selaras dengan standar internasional, sehingga berpotensi menjadi hambatan di pasar ekspor.”

— Ahli transisi energi (IESR)

Selain itu, tuntutan pasar global juga semakin meningkat:

“Pasar ekspor semakin menuntut data emisi yang dapat diverifikasi; tanpa data tersebut, produk berpotensi menghadapi berbagai hambatan perdagangan.”

— Perwakilan asosiasi industri (IISIA)

Hal ini memiliki implikasi langsung terhadap daya saing Indonesia, terutama dalam menghadapi kebijakan seperti CBAM yang mensyaratkan data emisi yang dapat diverifikasi.

Pada fase ini, prioritas kebijakan bergeser menuju optimalisasi sistem, yang meliputi:

- memastikan integritas pasar karbon;
- mempertahankan keselarasan dengan standar internasional; dan

- mengelola dampak ekonomi dari restrukturisasi industri.

Apabila fondasi kelembagaan tidak berhasil dibangun pada tahap sebelumnya, maka fase ini berpotensi ditandai oleh:

- tertundanya konvergensi biaya;
- terbatasnya partisipasi Indonesia dalam pasar global rendah karbon; serta
- tetap bergantungnya industri pada dukungan kebijakan, alih-alih memperoleh daya saing yang didorong oleh mekanisme pasar.

5.4. Wawasan strategi kebijakan

Daya saing masa depan industri baja Indonesia tidak hanya ditentukan oleh efisiensi biaya atau kemampuan teknologi, tetapi juga oleh sejauh mana kerangka kebijakan mampu membentuk kembali struktur biaya, insentif pasar, dan kondisi persaingan. Analisis LCOS dan penetapan harga karbon menunjukkan bahwa, dalam kondisi saat ini, teknologi rendah karbon masih berada pada posisi yang kurang kompetitif secara ekonomi. Bukti empiris di Indonesia semakin menunjukkan bahwa kelemahan tersebut bukan hanya dipengaruhi oleh mekanisme pasar, tetapi juga merupakan konsekuensi dari desain kebijakan yang belum memadai serta kelemahan kelembagaan yang masih berlangsung.

Kebijakan sebagai penentu hasil pasar

Instrumen kebijakan secara langsung memengaruhi posisi biaya relatif dari berbagai jalur produksi baja. Namun demikian, desain kebijakan yang berlaku di Indonesia saat ini belum mampu mengubah struktur biaya tersebut secara signifikan. Insentif fiskal yang ada masih didominasi oleh skema pengurangan pajak penghasilan badan (*corporate income tax*), tidak secara langsung menurunkan biaya produksi per unit, dan hanya memberikan bobot yang terbatas terhadap kinerja lingkungan.

Analisis LCOS menunjukkan bahwa teknologi baja rendah karbon masih berada pada posisi yang kurang menguntungkan secara ekonomi dalam kondisi saat ini. Bukti empiris juga mengonfirmasi bahwa kondisi tersebut diperkuat oleh desain kebijakan yang belum mampu mengubah struktur biaya secara memadai.

“Dari perspektif industri, dekarbonisasi masih dipandang terutama sebagai tambahan biaya, bukan sebagai peluang bisnis.”

— Perwakilan industri (KADIN Indonesia)

Akibatnya, perbedaan biaya yang diidentifikasi dalam analisis LCOS—khususnya *green premium* pada produksi baja berbasis hidrogen—masih tetap bertahan dalam praktik. Hal ini menegaskan bahwa tanpa mekanisme yang secara khusus ditujukan untuk menurunkan biaya produksi, kebijakan yang ada tidak akan memberikan dampak yang berarti terhadap daya saing industri. Dengan demikian, dominasi produksi baja konvensional bukan semata-mata merupakan hasil dari efisiensi pasar, melainkan juga mencerminkan desain kebijakan yang belum mampu mengatasi faktor-faktor penyebab utama tingginya biaya produksi baja hijau.

Risiko Transisi yang bersifat pasif

Apabila intervensi kebijakan tetap terbatas atau tidak konsisten, proses transisi menuju baja hijau kemungkinan besar akan lebih banyak didorong oleh tekanan eksternal, khususnya dari pasar internasional. Dalam kondisi seperti ini, eksportir hanya akan melakukan penyesuaian secara selektif untuk memenuhi persyaratan regulasi di negara tujuan ekspor, sementara pasar domestik tetap didominasi oleh produksi baja konvensional. Akibatnya, proses transisi berlangsung secara terfragmentasi dan bersifat reaktif.

