Mathematical and Data Analytics
Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7802

Trade-off Investasi Hijau dan Output Ekonomi: Analisis Keseimbangan dan Kelayakan Target Lingkungan dengan Kalibrasi Terbatas Indonesia

Sri Pauja Saragih[1)], Aulia Juanda Djaingsastro, S.Si, M.Si[2)]
[1,2)] Institut Teknologi Sawit Indonesia(ITSI)
pujapujasaragih@email.com[1)], aulia_juanda@ymail.com[2)]

Histori Naskah:
Diajukan: 21-11-2025
Disetujui: 07-12-2025
Publikasi:13-12-2025

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis trade-off antara akumulasi modal konvensional dan investasi hijau serta kelayakan pencapaian target lingkungan dengan mempertahankan output ekonomi. Analisis menggunakan model keseimbangan dengan kalibrasi ekonomi terbatas Indonesia berdasarkan data World Bank dan Penn World Table periode 2020–2023. Kualitas lingkungan dinyatakan sebagai indeks hipotetis, sedangkan regenerasi lingkungan, efektivitas investasi hijau, dan intensitas polusi ditetapkan sebagai parameter skenario. Pengujian mencakup variasi alokasi investasi hijau, identifikasi kandidat *knee point*, penentuan ambang lingkungan, serta perbandingan teknologi dan intensitas polusi. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan alokasi investasi hijau menurunkan modal dan output keseimbangan sekaligus meningkatkan kualitas lingkungan pada skenario utama, dengan manfaat lingkungan marginal yang menurun. Kandidat *knee point* ditemukan pada alokasi 15,3%, tetapi tidak diinterpretasikan sebagai tingkat investasi optimal. Pada skenario intensitas polusi tinggi, peningkatan efektivitas teknologi dari 3 menjadi 5 menurunkan alokasi minimum untuk mencapai indeks lingkungan 80 dari 30,384% di luar rentang utama menjadi 20,450%, serta mengurangi kehilangan output dari 21,451% menjadi 14,146%. Pada skenario intensitas polusi rendah, target lingkungan telah terpenuhi tanpa pengalihan investasi tambahan. Target lingkungan dan batas kehilangan output 5% belum terpenuhi bersamaan pada skenario polusi tinggi dengan kedua tingkat teknologi yang diuji. Temuan ini memperjelas peran efektivitas teknologi dan intensitas polusi dalam kelayakan target gabungan. Hasil merupakan perbandingan bersyarat antarskenario, bukan prediksi kondisi aktual Indonesia, karena manfaat produktivitas investasi hijau belum diperhitungkan.

Kata kunci: *pertumbuhan hijau; investasi hijau; akumulasi modal; trade-off; analisis keseimbangan.*

PENDAHULUAN

Pertumbuhan hijau menuntut perubahan investasi yang mampu mengurangi tekanan lingkungan sekaligus mempertahankan kapasitas produksi. Dalam konteks Indonesia, kebutuhan tersebut menghadapi ketergantungan pada energi fosil, insentif subsidi, dan kesiapan infrastruktur energi bersih. Kajian transisi energi menunjukkan bahwa faktor kelembagaan dan dukungan jaringan turut memengaruhi pengembangan investasi terbarukan (Wong & Dewayanti, 2024; OECD, 2024). Persoalan ini berkaitan dengan upaya mendukung SDG 7 dan SDG 13 sambil menjaga keberlanjutan output ekonomi.

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7802

Pengalihan investasi menuju kegiatan hijau dapat menimbulkan biaya peluang apabila mengurangi sumber daya untuk pembentukan modal konvensional. Namun, hubungan tersebut bergantung pada fungsi investasi dan teknologi yang digunakan. Literatur menunjukkan bahwa teknologi pengurangan polusi, perubahan arah inovasi, dan modal teknologi hijau dapat mengubah hubungan antara pertumbuhan dan lingkungan, termasuk membuka kemungkinan manfaat produktivitas (Brock & Taylor, 2010; Acemoglu et al., 2012; Gallo et al., 2025). Karena itu, trade-off perlu dianalisis berdasarkan mekanisme yang dinyatakan secara jelas, bukan dianggap sebagai pertentangan permanen antara tujuan ekonomi dan lingkungan.

