

Production and Carbon Emission Efficiency Analysis of the Manufacturing Sector across Six Provinces in Java: An SBM Approach (2018–2022)

Nadillah Lilhidayah¹, Deni Kusumawardani²

^{1,2}Department of Economics, Faculty of Economics and Business, Airlangga University, Surabaya, Indonesia

Email: ¹nadillah.lilhidayah-2023@feb.unair.ac.id

Kata kunci:

Efisiensi Hijau, SBM-DEA, Pulau Jawa, Industri Manufaktur, Emisi Karbon

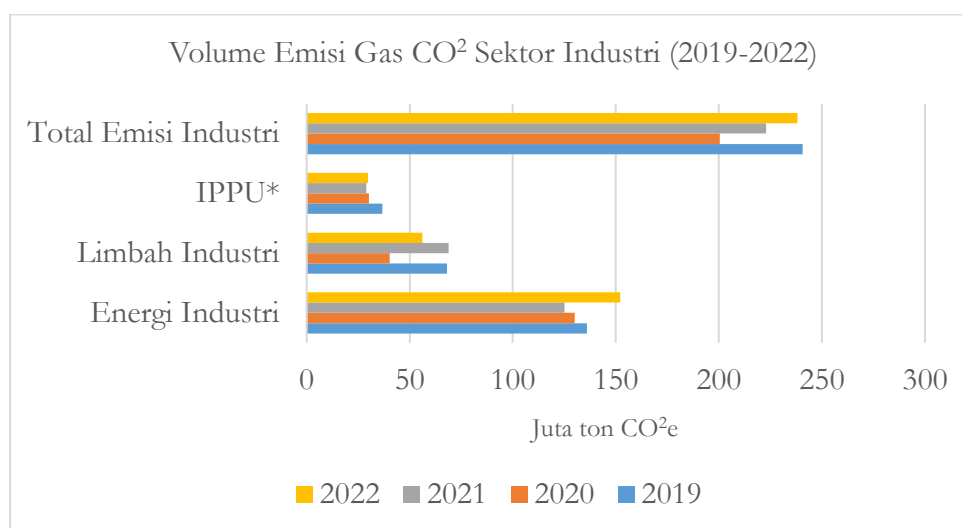
Abstrak

Objective: This study aims to estimate the green efficiency of the manufacturing sector across six provinces in Java and identify spatial-temporal policy benchmarks for eco-friendly industrial governance. **Method:** Using a descriptive-quantitative approach, this research applies the input-oriented Slack-Based Measure Data Envelopment Analysis (SBM-DEA) under the Variable Returns to Scale (VRS) assumption. The spatial scope covers six provinces in Java from 2018 to 2022. Input variables include capital, labor, and fossil energy consumption, while outputs comprise industrial GDP (desirable) and CO₂ emissions (undesirable). Data were gathered from BPS and the Ministry of Energy and Mineral Resources. **Results:** The findings reveal a stark performance dichotomy. Banten, DKI Jakarta, West Java, and DI Yogyakarta consistently maintained perfect efficiency (score 1.0000). Conversely, Central Java (average 0.8556) and East Java (average 0.7034) suffered from persistent green inefficiency due to emission slacks and energy waste. Benchmark analysis shows East Java's improvement target shifted from DI Yogyakarta (2018) to the low-carbon technology characteristics of DKI Jakarta and West Java (2020–2022), with a weight contribution above 60%. **Implications:** Regional authorities in Central and East Java must abandon business-as-usual policies. Recommended interventions include mandatory energy audits for heavy industries, green fiscal incentives, and eco-industrial park standardization modeled after West Java. Future studies should utilize firm-level data and incorporate other pollutants like wastewater and SO_x/NO_x gases.

PENDAHULUAN

Sektor industri manufaktur memegang peranan krusial sebagai motor penggerak pertumbuhan ekonomi nasional melalui kontribusinya terhadap Produk Domestik Bruto (PDB) dan penyerapan tenaga kerja. Namun, ekspansi sektor ini secara historis berbanding lurus dengan peningkatan konsumsi energi secara masif, khususnya energi berbasis fosil seperti bensin, solar, batu bara, dan gas bumi (Puspitasari et al., 2024). Ketergantungan yang tinggi terhadap energi konvensional tidak hanya mengancam ketahanan energi, tetapi juga memicu peningkatan emisi gas rumah kaca, khususnya karbon dioksida (CO₂), yang mempercepat laju perubahan iklim (Yang et al., 2022). Oleh karena itu, sektor industri manufaktur saat ini dihadapkan pada tantangan besar untuk melakukan transisi menuju penghematan energi dan penurunan emisi tanpa mengorbankan kapasitas produksi. Dalam konteks pembangunan ekonomi di Indonesia, Pulau Jawa merupakan pusat kegiatan ekonomi dan industri manufaktur nasional. Enam provinsi di Pulau Jawa, yaitu DKI Jakarta, Jawa Barat, Jawa Tengah, DI Yogyakarta, Jawa Timur, dan Banten, secara kumulatif memiliki konsumsi energi sektor industri tertinggi dibandingkan dengan wilayah lain di Indonesia (Kementerian ESDM, 2023). Tingginya konsentrasi modal (capital), teknologi, dan tenaga kerja di

wilayah tersebut mendorong peningkatan aktivitas produksi manufaktur, namun pada saat yang sama juga berkontribusi terhadap tingginya emisi karbon dari sektor industri. Perbedaan karakteristik struktur ekonomi dan bauran energi (*energy mix*) antardaerah menunjukkan bahwa tingkat efisiensi lingkungan berpotensi bervariasi pada setiap provinsi. Oleh karena itu, analisis komparatif efisiensi hijau antarprovinsi di Pulau Jawa menjadi penting untuk mengidentifikasi wilayah yang telah menerapkan praktik industri hijau secara lebih efektif serta wilayah yang masih memiliki potensi peningkatan efisiensi (Setiawan dkk., 2025).