“Negara-negara yang bergerak lebih awal akan memiliki keunggulan dalam merebut pasar hijau yang sedang berkembang.” — Pakar kebijakan energi (IESR)

Namun demikian, tanpa penyelarasan kebijakan yang proaktif, Indonesia berisiko tertinggal.

“Jika kita terlalu lambat beradaptasi, kita dapat kehilangan daya saing dan menjadi bergantung pada standar yang ditetapkan oleh negara lain.” — Pemangku kepentingan kebijakan (Kementerian Perindustrian)

Jalur transisi pasif membawa berbagai risiko yang signifikan. Di antaranya adalah menurunnya daya saing ekspor akibat keterlambatan dalam memenuhi standar internasional, meningkatnya paparan terhadap hambatan perdagangan berbasis karbon, serta alokasi investasi yang kurang efisien di antara berbagai pilihan teknologi. Selain itu, transisi yang bersifat pasif juga meningkatkan kemungkinan bahwa proses

dekarbonisasi harus dilakukan dalam waktu yang lebih singkat di masa mendatang, sehingga memerlukan penyesuaian yang lebih drastis dan berbiaya tinggi.

“Saat ini, banyak tindakan masih didorong oleh tuntutan dari luar negeri, bukan oleh strategi nasional yang benar-benar terintegrasi.”

— Pakar kebijakan (IESR)

Lemahnya sinyal kebijakan menyebabkan produksi dengan emisi tinggi tetap mendominasi. Pandangan para pemangku kepentingan juga mengonfirmasi bahwa hasil pasar sangat bergantung pada kekuatan kebijakan yang diterapkan.

“Jika tidak ada dorongan kebijakan yang kuat, industri akan tetap menggunakan model produksi yang ada karena itulah pilihan yang paling menguntungkan secara ekonomi.”

— Perwakilan industri (IISIA)

Hal ini menunjukkan bahwa perilaku pasar tidak akan terkoreksi secara otomatis dalam konteks dekarbonisasi. Sebaliknya, perilaku pelaku industri sangat dipengaruhi oleh keberadaan—atau ketiadaan—insentif kebijakan.

Biaya akibat penundaan transisi

Waktu pelaksanaan intervensi kebijakan memiliki implikasi langsung terhadap hasil ekonomi maupun lingkungan. Penundaan tindakan memungkinkan investasi pada aset-aset berbasis karbon tetap berlanjut, sehingga memperpanjang umur operasional infrastruktur beremisi tinggi dan meningkatkan jumlah emisi yang harus dikurangi di masa depan. Kondisi ini menciptakan efek biaya kumulatif. Semakin lama transisi ditunda, semakin besar biaya dekarbonisasi yang harus ditanggung pada masa mendatang, serta semakin tinggi risiko munculnya *stranded assets*.

“Jika kita menunda transisi, biayanya tidak akan hilang—justru akan menjadi semakin besar dan semakin sulit untuk dikelola di masa depan.” — Pakar transisi energi (IESR)

Di sisi lain, tekanan dari pasar internasional juga terus meningkat.

“Pasar global bergerak semakin cepat. Jika kebijakan domestik tidak mampu mengikuti perkembangan tersebut, produk kita berpotensi menghadapi hambatan di pasar ekspor.”

— Perwakilan asosiasi industri (IISIA)

Analisis mengenai tahapan transisi juga menunjukkan bahwa intervensi yang dilakukan sejak dini—terutama yang mendukung jalur dekarbonisasi berbiaya rendah seperti EAF berbasis *scrap*—dapat menurunkan biaya transisi jangka panjang melalui pembentukan momentum awal dan menghindari *lock-in* pada teknologi beremisi tinggi.

Dari beban biaya menuju keunggulan daya saing

Meskipun *green premium* sering dipandang sebagai hambatan utama, hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi tersebut sebaiknya dipahami sebagai fase transisi, bukan sebagai kendala yang bersifat permanen. Seiring meningkatnya harga karbon dan menurunnya biaya teknologi rendah karbon, posisi biaya relatif baja hijau akan semakin membaik.

Pada tingkat harga karbon yang cukup tinggi, hubungan tersebut akan berbalik. Produksi baja dengan emisi tinggi akan kehilangan keunggulan biayanya, sementara produksi baja rendah karbon akan memperoleh tambahan pendapatan melalui mekanisme kredit karbon. Akibatnya, daya saing industri secara bertahap akan bergeser menuju teknologi yang lebih bersih. Dinamika ini menunjukkan bahwa investasi lebih awal pada jalur produksi rendah karbon dapat memberikan keuntungan strategis dalam jangka panjang, terutama bagi perusahaan yang berorientasi pada pasar ekspor dan harus memenuhi standar lingkungan internasional yang semakin ketat.

