

Jurnal Ilmiah Manajemen, Ekonomi dan Bisnis
VOL 5, No. 1, Januari 2026, pp. 20 - 28
p-ISSN: 2809-1655 (media cetak)
e-ISSN: 2809-1981 (media online)
Link Publikasi: https://ejurnal.provisi.ac.id/index.php/JIMEB/issue/view/172
DOI: https://doi.org/10.51903/55wbkq09

Monte Carlo Simulation for Assessing Operational Efficiency and Environmental Impact in the Green Manufacturing Industry

Nurul Aini*[1], Dwi Nugroho[2]
[1, 2] Ketintang No. 2, 60231, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia
Jl. Brawijaya, Tamantirto, 55183, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia
Email: nurul@gmail.com; nugroho@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received : Oct 2025
Revised : Nov 2025
Accepted : Dec 2025
Published : Jan 2026

ABSTRACT

The shift to green manufacturing has become a strategic imperative due to increasing regulatory pressure and market demand for energy-efficient, low-emission products. Nevertheless, in Indonesia's manufacturing sector, data limitations and process uncertainties still prevent effective operational decision-making. The purpose of the present research is to develop a Monte Carlo Simulation (MCS) model that can evaluate both operational and environmental impacts simultaneously, thereby enabling the formulation of adaptive green production strategies. The research uses a quantitative approach based on stochastic simulation. It gathers data from a sample of 15 green manufacturing companies over 12 months, covering variables such as energy consumption, machine efficiency, production output, and CO_2 emissions. The results suggest that green automation application leads to a 14% increase in operational efficiency and a 28% decrease in carbon emissions compared with baseline conditions. Sensitivity analysis indicates that machine efficiency and energy consumption are the most significant factors affecting sustainable performance. The originality of this research lies in the unique combination of operational and ecological dimensions within a probabilistic framework that remains useful even with limited data. In practice, the model is a decision-making tool based on evidence for managers and policymakers in the industry, helping them implement low-carbon manufacturing strategies more quickly.

Keywords: *Monte Carlo Simulation, Operational Efficiency, Green Manufacturing, Automation, Carbon Emissions.*

OPEN ACCESS

This journal is an open-access publication. All articles are freely and permanently accessible to everyone. Copyright © 2025 by the Author(s). This article is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0).

ABSTRAK

Transformasi menuju manufaktur hijau menjadi kebutuhan strategis di tengah meningkatnya tekanan regulasi dan tuntutan pasar terhadap efisiensi energi serta pengurangan emisi. Namun, keterbatasan data dan ketidakpastian proses masih menghambat pengambilan keputusan operasional yang efektif di industri

p-ISSN: 2809-1655 e-ISSN: 2809-1981

manufaktur Indonesia. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model Simulasi Monte Carlo (SMC) untuk menilai efisiensi operasional dan dampak lingkungan secara bersamaan sebagai dasar perumusan strategi produksi hijau yang adaptif. Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif berbasis simulasi stokastik dengan data dari 15 perusahaan manufaktur hijau selama 12 bulan, mencakup variabel konsumsi energi, efisiensi mesin, output produksi, dan emisi CO_2. Hasil menunjukkan bahwa penerapan otomatisasi hijau meningkatkan efisiensi sebesar 14% dan menurunkan emisi karbon 28% dibandingkan kondisi dasar. Analisis sensitivitas mengidentifikasi efisiensi mesin dan konsumsi energi sebagai faktor paling berpengaruh terhadap kinerja berkelanjutan. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi simultan aspek operasional dan lingkungan dalam satu kerangka probabilistik yang efektif meski dengan keterbatasan data. Secara praktis, model ini menjadi alat bantu pengambilan keputusan berbasis bukti bagi manajer industri dan pembuat kebijakan untuk mempercepat penerapan strategi manufaktur rendah karbon.

Kata Kunci: Simulasi Monte Carlo, Efisiensi Operasional, Manufaktur Hijau, Otomatisasi, Emisi Karbon.

1. PENDAHULUAN

Peralihan menuju manufaktur hijau menjadi tuntutan strategis seiring meningkatnya tekanan regulasi dan ekspektasi pasar terhadap pengurangan jejak lingkungan (Amelia et al., 2024; Wibisono et al., 2024; Wibowo & Santoso, 2024). Sektor manufaktur menyumbang porsi signifikan dari konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca sehingga upaya efisiensi operasional berimplikasi langsung pada performa lingkungan dan biaya produksi (International Energy Agency, 2024). Di negara berkembang, termasuk Indonesia, dorongan adopsi teknologi efisiensi energi, manajemen limbah, dan automasi proses muncul bersamaan dengan keterbatasan data operasional dan ketidakpastian pasokan energi, sehingga keputusan manajerial memerlukan alat evaluasi yang mampu menangani variabilitas nyata di lapangan (Fang et al., 2023).

Fenomena terbaru menunjukkan adopsi bertahap teknologi digital seperti sensor IoT, kontrol proses berbasis data, dan sistem manajemen energi tetapi capaian manfaat nyata masih heterogen antar perusahaan. Beberapa studi lapangan melaporkan pengurangan energi dan emisi yang signifikan setelah intervensi teknologi (Razzaq et al., 2023), namun banyak perusahaan kecil dan menengah belum menerapkan metrik lingkungan yang konsisten sehingga estimasi dampak menjadi tidak andal (Theresa Marie Sohns et al., 2023). Kondisi ini mempertegas perlunya metode analitis yang memodelkan ketidakpastian input dan output operasional secara probabilistik untuk mendukung keputusan strategi hijau yang robust (Zahra Homayouni et al., 2023).