Gambar 1: Total Volume Emisi Gas Rumah Kaca Tahun 2019-2022

Sumber: Kementerian Perindustrian 2023

Berdasarkan laporan Kementerian Perindustrian (Kemenperin), total emisi gas rumah kaca (GRK) yang dihasilkan oleh sektor industri di Indonesia pada tahun 2022 tercatat sebesar 238,1 juta ton CO², menunjukkan tren peningkatan dibandingkan dengan tahun sebelumnya yang berada di angka 222,9 juta ton CO². Jika dibedah berdasarkan komponen pembentuknya, konsumsi energi industri menjadi kontributor utama dengan sumbangsih sebesar 152,2 juta ton CO². Posisi berikutnya diikuti oleh limbah industri sebesar 56,1 juta ton CO², serta aktivitas *Industrial Process and Product Use* (IPPU) yang menyumbangkan 29,7 juta ton CO². Secara historis, dalam kurun waktu lima tahun terakhir, akumulasi emisi pada tahun 2022 ini sebenarnya masih lebih rendah dibandingkan dengan tingkat emisi tahun 2019 yang mencapai puncaknya sebesar 240,7 juta ton CO². Adapun penurunan volume emisi yang sempat terjadi sepanjang periode 2020 hingga 2021 diidentifikasi sebagai dampak dari pembatasan aktivitas operasional akibat pandemi COVID-19.

Periode tahun 2018 hingga 2022 menjadi garis waktu (*timeline*) yang sangat krusial untuk diamati karena mencakup fluktuasi ekonomi global dan domestik yang ekstrem akibat pandemi COVID-19. Pada fase awal (2018–2019), sektor manufaktur di Pulau Jawa berada dalam tren produksi normal dengan konsumsi energi yang stabil. Namun, pada tahun 2020 hingga 2021, pembatasan mobilitas dan penurunan permintaan pasar memaksa banyak industri membatasi kapasitas operasionalnya, yang secara linier menurunkan konsumsi bensin, solar, batu bara, dan gas bumi, sekaligus menekan volume emisi karbon secara temporer (Adhitama & Hartanto, 20. Fase pemulihan ekonomi (*economic recovery*) pada tahun 2022 kemudian memicu lonjakan kembali (*rebound*) aktivitas produksi. Dinamika naik-turun dalam rentang lima tahun ini sangat penting

untuk dievaluasi guna melihat apakah penurunan emisi pada masa pandemi benar-benar didorong oleh efisiensi teknologi hijau atau sekadar akibat dari penurunan *output* produksi semata. Untuk mengukur kinerja multidimensi tersebut, metode konvensional *Data Envelopment Analysis* (DEA) yang bersifat radial masih memiliki keterbatasan karena mengasumsikan bahwa perubahan input dan output terjadi secara proporsional serta belum secara eksplisit mengakomodasi undesirable output.

Dalam realitas industri, emisi karbon dioksida (CO_2) merupakan produk sampingan yang tidak dapat dihindari dari penggunaan energi, sehingga harus diposisikan sebagai *undesirable output* yang skornya harus diminimalkan (Tone, 2001). Pendekatan *Slack-Based Measure* (SBM) yang bersifat non-radial dan non-oriented hadir sebagai solusi metodologis yang tepat karena mampu mengukur inefisiensi secara langsung dari nilai *slack* (sisa/kelebihan) variabel input dan output secara bersamaan (Kumar & Madheswaran, 2010). Dengan menggunakan model SBM, evaluasi efisiensi pada enam provinsi di Pulau Jawa tidak hanya mempertimbangkan capaian ekonomi yang direpresentasikan oleh PDB industri, tetapi juga mengakomodasi emisi karbon sebagai undesirable output, sehingga menghasilkan pengukuran *green efficiency* yang lebih komprehensif.

TINJAUAN PUSTAKA

a. Teori Produksi Neoklasik dan Akuntansi Lingkungan

Teori produksi neoklasik menjadi dasar dalam analisis efisiensi produksi karena menjelaskan bagaimana kombinasi faktor produksi, seperti modal (capital) dan tenaga kerja (labor), digunakan untuk menghasilkan output ekonomi secara optimal (Puspitasari et al., 2024; Setiawan dkk., 2025). Namun, dalam praktiknya, kegiatan manufaktur yang masih bergantung pada energi fosil tidak hanya menghasilkan manfaat ekonomi, tetapi juga menimbulkan emisi dan pencemaran lingkungan sebagai dampak negatif (Yang et al., 2022). Untuk itu, pendekatan akuntansi lingkungan memasukkan dampak tersebut ke dalam pengukuran efisiensi dengan membedakan hasil produksi menjadi *desirable output*, yaitu output yang diinginkan seperti PDB industri, dan *undesirable output*, yaitu output yang tidak diinginkan seperti emisi CO_2 (Tone, 2004; Zhang et al., 2018).

b. Konsep *Green Efficiency* dan Model *Slack-Based Measure* (SBM)

Menurut kerangka Operational Research yang dikembangkan oleh Tone (2001), model pengukuran efisiensi tradisional, seperti CCR dan BCC, masih memiliki keterbatasan karena mengasumsikan perubahan input dan output terjadi secara proporsional serta belum memperhitungkan keberadaan undesirable output yang dihasilkan selama proses produksi. Oleh karena itu, digunakan metode *Slack-Based Measure* (SBM) yang bersifat non-radial dan non-oriented sehingga dapat mengukur efisiensi dengan mempertimbangkan kelebihan penggunaan input (input slack) maupun kelebihan undesirable output (output slack) (Kumar Mandal & Madheswaran, 2010). Melalui pendekatan ini, efisiensi lingkungan (*green efficiency*) dinilai berdasarkan kemampuan suatu provinsi dalam mengurangi penggunaan input energi dan emisi yang dihasilkan, tanpa mengurangi output yang diinginkan berupa output ekonomi (Tone, 2001, 2004; Zhang et al., 2018).

c. Hipotesis Environmental Kuznets Curve (EKC) dan Rebound Effect

Hubungan antara pertumbuhan sektor manufaktur dan kerusakan lingkungan dijelaskan melalui hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC). Teori ini menyatakan bahwa hubungan antara tingkat pendapatan atau aktivitas produksi dengan pencemaran lingkungan berbentuk huruf U terbalik

