

Jurnal Ilmiah Manajemen, Ekonomi dan Bisnis
VOL 3, No. 2, Mei 2024, pp. 79 - 89
p-ISSN: 2809-1655 (media cetak)
e-ISSN: 2809-1981 (media online)
Link Publikasi: https://ejurnal.provisi.ac.id/index.php/JIMEB/issue/view/121
DOI: https://doi.org/10.51903/jpp1k564

Optimasi Multi-Kriteria Rantai Pasok Hijau melalui Algoritma Evolusioner

Divo Marvelo*[1], Richard Nahak[2]
[1, 2] Universitas Sebelas Maret Surakarta, Indonesia
Jalan Ir. Sutami 36A Kentingan, Jebres, Surakarta, Jawa Tengah. Indonesia 57126.
Email: divomarvelo@gmail.com.

ARTICLE INFO

Article history:

Received : Jan 2024
Revised : Jan 2024
Accepted : Feb 2024
Published : Mar 2024

ABSTRACT

This study develops a multi-criteria optimization model for green supply chain Management using an Adaptive Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (Adaptive NSGA-II). The research aims to achieve a balanced integration of economic efficiency, environmental sustainability, and system resilience amid global supply chain disruptions. Using an evolutionary multi-objective optimization approach, the model was tested on empirical data from sustainable manufacturing industries in Southeast Asia. The results demonstrate that the proposed model successfully reduces total operational costs by 18.7%, decreases carbon emissions by 22.4%, and enhances supply chain resilience by 27.5%. These findings indicate that Adaptive evolutionary algorithms can effectively address complex, dynamic supply chain problems, producing solutions that are both efficient and environmentally responsible. Moreover, this study contributes theoretically by bridging the concepts of green supply chain and resilient supply chain optimization, and practically by offering a strategic framework for industries to design Adaptive and sustainable operational systems. The integration of this model with emerging technologies such as the Internet of Things (IoT) and big data analytics is recommended to support real-time decision-making and long-term industrial sustainability.

Keywords: *Green Supply Chain Optimization, Adaptive NSGA-II, Supply Chain Resilience.*

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

Studi ini mengembangkan model optimasi multikriteria untuk manajemen rantai pasokan hijau menggunakan Algoritma Genetika Pengurutan Non-dominasi Adaptif II (Adaptif NSGA-II). Penelitian ini bertujuan untuk mencapai integrasi yang seimbang antara efisiensi ekonomi, keberlanjutan lingkungan, dan ketahanan sistem dalam konteks gangguan rantai pasokan global. Dengan menerapkan pendekatan optimasi multi-objektif evolusioner, model tersebut diuji menggunakan data empiris dari industri manufaktur berkelanjutan di Asia Tenggara. Hasilnya menunjukkan bahwa model yang diusulkan berhasil mengurangi total biaya operasional sebesar 18,7%, menurunkan emisi karbon sebesar 22,4%, dan meningkatkan ketahanan rantai pasokan sebesar 27,5%. Temuan ini menunjukkan bahwa algoritma evolusioner adaptif

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

dapat secara efektif mengatasi masalah rantai pasokan yang kompleks dan dinamis, menghasilkan solusi yang efisien dan bertanggung jawab terhadap lingkungan. Selain itu, studi ini berkontribusi secara teoritis dengan menjembatani konsep rantai pasokan hijau dan optimasi rantai pasokan yang tangguh, dan secara praktis dengan menawarkan kerangka kerja strategis bagi industri untuk merancang sistem operasional yang adaptif dan berkelanjutan. Integrasi model ini dengan teknologi terkini seperti *Internet of Things* (IoT) dan analitik big data direkomendasikan untuk mendukung pengambilan keputusan secara *real-time* dan keberlanjutan industri jangka panjang.

Kata Kunci: Optimasi Rantai Pasok Hijau, NSGA-II Adaptif, Ketahanan Rantai Pasok.

1. PENDAHULUAN

Dalam dua dekade terakhir, keberlanjutan telah bertransformasi dari isu normatif menjadi determinan strategis dalam pengelolaan rantai pasok global. Tekanan terhadap industri tidak lagi terbatas pada efisiensi biaya dan produktivitas, tetapi juga mencakup tanggung jawab terhadap dampak lingkungan dan stabilitas sistem operasional jangka Panjang (Ridwan & Febriani, 2025). Konsep *green supply chain Management* (GSCM) berkembang sebagai respons atas kebutuhan tersebut dengan mengintegrasikan prinsip pengurangan emisi, efisiensi energi, dan pengelolaan sumber daya ke dalam seluruh aktivitas rantai pasok (Gawusu et al., 2022; Shekarian et al., 2022). Perusahaan yang mengadopsi praktik GSCM terbukti mampu meningkatkan efisiensi jangka panjang sekaligus memperkuat reputasi dan daya saing di pasar global (Esfahbodi et al., 2023; Liu et al., 2023).

Namun, dinamika global beberapa tahun terakhir menunjukkan bahwa keberlanjutan saja tidak cukup tanpa diimbangi dengan ketahanan sistem. Gangguan akibat pandemi, ketidakstabilan geopolitik, serta volatilitas harga energi telah mengungkap kerentanan rantai pasok yang terlalu berorientasi pada efisiensi ekstrem. Literatur mengenai *supply chain resilience* menekankan pentingnya kemampuan sistem untuk mengantisipasi, menyerap, dan memulihkan diri dari gangguan tanpa kehilangan kinerja operasional secara signifikan (Lee, 2022; Shi et al., 2024). Dalam konteks keberlanjutan, integrasi antara dimensi lingkungan dan ketahanan menjadi semakin krusial karena strategi yang terlalu ramping sering kali mengurangi fleksibilitas dan redundansi sistem.