Efektivitas investasi hijau juga dipengaruhi oleh pengetahuan, insentif, pengalaman inovasi, dan kondisi pembiayaan. Perkembangan faktor tersebut dapat mengubah kemampuan teknologi serta biaya transisi, sementara dampak penyesuaian ekonomi dapat berbeda menurut sektor dan jangka waktu (Popp, 2002; Eyraud et al., 2013; Aghion et al., 2016; Dechezleprêtre & Sato, 2017; Way et al., 2022). Literatur ini memberikan dasar untuk membedakan besarnya alokasi investasi dari kemampuan investasi menghasilkan manfaat lingkungan dan ekonomi.

Meskipun kajian tersebut menjelaskan mekanisme pertumbuhan, teknologi, dan lingkungan, temuannya tidak secara langsung menentukan ambang pengalihan investasi dalam spesifikasi model penelitian ini. Kebutuhan analitis yang ditangani adalah penilaian apakah target kualitas lingkungan dan batas minimum output dapat dipenuhi secara bersamaan ketika efektivitas investasi hijau dan intensitas polusi berbeda. Celah ini dibatasi pada pertanyaan yang dianalisis, tanpa mengasumsikan bahwa pendekatan serupa belum pernah digunakan dalam literatur.

Penelitian ini menggunakan model keseimbangan yang membagi investasi antara pembentukan modal konvensional dan pengurangan polusi. Parameter ekonomi dikalibrasi secara terbatas menggunakan data Indonesia dari World Bank dan Penn World Table, sedangkan kualitas lingkungan dinyatakan sebagai indeks hipotetis dan parameter lingkungan ditetapkan sebagai skenario. Produktivitas dipertahankan tetap agar konsekuensi pengalihan investasi dapat ditelaah secara eksplisit; manfaat langsung investasi hijau terhadap produktivitas belum diperhitungkan.

Analisis bertujuan mengkaji perubahan modal, output, dan kualitas lingkungan keseimbangan; menilai manfaat marginal dan kandidat *knee point*; serta menentukan alokasi minimum untuk mencapai target hipotetis $E^* \geq 80$. Selanjutnya, skenario efektivitas teknologi dan intensitas polusi dibandingkan untuk mengevaluasi kelayakan target tersebut bersama kendala mempertahankan sedikitnya 95% output tanpa investasi hijau (*business as usual*, BAU). Apabila kedua sasaran tidak terpenuhi, konsekuensi pilihan *second-best* dianalisis.

Kontribusi penelitian terletak pada pemetaan ambang alokasi dan kelayakan target gabungan dalam kerangka yang dikalibrasi secara terbatas untuk Indonesia. Pembedaan antara kandidat *knee point* geometris dan ambang pencapaian target membantu memperjelas bahwa belokan kurva bukan alokasi optimal. Hasil penelitian menyediakan perbandingan bersyarat antarskenario untuk membahas trade-off investasi, tanpa dimaksudkan sebagai prediksi kondisi lingkungan aktual atau penetapan besaran investasi nasional.

METODE PENELITIAN

Pendekatan dan Data

Penelitian ini menggunakan analisis keseimbangan berbasis skenario untuk mengkaji trade-off antara akumulasi modal konvensional dan alokasi investasi hijau, dengan kalibrasi terbatas pada konteks Indonesia. Data periode 2020–2023 digunakan untuk menentukan parameter ekonomi. Rasio pembentukan modal tetap bruto (PMTB) terhadap PDB riil dari World Bank

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7802

digunakan sebagai proksi proporsi investasi (s), sedangkan pertumbuhan jumlah pekerja dan tingkat depresiasi modal dari Penn World Table 11.0 digunakan sebagai proksi n dan δ.

Data tersebut digunakan untuk menentukan parameter model, bukan untuk mengestimasi hubungan kausal investasi hijau dan kualitas lingkungan. Modal dan output dinyatakan dalam satuan model, sementara kualitas lingkungan (E) merupakan indeks hipotetis dengan rentang 0–100. Parameter regenerasi lingkungan, intensitas polusi, dan efektivitas investasi hijau ditetapkan sebagai asumsi skenario.