(inverted U-shaped) (Apriana, 2025). Pada tahap awal industrialisasi, peningkatan aktivitas manufaktur biasanya diikuti oleh peningkatan emisi karena fokus pembangunan masih diarahkan pada pertumbuhan ekonomi, sementara aspek lingkungan belum menjadi prioritas (Sambodo & Oyama, 2011). Seiring perkembangan ekonomi, kondisi tersebut dapat berubah ketika suatu wilayah mulai menerapkan teknologi yang lebih ramah lingkungan serta memperkuat regulasi dalam pengelolaan sektor industri. Perubahan ini menjadi titik balik (*turning point*) yang mendorong peningkatan efisiensi lingkungan (*green efficiency*) (Yoon & Nadvi, 2018). Namun, upaya tersebut dapat terhambat oleh rebound effect, yaitu kondisi ketika peningkatan efisiensi teknologi menurunkan biaya penggunaan energi sehingga konsumsi energi secara keseluruhan justru meningkat, terutama setelah terjadinya krisis ekonomi (Yang et al., 2022).

METODE PENELITIAN

Pendekatan metodologi dalam penelitian ini diadaptasi dari kerangka kerja yang dikembangkan oleh Zhang et al. (2018) yang berfokus pada pengukuran kinerja efisiensi lingkungan di sektor industri. Mengingat penelitian ini berorientasi pada evaluasi *green efficiency* industri manufaktur di enam provinsi di Pulau Jawa tanpa menyertakan analisis faktor penentu lanjutan, maka prosedur analisis dalam studi ini dipisahkan ke dalam dua tahapan utama: Estimasi Emisi Karbon Dioksida (CO²): Melakukan konversi volume penggunaan berbagai jenis bahan bakar fosil pada sektor manufaktur di tiap provinsi menjadi nilai kuantitatif emisi CO². Pengukuran Efisiensi Hijau (*Green Efficiency*): Mengoperasikan model *Slack-Based Measure Data Envelopment Analysis* (SBM-DEA) untuk menghitung skor efisiensi komparatif antarpulau dengan mengintegrasikan input produksi, output yang diinginkan (*desirable output*), serta emisi sebagai output yang tidak diinginkan (*undesirable output*).

a. Estimasi Volume Emisi CO² Industri

Salah satu tantangan utama dalam kajian ekonomi lingkungan di tingkat regional adalah terbatasnya ketersediaan data empiris mengenai volume polutan yang dihasilkan oleh sektor industri manufaktur. Guna mengatasi hambatan ketersediaan data tersebut, penelitian ini mengestimasi kandungan emisi dengan mengonversi total konsumsi bahan bakar (bensin, minyak solar, batu bara, dan gas alam) sehingga menjadi ekuivalen dengan total emisi CO² yang dihasilkan. Emisi CO² dipilih karena gas rumah kaca jenis ini memiliki polusi antropogenik paling dominan yang memicu pemanasan global serta degradasi kualitas lingkungan secara makro (Apriana, 2025) Koefisien konversi yang menjembatani volume konsumsi energi menjadi total emisi CO² merujuk pada standar resmi yang dirilis oleh U.S. *Energy Information Administration* (EIA, 2018). Secara matematis, formulasi untuk menghitung total emisi CO² yang dilepaskan oleh aktivitas industri manufaktur di setiap wilayah diformulasikan sebagai berikut:

$$E_{hi} = c_h \times P_{hi}$$

$$E_i = \sum_h^n E_{hi}$$

E_i = Akumulasi total emisi CO² yang dihasilkan pada provinsi ke-i (ton CO²).

E_{hi} = Volume emisi CO² dari jenis bahan bakar ke-h pada provinsi ke-i.

c_h = Koefisien emisi spesifik berdasarkan karakteristik jenis bahan bakar ke-h (merujuk pada standar EIA, 2018).

P_{hi} = Total volume penggunaan jenis bahan bakar ke-h pada provinsi ke-i.

h = Indikator jenis bahan bakar yang digunakan (bensin, minyak solar, batu bara, dan gas natural).

b. Formulasi Model Slack-Based Measure (SBM) dengan *Undesirable Output*

Setelah variabel emisi CO² berhasil diestimasi, langkah selanjutnya adalah mengukur derajat efisiensi hijau menggunakan model SBM-DEA. Berbeda dengan model DEA tradisional (seperti model CCR atau BCC) yang bersifat radial dan mengabaikan eksistensi produk sampingan yang merusak, model SBM yang diperkenalkan oleh Tone (2001) mampu mengatasi masalah inefisiensi secara non-radial dengan memanfaatkan nilai *slacks* (siswa kelebihan *input* atau kekurangan *output*) secara langsung.

Dalam konteks ekonomi industri dan lingkungan, emisi CO² diposisikan sebagai *undesirable output* (output buruk) yang harus ditekan seminimal mungkin, sementara PDB industri bertindak sebagai *desirable output* (output baik) yang harus dimaksimalkan (Zhang et al, 2018). Melalui pendekatan SBM-DEA ini, unit kegiatan ekonomi (provinsi) tidak hanya dinilai berdasarkan kemampuan produksinya, melainkan juga seberapa optimal wilayah tersebut mampu mereduksi dampak lingkungan dari energi yang dikonsumsi.

Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan model *Slack-Based Measure* (SBM) yang dikembangkan oleh Tone (2001, 2004) untuk mengevaluasi efisiensi hijau (*green efficiency*) sektor industri manufaktur di 6 provinsi di Pulau Jawa. Diasumsikan terdapat n unit pengambilan keputusan (atau *Decision Making Units*/DMU, dalam konteks ini adalah provinsi) setiap DMU menggunakan vektor input $x \in R^m$ untuk menghasilkan vektor output yang diinginkan (*desirable output*) $y^g \in R^{s1}$ dan vektor output yang tidak diinginkan (*undesirable output*) $y^b \in R^{s2}$. Matriks untuk masing-masing variabel didefinisikan sebagai berikut:

$$X = [x_1, x_2, \dots, \dots, x_n] \in R^{m \times n}$$

$$Y^g = [y_1^g, y_2^g \dots \dots \dots, y_n^g] \in \mathbb{R}^{s^1 \times n}$$

$$Y^b = [y_1^b, y_2^b \dots \dots \dots, y_n^b] \in \mathbb{R}^{s^2 \times n}$$

Berdasarkan struktur data di atas, nilai efisiensi ekonomi dan lingkungan (q^*) dari DMU spesifik (x_0, y_0^g, y_0^b) diukur menggunakan program linier non-radial berikut:

$$\theta^* = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \right)}$$

Dengan subjek x_0 ,

$$y_0^g = Y^g \lambda - s^g$$

$$y_0^b = Y^b \lambda - s^b$$

$$s^- \geq 0, s^g \geq 0, s^b \geq 0, \lambda \geq 0$$

Keterangan:

- q^* = skor efisiensi hijau (*green efficiency*) yang berkisar antara $0 \leq q^* \leq 1$. Jika nilai $q^* = 1$, maka provinsi tersebut dikatakan telah mencapai efisiensi penuh (berada di garis batas/frontier produksi yang efisien).
- s^-, s^g, s^b = Vektor *slack* yang masing-masing menunjukkan kelebihan (excess) input, kekurangan (shortage) output, dan kelebihan (excess) output emisi buruk.
- λ = vektor intensitas atau bobot kontribusi dari masing-masing provinsi dalam membentuk frontier efisiensi.
- m, s_1, s_2 = Jumlah masing-masing variabel input, desirable output, dan undesirable output.

Di mana X adalah *input*, Y^g adalah *output* yang diinginkan, Y^b adalah *output* yang tidak diinginkan. M merupakan jumlah variabel *input*, s_1 merupakan jumlah variabel *output* yang diinginkan, dan s_2 merupakan jumlah variabel *output* yang tidak diinginkan. Selain itu, terdapat tiga *slacks* di dalam persamaan, yaitu s^- yang merepresentasikan kelebihan dalam penggunaan *input*, s^g yang merepresentasikan kelangkaan dalam produksi *output* yang diinginkan, dan s^b yang merepresentasikan kelebihan dalam produksi *output* yang tidak diinginkan. Melalui fungsi tujuan di atas, peningkatan inefisiensi akan terjadi jika nilai *slack input* (s^-) dan *slack emisi* (s^b)

meningkat. Sebaliknya, efisiensi akan tercapai maksimal ketika seluruh nilai *slack* bernilai nol ($s^- = 0, s^g = 0, s^b = 0$).

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

a. Pengukuran Emisi Karbon

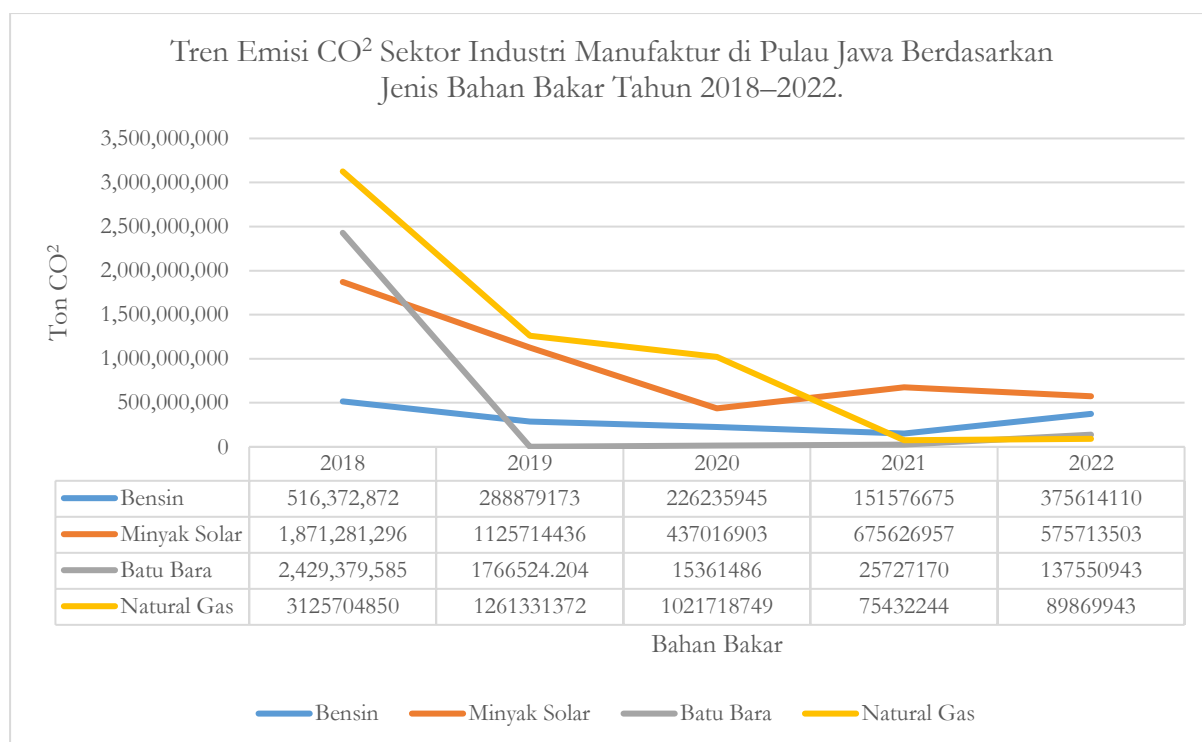
Tabel 1. Statistik Deskriptif Variabel Penelitian Sektor Industri Manufaktur di Pulau Jawa (2018–2022)

Variabel	Satuan	Nilai Minimum	Nilai Maksimum	Rata-rata (Mean)	Standar Deviasi
Input					
Capital	Ribu Rupiah	1048762806	1293940000000,00	441020000000,00	345912000000,00
Tenaga Kerja	Orang	74334	2156783,00	890858,88	645779,05
Konsumsi Energi	Liter	82480142	52224000000,00	9361000000,00	11000000000,00
Desirable Output					
PDB Industri	Ribu Rupiah	2,060000000000	2400000000000,00	880000000000,00	658380000000,00
Undesirable Output					
Emisi CO²	Ton CO ²	5853,84	1170512804,00	130000000,00	237146132,00