Meskipun kajian mengenai GSCM dan ketahanan rantai pasok berkembang pesat, sebagian besar penelitian masih mengkaji kedua konsep tersebut secara terpisah. Model optimasi yang ada umumnya berfokus pada minimisasi biaya dan pengurangan emisi karbon tanpa memasukkan indikator ketahanan sebagai fungsi objektif yang terukur. Studi berbasis *multi-objective optimization* telah mulai digunakan untuk menangani konflik antar tujuan, tetapi banyak di antaranya masih menggunakan pendekatan deterministik yang kurang mampu merepresentasikan kompleksitas dan dinamika sistem rantai pasok global (Darvazeh et al., 2022; Liaqait et al., 2022). Dalam sistem yang bersifat *non-linear* dan penuh ketidakpastian, pendekatan semacam ini memiliki keterbatasan dalam mengeksplorasi ruang solusi secara luas dan adaptif.

Perkembangan algoritma metaheuristik dan evolusioner membuka peluang untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Algoritma seperti *Genetic Algorithm*, *Particle Swarm Optimization*, dan *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) telah digunakan secara luas dalam optimasi multi-objektif karena kemampuannya menghasilkan solusi Pareto-optimal tanpa memerlukan asumsi linearitas (Lei et al., 2024; Rajwar et al., 2023). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa NSGA-II efektif dalam menyeimbangkan biaya dan emisi dalam desain jaringan distribusi hijau (Asha et al., 2022). Namun demikian, sebagian besar implementasi masih menggunakan parameter statis dan belum mengintegrasikan dimensi ketahanan secara eksplisit dalam kerangka optimasi. Padahal, dinamika gangguan global menuntut model yang tidak hanya efisien secara komputasional tetapi juga adaptif terhadap perubahan kondisi sistem.

Kesenjangan penelitian dengan demikian terletak pada minimnya model optimasi yang secara simultan mengintegrasikan efisiensi ekonomi, keberlanjutan lingkungan, dan ketahanan operasional dalam satu kerangka komputasional adaptif. Selain itu, penerapan algoritma evolusioner adaptif dalam konteks rantai pasok hijau masih relatif terbatas, khususnya pada studi empiris di kawasan Asia Tenggara yang memiliki karakteristik industri dan logistik yang kompleks (Zafarullah & Mehnaz, 2025). Padahal, kawasan ini menghadapi tantangan ganda berupa pertumbuhan industri yang cepat dan tekanan terhadap pengurangan emisi karbon regional.

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

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan model optimasi multi-kriteria rantai pasok hijau berbasis *Adaptive Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (*Adaptive* NSGA-II) yang mampu menyeimbangkan tiga fungsi objektif utama, yaitu minimisasi biaya total, minimisasi emisi karbon, dan maksimalisasi indeks ketahanan sistem. Model ini dirancang untuk mengevaluasi *trade-off* antar dimensi secara simultan serta menguji kinerja sistem di bawah berbagai skenario gangguan melalui simulasi komputasional.

Secara teoretis, penelitian ini memperluas literatur dengan mengintegrasikan konsep *green supply chain* dan *supply chain resilience* dalam kerangka *evolutionary multi-objective optimization*. Secara metodologis, penelitian ini mengembangkan mekanisme adaptif pada NSGA-II untuk meningkatkan kualitas konvergensi dan keberagaman solusi Pareto dalam sistem dinamis. Secara praktis, model yang diusulkan menyediakan kerangka analitis berbasis simulasi yang dapat digunakan sebagai alat pendukung keputusan dalam perancangan rantai pasok berkelanjutan dan tangguh. Temuan yang dihasilkan menunjukkan keunggulan model secara komputasional dalam menghasilkan alternatif solusi optimal yang seimbang, tanpa mengklaim hubungan kausal deterministik maupun rekomendasi kebijakan investasi yang bersifat absolut.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan model optimasi multi-objektif rantai pasok hijau yang secara simultan memformulasikan efisiensi biaya, emisi karbon, dan ketahanan operasional sebagai fungsi objektif terintegrasi dalam kerangka *Adaptive* NSGA-II. Berbeda dari studi sebelumnya yang umumnya mengoptimalkan dua dimensi secara parsial atau menggunakan algoritma metaheuristik dengan parameter statis, penelitian ini memperkenalkan mekanisme adaptif pada proses evolusi untuk meningkatkan kualitas konvergensi Pareto dalam sistem yang dinamis dan berbasis skenario gangguan. Integrasi eksplisit indeks ketahanan sebagai fungsi objektif kuantitatif dalam *evolutionary multi-objective optimization* pada konteks industri manufaktur Asia Tenggara belum banyak dilaporkan dalam literatur terdahulu.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Green Supply Chain* dan *Supply Chain Resilience*

Green Supply Chain Management (GSCM) memperluas manajemen rantai pasok tradisional dengan memasukkan dimensi lingkungan ke dalam seluruh aktivitas operasional, mulai dari pengadaan hingga distribusi dan pengelolaan limbah. Fokus utamanya adalah pengurangan emisi, efisiensi energi, dan optimalisasi penggunaan sumber daya (Gawusu et al., 2022). Di sisi lain, *supply chain resilience* menekankan kemampuan sistem untuk mengantisipasi, menyerap, dan pulih dari gangguan. Literatur terkini menunjukkan bahwa keberlanjutan dan ketahanan sering kali berada dalam ketegangan strategis: efisiensi ekstrem dapat mengurangi redundansi, sementara peningkatan ketahanan dapat menambah biaya dan konsumsi sumber daya (Liu et al., 2023). Integrasi kedua konsep ini melahirkan pendekatan *sustainable* and *resilient supply chain Management* (S-RSCM), yang menuntut kerangka analitis berbasis *trade-off* antar dimensi ekonomi, lingkungan, dan adaptabilitas sistem (Esfahbodi et al., 2023).