Model dan Parameter

Dinamika modal dan output dirumuskan sebagai:

$$\frac{dk}{dt} = s(1-\theta)k^{\alpha} - (n+\delta)k, \qquad y = k^{\alpha}.$$

Variabel k menunjukkan modal konvensional per pekerja, y adalah output per pekerja, dan α merupakan elastisitas output terhadap modal. Parameter θ menunjukkan proporsi investasi yang dialokasikan untuk investasi hijau. Dengan demikian, investasi konvensional sebesar $s(1-\theta)y$, sedangkan investasi hijau sebesar θsy. Pertumbuhan pekerja $((n))$ berfungsi sebagai faktor pengenceran modal per pekerja.

Dinamika kualitas lingkungan dirumuskan sebagai:

$$\frac{dE}{dt} = R(100-E) - \phi y + \eta\theta sy,$$

dengan R sebagai laju regenerasi alami, ϕ sebagai intensitas polusi per unit output, dan η sebagai efektivitas investasi hijau. Nilai E dibatasi pada interval $[0{,}100]$; perubahan yang mengarah keluar dari interval tersebut ditahan pada batasnya.

Tabel 1. Parameter dan skenario analisis

Parameter	Nilai	Dasar penggunaan
Proporsi investasi, s	0,315953	Proksi rasio PMTB terhadap PDB riil
Pertumbuhan pekerja, n	0,019864	Proksi pertumbuhan pekerja dari PWT
Depresiasi modal, δ	0,038303	Parameter depresiasi dari PWT
Elastisitas modal, α	0,40	Asumsi utama
Regenerasi lingkungan, R	0,05	Asumsi utama
Alokasi investasi hijau, θ	0; 0,05; 0,10; 0,20; 0,30	Skenario utama
Efektivitas investasi hijau, η	3 dan 5	Skenario teknologi
Intensitas polusi, ϕ	0,20 dan 0,70	Skenario polusi

Skenario acuan menggunakan $\eta = 3$, $\phi = 0{,}70$, dan $\theta = 0$. Model mengasumsikan produktivitas tetap dan belum memasukkan manfaat langsung investasi hijau terhadap produktivitas output. Oleh karena itu, hasil menggambarkan konsekuensi pengalihan investasi dalam struktur model tersebut.

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7802

Perhitungan Keseimbangan dan Trade-off

Keseimbangan positif diperoleh dengan menetapkan perubahan modal dan lingkungan sama dengan nol. Untuk $0 \le \theta < 1$, $0 < \alpha < 1$, $n + \delta > 0$, dan $R > 0$, keseimbangan modal dan output adalah:

$$k^* = \left[\frac{s(1-\theta)}{n+\delta}\right]^{\frac{1}{1-\alpha}}, \qquad y^* = (k^*)^{\alpha}.$$

Keseimbangan lingkungan sebelum pembatasan dihitung sebagai:

$$E^*_{\text{raw}} = 100 - \frac{(\phi - \eta\theta s)y^*}{R}.$$

Nilai yang dilaporkan mengikuti batas indeks:

$$E^* = \min\{100, \max\{0, E^*_{\text{raw}}\}\}.$$

Nilai E^*_{raw} tetap disimpan untuk membedakan keseimbangan interior dan keseimbangan pada batas indeks. Nilai k^*, y^*, dan E^* disajikan dalam tabel, sedangkan trade-off divisualisasikan melalui grafik y^*–E^*dan kehilangan output–(E^*).

Biaya ekonomi diukur sebagai persentase kehilangan output keseimbangan terhadap skenario tanpa investasi hijau (*business as usual*, BAU):

$$L(\theta) = 100\left(1 - \frac{y^*(\theta)}{y^*(0)}\right) = 100\left[1 - (1-\theta)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}\right].$$

Ukuran ini menunjukkan selisih output antarskenario, bukan kerugian PDB aktual atau biaya kesejahteraan masyarakat.