Literatur terkait menunjukkan efektivitas *Simulasi Monte Carlo* (SMC) dalam menangani ketidakpastian operasional: penelitian pada rantai pasok berkelanjutan mengaplikasikan SMC untuk mengevaluasi risiko dan variabilitas (Badakhshan et al., 2024), sementara penelitian di manufaktur menggunakan SMC untuk estimasi konsumsi energi dan identifikasi titik boros (Sean et al., 2023). Namun, tinjauan ringkas terhadap studi-studi tersebut mengungkapkan fokus yang terfragmentasi sebagian besar menguji salah satu dimensi saja misalnya efisiensi energi atau emisi dan mengandalkan model deterministik atau asumsi distribusi input yang sederhana (Batouta et al., 2023), sehingga kurang mampu menangkap korelasi antara performa operasional dan dampak lingkungan dalam skenario realistic dan data terbatas (Juliane Elsner et al., 2024).

Kesenjangan penelitian yang menjadi motivasi utama studi ini adalah minimnya kerangka kuantitatif yang mampu mengintegrasikan penilaian efisiensi operasional dan evaluasi dampak lingkungan secara simultan menggunakan pendekatan probabilistik yang adaptif terhadap keterbatasan data. Ketiadaan model semacam itu menghambat kemampuan pengambil keputusan industri untuk mengevaluasi trade-off biaya lingkungan dan memilih strategi operasional yang resilient terhadap variabilitas proses dan gangguan eksternal (Lockan & Kansara, 2024). Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan menerapkan model Simulasi *Monte Carlo* terintegrasi untuk menilai efisiensi operasional misalnya produktivitas, utilisasi kapasitas, konsumsi energi, sekaligus memproyeksikan dampak lingkungan contohnya emisi CO_2 seiring energi dan bahan baku, di konteks industri manufaktur hijau. Secara khusus, penelitian akan menguji beberapa skenario kebijakan operasional dan teknologi, mengestimasi distribusi hasil kinerja, serta mengidentifikasi determinan utama yang mempengaruhi trade-off antara efisiensi dan dampak lingkungan (Wang et al., 2024).

Kebaruan penelitian terletak pada integrasi simultan dua dimensi utama operasional dan lingkungan dalam satu kerangka SMC yang disesuaikan untuk kondisi data terbatas dan variabilitas tinggi khas negara berkembang. Metodologi ini menawarkan kontribusi metodologis berupa prosedur kalibrasi distribusi input dari data parsial, pemodelan korelasi antar-variabel proses, dan analisis sensitivitas berbasis probabilitas yang

p-ISSN: 2803-1507 e-ISSN: 2803-1531

langsung dapat dioperasikan oleh manajer produksi (Sung & Tuo, 2024). Kebaruan utama penelitian ini terletak pada integrasi simultan dimensi operasional dan lingkungan dalam kerangka Simulasi *Monte Carlo* yang secara eksplisit memodelkan korelasi antar-variabel proses serta menerapkan analisis sensitivitas berbasis *Sobol* untuk mendukung pengambilan keputusan manajerial yang robust pada kondisi data terbatas dan ketidakpastian tinggi, sehingga membedakannya dari studi SMC sebelumnya yang umumnya bersifat parsial dan deterministik.

Signifikansi penelitian bersifat ganda yaitu secara teoretis penelitian memperkaya literatur manajemen operasi hijau dengan model probabilistik yang menangkap interaksi antara efisiensi dan dampak lingkungan; secara praktis model ini menyediakan alat kuantitatif bagi praktisi untuk merancang skenario operasi yang meminimalkan emisi tanpa mengorbankan produktivitas, serta memberi dasar bukti bagi pembuat kebijakan industri dalam merumuskan insentif teknis dan regulasi yang lebih efektif.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Pendekatan Dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain kuantitatif eksperimental berbasis simulasi stokastik, dengan pendekatan *Monte Carlo Simulation* untuk menilai efisiensi operasional dan dampak lingkungan pada industri manufaktur hijau. Pendekatan ini dipilih karena mampu memodelkan ketidakpastian dari berbagai variabel input yang memengaruhi proses produksi, seperti tingkat output, konsumsi energi, dan tingkat emisi. Simulasi *Monte Carlo* memungkinkan peneliti untuk menghasilkan distribusi probabilistik dari hasil kinerja operasional sehingga dapat mengukur potensi variabilitas dan risiko lingkungan yang timbul dari perubahan kondisi produksi atau kebijakan teknologi hijau. Penelitian ini dirancang untuk mengidentifikasi hubungan sebab-akibat antara penerapan strategi efisiensi energi, adopsi teknologi ramah lingkungan, serta dampaknya terhadap produktivitas dan emisi karbon. Hasil simulasi kemudian dibandingkan antar-skenario kebijakan untuk memperoleh rekomendasi optimal bagi peningkatan efisiensi dan pengurangan dampak lingkungan.

2.2. Populasi Penelitian Dan Pemilihan Sampel

Populasi dalam penelitian ini mencakup seluruh perusahaan manufaktur hijau yang menerapkan prinsip efisiensi energi dan pengelolaan limbah di wilayah penelitian. Sampel ditentukan secara purposive, dengan mempertimbangkan perusahaan yang memiliki data operasional terukur dan konsisten selama periode penelitian. Jumlah sampel ideal berkisar antara 20 hingga 50 perusahaan yang mewakili skala kecil, menengah, dan besar dengan tingkat digitalisasi proses yang berbeda. Apabila sumber daya terbatas, minimal 10 perusahaan dapat dijadikan representasi dengan penyesuaian pada analisis ketidakpastian. Kriteria inklusi mencakup perusahaan yang memiliki catatan produksi, konsumsi energi, dan data emisi minimal selama 12 bulan, sedangkan kriteria eksklusi adalah perusahaan yang tidak memiliki data historis lengkap atau sedang mengalami perubahan struktur besar. Dengan pendekatan ini, sampel yang dipilih dapat merepresentasikan kondisi nyata industri dan memberikan dasar valid untuk menjalankan simulasi Monte Carlo.