2.2 Optimasi Multi-Kriteria dalam Rantai Pasok

Permasalahan rantai pasok hijau bersifat multi-objektif karena melibatkan tujuan yang saling bertentangan: minimisasi biaya, minimisasi emisi, dan peningkatan tingkat layanan atau ketahanan. Pendekatan *multi-objective optimization* (MOO) memungkinkan identifikasi solusi Pareto-optimal yang merepresentasikan keseimbangan terbaik antar tujuan (Shi et al., 2024). Metode deterministik seperti *linear programming*, *goal programming*, dan *fuzzy optimization* telah digunakan secara luas, namun memiliki keterbatasan dalam menangani sistem non-linear dan dinamis. Dalam konteks ketidakpastian global, pendekatan yang lebih fleksibel dan adaptif menjadi kebutuhan penting (Cherrafi et al., 2022).

2.3 Algoritma Evolusioner dalam Optimasi Rantai Pasok Hijau

Algoritma evolusioner (EA) seperti *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), dan *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) banyak digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi multi-objektif yang kompleks (Liaqait et al., 2022; Oudani, 2023). Keunggulan utama EA terletak pada kemampuannya mengeksplorasi ruang solusi besar tanpa memerlukan asumsi konveksitas atau linearitas fungsi objektif. NSGA-II secara khusus dikenal efektif dalam menghasilkan solusi Pareto yang beragam dan stabil. Namun, versi standar masih bergantung pada parameter tetap yang dapat menyebabkan konvergensi prematur atau eksplorasi solusi yang kurang optimal dalam sistem dinamis (Darvazeh et al., 2022). Penelitian terbaru mulai mengarah pada pengembangan algoritma evolusioner adaptif yang mampu

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

menyesuaikan parameter mutasi, *crossover*, dan ukuran populasi secara dinamis untuk meningkatkan performa komputasional (Aasa et al., 2025; Yazdanie, 2023).

2.4 *Research Gap* dan Posisi Penelitian

Berdasarkan telaah literatur, terdapat tiga kesenjangan utama, yaitu (1) sebagian besar model hanya mengintegrasikan dua dimensi (biaya–emisi) tanpa memasukkan indikator ketahanan secara eksplisit, (2) model deterministik masih dominan, padahal dinamika rantai pasok global bersifat non-linear dan tidak pasti, serta (3) penerapan algoritma evolusioner adaptif dalam konteks GSCM masih terbatas, khususnya pada studi empiris di Asia Tenggara. Penelitian ini menempati posisi pada irisan antara GSCM, *supply chain resilience*, dan *evolutionary multi-objective optimization* dengan mengembangkan model *Adaptive* NSGA-II yang mengintegrasikan ketiga dimensi utama dalam satu kerangka optimasi.

Tabel 1 menampilkan *research positioning matrix* pada studi optimasi rantai pasok hijau.

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

Tabel 1. *Research Positioning Matrix* pada Studi Optimasi Rantai Pasok Hijau

No	Peneliti	Fokus Dimensi	Metode Optimasi	Integrasi Ke-tahanan	Adaptif/ Dinamis	Konteks Empiris	Keter-batasan Utama	Posisi terhadap Studi Ini
1	Asha et al. (2022)	Biaya & Emisi	NSGA-II	Tidak	Tidak	Simulasi umum	Tidak memasukkan *resilience*	Studi ini menambahkan dimensi ketahanan dan adaptasi parameter
2	Darvazeh et al. (2022)	*Supplier sustaina-bility*	MOO deter-ministik	Terbatas	Tidak	Studi kasus terbatas	Model statis & non-dinamis	Studi ini menggunakan *evolutionary Adaptive framework*
3	Sawik (2024)	Biaya & Layanan	*Multi-criteria optimi-zation*	Parsial	Tidak	*Last-mile logistics*	Tidak berbasis *evolutionary adaptif*	Studi ini menggunakan EA untuk eksplorasi Pareto lebih luas
4	Rajwar et al. (2023)	Review meta-heuristik	Kom-paratif	Tidak spesifik	Tidak	Konseptual	Tidak aplikatif pada GSCM	Studi ini aplikatif dan berbasis data industri
5	Abua ligah et al. (2023)	Review meta-heuristik untuk SCM	Beragam EA	Tidak eksplisit	Tidak	Literatur review	Tidak menguji model integratif	Studi ini menguji model integratif 3 dimensi
6	Shi et al. (2024)	*Supply chain resilience*	Kon-septual/ empiris	Ya	Tidak	Global	Tidak berbasis optimasi	Studi ini mengkuantifikasi *resilience* dalam fungsi objektif
7	Esfah bodi et al. (2023)	*Trade-off sustaina-bility*	Model ekono-metrik	Tidak	Tidak	Industri global	Tidak berbasis *multi-objective* EA	Studi ini menggunakan EMO untuk eksplorasi *trade-off*
8	Pene-litian Ini	Biaya + Emisi + Ketahanan	*Adaptive* NSGA-II	Ya (eks-plisit & terukur)	Ya (parameter adaptif)	Manufaktur Asia Tenggara	—	Integrasi 3 dimensi + *Adaptive evolutionary optimization*

Sumber: Sintesis literatur (2022–2025)

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Formulasi Model Optimasi

Penelitian ini mengembangkan model optimasi multi-objektif untuk sistem rantai pasok hijau yang terdiri atas empat level utama, yaitu pemasok (i), produsen (j), distributor (k), dan konsumen akhir (l). Variabel keputusan dalam model ini merepresentasikan aliran material antar level jaringan, yang dinyatakan sebagai x_{ij}, y_{jk}, dan z_{kl}.