Sumber: Olahan peneliti (2026)

Berdasarkan hasil pengolahan data statistik deskriptif pada Tabel 1, terlihat adanya kesenjangan (gap) skala yang cukup lebar antara nilai minimum dan maksimum pada seluruh variabel pengamatan di enam provinsi Pulau Jawa selama periode 2018–2022. Pada aspek input produksi, variabel *capital* memiliki nilai rata-rata sebesar 441 miliar rupiah dengan standar deviasi sebesar 346 miliar rupiah. Sementara itu, sektor industri manufaktur di Pulau Jawa menyerap tenaga kerja dengan rata-rata 890.859 orang, kapasitas penyerapan tertinggi mencapai 2.156.783 orang. Kebutuhan operasional industri ini mendorong tingginya konsumsi energi fosil, yang ditunjukkan oleh nilai rata-rata konsumsi energi sebesar 9,36 miliar liter dengan nilai maksimum yang menyentuh angka 52,2 miliar liter. Di sisi output, kapasitas produksi ekonomi yang direpresentasikan melalui PDB industri menghasilkan nilai rata-rata sebesar 880 miliar rupiah. Nilai standar deviasi PDB industri yang cukup besar (658 miliar rupiah) mengindikasikan adanya ketimpangan output atau konsentrasi industri yang belum merata di antara keenam provinsi tersebut. Sejalan dengan tingginya output ekonomi dan konsumsi energi, emisi CO² yang dilepaskan sebagai undesirable output mencatatkan nilai rata-rata yang signifikan, yaitu sebesar 130 juta ton CO², dengan volume emisi tertinggi mencapai 1,17 miliar ton CO². Tingginya angka maksimum emisi ini mengacu pada urgensi dilakukannya evaluasi efisiensi hijau untuk mengidentifikasi wilayah yang memerlukan intervensi teknologi ramah lingkungan.

b. Emisi CO² Sektor Industri Manufaktur di Pulau Jawa



Gambar 2: Tren Emisi CO² Sektor Industri Manufaktur di Pulau Jawa Berdasarkan Jenis Bahan Bakar Tahun 2018–2022

Sumber: Olahan peneliti (2026)

Guna memahami komparasi dampak lingkungan yang dihasilkan dari aktivitas manufaktur di Pulau Jawa, dilakukan pemecahan (*breakdown*) terhadap akumulasi emisi CO² berdasarkan bauran energi (*energy mix*) yang digunakan selama periode 2018–2022. Berdasarkan hasil perhitungan pada Gambar 2, terlihat bahwa emisi yang dilepaskan tidak tersebar merata di setiap jenis bahan bakar. Penggunaan gas alam (*natural gas*) menjadi kontributor utama pencemaran lingkungan. Hal ini dikarenakan karakteristik bahan bakar tersebut yang memiliki intensitas karbon lebih tinggi dibandingkan dengan energi lainnya. Di sisi lain, bensin mencatatkan persentase emisi paling rendah karena penggunaannya yang terbatas pada sektor operasional di industri kecil hingga menengah. Secara temporal, tren emisi dari seluruh jenis bahan bakar kompak mengalami penurunan pada tahun 2020 dan 2021. Pola ini mengonfirmasi bahwa pembatasan mobilitas dan operasional pabrik selama pandemi COVID-19 secara langsung menekan konsumsi energi fosil di lapangan. Namun, pemulihan ekonomi pada tahun 2022 kembali memicu lonjakan emisi, terutama dari penggunaan bensin, seiring dengan kembali normalnya kapasitas utilitas pabrik di koridor industri Pulau Jawa.

Pengukuran efisiensi hijau pada sektor industri manufaktur di enam provinsi Pulau Jawa diestimasi menggunakan model *Slack-Based Measure* (SBM) berorientasi input dengan asumsi *Variable Returns to Scale* (VRS) selama periode 2018–2022. Ringkasan skor efisiensi beserta status capaian masing-masing wilayah disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Skor Green Efficiency Sektor Industri Manufaktur di Enam Provinsi Pulau Jawa (2018–2022)

Provinsi	2018	2019	2020	2021	2022	Rata-rata	Status

Banten	1	1	1	1	1	1	Efisien
DI Yogyakarta	1	1	1	1	1	1	Efisien
DKI Jakarta	1	1	1	1	1	1	Efisien
Jawa Barat	1	1	1	1	1	1	Efisien
Jawa Tengah	0,75752802	1	1	1	0,52061413	0,855628	Inefisien
Jawa Timur	0,92392165	0,68788553	0,75863947	0,53636857	0,61034902	0,703433	Inefisien

Sumber: Output MaxDEA diolah peneliti (2026)

Berdasarkan hasil komparasi pada Tabel 2, terlihat adanya variasi performa efisiensi yang kontras secara spasial maupun temporal. Provinsi Banten, DI Yogyakarta, DKI Jakarta, dan Jawa Barat secara konsisten mempertahankan skor efisiensi sempurna senilai 1,0000 sepanjang periode pengamatan. Struktur industri di keempat wilayah ini dinilai telah berhasil mencapai titik optimum ekosistem produksi, di mana penyerapan input modal (*capital*), tenaga kerja, dan konsumsi energi fosil mampu menghasilkan output ekonomi (PDB industri) maksimal sekaligus menekan residu emisi CO² di tingkat paling minimal.

Fenomena menarik ditunjukkan oleh perkembangan tren efisiensi di Provinsi Jawa Tengah dan Jawa Timur yang dapat dikategorikan berstatus inefisien secara rata-rata (skor < 1,0000). Provinsi Jawa Tengah sempat mencapai batas frontier efisien sempurna pada periode pandemi COVID-19 (tahun 2019 hingga 2021), yang didorong oleh penurunan drastis konsumsi energi dan emisi akibat pembatasan operasional pabrik. Namun, pada fase pemulihan ekonomi tahun 2022, skor efisiensi Jawa Tengah anjlok secara signifikan menjadi 0,5206. Penurunan yang signifikan ini mengindikasikan adanya gejala *over-consumption* pada input energi fosil yang tidak diimbangi oleh pertumbuhan PDB industri yang sepadan, sehingga memicu pembengkakan slack pada undesirable output berupa emisi gas rumah kaca.