Koherensi kebijakan sebagai prasyarat transisi

Temuan yang terus muncul sepanjang analisis ini adalah bahwa setiap instrumen kebijakan tidak akan efektif apabila diterapkan secara terpisah. Penetapan harga karbon tanpa dukungan kebijakan lain tidak mampu menutup kesenjangan biaya (*green premium*). Subsidi

tanpa upaya penciptaan pasar tidak dapat menjamin terbentuknya permintaan. Demikian pula, kebijakan perdagangan tanpa penyelarasan dengan kebijakan domestik justru berpotensi menimbulkan distorsi pasar.

Oleh karena itu, keberhasilan transisi sangat bergantung pada koherensi kebijakan, yaitu keterpaduan antara:

- sinyal harga (*carbon pricing*),
- dukungan terhadap biaya produksi (insentif finansial),
- penciptaan pasar (kebijakan sisi permintaan), dan
- pengaturan kondisi persaingan (kebijakan perdagangan).

Ketiadaan koherensi tersebut akan menghasilkan kebijakan yang terfragmentasi, di mana kemajuan pada satu aspek akan terhambat oleh kelemahan pada aspek lainnya. Para pemangku kepentingan menegaskan bahwa kondisi saat ini masih menciptakan persaingan yang tidak seimbang bagi produsen dalam negeri.

“Produsen domestik yang berupaya melakukan dekarbonisasi harus menanggung biaya yang lebih tinggi, sementara produk impor tidak dikenakan persyaratan lingkungan yang sama.”

— Perwakilan asosiasi industri (IISIA)

Ketidakseimbangan ini memperkuat keunggulan ekonomi produksi beremisi tinggi sekaligus mengurangi insentif bagi perusahaan untuk berinvestasi pada teknologi rendah karbon.

“Yang dibutuhkan adalah pendekatan yang komprehensif—menghubungkan insentif, regulasi, dan penciptaan pasar ke dalam satu kerangka kebijakan yang terpadu.”

— Perwakilan industri (KADIN Indonesia)



Kesimpulan

Tantangan daya saing yang dihadapi dalam dekarbonisasi industri baja Indonesia pada dasarnya bukan merupakan persoalan teknologi, melainkan persoalan koherensi antara pasar dan kebijakan. Jalur produksi baja rendah karbon telah mampu menghasilkan nilai ekonomi dan sosial yang signifikan, namun sebagian besar nilai tersebut belum dapat ditangkap oleh investor swasta dalam kondisi pasar saat ini. Kondisi ini menciptakan kesenjangan yang terus bertahan antara apa yang rasional bagi kepentingan masyarakat dan apa yang rasional bagi perusahaan. Selama biaya karbon masih belum sepenuhnya diinternalisasikan, permintaan terhadap material rendah karbon masih belum pasti, serta produk impor berintensitas karbon tinggi masih menghadapi pembatasan yang minim, produksi baja konvensional akan tetap lebih unggul secara komersial dibandingkan alternatif yang lebih bersih, meskipun dalam jangka panjang menimbulkan risiko dan kewajiban yang semakin besar. Dengan demikian, *green premium* bukan mencerminkan ketidakefisienan yang melekat pada baja hijau, melainkan menunjukkan kegagalan struktur pasar saat ini dalam memberikan penghargaan terhadap pengurangan emisi dan peningkatan daya saing di masa depan.

Transisi menuju dekarbonisasi juga tidak mungkin mengikuti satu jalur teknologi tunggal. Sebaliknya, lintasan dekarbonisasi industri baja Indonesia akan ditentukan oleh serangkaian teknologi yang tingkat daya saingnya berubah seiring waktu. *Electric Arc Furnace* (EAF) berbasis *scrap* muncul sebagai pilihan yang paling efisien secara ekonomi dan paling siap untuk segera diterapkan karena menawarkan kombinasi terbaik antara daya saing biaya, pengurangan emisi, dan kelayakan finansial. Namun demikian, EAF saja tidak mampu mencapai dekarbonisasi penuh sektor baja akibat keterbatasan pasokan *scrap*. Oleh karena itu, jalur *Direct Reduced Iron–Electric Arc Furnace* (DRI-EAF) yang menggunakan hidrogen (*hydrogen-ready*) menjadi sangat strategis, bukan karena saat ini merupakan pilihan dengan biaya paling rendah, tetapi karena mampu menjaga fleksibilitas di masa depan dan mencegah industri terjebak pada aset-aset berintensitas karbon tinggi (*carbon lock-in*). Dalam konteks ini, transisi dekarbonisasi lebih tepat dipahami sebagai proses pengelolaan suksesi teknologi daripada sekadar memilih satu teknologi terbaik.