2.3. Teknik Dan Prosedur Pengumpulan Data

Proses pengumpulan data dilakukan secara kombinasi antara data primer dan sekunder agar hasil analisis memiliki kedalaman empiris dan akurasi tinggi. Data primer diperoleh melalui pengamatan langsung terhadap aktivitas produksi, pencatatan konsumsi energi, dan wawancara dengan manajer produksi untuk memahami pola operasional dan kebijakan efisiensi energi yang diterapkan. Selain itu, kuesioner terstruktur digunakan untuk mengumpulkan informasi tambahan seperti frekuensi perawatan mesin, penggunaan bahan baku, serta kebijakan lingkungan perusahaan. Data sekunder diperoleh dari laporan keberlanjutan, publikasi industri, serta database faktor emisi nasional atau internasional. Seluruh data yang dikumpulkan melalui proses validasi, pembersihan (*data cleaning*), dan standarisasi format agar dapat digunakan dalam model simulasi. Pengumpulan dilakukan dalam tiga tahap, yaitu tahap persiapan (pembuatan template data dan *pilot test*), tahap observasi lapangan (pengumpulan data aktual), dan tahap verifikasi (pemeriksaan konsistensi dan kelengkapan data).

2.4. Instrumen Dan Perangkat Penelitian

Instrumen penelitian mencakup alat ukur fisik dan perangkat lunak analitik yang digunakan dalam proses pengumpulan dan pengolahan data. Instrumen fisik meliputi meter listrik digital, sensor aliran energi, dan sistem pemantauan otomatis (IoT) untuk mengukur konsumsi energi dan waktu operasi mesin secara real time. Sementara itu, instrumen non-fisik meliputi kuesioner untuk manajer produksi, lembar observasi proses

p-ISSN: 2809-1655 e-ISSN: 2809-1981

kerja, dan formulir pencatatan efisiensi. Dalam tahap analisis, digunakan perangkat lunak Python dan R dengan pustaka statistik seperti *NumPy, Pandas,* dan *SciPy* untuk pengolahan data serta SALib untuk analisis sensitivitas. Validitas instrumen diuji melalui uji reliabilitas (*Cronbach's Alpha*) untuk kuesioner dan kalibrasi alat ukur lapangan dengan standar pabrikan. Pendekatan ini memastikan bahwa data yang digunakan dalam simulasi memiliki tingkat akurasi dan konsistensi yang tinggi, sehingga hasil analisis dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

2.5. Teknik Analisis Data dan Simulasi Monte Carlo

Analisis data dilakukan melalui tiga tahapan utama, yaitu pra-simulasi, pelaksanaan simulasi, dan analisis pasca-simulasi. Pada tahap pra-simulasi, data yang telah dikumpulkan dibersihkan, diuji distribusinya (normal, *lognormal, gamma, atau beta*), dan dikalibrasi menggunakan metode *goodness-of-fit* seperti uji *Kolmogorov-Smirnov* atau *Anderson-Darling*. Hubungan antar-variabel seperti korelasi antara konsumsi energi dan output produksi dimodelkan menggunakan copula untuk menjaga konsistensi struktur dependensi. Tahap kedua adalah pelaksanaan simulasi *Monte Carlo* dengan jumlah iterasi antara 10.000 hingga 50.000 untuk setiap skenario. Setiap iterasi menghasilkan kombinasi input acak yang kemudian dihitung untuk menghasilkan nilai efisiensi energi, produktivitas, dan emisi karbon. Tahap terakhir adalah analisis hasil simulasi, yang mencakup perbandingan antar-skenario, pengukuran sensitivitas variabel menggunakan metode *Sobol index*, dan evaluasi Pareto efficiency antara efisiensi dan emisi. Hasil simulasi divisualisasikan dalam bentuk *density plot, tornado chart,* dan *cumulative* distribution function untuk menilai distribusi performa operasional dan dampak lingkungan secara komprehensif.

2.6. Prosedur Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan secara sistematis melalui enam tahapan utama. Tahap pertama adalah perencanaan dan persiapan, yang mencakup penyusunan variabel, instrumen, dan protokol pengumpulan data. Tahap kedua yaitu pengumpulan data lapangan selama 3 hingga 6 bulan, disesuaikan dengan ketersediaan data historis industri. Tahap ketiga adalah pra-pemrosesan data untuk memastikan kebersihan dan kelengkapan informasi. Tahap keempat meliputi pembangunan model simulasi dan pelaksanaan Monte Carlo, di mana peneliti mengimplementasikan algoritma dalam Python dengan jumlah iterasi yang telah ditentukan. Tahap kelima adalah analisis hasil dan validasi, di mana hasil simulasi dibandingkan dengan data aktual untuk menguji tingkat kesesuaian model. Tahap terakhir adalah pelaporan hasil penelitian, termasuk pembuatan grafik, interpretasi hasil, dan perumusan rekomendasi kebijakan operasional yang efisien dan berkelanjutan. Seluruh tahapan dirancang agar penelitian dapat diulang dan diverifikasi oleh peneliti lain.