Identifikasi Knee Point dan Kelayakan Target

Kandidat *knee point* ditentukan pada rentang $\theta \in [0; 0{,}30]$. Nilai y^*dan E^*dinormalisasi secara terpisah ke interval 0–1. Titik dengan jarak tegak lurus terbesar terhadap garis penghubung kedua ujung kurva dipilih sebagai kandidat knee point geometris. Perhitungan menggunakan langkah $\theta = 0{,}001$, kemudian diperiksa kembali dengan langkah $0{,}0001$. Hasilnya diperlakukan sebagai karakteristik kurva yang bergantung pada rentang dan normalisasi, bukan sebagai tingkat investasi optimal.

Diminishing returns diperiksa secara terpisah melalui rasio tambahan kualitas lingkungan terhadap output yang dikorbankan:

$$M(\theta) = \frac{dE^*/d\theta}{-dy^*/d\theta}.$$

Dengan \($a = \alpha/(1-\alpha)$\) dan ($c = s\eta$), pada bagian interior indeks lingkungan:

$$M(\theta) = \frac{c(1-\theta)/a + \phi - c\theta}{R}, \qquad \frac{dM}{d\theta} = -\frac{c(1+1/a)}{R} < 0.$$

Selanjutnya, ditentukan nilai minimum θ yang memenuhi target hipotetis $E^* \ge 80$. Pencarian akar menggunakan metode Brent pada rentang utama. Apabila target telah terpenuhi pada BAU, nilai minimum ditetapkan sebesar nol; apabila belum tercapai hingga $\theta = 0{,}30$, target dinyatakan tidak tercapai dalam rentang tersebut.

Kelayakan gabungan dievaluasi berdasarkan:

$$E^* \ge 80, \qquad y^* \ge 0{,}95y^*(0).$$

Batas alokasi investasi yang memenuhi kendala output adalah:

$$\theta_y = 1 - 0{,}95^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}.$$

Jika kedua target tidak dapat dipenuhi sekaligus, alternatif *second-best* disajikan dengan membandingkan kualitas lingkungan pada batas kehilangan output 5% dan kehilangan output

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7802

minimum untuk mencapai target lingkungan. Perbandingan ini tidak dimaksudkan sebagai optimasi kesejahteraan.

Analisis Skenario dan Pemeriksaan Perhitungan

Analisis diulang untuk kombinasi $\eta = 3{,}5$ dan $\phi = 0{,}20{,}0{,}70$, dengan parameter ekonomi lainnya tetap. Sensitivitas tambahan menggunakan $R = 0{,}02; 0{,}05; 0{,}10$ dan $\alpha = 0{,}30; 0{,}40; 0{,}50$, menghasilkan 36 kombinasi parameter.

Eksplorasi di luar skenario utama mencakup perluasan rentang θ untuk mencari ambang lingkungan yang belum tercapai, serta perhitungan kebutuhan η atau batas ϕ pada kendala kehilangan output 5%. Hasil eksplorasi tersebut dilaporkan terpisah dari skenario utama.

Perhitungan dilakukan menggunakan Python. Konsistensi keseimbangan diperiksa melalui residual persamaan modal dan persamaan lingkungan yang memperhitungkan batas indeks, pada 3.001 titik untuk setiap kombinasi utama teknologi dan polusi. Pemeriksaan ini menilai ketepatan numerik perhitungan; penerapannya pada kondisi aktual Indonesia tetap dibatasi oleh asumsi model dan parameter lingkungan yang belum diestimasi secara empiris.

HASIL

Keseimbangan modal, output, dan lingkungan

Hasil berikut menyajikan keseimbangan model pada berbagai proporsi investasi hijau, dengan parameter ekonomi yang dikalibrasi secara terbatas menggunakan data Indonesia. Nilai modal dan output dinyatakan dalam satuan model, sedangkan kualitas lingkungan merupakan indeks hipotetis. Oleh karena itu, hasil diinterpretasikan sebagai perbandingan antarskenario, bukan prediksi kondisi aktual Indonesia.

Perhitungan utama menggunakan $(\eta = 3)$, $(\phi = 0{,}70)$, dan $(R = 0{,}05)$. Alokasi investasi hijau ditetapkan sebesar 0%, 5%, 10%, 20%, dan 30%, dengan parameter lainnya dipertahankan. Nilai keseimbangan diperoleh dari persamaan analitis pada bagian metode.