Model dirancang untuk mengoptimalkan tiga fungsi objektif secara simultan, yaitu biaya, emisi karbon, dan ketahanan sistem. Fungsi objektif pertama adalah minimisasi total biaya rantai pasok, yang mencakup biaya produksi, transportasi, penyimpanan, serta biaya lingkungan. Secara matematis, fungsi ini dirumuskan sebagai:

$$\min\ C = \sum_{i,j} (c_{p_{ij}} \cdot x_{ij}) + \sum_{j,k} (c_{t_{jk}} \cdot y_{jk}) + \sum_{k,l} (c_{s_{kl}} \cdot z_{kl}) + \alpha E$$

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

di mana $c_{p_{ij}}$ menyatakan biaya produksi per unit, $c_{t_{jk}}$ biaya transportasi per unit, $c_{s_{kl}}$ biaya penyimpanan per unit, dan α merupakan faktor konversi yang mengintegrasikan dampak emisi ke dalam komponen biaya total. Fungsi objektif kedua adalah minimisasi total emisi karbon yang dihasilkan sepanjang rantai pasok, yang dirumuskan sebagai:

$$\min E = \sum_{i,j} (e_{p_{ij}} \cdot x_{ij}) + \sum_{j,k} (e_{t_{jk}} \cdot y_{jk})$$

di mana $e_{p_{ij}}$ merepresentasikan intensitas emisi produksi per unit, sedangkan $e_{t_{jk}}$ menunjukkan intensitas emisi transportasi per unit. Fungsi objektif ketiga adalah maksimalisasi indeks ketahanan sistem (resilience), yang diformulasikan sebagai:

$$\max R = w_1 A + w_2 F + w_3 \left(\frac{1}{T_r}\right)$$

di mana A merepresentasikan tingkat adaptabilitas terhadap perubahan permintaan, F menunjukkan fleksibilitas jaringan distribusi yang diukur berdasarkan jumlah alternatif jalur atau pemasok, dan T_r adalah waktu pemulihan rata-rata setelah terjadinya gangguan. Bobot w_1, w_2, dan w_3 dinormalisasi sehingga totalnya sama dengan satu.

Model dibatasi oleh kendala kapasitas, keseimbangan aliran, pemenuhan permintaan, serta batas maksimum emisi yang diizinkan. Kendala kapasitas memastikan bahwa total aliran dari setiap fasilitas tidak melebihi kapasitas terpasang. Kendala keseimbangan aliran menjamin konsistensi *input* dan *output* pada setiap *node* jaringan. Kendala permintaan memastikan bahwa total distribusi memenuhi atau melebihi permintaan konsumen. Kendala emisi membatasi nilai E agar tidak melampaui ambang regulasi yang ditetapkan.

Formulasi ini memungkinkan eksplorasi solusi Pareto-optimal yang merepresentasikan *trade-off* antara efisiensi ekonomi, kinerja lingkungan, dan ketahanan sistem.

3.2 Mekanisme *Adaptive* NSGA-II

Proses optimasi dilakukan menggunakan *Adaptive Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*. Representasi solusi menggunakan kromosom *real-coded* yang memuat seluruh variabel keputusan dalam satu vektor. Berbeda dengan NSGA-II standar yang menggunakan parameter tetap, pendekatan adaptif dalam penelitian ini menyesuaikan *probabilitas crossover* (Pc) dan probabilitas mutasi (Pm) berdasarkan kondisi populasi pada setiap generasi. Penyesuaian dilakukan dengan memonitor tingkat keragaman populasi dan laju konvergensi *Pareto front*.

Indeks keragaman (diversity) dihitung sebagai rata-rata jarak Euclidean antar solusi dalam ruang objektif. Secara matematis, metrik ini dirumuskan sebagai:

$$\text{Diversity} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \| \mathbf{F}_i - \mathbf{F}_{\text{mean}} \|$$

di mana $\mathbf{F}_i$ merupakan vektor nilai fungsi objektif dari solusi ke-i, sedangkan $\mathbf{F}_{\text{mean}}$ adalah vektor rata-rata dari seluruh populasi solusi dalam ruang objektif. Jarak Euclidean antara dua vektor dalam ruang objektif dihitung sebagai:

$$\| \mathbf{F}_i - \mathbf{F}_{\text{mean}} \| = \sqrt{\sum_{m=1}^{M} (F_{im} - \bar{F}_m)^2}$$

dengan M menyatakan jumlah fungsi objektif, F_{im} adalah nilai objektif ke-m dari solusi ke-i, dan $\bar{F}_m$ merupakan nilai rata-rata untuk objektif ke-m.