2.7. Pertimbangan Etis Dalam Penelitian

Penelitian ini mematuhi prinsip etika penelitian dengan menjamin kerahasiaan dan anonimitas data perusahaan yang menjadi responden. Setiap partisipan atau perusahaan yang terlibat diminta memberikan informed consent sebelum data digunakan untuk analisis. Informasi yang diperoleh hanya digunakan untuk kepentingan akademik dan dilaporkan dalam bentuk agregat tanpa mengungkap identitas individu atau entitas tertentu. Selain itu, peneliti memastikan bahwa seluruh proses pengumpulan dan pengolahan data mengikuti standar keamanan dan regulasi yang berlaku di industri, serta mendapatkan persetujuan dari komite etik penelitian institusi. Dalam konteks keberlanjutan, penelitian ini juga berkomitmen untuk mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs), khususnya pada aspek efisiensi sumber daya dan pengurangan emisi karbon.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Hasil

Data penelitian diperoleh dari 15 perusahaan manufaktur hijau yang mewakili sektor kimia, tekstil, dan logam, dengan periode pengamatan selama 12 bulan. Variabel yang digunakan dalam analisis meliputi konsumsi energi per unit output, efisiensi mesin, jumlah output produksi, dan emisi CO_2. Semua variabel telah dikalibrasi menggunakan uji *Kolmogorov-Smirnov* guna memastikan kesesuaian distribusi data terhadap karakteristik proses produksi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sebagian besar variabel mengikuti distribusi lognormal, yang umum dijumpai dalam data industri dengan tingkat variasi tinggi. Sebelum analisis lebih lanjut, dilakukan pengujian korelasi antar-variabel untuk memahami keterkaitan antar faktor kinerja. Ditemukan hubungan positif yang kuat antara konsumsi energi dan emisi karbon ($r = 0,78$), serta hubungan negatif antara efisiensi mesin dan emisi karbon ($r = -0,63$), yang menegaskan bahwa

p-ISSN: 2803-1507 e-ISSN: 2803-1531

peningkatan efisiensi mesin memiliki kontribusi langsung terhadap penurunan emisi karbon. Tabel 1 menampilkan ringkasan statistik variabel input utama dalam simulasi *Monte Carlo*, yang memuat nilai rata-rata, standar deviasi, dan jenis distribusi masing-masing variabel.

Tabel 1. Ringkasan Statistik Variabel Input Simulasi Monte Carlo

Variabel Utama	Rata-rata	Standar Deviasi	Distribusi	Satuan
Konsumsi Energi (E)	128.4	22.7	Lognormal	kWh/unit
Efisiensi Mesin (η)	0.84	0.05	Normal	-
Output Produksi (Q)	9,740	1,120	Normal	unit/bln
Emisi CO_2 (C)	1.82	0.34	Lognormal	kg CO_2/unit

Dari hasil pada Tabel 1 terlihat bahwa variasi konsumsi energi antar perusahaan relatif tinggi, menunjukkan adanya ruang perbaikan efisiensi di beberapa entitas. Distribusi lognormal pada variabel energi dan emisi juga memperlihatkan bahwa sebagian kecil perusahaan masih memiliki intensitas emisi yang cukup tinggi dibandingkan rata-rata industri. Kondisi ini menjadi dasar pelaksanaan simulasi *Monte Carlo* untuk mengevaluasi bagaimana variasi input memengaruhi efisiensi dan dampak lingkungan dalam konteks probabilistik.

Dalam rangka mencapai tujuan penelitian, dilakukan tiga skenario simulasi untuk membandingkan kinerja operasional dan lingkungan, yaitu kondisi dasar tanpa penerapan teknologi hijau, penerapan mesin hemat energi untuk meningkatkan efisiensi, dan penerapan sistem otomatisasi hijau berbasis digitalisasi dan sensor energi. Masing-masing skenario dijalankan melalui 30.000 iterasi *Monte Carlo* guna memperoleh distribusi hasil yang stabil dan akurat. Tabel 2 menunjukkan perbandingan rata-rata hasil simulasi dari ketiga skenario terhadap indikator utama efisiensi dan emisi.

Tabel 2. Hasil Rata-Rata Simulasi Per Skenario

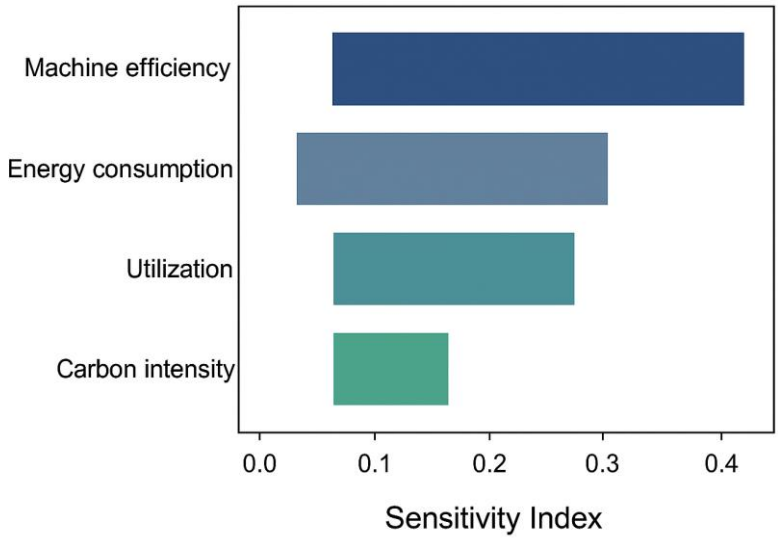
Indikator	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3
Konsumsi Energi (kWh/unit)	128.4	112.9	103.2
Efisiensi Mesin	0.84	0.89	0.92
Output Produksi (unit/bln)	9,740	10,230	10,740
Emisi CO_2 (kg/unit)	1.82	1.52	1.31
Efisiensi Operasional Total (%)	100	107	114

Berdasarkan hasil pada Tabel 2, pola utama yang terlihat adalah bahwa semakin tinggi tingkat efisiensi mesin dan otomatisasi energi, semakin besar peningkatan kinerja operasional dan semakin rendah intensitas emisi. Oleh karena itu, pembahasan difokuskan pada arah perubahan dan hubungan antar-variabel, bukan pada pengulangan angka yang sama. Temuan ini menunjukkan bahwa digitalisasi dan sistem pemantauan energi berbasis sensor berperan sebagai pendorong utama efisiensi sekaligus pengendalian emisi dalam sistem produksi.