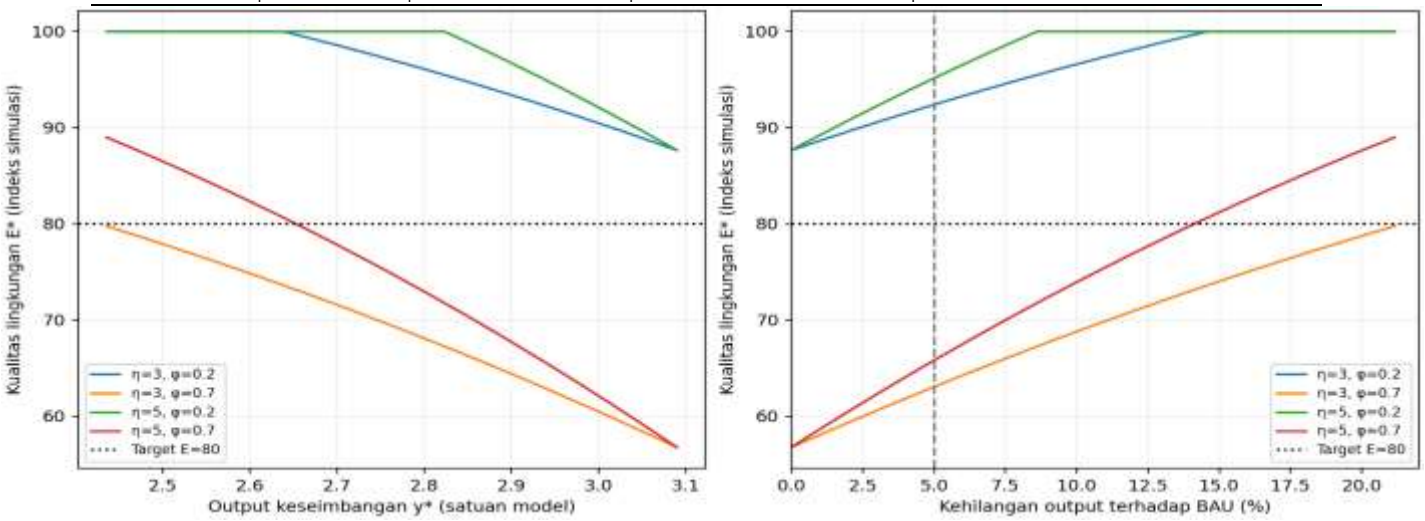
Tabel 2. Keseimbangan pada berbagai alokasi investasi hijau

Alokasi hijau (θ)	Modal (k^*)	Output (y^*)	Lingkungan (E^*)	Kehilangan output terhadap BAU (%)
0,00	16,785	3,090	56,739	0,000
0,05	15,409	2,986	61,024	3,362
0,10	14,081	2,880	65,134	6,783
0,20	11,572	2,663	72,815	13,823
0,30	9,263	2,436	79,749	21,163

Tabel 2 menunjukkan penurunan modal dan output keseimbangan ketika alokasi hijau meningkat. Sebaliknya, nilai lingkungan meningkat pada seluruh tingkat alokasi yang diuji. Pada alokasi 5%, kehilangan output sebesar 3,362% dan nilai lingkungan mencapai 61,024. Pada alokasi 30%, kehilangan output mencapai 21,163% dengan nilai lingkungan sebesar 79,749.

Kurva hasil perhitungan untuk empat kombinasi efektivitas hijau dan intensitas tekanan lingkungan ditampilkan pada Gambar 1.

Mathematical and Data Analytics
Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7802



Gambar 1. *Hubungan output dan kualitas lingkungan keseimbangan.*

Panel (a) menunjukkan hubungan (y^*) dan (E^*); panel (b) menunjukkan kehilangan output terhadap BAU dan (E^*). Garis horizontal menandai target $(E^* = 80)$, sedangkan garis vertikal pada panel (b) menandai batas kehilangan output 5%. Parameter lainnya menggunakan nilai utama.

Perubahan marginal dan kandidat knee point

Tambahan kualitas lingkungan dihitung pada tiga kenaikan alokasi yang sama, masing-masing sebesar 10 poin persentase.