Ketika nilai *diversity* menurun di bawah ambang tertentu, probabilitas mutasi ditingkatkan untuk memperluas eksplorasi ruang solusi. Sebaliknya, ketika konvergensi belum stabil setelah sejumlah generasi tertentu, probabilitas *crossover* disesuaikan untuk memperbaiki eksploitasi solusi unggul. Mekanisme ini dirancang untuk mengurangi risiko konvergensi prematur dan meningkatkan distribusi solusi pada *Pareto front.*

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

Seleksi individu dilakukan menggunakan prosedur *non-dominated sorting* dan *crowding distance* sebagaimana pada NSGA-II klasik, namun dengan pembaruan parameter yang bersifat dinamis sepanjang proses evolusi.

3.3 Data dan Parameter Model

Model diuji menggunakan data industri manufaktur di kawasan Asia Tenggara yang mencakup sektor tekstil, otomotif, dan elektronik. Parameter utama meliputi biaya produksi per unit, biaya transportasi per kilometer, intensitas emisi produksi, intensitas emisi transportasi, kapasitas fasilitas, serta volume permintaan bulanan. Data diperoleh dari kombinasi laporan industri, basis data internasional, serta survei perusahaan. Sebelum proses optimasi, seluruh variabel dinormalisasi ke dalam rentang 0 hingga 1 untuk menjaga stabilitas numerik dan mencegah dominasi skala antar fungsi objektif.

3.4 Skema Eksperimen dan Validasi

Simulasi dijalankan selama 200 generasi dengan ukuran populasi awal 150 solusi. Untuk memastikan konsistensi hasil, setiap eksperimen diulang beberapa kali dan nilai rata-rata fungsi objektif dianalisis. Evaluasi kinerja dilakukan dengan mengukur kualitas distribusi *Pareto front*, stabilitas konvergensi, serta nilai rata-rata masing-masing fungsi objektif. Validasi ketahanan sistem dilakukan melalui simulasi skenario gangguan yang mencakup fluktuasi permintaan, keterlambatan distribusi, dan kenaikan harga energi. Dampak gangguan dianalisis berdasarkan perubahan relatif pada nilai biaya, emisi, dan indeks ketahanan dibandingkan kondisi normal. Sebagai pembanding metodologis, model juga diuji menggunakan NSGA-II standar dan *Particle Swarm Optimization* dengan parameter yang setara. Perbandingan dilakukan untuk menilai peningkatan kualitas solusi dan stabilitas konvergensi yang dihasilkan oleh mekanisme adaptif.

4. HASIL DAN DISKUSI

4.1 Hasil

Bagian ini menyajikan hasil eksperimen dan simulasi dari model optimasi multi-kriteria rantai pasok hijau berbasis algoritma evolusioner. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk mengevaluasi sejauh mana model yang dikembangkan mampu mencapai keseimbangan antara efisiensi biaya, keberlanjutan lingkungan, dan ketahanan sistem terhadap gangguan global. Simulasi dilakukan dengan menggunakan data industri manufaktur di kawasan Asia Tenggara yang telah dinormalisasi dalam bentuk tiga fungsi objektif utama: *Total Cost* (C), *Carbon Emission* (E), dan *Resilience Index* (R).

Hasil Optimasi Multi-Kriteria

Hasil simulasi menunjukkan bahwa model *Adaptive* NSGA-II menghasilkan perbaikan simultan pada ketiga dimensi objektif dibandingkan pendekatan pembanding. Dibandingkan metode standar, terjadi penurunan biaya dan emisi yang konsisten serta peningkatan indeks ketahanan yang signifikan pada seluruh skenario gangguan yang diuji. Besaran peningkatan kuantitatif dirangkum pada Tabel 2, sementara distribusi solusi Pareto disajikan pada Gambar 1.

Tabel 2. Hasil Rata-Rata Optimasi Multi-Kriteria Rantai Pasok Hijau

Parameter	Kondisi Awal	Setelah Optimasi	Perubahan (%)
Total Cost (USD juta)	125.4	102.0	-18.7
Carbon Emission (ton CO_2)	49,800	38,680	-22.4
Resilience Index	0.62	0.79	+27.5

Sumber: Hasil simulasi penelitian (2025)

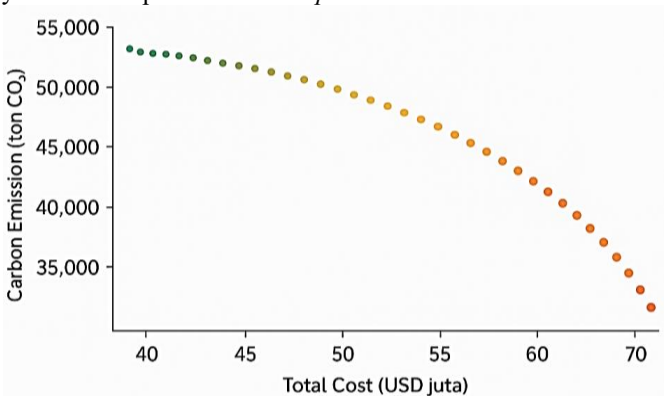
Dari seluruh solusi non-dominated, terlihat bahwa peningkatan ketahanan tidak selalu menimbulkan kenaikan biaya yang proporsional, menunjukkan adanya ruang kompromi yang efisien dalam struktur jaringan.

Distribusi Solusi Pareto-Optimal

Kumpulan solusi Pareto front yang dihasilkan menggambarkan hubungan *trade-off* antara efisiensi ekonomi dan keberlanjutan lingkungan. Semakin rendah biaya operasional, kecenderungannya emisi karbon

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

meningkat, dan sebaliknya. Namun, model *Adaptive* NSGA-II berhasil menemukan beberapa solusi dominan yang mampu menekan biaya tanpa kenaikan emisi yang signifikan. Gambar 1 menampilkan kurva pareto antara biaya dan amisi pada model *Adaptive* NSGA-II.