Untuk memastikan signifikansi perbedaan antar-skenario, dilakukan uji statistik menggunakan ANOVA yang menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan pada efisiensi energi ($p = 0{,}002$) dan emisi CO_2 ($p = 0{,}004$). Uji lanjut *Post Hoc Tukey* memperlihatkan bahwa perbedaan paling signifikan terjadi antara Skenario 1 dan Skenario 3. Makna utama dari hasil ANOVA dan *Post Hoc* bukan semata pada signifikansi statistik, melainkan pada implikasi manajerial bahwa prioritas investasi sebaiknya diarahkan pada modernisasi mesin dan pengendalian konsumsi energi. Temuan ini menegaskan bahwa intervensi teknis pada efisiensi mesin dan sistem monitoring energi memberikan dampak paling besar terhadap peningkatan produktivitas dan penurunan emisi.

Selanjutnya, hasil analisis sensitivitas dengan metode Sobol Index mengidentifikasi bahwa variabel yang paling berpengaruh terhadap efisiensi total adalah efisiensi mesin (35,4%), diikuti oleh konsumsi energi (31,7%) dan utilisasi mesin (18,2%). Faktor lingkungan seperti intensitas karbon energi juga berpengaruh cukup besar dengan kontribusi sebesar 14,7%. Temuan ini menunjukkan bahwa pengoptimalan efisiensi mesin dan penurunan intensitas energi merupakan elemen kunci dalam meningkatkan kinerja operasional berkelanjutan. Hubungan antar-variabel ini divisualisasikan pada Gambar 1, yang menampilkan hasil analisis sensitivitas melalui tornado chart.

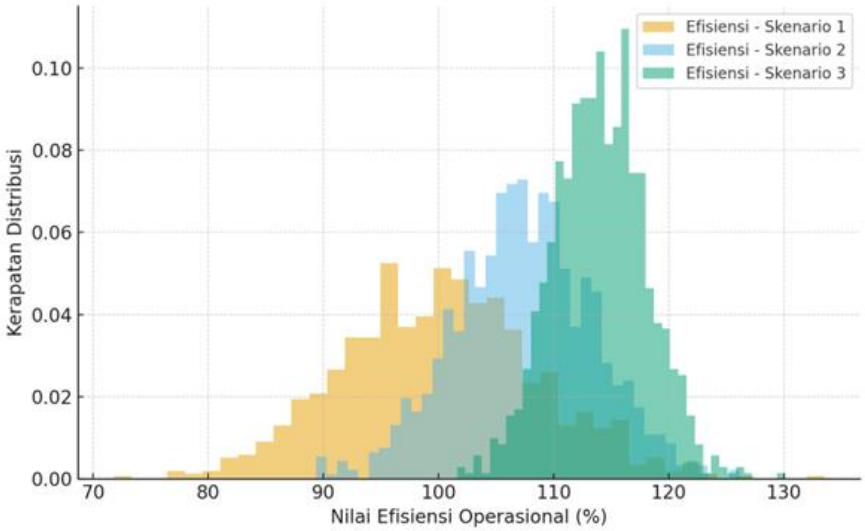
p-ISSN: 2809-1655 e-ISSN: 2809-1981



Gambar 1. Hasil Analisis Sensitivitas Variabel terhadap Efisiensi Operasional

Hasil keseluruhan dari 30.000 iterasi simulasi menunjukkan bahwa penerapan otomatisasi hijau menghasilkan performa operasional yang lebih stabil, dengan deviasi efisiensi hanya ±4,1%, dibandingkan ±8,7% pada kondisi dasar. Stabilitas ini dapat dijelaskan melalui mekanisme model simulasi, di mana kalibrasi distribusi input mengurangi distorsi ekstrem, pemodelan korelasi antar-variabel menjaga keterkaitan realistis antara efisiensi mesin, konsumsi energi, dan emisi, serta kontrol sensor otomatis berfungsi sebagai sistem umpan balik yang menekan fluktuasi operasional. Dengan demikian, otomatisasi hijau tidak hanya meningkatkan kinerja rata-rata, tetapi juga memperkuat ketahanan sistem produksi terhadap ketidakpastian proses.

Distribusi hasil simulasi memperlihatkan perubahan pola kurva, di mana seluruh skenario efisiensi menunjukkan bentuk right-skewed distribution, menandakan potensi peningkatan efisiensi yang lebih besar pada perusahaan dengan kinerja rendah. Pola distribusi ini divisualisasikan pada Gambar 2, yang menunjukkan pergeseran kurva konsumsi energi dan emisi CO_2 menuju nilai yang lebih rendah pada Skenario 3.



Gambar 2. Distribusi Hasil Simulasi Efisiensi Dan Emisi Antar Skenario

p-ISSN: 2803-1507 e-ISSN: 2803-1531

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperkuat efektivitas metode Simulasi *Monte Carlo* dalam mengukur ketidakpastian dan hubungan probabilistik antara efisiensi operasional serta dampak lingkungan. Pendekatan ini tidak hanya membuktikan potensi penerapan teknologi hijau dalam meningkatkan efisiensi, tetapi juga memberikan dasar empiris bagi manajemen dan pembuat kebijakan industri untuk merumuskan strategi operasional yang berorientasi pada produktivitas tinggi dan keberlanjutan lingkungan.