Pada tingkat pasar, industri baja Indonesia sedang memasuki fase di mana kinerja karbon semakin menjadi penentu utama daya saing. Selama ini, keunggulan kompetitif terutama ditentukan oleh biaya produksi, ketersediaan sumber daya, dan skala ekonomi. Ke depan, akses terhadap pasar ekspor, kepatuhan terhadap kebijakan perdagangan berbasis iklim, serta kemampuan memanfaatkan nilai ekonomi dari pasar karbon akan menjadi faktor yang sama pentingnya. Munculnya berbagai instrumen seperti CBAM menunjukkan adanya perubahan struktural dalam perdagangan global, di mana intensitas emisi menjadi atribut yang dapat diperdagangkan, sejajar dengan kualitas produk dan harga. Dalam kondisi tersebut, dekarbonisasi tidak lagi dapat dipandang semata-mata sebagai kewajiban lingkungan, melainkan sebagai respons strategis industri terhadap perubahan aturan pasar global. Oleh karena itu, biaya dari tidak melakukan transisi bukan hanya berupa peningkatan emisi, tetapi juga berupa menurunnya posisi daya saing Indonesia secara bertahap di pasar internasional.

Tidak ada satu instrumen kebijakan pun yang mampu menyelesaikan tantangan daya saing tersebut secara mandiri. Penetapan harga karbon (*carbon pricing*), insentif fiskal, kebijakan perdagangan, sistem sertifikasi, serta GPP masing-masing mengatasi dimensi yang berbeda dari *green premium*. Efektivitasnya sangat bergantung pada bagaimana instrumen-instrumen tersebut saling berinteraksi, bukan pada kekuatan masing-masing secara individual. Pasar karbon menciptakan nilai ekonomi bagi pengurangan emisi, kebijakan pengadaan pemerintah memberikan kepastian permintaan, standar dan sertifikasi membangun kredibilitas pasar, kebijakan perdagangan melindungi industri dari *carbon leakage*, sedangkan dukungan finansial yang terarah menurunkan risiko investasi. Dengan demikian, transisi hanya akan berhasil apabila seluruh instrumen tersebut berfungsi sebagai suatu ekosistem kebijakan yang terintegrasi. Tantangan utama Indonesia bukanlah ketiadaan instrumen kebijakan, melainkan bagaimana menyelaraskan seluruh instrumen tersebut ke dalam kerangka kebijakan yang koheren sehingga mampu mengubah keputusan investasi dan ekspektasi pasar.

Pada akhirnya, masa depan industri baja Indonesia akan ditentukan oleh sejauh mana dekarbonisasi dapat diubah dari sekadar beban biaya menjadi sumber keunggulan kompetitif. Penelitian ini menunjukkan bahwa transisi menuju

baja hijau layak dilakukan secara ekonomi, memungkinkan secara teknologi, dan memberikan manfaat sosial yang nyata. Namun demikian, hasil tersebut tidak akan terjadi secara otomatis. Keberhasilannya bergantung pada pilihan-pilihan kebijakan yang secara sengaja dirancang untuk memperkecil kesenjangan antara insentif sektor swasta dan nilai publik yang dihasilkan. Oleh karena itu, pertanyaan strategis yang kini dihadapi bukan lagi apakah Indonesia mampu melakukan dekarbonisasi sektor bajanya, melainkan apakah Indonesia dapat melakukannya dengan cukup cepat untuk memanfaatkan peluang pasar yang sedang berkembang sekaligus menghindari risiko terjebak pada aset dan sistem produksi berintensitas karbon tinggi. Dalam ekonomi global yang semakin dibatasi oleh karbon, daya saing dan dekarbonisasi bukan lagi dua tujuan yang saling bersaing, melainkan telah menjadi dua prasyarat yang tidak terpisahkan bagi keberhasilan industri dalam jangka panjang.