Di sisi lain, sektor manufaktur Provinsi Jawa Timur secara persisten berada di bawah batas ekonomi ramah lingkungan dengan nilai rata-rata efisiensi terendah sebesar 0,7034. Performa efisiensi hijau Jawa Timur mengalami titik nadir pada tahun 2021 dengan skor sebesar 0,5364, sebelum mengalami sedikit perbaikan pada tahun 2022 menjadi 0,6103. Karakteristik inefisiensi yang terjadi di Jawa Timur menunjukkan bahwa konsentrasi industri berskala besar di wilayah tersebut masih sangat bergantung pada bauran energi tinggi karbon (*carbon-intensive energy mix*). Akibatnya, peningkatan utilisasi kapasitas pabrik untuk mengejar pertumbuhan ekonomi justru memicu eksternalitas negatif lingkungan berupa pelepasan emisi karbon dioksida dalam volume yang sangat besar, sebagaimana ditunjukkan pada nilai maksimum emisi pada analisis deskriptif sebelumnya. Kondisi ini menjelaskan kebutuhan intervensi kebijakan berupa transisi menuju teknologi rendah karbon bagi koridor manufaktur di Jawa Tengah dan Jawa Timur.

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil estimasi empiris menggunakan model SBM-DEA, ditemukan perbedaan yang jelas dalam performa efisiensi hijau antara bagian barat-tengah Pulau Jawa (Banten, DKI Jakarta, Jawa Barat, DI Yogyakarta) dan wilayah timur (Jawa Tengah dan Jawa Timur).

Keberhasilan DKI Jakarta dan DI Yogyakarta dalam mempertahankan posisi efisiensi sempurna senilai 1 di sepanjang periode pengamatan sangat dipengaruhi oleh karakteristik struktural ekonominya. Kedua provinsi ini tidak lagi bertumpu pada industri manufaktur berat yang padat energi (*energy-intensive heavy industries*). DKI Jakarta didominasi oleh sektor jasa dan

industri bernilai tambah tinggi yang minim polusi, sementara DI Yogyakarta didominasi oleh industri kreatif dan pariwisata yang memiliki intensitas emisi karbon rendah. Hal ini sejalan dengan penelitian Tone (2001) yang mengembangkan model SBM, di mana DMU yang mampu menekan input dan undesirable output secara drastis tanpa mengurangi *desirable output* akan selalu berada pada garis frontier efisiensi. Di sisi lain, Jawa Barat dan Banten yang memiliki kluster industri manufaktur skala besar telah menunjukkan kemajuan dalam adopsi kawasan industri terpadu (*eco-industrial park*). Implementasi standar manajemen lingkungan yang ketat pada kluster industri terpusat terbukti efektif dalam mengendalikan dampak dari tingginya penggunaan energi, sehingga mampu mendukung pencapaian output ekonomi yang optimal tanpa memicu peningkatan emisi yang berlebihan (Yoon & Nadvi, 2018).

Kondisi sebaliknya terjadi di Jawa Tengah dan Jawa Timur yang terbukti masih mengalami inefisiensi hijau yang persisten. Secara teoretis, fenomena inefisiensi persisten di wilayah pusat manufaktur padat energi ini merefleksikan kegagalan internalisasi eksternalitas lingkungan ke dalam biaya operasional industri. Kasus anjloknya efisiensi Jawa Tengah pada tahun 2022 (skor 0,5206) menjadi indikasi kuat adanya fenomena rebound effect pascapandemi COVID-19. Pencabutan pembatasan mobilitas diikuti oleh percepatan aktivitas produksi manufaktur untuk memenuhi pemulihan ekonomi. Namun, akselerasi tersebut sebagian besar masih ditopang oleh penggunaan energi fosil konvensional berbiaya rendah, seperti batu bara dan minyak solar, yang berkontribusi terhadap peningkatan emisi. Fenomena penurunan efisiensi akibat lonjakan emisi pada periode pascakrisis sejalan dengan temuan (Yang et al., 2022) yang menunjukkan bahwa pemulihan ekonomi yang berlangsung secara agresif cenderung meningkatkan ketergantungan pada energi fosil sehingga berdampak negatif terhadap indikator keberlanjutan lingkungan.

Sementara itu, Jawa Timur menunjukkan nilai efisiensi rata-rata terendah (0,7034), yang mengindikasikan bahwa kinerja efisiensi lingkungannya masih relatif rendah dibandingkan dengan provinsi lain. Jika ditinjau dari perspektif hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC), koridor industri Jawa Timur dan Jawa Tengah tampaknya masih berada pada fase awal kurva, di mana akselerasi pertumbuhan ekonomi dan akumulasi skala industri (scale effect) mengorbankan kualitas lingkungan demi mengejar target output ekonomi. Kondisi ini diduga berkaitan dengan tingginya konsentrasi industri manufaktur, terutama di kawasan industri utama seperti Ring 1, yang masih bergantung pada pasokan energi fosil. Tingginya konsumsi batu bara sebagai sumber energi bagi sektor manufaktur turut meningkatkan intensitas emisi, sehingga memperlebar kesenjangan menuju tingkat efisiensi hijau yang optimal. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Sambodo Dan Oyama (2011) yang menunjukkan bahwa konsentrasi industri manufaktur berskala besar tanpa diimbangi dengan percepatan transisi menuju energi bersih berpotensi meningkatkan pertumbuhan ekonomi dengan konsekuensi berupa penurunan kualitas lingkungan.