Tabel 3. Tambahan kualitas lingkungan pada kenaikan alokasi yang sama

Perubahan (θ)	Tambahan $(E^*)(poinindeks)$
0,00 → 0,10	8,395
0,10 → 0,20	7,681
0,20 → 0,30	6,934

Tambahan lingkungan menurun dari 8,395 menjadi 6,934 poin pada kenaikan alokasi berikutnya. Pemeriksaan analitis juga menghasilkan turunan negatif untuk rasio tambahan lingkungan terhadap output yang dikorbankan pada bagian interior model.

Pencarian geometris menghasilkan kandidat knee point pada $(\theta = 0{,}153)$. Posisi tersebut sama ketika interval grid diperkecil dari 0,001 menjadi 0,0001. Jarak maksimum terhadap garis penghubung ujung kurva sebesar 0,0357 dalam koordinat normalisasi.

Pencapaian target lingkungan pada skenario teknologi dan polusi

Minimum alokasi untuk mencapai $(E^* \geq 80)$ dihitung pada kombinasi $(\eta = 3{,}5)$ & $(\phi = 0{,}20; 0{,}70)$.

Tabel 4. Minimum alokasi untuk memenuhi target lingkungan

(ϕ)	(η)	Minimum alokasi dalam rentang 0–30%	Kehilangan output terhadap BAU (%)
0,20	3	0%	0,000
0,20	5	0%	0,000
0,70	3	Tidak tercapai	—
0,70	5	20,450%	14,146

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7802

Pada $(\phi = 0{,}20)$, nilai lingkungan BAU sebesar 87,640 sudah memenuhi target. Pada $(\phi = 0{,}70)$ dan $(\eta = 3)$, target belum tercapai karena alokasi 30% menghasilkan $(E^* = 79{,}749)$.

Ketika (η) meningkat menjadi 5 pada $(\phi = 0{,}70)$, target tercapai pada alokasi 20,450%, dengan kehilangan output 14,146%. Sebagai pengujian tambahan di luar rentang utama, skenario $(\eta = 3, \phi = 0{,}70)$ memerlukan alokasi sekitar 30,384% untuk mencapai target, dengan kehilangan output 21,451%.

Kelayakan target lingkungan dan output secara bersamaan

Persyaratan mempertahankan output sekurang-kurangnya 95% dari BAU menghasilkan batas alokasi sebesar:

$$[\theta_y = 1 - 0{,}95^{1{,}5} = 0{,}074055.]$$

Kualitas lingkungan pada batas alokasi 7,405% ditampilkan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Kualitas lingkungan pada batas kehilangan output 5%

(ϕ)	(η)	(E^*)pada $(\theta = 7{,}405)$	Kedua target dapat dipenuhi
0,20	3	92,379	Ya
0,20	5	95,126	Ya
0,70	3	63,024	Tidak
0,70	5	65,771	Tidak

Pada $(\phi = 0{,}20)$, kedua target sudah terpenuhi pada BAU. Pada $(\phi = 0{,}70)$, nilai lingkungan pada batas output masih berada di bawah 80 untuk kedua nilai efektivitas hijau. Dengan demikian, tidak terdapat alokasi yang memenuhi kedua kriteria pada kombinasi tersebut. Eksplorasi tambahan pada batas alokasi 7,405% menghasilkan kebutuhan (η) sekitar 15,358 apabila $(\phi = 0{,}70)$. Jika $(\eta = 5)$, target lingkungan memerlukan (ϕ) paling tinggi sekitar 0,458. Kedua hasil merupakan eksplorasi di luar kombinasi utama.

Nilai keseimbangan diperiksa pada empat kombinasi teknologi dan tekanan lingkungan, masing-masing menggunakan 3.001 titik alokasi. Residual keseimbangan berada di bawah (10^{-12}),termasuk pemeriksaan dinamika lingkungan pada batas indeks.

Posisi kandidat knee point tetap sama pada dua kerapatan grid. Pemeriksaan tersebut menunjukkan konsistensi numerik pada pengujian yang dilakukan, tanpa memberikan bukti validitas empiris parameter lingkungan.