3.2. Diskusi

Hasil simulasi Monte Carlo menunjukkan bahwa penerapan strategi efisiensi energi dan otomatisasi hijau secara nyata meningkatkan efisiensi operasional sekaligus menurunkan emisi karbon pada industri manufaktur hijau. Alih-alih mengulang angka peningkatan dan penurunan yang telah disajikan pada bagian hasil, diskusi ini menekankan bahwa otomatisasi hijau menciptakan sistem produksi yang lebih stabil, adaptif, dan tahan terhadap variasi input energi dan output produksi. Penurunan deviasi hasil simulasi mencerminkan bahwa sistem kontrol digital dan sensor energi mampu meredam fluktuasi operasional melalui mekanisme umpan balik real-time. Analisis sensitivitas mengidentifikasi bahwa efisiensi mesin menjadi faktor paling dominan terhadap efisiensi total (35,4%), disusul konsumsi energi (31,7%) dan utilisasi mesin (18,2%). Hasil ini memperlihatkan bahwa peningkatan performa mesin dan pengendalian penggunaan energi merupakan kunci utama dalam peningkatan efisiensi operasional secara menyeluruh (Tan et al., 2024).

Temuan ini memiliki implikasi langsung bagi manajemen industri, yaitu bahwa strategi investasi sebaiknya diprioritaskan pada peningkatan efisiensi mesin dan optimalisasi sistem pengendalian energi, dibandingkan intervensi yang bersifat administratif atau berdampak terbatas. Temuan ini memperkuat hasil penelitian (Altın, 2024) yang menunjukkan bahwa adopsi teknologi efisiensi energi berperan penting dalam menekan konsumsi energi dan emisi tanpa menurunkan produktivitas. Namun, penelitian ini melangkah lebih jauh karena menggunakan pendekatan probabilistik melalui Simulasi Monte Carlo, yang memungkinkan analisis ketidakpastian dan variasi antar faktor dengan lebih realistis dibandingkan pendekatan deterministik yang digunakan oleh studi sebelumnya (Mundu et al., 2024). Pendekatan ini sejalan dengan penelitian (Gabriel Osabohien et al., 2024) yang menilai efektivitas SMC dalam mengelola risiko operasional, namun penelitian ini memperluas penerapan SMC pada konteks efisiensi energi dan lingkungan secara simultan. Selain itu, perbandingan dengan studi (Herojeet et al., 2023) memperlihatkan bahwa model berbasis simulasi probabilistik menghasilkan hasil yang lebih representatif terhadap kondisi industri sebenarnya. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi dalam memperluas kerangka teoritis manajemen operasi hijau dengan menampilkan hubungan empiris antara efisiensi teknis, performa energi, dan dampak lingkungan dalam satu model terpadu (Bampatsou et al., 2024).

Beberapa hasil memperlihatkan dinamika yang tidak sepenuhnya sesuai dengan ekspektasi awal. Meskipun perusahaan dengan efisiensi mesin tinggi menunjukkan performa operasional lebih baik, variasi emisi karbon pada kelompok tersebut tetap besar akibat ketergantungan terhadap sumber energi berbasis fosil. Artinya, peningkatan efisiensi teknis belum sepenuhnya menjamin penurunan emisi apabila sumber energi belum beralih ke energi bersih (Wei et al., 2023). Selain itu, hasil distribusi lognormal pada variabel konsumsi energi dan emisi menunjukkan adanya kelompok perusahaan yang masih memiliki tingkat emisi jauh di atas rata-rata industri. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan implementasi teknologi hijau antar perusahaan, terutama di kalangan usaha kecil dan menengah yang belum memiliki sumber daya memadai untuk menerapkan sistem digitalisasi energi (Herce et al., 2024). Fenomena tersebut menjadi sinyal penting bahwa strategi efisiensi energi memerlukan dukungan kebijakan dan akses teknologi agar manfaatnya dapat dirasakan secara merata di seluruh sektor (Osicka et al., 2023).

Secara teoritis, penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan model manajemen operasi hijau dengan menghadirkan kerangka simulasi probabilistik yang mengintegrasikan efisiensi operasional dan dampak lingkungan (Porcelli et al., 2023). Model ini memperluas pendekatan klasik dalam analisis efisiensi energi yang umumnya bersifat deterministik menjadi model yang mempertimbangkan variasi dan ketidakpastian nyata di lapangan. Pendekatan ini tidak hanya menegaskan pentingnya efisiensi teknis, tetapi juga memperlihatkan interaksi kompleks antara variabel energi, produktivitas, dan emisi dalam sistem produksi (Ioshchikhes & Weigold, 2024). Secara praktis, hasil penelitian ini memberikan panduan kuantitatif bagi manajer industri untuk merancang strategi produksi yang optimal, seperti pemilihan mesin hemat energi, digitalisasi sistem kontrol produksi, dan pemanfaatan sumber energi rendah karbon (Hechelmann et al., 2023). Selain itu, model simulasi ini dapat digunakan oleh pembuat kebijakan sebagai dasar dalam menyusun insentif atau regulasi yang mendorong adopsi teknologi hijau di sektor manufaktur. Dengan demikian,

penelitian ini tidak hanya berkontribusi terhadap teori efisiensi operasional berkelanjutan, tetapi juga terhadap praktik manajerial dan kebijakan lingkungan industri (Garrido et al., 2024).