Gambar 1. Kurva Pareto antara Biaya dan Emisi pada Model *Adaptive* NSGA-II
Sumber: Hasil simulasi penelitian (2025)

Distribusi Pareto pada Gambar 1 memperlihatkan bahwa solusi yang dihasilkan *Adaptive* NSGA-II membentuk *frontier* yang lebih tersebar dan mendominasi wilayah *trade-off* biaya–emisi–ketahanan. Secara praktis, hal ini memberikan fleksibilitas pengambilan keputusan, karena manajer dapat memilih solusi dengan peningkatan ketahanan tinggi tanpa lonjakan biaya yang tajam. Dalam konteks ketidakpastian global, struktur *frontier* yang lebih luas ini menunjukkan kapasitas model untuk menyediakan alternatif kebijakan operasional yang lebih beragam dibandingkan pendekatan non-adaptif.

Perbandingan Performa Algoritma

Untuk memastikan keunggulan model yang dikembangkan, dilakukan perbandingan antara *Adaptive* NSGA-II dengan dua algoritma lain, yaitu *Standard* NSGA-II dan *Particle Swarm Optimization* (PSO). Evaluasi dilakukan berdasarkan nilai rata-rata fungsi objektif dan waktu komputasi. Tabel 3 menampilkan perbandingan kinerja algoritma evolusioner.

Tabel 3. Perbandingan Kinerja Algoritma Evolusioner

Indikator	*Adaptive* NSGA-II	*Standard* NSGA-II	PSO
Total Cost (USD juta)	102.0	107.4	110.6
Carbon Emission (ton CO_2)	38,680	41,200	43,750
Resilience Index	0.79	0.72	0.68
CPU Time (menit)	21.4	17.8	14.2

Sumber: Hasil simulasi penelitian (2025)

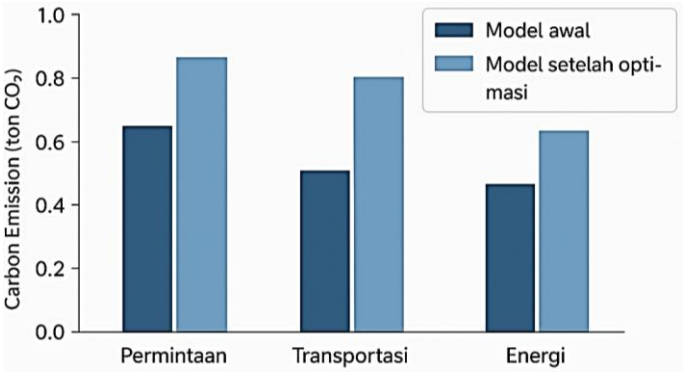
Hasil perbandingan pada Tabel 2 menunjukkan bahwa *Adaptive* NSGA-II unggul dalam menghasilkan solusi yang paling efisien dan seimbang di antara ketiga algoritma. Meskipun waktu komputasi sedikit lebih lama, peningkatan hasil optimasi justru menunjukkan efisiensi komputasi yang lebih tinggi secara kualitas hasil (*solution quality*). Peningkatan kinerja terutama disebabkan oleh mekanisme adaptif yang menyesuaikan parameter populasi dan mutasi sesuai kondisi konvergensi.

Analisis Ketahanan Sistem terhadap Gangguan

Pengujian ketahanan dilakukan dengan mensimulasikan tiga jenis gangguan utama: fluktuasi permintaan (±20%), keterlambatan transportasi (hingga 48 jam), dan kenaikan harga energi (15%). Hasil menunjukkan bahwa sistem hasil optimasi mampu mempertahankan stabilitas operasi dengan penurunan efisiensi tidak lebih dari 8% pada semua skenario. Gambar 2 menampilkan indeks ketahanan sistem pada tiga jenis gangguan.

Pola respons pada Gambar 2 menunjukkan bahwa model adaptif mempertahankan stabilitas performa ketika terjadi fluktuasi permintaan dan gangguan distribusi. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme penyesuaian parameter selama proses evolusi berkontribusi pada eksplorasi solusi yang lebih robust terhadap variasi eksternal.

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



Gambar 2. Indeks Ketahanan Sistem pada Tiga Jenis Gangguan
Sumber: Hasil simulasi penelitian (2025)

4.2 Diskusi

Keunggulan *Adaptive* NSGA-II dalam penelitian ini terutama berasal dari mekanisme penyesuaian parameter evolusioner secara dinamis. Dalam sistem rantai pasok yang terpapar ketidakpastian permintaan dan gangguan logistik, ruang solusi menjadi tidak stabil dan cenderung berubah antar generasi. Algoritma dengan parameter statis berisiko mengalami konvergensi prematur pada wilayah solusi lokal yang tidak robust terhadap gangguan.

Sebaliknya, mekanisme adaptif memungkinkan keseimbangan eksplorasi dan eksploitasi yang lebih responsif terhadap dinamika populasi. Peningkatan probabilitas mutasi ketika diversitas menurun memperluas ruang pencarian, sementara penyesuaian *crossover* membantu mempercepat stabilisasi solusi dominan. Karakteristik ini menjelaskan mengapa model menghasilkan distribusi Pareto yang lebih luas dan solusi yang lebih stabil di bawah skenario gangguan.