Tabel 3. Hasil Analisis Peer Group Benchmark (Lambda) Efisiensi Hijau (2018–2022)

Tahun	Provinsi Inefisien	Skor SBM	Provinsi Rujukan (Peer Group) dan Nilai Bobot (λ)
2018	Jawa Tengah; Jawa Timur	0,75750; 0,9239	DI Yogyakarta (0,721); Jawa Barat (0,279)DI Yogyakarta (0,606); Jawa Barat (0,394)
2019	Jawa Tengah; Jawa Timur	1,00000; 0,6879	Self-Benchmark (1,000) (Efisien)DI Yogyakarta (0,125); DKI Jakarta (0,624); Jawa Barat (0,251)
2020	Jawa Tengah; Jawa Timur	1,00000; 0,7586	Self-Benchmark (1,000) (Efisien)DKI Jakarta (0,731); Jawa Barat (0,269)
2021	Jawa Tengah; Jawa Timur	1,00000; 0,5364	Self-Benchmark (1,000) (Efisien)DKI Jakarta (0,661); Jawa Barat (0,339)
2022	Jawa Tengah; Jawa Timur	0,52060; 0,6103	DI Yogyakarta (0,654); DKI Jakarta (0,050); Jawa Barat (0,296)DKI Jakarta (0,638); Jawa Barat (0,362)

Sumber: Output MaxDEA diolah peneliti (2026)

Merujuk pada parameter benchmark (λ) pada Tabel 3, dinamika unit acuan operasional industri ramah lingkungan di Pulau Jawa menunjukkan perubahan selama periode 2018–2022. Berdasarkan hasil pemodelan SBM-DEA, empat provinsi, yaitu Banten, DI Yogyakarta, DKI Jakarta, dan Jawa Barat, secara konsisten berperan sebagai peer group dengan nilai λ sebesar 1,0000 pada setiap tahun pengamatan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keempat provinsi tersebut berada pada efficient frontier dan dapat dijadikan sebagai acuan dalam penerapan praktik terbaik (*best practice*) terkait pencapaian efisiensi lingkungan di sektor manufaktur.

Pola *benchmark* yang berbeda terlihat pada Provinsi Jawa Tengah. Pada tahun 2018, Jawa Tengah belum mencapai tingkat efisiensi sehingga target efisiensinya mengacu pada kombinasi DI Yogyakarta (72,1%) dan Jawa Barat (27,9%). Selama periode 2019–2021, Jawa Tengah mencapai kondisi efisien dengan nilai λ sebesar 1,0000 sehingga berfungsi sebagai unit acuan bagi dirinya sendiri. Perubahan tersebut diduga dipengaruhi oleh penurunan aktivitas industri selama pandemi COVID-19 yang berdampak pada penurunan konsumsi energi dan emisi. Namun, pada tahun 2022 Jawa Tengah kembali berada pada kondisi tidak efisien seiring dengan meningkatnya aktivitas produksi pada fase pemulihan ekonomi. Oleh karena itu, perbaikan kinerja efisiensi pada tahun 2022 dapat dilakukan dengan mengacu pada kombinasi benchmark dari DI Yogyakarta (65,3%), Jawa Barat (29,6%), dan DKI Jakarta (5,0%).

Sementara itu, Jawa Timur menunjukkan pola benchmark yang lebih dinamis akibat belum mampu mencapai kondisi efisien selama periode penelitian. Pada tahun 2018–2019, provinsi ini direkomendasikan untuk mengadopsi karakteristik efisiensi dari DI Yogyakarta dan Jawa Barat, dengan kontribusi terbesar berasal dari DI Yogyakarta. Selanjutnya, pada periode 2020–2022 terjadi perubahan unit acuan, di mana DKI Jakarta menjadi benchmark utama dengan bobot λ yang secara konsisten melebihi 60%, yaitu 62,3% (2019), 73,1% (2020), 66,1% (2021), dan 63,7% (2022), sedangkan Jawa Barat memberikan kontribusi pelengkap dengan bobot berkisar antara 25% hingga 36%.

Perubahan benchmark dari DI Yogyakarta menuju DKI Jakarta mengindikasikan bahwa strategi peningkatan efisiensi di Jawa Timur perlu disesuaikan dengan karakteristik wilayah yang memiliki struktur industri manufaktur berskala besar. Dengan demikian, upaya pengurangan

konsumsi energi dan emisi karbon akan lebih relevan apabila mengadopsi praktik pengelolaan industri yang diterapkan di DKI Jakarta dan Jawa Barat. Temuan ini sejalan dengan (Wang & Hou, n.d.) yang menyatakan bahwa pembelajaran antardaerah melalui mekanisme peer-group learning merupakan salah satu pendekatan yang efektif untuk meningkatkan efisiensi wilayah yang masih berada di bawah *efficient frontier*.

Berdasarkan hasil proyeksi *slack output* pada model SBM-DEA, terdapat beberapa rekomendasi kebijakan yang dapat diterapkan untuk meningkatkan efisiensi lingkungan di Jawa Tengah dan Jawa Timur, yaitu:

1. Penerapan audit energi secara wajib pada industri manufaktur padat energi, seperti industri semen, tekstil, dan kimia, untuk mendorong transisi dari penggunaan batu bara menuju gas alam maupun energi terbarukan, seperti sistem solar rooftop.
2. Pemberian insentif fiskal bagi perusahaan yang mampu mencapai target pengurangan emisi karbon melalui skema keringanan pajak daerah atau bentuk insentif lainnya.
3. Pengembangan kawasan industri berbasis pengelolaan limbah dan emisi secara terpusat dengan mengacu pada praktik yang telah diterapkan di Jawa Barat dan Banten.

KESIMPULAN DAN SARAN

a. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis tingkat efisiensi hijau (*green efficiency*) sektor industri manufaktur di enam provinsi di Pulau Jawa selama periode 2018–2022 menggunakan *pendekatan Slack-Based Measure Data Envelopment Analysis* (SBM-DEA). Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan tingkat efisiensi antarprovinsi. Banten, DKI Jakarta, Jawa Barat, dan DI Yogyakarta secara konsisten mencapai nilai efisiensi sebesar 1,0000 selama periode penelitian, sehingga berada pada *efficient frontier*. Sebaliknya, Jawa Tengah dan Jawa Timur masih menunjukkan tingkat efisiensi yang relatif rendah, dengan nilai rata-rata masing-masing sebesar 0,8556 dan 0,7034. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa kedua provinsi masih memiliki peluang untuk meningkatkan efisiensi melalui pengurangan konsumsi energi fosil dan penurunan emisi CO₂ sebagai *undesirable output*.