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu diakui untuk menjaga validitas hasilnya. Pertama, ukuran sampel yang terbatas pada 15 perusahaan mungkin belum sepenuhnya merepresentasikan keseluruhan industri manufaktur hijau di Indonesia. Kedua, data yang digunakan sebagian besar berasal dari laporan internal perusahaan yang berpotensi mengandung bias pengukuran atau inkonsistensi pencatatan. Ketiga, model simulasi masih belum memasukkan faktor eksternal seperti volatilitas harga energi, perubahan kebijakan lingkungan, dan gangguan rantai pasok global yang dapat memengaruhi hasil jangka panjang. Selain itu, penggunaan distribusi input yang dikalibrasi secara statistik meskipun akurat, tetap memiliki batasan dalam menggambarkan variasi ekstrem yang jarang terjadi (Dadi Kusumaningtyas & Purwantoro, 2023). Oleh karena itu, hasil simulasi ini perlu ditafsirkan dengan hati-hati dan dianggap sebagai estimasi probabilistik, bukan prediksi absolut terhadap performa operasional.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas cakupan sampel dan sektor agar model simulasi dapat menggambarkan kondisi industri manufaktur secara lebih komprehensif. Penggunaan pendekatan hybrid modeling seperti penggabungan Simulasi *Monte Carlo* dengan system dynamics atau machine learning dapat memperdalam analisis hubungan sebab-akibat dan prediksi jangka panjang (Setiawati et al., 2023). Penelitian di masa depan juga dapat mengintegrasikan aspek perilaku organisasi dan kebijakan energi terbarukan untuk memahami faktor sosial dan struktural yang memengaruhi implementasi efisiensi energi (Soekandar & Pratiwi, 2023). Selain itu, analisis *life-cycle assessment* dan evaluasi biaya-manfaat teknologi hijau perlu dilakukan agar dapat menilai dampak ekonomi dan lingkungan secara bersamaan (Rusliani et al., 2023). Dengan arah pengembangan tersebut, penelitian lanjutan dapat memperkuat peran simulasi probabilistik sebagai alat ilmiah dan praktis untuk mendorong keberlanjutan industri manufaktur hijau.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini membuktikan bahwa *Simulasi Monte Carlo* (SMC) efektif untuk menilai hubungan antara efisiensi operasional dan dampak lingkungan dalam industri manufaktur hijau, terutama dalam kondisi ketidakpastian data. Temuan utama menunjukkan bahwa otomatisasi hijau dan peningkatan efisiensi mesin mampu meningkatkan kinerja operasional sekaligus mengurangi emisi karbon, sehingga memperkuat peran teknologi digital dalam mendukung keberlanjutan produksi. Secara teoretis, penelitian ini berkontribusi melalui model simulasi probabilistik terintegrasi yang menghubungkan aspek operasional dan lingkungan dalam satu kerangka analisis. Model ini memperluas pendekatan efisiensi energi konvensional dengan mempertimbangkan variabilitas dan risiko proses produksi secara lebih realistis. Secara praktis, hasil penelitian memberikan dasar kuantitatif bagi manajer industri dalam menetapkan prioritas investasi pada efisiensi mesin dan pengendalian energi. Selain itu, model ini dapat dimanfaatkan oleh pembuat kebijakan sebagai alat pendukung dalam merancang insentif dan regulasi untuk mendorong adopsi teknologi hijau. Dengan demikian, penelitian ini mendukung pengambilan keputusan berbasis data, meningkatkan ketahanan operasional, dan berkontribusi pada penguatan praktik manufaktur yang lebih efisien dan berkelanjutan.

REFERENSI

Altın, H. (2024). The Impact of Energy Efficiency and Renewable Energy Consumption on Carbon Emissions in G7 countries. *International Journal of Sustainable Engineering*, *17*(1), 1–9. https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2319648

Amelia, E. R., Setiawan, D. B., Eduwin, E., Sagena, U. W., & B, J. (2024). Ironi Kebijakan Energi Pemerintah dan Peran Ormas di Dalamnya. *Kompak: Jurnal Ilmiah Komputerisasi Akuntansi*, *17*(2), 388–398. https://doi.org/10.51903/kompak.v17i2.2020

Badakhshan et al. (2024). Application of Simulation and Machine Learning in Supply Chain Management: A Synthesis of the Literature Using the Sim-ML Literature Classification Framework. *Computers and Industrial Engineering*, *198*, 110649. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110649

Bampatsou et al. (2024). Environmentally Adjusted Technical Efficiency and the Impact of Energy and Transport Taxes on the Eco-Efficiency Index of Greek Industry. *Journal of Industrial and Business Economics*, *51*(1), 73–97. https://doi.org/10.1007/s40812-023-00292-y

Batouta et al. (2023). Energy Efficiency in the Manufacturing Industry — A Tertiary Review and A Conceptual Knowledge-Based Framework. *Energy Reports*, *9*, 4635–4653.

https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.107

Dadi Kusumaningtyas, D., & Purwantoro, K. (2023). Peran Pilihan Pendekatan Pemecahan Masalah dan Karakteristik Risiko dalam Mengatasi Gangguan pada Risiko Rantai Pasokan. *Jurnal Ilmiah Manajemen, Ekonomi Dan Bisnis*, *2*(2), 37–63. https://doi.org/10.51903/jimeb.v2i2.603

Fang, B., Yu, J., Chen, Z., Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., Hamza, E. H., Rooney, D. W., & Yap, P. S. (2023). Artificial Intelligence for Waste Management in Smart Cities: A Review. *Environmental Chemistry Letters, 21*(4), 1959–1989. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01604-3

Gabriel Osabohien et al. (2024). Operational Risk Management, Financial Sector Stability and Sustainable Development in West Africa. *Discover Sustainability*, *5*(1), 214. https://doi.org/10.1007/s43621-024-00434-9