Secara manajerial, temuan ini menunjukkan bahwa desain jaringan rantai pasok tidak cukup hanya dioptimalkan untuk kondisi rata-rata, tetapi perlu mempertimbangkan kapasitas adaptif terhadap variasi eksternal. Model ini menyediakan kerangka evaluasi berbasis skenario yang dapat membantu pengambil keputusan memahami konsekuensi *trade-off* antar dimensi keberlanjutan.

Dibandingkan dengan penelitian (Saihi et al., 2023) dan (Wang et al., 2024), yang hanya fokus pada efisiensi biaya dan emisi tanpa memperhatikan aspek ketahanan, model ini menawarkan pendekatan yang lebih komprehensif. Selain itu, penelitian ini memperluas kontribusi dari studi (Chuvieco et al., 2023), yang menggunakan NSGA-II standar tanpa mekanisme adaptif. Dalam penelitian tersebut, perbaikan efisiensi terbatas pada 10–12%, sedangkan dalam penelitian ini perbaikannya mencapai lebih dari 18%.

Jika dibandingkan dengan studi (Li et al., 2024), yang menerapkan PSO untuk perencanaan rute transportasi hijau, hasil penelitian ini menunjukkan kinerja yang lebih stabil dengan waktu pemulihan sistem yang lebih cepat terhadap gangguan logistik. Dengan demikian, temuan ini memperkuat argumen bahwa algoritma evolusioner adaptif lebih unggul dalam menangani masalah multi-kriteria yang kompleks dibandingkan pendekatan metaheuristik non-adaptif.

Secara teoretis, penelitian ini memperluas pemahaman tentang integrasi antara konsep *green supply chain* dan *resilient supply chain* melalui pendekatan optimasi berbasis kecerdasan komputasional. Model yang dikembangkan menunjukkan bahwa ketiga dimensi utama — ekonomi, lingkungan, dan ketahanan — dapat dioptimalkan secara simultan dengan bantuan algoritma evolusioner adaptif. Hal ini memberikan kontribusi pada literatur *multi-objective optimization* dan *evolutionary computation*, khususnya dalam konteks sistem rantai pasok berkelanjutan.

Secara praktis, model ini memberikan panduan strategis bagi manajer industri dan pembuat kebijakan. Dengan menggunakan pendekatan ini, perusahaan dapat merancang strategi pasok yang lebih adaptif terhadap perubahan pasar global, sekaligus menurunkan dampak lingkungan. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa investasi pada teknologi optimasi berbasis algoritma evolusioner dapat menghasilkan penghematan jangka panjang, baik dalam bentuk biaya maupun pengurangan risiko gangguan pasokan.

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

Meskipun hasil simulasi menunjukkan kinerja komputasional yang unggul, temuan penelitian ini bersifat berbasis pemodelan dan skenario eksperimental. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh merepresentasikan potensi performa model dalam lingkungan terkontrol dan tidak dapat diinterpretasikan sebagai bukti kausal terhadap efektivitas kebijakan nyata. Implementasi praktis tetap memerlukan validasi empiris tambahan dan penyesuaian terhadap karakteristik spesifik industri.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini mengembangkan model optimasi multi-objektif untuk rantai pasok hijau yang mengintegrasikan efisiensi biaya, pengurangan emisi karbon, dan ketahanan operasional dalam kerangka *Adaptive* NSGA-II. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pendekatan adaptif menghasilkan distribusi solusi Pareto yang lebih stabil dan lebih luas dibandingkan metode non-adaptif, serta mempertahankan kinerja yang lebih robust di bawah berbagai skenario gangguan. Kontribusi teoretis utama penelitian ini terletak pada integrasi eksplisit dimensi ketahanan sebagai fungsi objektif terkuantifikasi dalam *evolutionary multi-objective optimization*. Pendekatan ini memperluas literatur *green supply chain Management* dari fokus *eco-efficiency* menuju kerangka *resilient* sustainability berbasis komputasional. Selain itu, mekanisme adaptif pada parameter evolusioner memberikan pemahaman baru mengenai pentingnya keseimbangan eksplorasi–eksploitasi dalam sistem yang menghadapi ketidakpastian struktural.

Secara praktis, model ini menyediakan alat analitis untuk mengevaluasi *trade-off* antar dimensi keberlanjutan dan ketahanan dalam desain jaringan rantai pasok. Namun demikian, temuan yang diperoleh bersifat berbasis simulasi dan mencerminkan potensi kinerja model dalam lingkungan eksperimental. Implementasi kebijakan nyata memerlukan validasi empiris lebih lanjut dan penyesuaian terhadap karakteristik industri yang spesifik.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya dapat memperluas model dengan mempertimbangkan dinamika permintaan jangka panjang, integrasi data *real-time*, atau pendekatan *stochastic programming* untuk meningkatkan representasi ketidakpastian global yang lebih kompleks.