Dari sisi temporal, hasil analisis menunjukkan adanya perubahan pola efisiensi selama periode penelitian. Jawa Tengah mencapai kondisi efisien pada periode 2019–2021, yang diduga berkaitan dengan penurunan aktivitas industri selama pandemi COVID-19, namun kembali mengalami penurunan efisiensi pada tahun 2022 seiring meningkatnya aktivitas produksi pada masa pemulihan ekonomi. Sementara itu, hasil analisis *benchmark* (λ) menunjukkan bahwa rekomendasi unit acuan bagi Jawa Timur mengalami perubahan dari DI Yogyakarta pada awal periode penelitian menjadi DKI Jakarta dan Jawa Barat pada periode 2020–2022. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa strategi peningkatan efisiensi perlu disesuaikan dengan karakteristik wilayah yang memiliki struktur industri manufaktur berskala besar.

Penelitian ini memberikan kontribusi empiris dalam penerapan metode SBM-DEA yang mengintegrasikan indikator ekonomi dan lingkungan melalui penggunaan *undesirable output* pada

analisis efisiensi sektor manufaktur di tingkat provinsi. Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa wilayah dengan konsentrasi industri manufaktur yang tinggi tidak selalu memiliki tingkat efisiensi lingkungan yang rendah, sehingga pencapaian efisiensi dipengaruhi oleh karakteristik pengelolaan energi, teknologi produksi, dan strategi pengendalian emisi yang diterapkan pada masing-masing wilayah.

b. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan tersebut, beberapa rekomendasi untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Menggunakan data pada tingkat perusahaan (firm-level data) atau tingkat kabupaten/kota sehingga variasi efisiensi antarunit produksi dapat dianalisis secara lebih rinci.
2. Menambahkan indikator lingkungan yang lebih beragam sebagai undesirable output, seperti limbah cair industri, limbah B3, serta emisi SO_x dan NO_x, agar pengukuran efisiensi hijau dapat merepresentasikan dampak lingkungan secara lebih menyeluruh.
3. Mengombinasikan metode SBM-DEA dengan Malmquist–Luenberger Productivity Index untuk menganalisis perubahan produktivitas hijau dan perkembangan teknologi produksi dalam jangka panjang, khususnya pada periode pascapandemi COVID-19.
4. Mengintegrasikan variabel yang merepresentasikan kebijakan lingkungan, seperti bauran energi terbarukan, investasi teknologi rendah karbon, atau penerapan standar industri hijau, sehingga faktor-faktor yang memengaruhi efisiensi lingkungan dapat dianalisis secara lebih komprehensif.

REFERENCE

- Adhitama, A. P., & Hartanto, H. (2023). Dampak Pandemi COVID-19 Terhadap Implementasi Target Energi Terbarukan dalam Kerangka ASEAN Plan of Action for Energy Cooperation 2016-2025. *JDKP Jurnal Desentralisasi Dan Kebijakan Publik*, 4(2), 50–60. <https://doi.org/10.30656/jdkp.v4i2.6910>
- Apriana, E. (2025). Pemanasan Global: Sebuah Tinjauan Sistematis terhadap Dampak, Penyebab, dan Strategi Mitigasi (Systematic Literature Review). In *Serambi Saintia Jurnal Sains dan Aplikasi: XIII* (Number 2).
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2023). Handbook of energy & economic statistics of Indonesia 2023. Pusat Data dan Teknologi Informasi, Kementerian ESDM.
- Kumar Mandal, S., & Madheswaran, S. (2010). Environmental efficiency of the Indian cement industry: An interstate analysis. *Energy Policy*, 38(2), 1108–1118. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.063>
- Muslih, Apriana., dan Lismarita. (2025). Pemanasan Global: Sebuah Tinjauan Sistematis terhadap Dampak, Penyebab, dan Strategi Mitigasi (Systematic Literature Review). *Serambi Saintia Jurnal Sains dan Aplikasi Vol XIII*, No. 2

- Puspitasari, R., Hangga Nugraha, S., & Prabu Kusuma, R. (2024). *Membangun Kebijakan untuk Masa Depan: Kolaborasi Gagasan Menyongsong Indonesia Maju 2045*. Retrieved www.ipbpress.com
- Sambodo, Maxensius Tri dan Oyama, Tatsuo (2011). (n.d.) Economic, Energy, and CO² Intensity Valuation In Indonesia's Manufacturing Industry. Annual Meeting of Science and Technology Studies (AMSTECS) in National Graduate Institute Tokyo
- Setiawan, Ari Budi; Pangestika, Maulida Dewi; Kusuma, Putri Patria; and Yusuf, Mochammad (2025) "Perencanaan Investasi Hijau pada Usaha Menengah Besar di Provinsi Jawa Tengah," *Jurnal Ekonomi dan Pembangunan Indonesia: Vol. 25: No. 2, Article 4*. DOI: 10.7454/jepi.v25i2.1860
- Tone, K. (2001). *A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis*. *European Journal of Operational Research*, 130(3), 498-509. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00407-5
- Tone, K. (2004). *Dealing with undesirable outputs in DEA: A slacks-based measure (SBM) approach*. *North American Productivity Workshop, Toronto, June 2004*, 44-45.
- Wang, Y., & Hou, W. (n.d.). Measurement of China's Green Total Factor Productivity and Analysis of its Influencing Factors. *Scientific Journal of Economics and Management Research*, 4, 2022.
- Yang, M., Chen, L., Msigwa, G., Tang, K. H. D., & Yap, P. S. (2022). Implications of COVID-19 on global environmental pollution and carbon emissions with strategies for sustainability in the COVID-19 era. In *Science of the Total Environment* (Vol. 809). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151657>
- Yoon, S., & Nadvi, K. (2018). Industrial clusters and industrial ecology: Building 'eco-collective efficiency' in a South Korean cluster. *Geoforum*, 90, 159–173. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.01.013>
- Zhang, J., Chang, Y., Wang, C., & Zhang, L. (2018). The green efficiency of industrial sectors in China: A comparative analysis based on sectoral and supply-chain quantifications. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.015>