Garrido et al. (2024). Operations Management, Sustainability & Industry 5.0: A Critical Analysis and Future Agenda. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, *10*, 100141. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100141

Hechelmann et al. (2023). Decarbonisation Strategies for Manufacturing: A Technical and Economic Comparison. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *188*, 113797. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113797

Herce et al. (2024). Energy Efficiency Policies for Small and Medium-Sized Enterprises: A Review. *Sustainability*, *16*(3), 1023. https://doi.org/10.3390/su16031023

Herojeet et al. (2023). Probabilistic Modelling is Superior to Deterministic Approaches in the Human Health Risk Assessment: An Example from a Tribal Stretch in Central India. *Scientific Reports*, *13*(1), 1–26. https://doi.org/10.1038/s41598-023-45622-1

International Energy Agency. (2024). *World Energy Outlook*. IEA. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024

Ioshchikhes, B., & Weigold, M. (2024). Development of Stationary Expert Systems for Improving Energy Efficiency in Manufacturing. *Procedia CIRP*, *126*, 921–926. https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.351

Juliane Elsner et al. (2024). Data Quality in Environmental Assessment Methods: Implications for Operational Management in Manufacturing. *Procedia CIRP*, *122*, 807–812. https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.113

Lockan, M., & Kansara, R. (2024). Robust Optimization of the Energy Concept of an Industrial Process W.R.T. Uncertain Energy Costs and Environmental Conditions. *Journal of Environmental Management, 370*, 122023. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122023

Mundu et al. (2024). Simulation Modeling for Energy Systems Analysis: A Critical Review. *Energy Informatics*, *7*(1), 75. https://doi.org/10.1186/s42162-024-00374-8

Osicka et al. (2023). Energy Justice and Energy Democracy: Separated Twins, Rival Concepts or Just Buzzwords? *Energy Research and Social Science*, *104*, 103266. https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103266

Porcelli et al. (2023). Prospective Environmental Impact Assessment and Simulation Applied to an Emerging Biowaste-Based Energy Technology in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *176*, 113172. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113172

Razzaq, I., Amjad, M., Qamar, A., Asim, M., Ishfaq, K., Razzaq, A., & Mawra, K. (2023). Reduction in Energy Consumption and CO2 Emissions by Retrofitting an Existing Building to a Net Zero Energy Building for the Implementation of SDGs 7 and 13. *Frontiers in Environmental Science*, *10*, 1–11. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1028793

Rusliani et al. (2023). Analisis Strategi Inovasi Berkelanjutan pada UMKM di Kota Jambi. *Jurnal Ilmiah Manajemen, Ekonomi dan Bisnis*, *2*(2), 114–128. https://doi.org/10.51903/jimeb.v2i2.700

Kapp, S., Choi, J.-K., & Hong, T. (2023). Predicting Industrial Building Energy Consumption with Statistical and Machine-Learning Models Informed by Physical System Parameters. *Renewable and Sustainable*

p-ISSN: 2809-1655 e-ISSN: 2809-1981

Energy Reviews, 172, 113045. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113045

Setiawati et al. (2023). Pengaruh Persepsi Kemudahan, Keamanan dan Kerahasiaan, serta Kesiapan Teknologi Informasi terhadap Penggunaan E-Filling pada Wajib Pajak. *Jurnal Ilmiah Manajemen, Ekonomi Dan Bisnis*, *2*(3), 134–153. https://doi.org/10.51903/jimeb.v2i3.681

Soekandar, A. J., & Pratiwi, P. (2023). Difusi Inovasi untuk Keberlanjutan Bisnis Ritel Kecil: Strategi Pemasaran Digital. *Jurnal Ilmiah Manajemen, Ekonomi dan Bisnis*, *2*(1), 81–99. https://doi.org/10.51903/jimeb.v2i1.596

Sung, C. L., & Tuo, R. (2024). A Review on Computer Model Calibration. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, *16*(1), 1–23. https://doi.org/10.1002/wics.1645

Tan, B., Karabağ, O., & Khayyati, S. (2024). Energy-Efficient Production Control of a Make-to-Stock System with Buffer- and Time-Based Policies. *International Journal of Production Research*, *62*(16), 5809–5827. https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2298488

Theresa Marie Sohns et al. (2023). Green Business Process Management for Business Sustainability: A Case Study of Manufacturing Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs) from Germany. *Journal of Cleaner Production*, *401*, 136667. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136667

Wang et al. (2024). Prospective Techno-Economic and Life Cycle Assessment: A Review Across Established and Emerging Carbon Capture, Storage and Utilization (CCS/CCU) Technologies. *Frontiers in Energy Research*, *12*, 1–26. https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1412770

Wei et al. (2023). Economic and Technological Efficiency of Implementing Renewable Energy Technologies. *Sustainability*, *15*(11), 8802. https://doi.org/10.3390/su15118802

Wibisono, W., Handoko, S., & Afifudin. (2024). Public-Private Partnerships in Public Sector Management: Case Study Analysis of Efficiency and Sustainability Outcomes. *Journal of Management and Informatics*, *3*(3), 451–469. https://doi.org/10.51903/jmi.v3i3.55

Wibowo, M. C., & Santoso, J. T. (2024). Empowering Urban Farmers: An Asynchronous Learning Application for Greenhouse Management. *Journal of Technology Informatics and Engineering*, *3*(2), 138–150. https://doi.org/10.51903/jtie.v3i2.185

Zahra Homayouni et al. (2023). A Robust-Heuristic Optimization Approach to a Green Supply Chain Design with Consideration of Assorted Vehicle Types and Carbon Policies under Uncertainty. *Annals of Operations Research*, *324*(1), 395–435. https://doi.org/10.1007/s10479-021-03985-6