Referensi

- Antara. (2026). RI masuk lima besar negara eksportir besi-baja dunia berkat hilirisasi. <https://www.antaranews.com/berita/5395198/ri-masuk-lima-besar-negara-eksportir-besi-baja-dunia-berkat-hilirisasi?page=all>
- Badan Pusat Statistik. (2024). Statistik upah dan tenaga kerja sektor manufaktur.
- Bank Indonesia. (2026). Kurs tengah Bank Indonesia.
- Bataille, C. (2020). Low and zero emissions in the steel and cement industries. *Nature Climate Change*, 10(6), 438–440. <https://doi.org/10.1787/5ccf8e33-en>.
- Boston Consulting Group. (2023). Green awakening: Are consumers open to paying more for decarbonized products? <https://web-assets.bcg.com/fa/44/8abcfccf430ca039a3a1417ac690/green-awakening-are-consumers-open-to-paying-more-for-decarbonized-products.pdf>
- Columbia Center on Global Energy Policy. (2024). Levelized cost of steel: A framework for decarbonization.
- Dawadi, S., Shrestha, S., & Giri, R. A. (2021). Mixed-methods research: A discussion on its types, challenges, and criticisms. *Journal of Practical Studies in Education*, 2(2), 25–36. <https://doi.org/10.46809/jpse.v2i2.20>
- Ellersdorfer, P., Wang, C., Saydam, S., Canbulat, I., MacGill, I., & Daiyan, R. (2024). Unlocking new export opportunities: An open-source framework for assessing green iron and steel supply chains. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.163>
- European Commission. (2021). Proposal for a carbon border adjustment mechanism. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0564>
- Green Steel Economics — Global Efficiency Intelligence*. (n.d.). Retrieved November 7, 2025, from <https://www.globalefficiencyintel.com/green-steel-economics>
- Global Energy Monitor. (2025). Global steel plant tracker (March 2025 release). <https://globalenergymonitor.org/projects/global-steel-plant-tracker/>
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement (NBER Working Paper No. 3914). National Bureau of Economic Research. <https://www.nber.org/papers/w3914>
- Gunung Prisma. (2022). Indonesia carbon tax: The future of steel industry. <https://www.gunungprisma.com/news/indonesia-carbon-tax-the-future-of-steel-industry/>
- Hasanbeigi, A., Springer, C., Savel, C., Valeriz, D. R., Yurnaidi, Z., & Vu, T. D. (2025). Net-zero roadmap for Indonesia's steel industry. *Global Efficiency Intelligence & ASEAN Centre for Energy*. <https://aseanenergy.org/publications/net-zero-roadmap-for-indonesias-steel-industry>
- Hennink, M. M., Hutter, I., & Bailey, A. (2020). *Qualitative research methods* (2nd ed.). Sage. 10.1007/s11135-023-01660-5
- Iron and Steel Technology Roadmap – Analysis - IEA*. (n.d.). Retrieved January 17, 2026, from <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
- Indonesian Center for Environmental Law. (2025). Optimizing environmental legal instruments for the decarbonization of the steel industry in Indonesia. https://icel.or.id/media/pdf/ICEL-Discussion-Note-Decarbonization-of-Steel_.pdf
- Indonesia Stock Exchange. (2025). IDX Carbon market statistics and price data (March 2025).
- Institute for Essential Services Reform. (2024). Decarbonization of the iron and steel industry needs a comprehensive roadmap. <https://iesr.or.id/en/decarbonization-of-the-iron-and-steel-industry-needs-a-comprehensive-roadmap/>
- Institute for Essential Services Reform. (2024). Memulai perjalanan dekarbonisasi industri baja. <https://iesr.or.id/memulai-perjalanan-dekarbonisasi-industri-baja/>
- Indonesia Economic Forum. (2025). Aigis Green Talk 6 – Highlights industrial decarbonization roadmap: Current status, targets, and strategies. <https://www.indonesiaeconomicforum.com/aigis-green-talk-6-highlights-industrial-decarbonization-roadmap-current-status-targets-and-strategies/>
- Indonesian Iron and Steel Industry Association. (2024). Kinerja ekspor impor baja Q1 2024 membaik – IISIA apresiasi dukungan kebijakan pemerintah. <https://iisia.or.id/news/kinerja-ekspor-impor-baja-q1-2024-membaik-iisia-apresiasi-dukungan-kebijakan-pemerintah>