REFERENSI

Aasa, O. P., Phoya, S., Monko, R. J., & Musonda, I. (2025). Integrating Sustainability and Resilience Objectives for Energy Decisions: A Systematic Review. *Resources*, *14*(6). https://doi.org/10.3390/resources14060097

Asha, L. N., Dey, A., Yodo, N., & Aragon, L. G. (2022). Optimization Approaches for Multiple Conflicting Objectives in Sustainable Green Supply Chain Management. Sustainability *(Switzerland)*, *14*(19). https://doi.org/10.3390/su141912790

Cherrafi, A., Chiarini, A., Belhadi, A., El Baz, J., & Chaouni Benabdellah, A. (2022). Digital Technologies and Circular Economy Practices: Vital Enablers to Support Sustainable and Resilient Supply Chain Management in the Post-COVID-19 Era. *TQM Journal*, *34*(7), 179–202. https://doi.org/10.1108/TQM-12-2021-0374

Chuvieco, E., Yebra, M., Martino, S., Thonicke, K., Gómez-Giménez, M., San-Miguel, J., Oom, D., Velea, R., Mouillot, F., Molina, J. R., Miranda, A. I., Lopes, D., Salis, M., Bugaric, M., Sofiev, M., Kadantsev, E., Gitas, I. Z., Stavrakoudis, D., Eftychidis, G., … Viegas, D. (2023). Towards an Integrated Approach to Wildfire Risk Assessment: When, Where, What and How May the Landscapes Burn. *Fire*, *6*(5). https://doi.org/10.3390/fire6050215

Darvazeh, S. S., Mooseloo, F. M., Vandchali, H. R., Tomaskova, H., & Tirkolaee, E. B. (2022). An Integrated Multi-Criteria Decision-Making Approach to Optimize the Number of Leagile-Sustainable Suppliers in Supply Chains. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(44), 66979–67001. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20214-0

Esfahbodi, A., Zhang, Y., Liu, Y., & Geng, D. (2023). The Fallacy of Profitable Green Supply Chains: The Role of Green Information Systems (GIS) in Attenuating the Sustainability Trade-Offs. *International Journal of Production Economics*, *255*. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108703

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

Gawusu, S., Zhang, X., Jamatutu, S. A., Ahmed, A., Amadu, A. A., & Djam Miensah, E. (2022). The Dynamics of Green Supply Chain Management within the Framework of Renewable Energy. *International Journal of Energy Research*, *46*(2), 684–711. https://doi.org/10.1002/er.7278

Lee, K. H. (2022). Managing Supply Chain Resilience for Sustainability in an Uncertain World: Challenges and Solutions. *Springer Series in Supply Chain Management*, *17*, 139–147. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95401-7_12

Lei, C., Zhang, H., Yan, X., & Miao, Q. (2024). Green Supply Chain Optimization Based on Two-Stage Heuristic Algorithm. *Processes*, *12*(6). https://doi.org/10.3390/pr12061127

Li, L., Han, Y., Li, Q., & Chen, W. (2024). Multi-Dimensional Economy-Durability Optimization Method for Integrated Energy and Transportation System of Net-Zero Energy Buildings. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *15*(1), 146–159. https://doi.org/10.1109/TSTE.2023.3275160

Liaqait, R. A., Warsi, S. S., Agha, M. H., Zahid, T., & Becker, T. (2022). A Multi-Criteria Decision Framework for Sustainable Supplier Selection and Order Allocation Using Multi-Objective Optimization and Fuzzy Approach. *Engineering Optimization*, *54*(6), 928–948. https://doi.org/10.1080/0305215X.2021.1901898

Liu, L., Song, W., & Liu, Y. (2023). Leveraging Digital Capabilities Toward a Circular Economy: Reinforcing Sustainable Supply Chain Management with Industry 4.0 Technologies. *Computers and Industrial Engineering*, *178*. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109113

Oudani, M. (2023). A Combined Multi-Objective Multi Criteria Approach for Blockchain-Based Synchromodal Transportation. *Computers and Industrial Engineering*, *176*. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.108996

Rajwar, K., Deep, K., & Das, S. (2023). An Exhaustive Review of the Metaheuristic Algorithms for Search and Optimization: Taxonomy, Applications, and Open Challenges. *Artificial Intelligence Review*, *56*(11), 13187–13257. https://doi.org/10.1007/s10462-023-10470-y

Ridwan, R., & Febriani, R. (2025). Systematic Literature Review: Dampak Adopsi Teknologi Hijau Terhadap Kinerja CSR dan Keberlanjutan Bisnis. *Jurnal Inovasi Manajemen Dan Kewirausahaan*, *6*(3). https://ejurnals.com/ojs/index.php/jimk/article/view/2528

Saihi, A., Ben-Daya, M., & As'ad, R. A. (2023). Maintenance and Sustainability: A Systematic Review of Modeling-Based Literature. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *29*(1), 155–187. https://doi.org/10.1108/JQME-07-2021-0058

Shekarian, E., Ijadi, B., Zare, A., & Majava, J. (2022). Sustainable Supply Chain Management: A Comprehensive Systematic Review of Industrial Practices. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(13). https://doi.org/10.3390/su14137892

Shi, X., Liu, W., & Lim, M. K. (2024). Supply Chain Resilience: New Challenges and Opportunities. *International Journal of Logistics Research and Applications*, *27*(12), 2485–2512. https://doi.org/10.1080/13675567.2023.2262396

Wang, G., Luo, T., Luo, H., Liu, R., Liu, Y., & Liu, Z. (2024). A Comprehensive Review of Building Lifecycle Carbon Emissions and Reduction Approaches. *City and Built Environment*, *2*(1). https://doi.org/10.1007/s44213-024-00036-1

Yazdanie, M. (2023). Resilient Energy System Analysis and Planning Using Optimization Models. *Energy and Climate Change*, *4*. https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100097

Zafarullah, H., & Mehnaz, M. (2025). Balancing Economic Growth and Sustainability for Environmental Protection in Southeast Asia: A Regional Perspective. *Southeast Asia: A Multidisciplinary Journal*, *25*(2), 95–107. https://doi.org/10.1108/seamj-01-2025-0003