PEMBAHASAN

Pertumbuhan hijau di Indonesia berkaitan dengan kemampuan mengubah komposisi investasi tanpa melemahkan kapasitas produksi. Ketergantungan pada energi fosil, insentif subsidi, dan kebutuhan infrastruktur membuat transisi tersebut melibatkan perubahan teknologi sekaligus kelembagaan (Wong & Dewayanti, 2024; OECD, 2024). Dalam konteks ini, hasil penelitian memperlihatkan biaya peluang ketika investasi hijau bersumber dari investasi yang sebelumnya membentuk modal konvensional. Hubungan tersebut berlaku dalam asumsi model dan belum menunjukkan besarnya biaya transisi aktual Indonesia.

Trade-off yang terbentuk bergantung pada fungsi investasi hijau dalam perekonomian. Literatur pertumbuhan dan lingkungan menempatkan teknologi pengurangan polusi, arah inovasi, serta modal teknologi hijau sebagai mekanisme yang dapat mengubah hubungan antara produksi dan tekanan lingkungan (Brock & Taylor, 2010; Acemoglu et al., 2012; Gallo et al., 2025). Model penelitian ini membatasi investasi hijau pada fungsi pengurangan polusi, sehingga

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7802

manfaat produktivitasnya belum diperhitungkan. Oleh karena itu, penurunan output lebih tepat diinterpretasikan sebagai konsekuensi pengalihan investasi pada produktivitas tetap, bukan sebagai bukti bahwa investasi hijau selalu menghambat pertumbuhan.

Perbaikan lingkungan juga perlu dibedakan menurut sumbernya. Dalam model, lingkungan membaik melalui aktivitas pengurangan polusi dan berkurangnya tekanan produksi. Perbaikan melalui saluran kedua belum menunjukkan kemampuan mempertahankan output dengan dampak lingkungan yang lebih rendah. Di sisi lain, bukti keuntungan produktivitas hijau tidak berarti seluruh biaya penyesuaian akan hilang; pengaruhnya dapat berbeda menurut sektor dan jangka waktu (Dechezleprêtre & Sato, 2017; Gallo et al., 2025). Temuan kita dengan demikian menyoroti perlunya menilai manfaat lingkungan bersama kontribusi produktif investasi, sementara dampak sektoralnya memerlukan analisis tersendiri.

Peningkatan efektivitas investasi membuka kemungkinan memperkecil pengorbanan output untuk mencapai target lingkungan. Namun, kemampuan tersebut tidak meningkat otomatis mengikuti besarnya anggaran. Pengetahuan yang tersedia, insentif harga, dan pengalaman inovasi memengaruhi perkembangan teknologi bersih, sedangkan perubahan biaya teknologi dapat mengubah penilaian ekonomi atas transisi energi (Popp, 2002; Aghion et al., 2016; Way et al., 2022). Literatur ini membantu menjelaskan mekanisme yang belum tercakup dalam parameter efektivitas yang ditetapkan dari luar model. Karena teknologi tetap dalam setiap skenario, manfaat marginal yang menurun dan kandidat knee point menggambarkan bentuk kurva pada asumsi tersebut, bukan batas tetap bagi pengembangan investasi hijau.

Kelayakan target juga dipengaruhi oleh struktur produksi dan akses pembiayaan. Literatur menunjukkan bahwa investasi hijau berkaitan dengan kondisi keuangan dan insentif kebijakan, sementara transformasi energi Indonesia membutuhkan dukungan infrastruktur serta perbaikan lingkungan investasi (Eyraud et al., 2013; Wong & Dewayanti, 2024; OECD, 2024). Hasil penelitian selaras secara konseptual dengan kebutuhan tersebut: perubahan alokasi saja belum memenuhi target gabungan pada skenario intensitas polusi tinggi yang diuji. Implikasinya adalah perlunya mempertimbangkan peningkatan efektivitas pengurangan polusi bersama perubahan sumber tekanan polusi. Model belum menguji instrumen pembiayaan, subsidi, atau pajak tertentu, sehingga belum dapat menetapkan besaran kebijakan operasional.