- Indonesian Iron and Steel Industry Association. (2025). Dashboard monitoring export and import. <https://dashboard-export-import.iisia.or.id/>
- International Energy Agency. (2020). Iron and steel technology roadmap: Towards more sustainable steelmaking. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
- International Energy Agency. (2022). Iron and steel technology roadmap. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
- International Energy Agency. (2024). Iron and steel technology roadmap: Towards more sustainable steelmaking.
- International Energy Agency. (2026). Global Hydrogen Review 2026. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2026>
- International Institute for Sustainable Development. (2024). Green public procurement in Indonesia: Policies, practices, and ways forward. <https://www.iisd.org/system/files/2024-11/green-public-procurement-indonesia.pdf>
- International Renewable Energy Agency. (2020). Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf
- Kementerian Lingkungan Hidup. (2025). Peraturan Presiden Nomor 110 Tahun 2025.
- Kementerian Perindustrian. (2025). Peta jalan dekarbonisasi industri 2050.
- King, N., & Horrocks, C. (2010). Interviews in qualitative research. Sage.
- Maguire, M., & Delahunt, B. (2017). Doing a thematic analysis: A practical, step-by-step guide for learning and teaching scholars. *AISHE-J: The All Ireland Journal of Teaching and Learning in Higher Education*, 8(3). <https://ojs.aishe.org/index.php/aishe-j/article/view/335/553>
- Material Economics. (2019). Industrial transformation 2050: Pathways to net-zero emissions from EU heavy industry.
- Massachusetts Institute of Technology Joint Program on the Science and Policy of Global Change. (2023). Techno-economic analysis of steel decarbonization pathways.
- Muslemani, H., Liang, X., Kaesehage, K., Ascui, F., & Wilson, J. (2021). Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for green steel products. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128127. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128127>
- OECD & World Health Organization. (2023). The economics of air pollution health impacts.
- Otoritas Jasa Keuangan. (2023). Peraturan Otoritas Jasa Keuangan Republik Indonesia Nomor 14 Tahun 2023 tentang perdagangan karbon melalui bursa karbon.
- Pauliuk, S., Heeren, N., Berrill, P., et al. (2021). Global scenarios of resource and emission savings from material efficiency in residential buildings and cars. *Nature Communications*, 12, 5097. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25300-4>
- Pintowantoro, S., Setiyorini, Y., Ardian, F., & Abdul, F. (2025). Environmentally sustainable ironmaking: An Indonesian perspective. *Journal of Sustainability Research*, 7(1), e250003. <https://doi.org/10.20900/jsr20250003>
- PwC Indonesia. (2024). Indonesia tax and investment guide 2024.
- Rodrik, D. (2015). Green industrial policy. *Oxford Review of Economic Policy*, 30(3), 469–491. <https://doi.org/10.1093/oxrep/gru025>
- Rosner, F., Papadimas, D., Brooks, K., Yoro, K., Ahluwalia, R., Autrey, T., & Breunig, H. (2023). Green steel: Design and cost analysis of hydrogen-based direct iron reduction. *Energy & Environmental Science*, 16(10), 4121–4134. <https://doi.org/10.1039/d3ee01077e>
- SEASIS. (2024). 2023 scrap demand in ASEAN-6 (preliminary data). <https://www.seaisi.org/details/25001?type=news-rooms>
- SEASIS. (2025). Statistics and analysis. <https://www.seaisi.org/statistics-analyses>
- Shapiro, A. F., & Metcalf, G. E. (2023). The macroeconomic effects of a carbon tax to meet the US Paris Agreement target: The role of firm creation and technology adoption. *Journal of Public Economics*, 218, 104800. <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2022.104800>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2024). Article 6 bilateral trade agreements: Implementation guidance.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2023).

Report on the social cost of greenhouse gases: Estimates incorporating recent scientific advances (EPA SC-GHG 2023 Final Report). https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf

Way, R., Ives, M. C., Mealy, P., & Farmer, J. D. (2022). Empirically grounded technology forecasts and the energy transition. *Joule*, 6(9), 2057–2082. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.009>

World Bank. (2023). Indonesia input-output table and economic multiplier estimates.

World Steel Association. (2024). Steel statistical yearbook 2024.

World Steel Association. (2025). Data. <https://worldsteel.org/data/>

World Steel Association. (2025). World steel price outlook 2025.

www.habibiecenter.or.id



The Habibie Center

The Habibie Center

Jl. Kemang Selatan No.98, Jakarta Selatan,
DKI Jakarta 12560

- +62 21 7817211
- thc@habibiecenter.or.id
- [habibiecenter](#)
- [habibiecenter](#)
- [The Habibie Center](#)
- [The Habibie Center](#)