Dalam kerangka SDG 7, SDG 9, dan SDG 13, temuan ini mengarahkan perhatian pada hubungan antara energi bersih, kemampuan teknologi, dan perlindungan lingkungan ketika output menjadi kendala kebijakan. Ketidaklayakan target pada sebagian skenario merupakan hasil bersyarat dari mekanisme model, bukan kesimpulan bahwa pertumbuhan hijau mustahil dicapai. Alternatif *second-best* memperjelas konsekuensi prioritas, tetapi belum menentukan pilihan terbaik bagi masyarakat karena manfaat kesehatan, kerusakan lingkungan yang dihindari, dan distribusi biaya belum dihitung. Kontribusi penelitian terletak pada pemetaan kondisi yang membentuk trade-off; pengujian empiris berikutnya perlu mengukur kontribusi investasi hijau terhadap produktivitas dan intensitas polusi Indonesia.

KESIMPULAN

Analisis keseimbangan dengan kalibrasi ekonomi terbatas Indonesia menunjukkan bahwa pengalihan investasi konvensional menuju investasi hijau meningkatkan kualitas lingkungan sekaligus menurunkan modal dan output dalam asumsi model. Manfaat lingkungan marginal menurun, sedangkan kandidat *knee point* pada $\theta = 0{,}153$ merupakan karakteristik geometris, bukan alokasi optimal. Pada skenario $\phi = 0{,}70$, peningkatan efektivitas teknologi dari $\eta = 3$ menjadi 5 menurunkan kebutuhan alokasi untuk mencapai $E^* \geq 80$ dari 30,384 di luar rentang

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7802

utama menjadi 20,450%, serta menurunkan kehilangan output dari 21,451% menjadi 14,146%. Pada $\phi = 0{,}20$, target lingkungan telah terpenuhi tanpa pengalihan investasi tambahan.

Target lingkungan dan batas kehilangan output 5% belum dapat dipenuhi bersamaan pada skenario intensitas polusi tinggi dengan kedua tingkat teknologi yang diuji. Pilihan *second-best* karena itu bergantung pada prioritas antara mempertahankan output dan mencapai target lingkungan. Temuan ini mendukung pertimbangan peningkatan efektivitas teknologi bersama pengurangan intensitas polusi, tetapi belum menetapkan kebijakan optimal. Pemeriksaan numerik menunjukkan konsistensi perhitungan; hasil tetap merupakan perbandingan skenario, bukan prediksi kondisi aktual Indonesia, karena indeks lingkungan bersifat hipotetis dan manfaat produktivitas investasi hijau belum diperhitungkan.

DAFTAR PUSTAKA

Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., & Hemous, D. (2012). The environment and directed technical change. *American Economic Review, 102*(1), 131–166. https://doi.org/10.1257/aer.102.1.131

Aghion, P., Dechezleprêtre, A., Hémous, D., Martin, R., & Van Reenen, J. (2016). Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: Evidence from the auto industry. *Journal of Political Economy, 124*(1), 1–51. https://doi.org/10.1086/684581

Brock, W. A., & Taylor, M. S. (2010). The Green Solow model. *Journal of Economic Growth, 15*, 127–153. https://doi.org/10.1007/s10887-010-9051-0

Dechezleprêtre, A., & Sato, M. (2017). The impacts of environmental regulations on competitiveness. *Review of Environmental Economics and Policy, 11*(2), 183–206. https://doi.org/10.1093/reep/rex013

Eyraud, L., Clements, B., & Wane, A. (2013). Green investment: Trends and determinants. *Energy Policy, 60*, 852–865. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.039

Gallo, E., Jona-Lasinio, C., & Samoncini, B. (2025). Green investment and productivity dynamics. *Review of Income and Wealth, 71*(3), e70024. https://doi.org/10.1111/roiw.70024

OECD. (2024). *OECD Economic Surveys: Indonesia 2024*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/de87555a-en

Popp, D. (2002). Induced innovation and energy prices. *American Economic Review, 92*(1), 160–180. https://doi.org/10.1257/000282802760015658

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

Wong, R., & Dewayanti, A. (2024). Indonesia's energy transition: Dependency, subsidies and renewables. *Asia & the Pacific Policy Studies, 11*(2), e391. https://doi.org/10.1002/app5.391