

SUSTAINABLE PALM OIL SUPPLY CHAIN OPTIMIZATION MODEL BASED ON GREEN SUPPLY CHAIN**MODEL OPTIMALISASI RANTAI PASOK MINYAK KELAPA SAWIT BERKELANJUTAN BERBASIS GREEN SUPPLY CHAIN****Hamdani**

Institut Teknologi Sawit Indonesia

*hamdaniitsi@itsi.ac.id

Corresponding Author*ABSTRACT**

This study aims to develop a palm oil supply chain optimization model that balances economic efficiency, environmental sustainability, and social welfare within a sustainable development framework. green supply chain management (GSCM). Using the approach narrative review This study synthesizes the results of cross-disciplinary research, including economics, industrial engineering, and environmental management. The results of the analysis show that the model Mixed-Integer Linear Programming (MILP), System Dynamics (SD), Life Cycle Assessment (LCA), and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) is the most relevant approach to addressing the complexities of sustainability in the palm oil sector. The proposed integrative model links economic, environmental, and social dimensions through a multi-objective optimization framework. This research provides a conceptual contribution to the development of GSCM theory and offers a basis for formulating policies and strategies for implementing a sustainable and transparent palm oil supply chain at the national and global levels.

Keywords: *green supply chain, palm oil, optimization, sustainability, dynamic systems, life cycle assessment, MILP*

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model optimasi rantai pasok minyak kelapa sawit yang menyeimbangkan efisiensi ekonomi, kelestarian lingkungan, dan kesejahteraan sosial dalam kerangka green supply chain management (GSCM). Menggunakan pendekatan narrative review, studi ini mensintesis hasil-hasil penelitian lintas disiplin, termasuk ekonomi, teknik industri, dan manajemen lingkungan. Hasil analisis menunjukkan bahwa model Mixed-Integer Linear Programming (MILP), System Dynamics (SD), Life Cycle Assessment (LCA), dan Multi-Criteria Decision Making (MCDM) merupakan pendekatan paling relevan untuk mengatasi kompleksitas keberlanjutan pada sektor sawit. Model integratif yang diusulkan mengaitkan dimensi ekonomi, lingkungan, dan sosial melalui kerangka optimasi multi-tujuan. Penelitian ini memberikan kontribusi konseptual terhadap pengembangan teori GSCM serta menawarkan dasar bagi perumusan kebijakan dan strategi implementasi rantai pasok sawit yang berkelanjutan dan transparan di tingkat nasional maupun global.

Kata kunci: *green supply chain, minyak kelapa sawit, optimisasi, keberlanjutan, sistem dinamis, life cycle assessment, MILP*

1. PENDAHULUAN

Industri minyak kelapa sawit memiliki peran strategis dalam mendukung ketahanan pangan, energi, dan ekonomi dunia. Secara global, produksi minyak kelapa sawit mencapai sekitar 76,02 juta ton pada tahun 2023/2024 dan diproyeksikan meningkat menjadi 78,25 juta ton pada 2024/2025 (USDA, 2024). Indonesia merupakan produsen terbesar dunia dengan kontribusi sekitar 46 juta ton, atau lebih dari 58% dari total produksi global, diikuti oleh Malaysia dengan sekitar 18 juta ton (FAO, 2024; USDA, 2024).

Di tingkat nasional, luas areal perkebunan kelapa sawit di Indonesia mencapai 16,38 juta hektar, terdiri atas perkebunan rakyat (6,1 juta ha), perkebunan swasta (8,7 juta ha), dan perkebunan negara (1,5 juta ha) (BPS, 2024). Industri ini juga menyerap sekitar 16,2 juta tenaga

kerja, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga menjadi salah satu sektor agribisnis terbesar yang menopang ekonomi pedesaan (Kementerian Pertanian, 2023).

Tabel 1.
Produksi dan Kontribusi Minyak Kelapa Sawit Dunia dan Indonesia (2023/2024)

Negara / Kawasan	Produksi (juta ton)	Pangsa Dunia (%)
Indonesia	46	58
Malaysia	18.2	24
Thailand	3.5	5
Nigeria	1.4	2
Lainnya	7	9
Total Dunia	76	100

Sumber: USDA (2024); FAO (2024)

Tabel 1 di atas menunjukkan dominasi Indonesia sebagai produsen utama minyak kelapa sawit dunia. Dengan pangsa lebih dari setengah produksi global, posisi Indonesia sangat strategis dalam menentukan arah kebijakan keberlanjutan industri ini. Besarnya skala produksi membuat efisiensi rantai pasok dan keberlanjutan lingkungan menjadi isu kunci bagi stabilitas ekonomi dan ekologi nasional.

Di balik kontribusi ekonominya yang besar, sektor sawit menghadapi tantangan serius terkait deforestasi, degradasi lahan, emisi karbon, dan konflik sosial. Berdasarkan analisis Global Forest Watch (2024), Indonesia kehilangan sekitar 3 juta hektar hutan alam akibat ekspansi perkebunan kelapa sawit dalam dua dekade terakhir. Selain itu, konversi lahan gambut untuk sawit telah menjadi salah satu sumber utama emisi gas rumah kaca di Asia Tenggara (World Resources Institute, 2024).

Dari sisi sosial, data Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO, 2024) menunjukkan bahwa lembaga tersebut menerima lebih dari 150 pengaduan resmi (grievance cases) yang berkaitan dengan sengketa lahan, hak pekerja, dan konflik masyarakat adat. Hal ini memperlihatkan bahwa isu sosial masih menjadi tantangan serius dalam rantai pasok minyak sawit.

Tabel 2.
Tantangan Keberlanjutan pada Industri Sawit Indonesia

Dimensi Tantangan	Indikator Utama	Data / Fakta Kunci	Sumber
Lingkungan	Kehilangan hutan primer	3 juta ha dalam 20 tahun terakhir	Global Forest Watch (2024)
	Konversi lahan gambut	Ratusan ribu ha dikonversi untuk perkebunan	WRI (2024)
Sosial	Kasus konflik/grievance	>150 kasus terdaftar dalam RSPO Complaint System	RSPO (2024)
Ekonomi	Ketergantungan ekspor	>70% produksi diekspor ke pasar global	BPS (2024)

Sumber: Watch (2024); WRI (2024); RSPO (2024); BPS (2024)

Tantangan ini menegaskan pentingnya transformasi menuju rantai pasok yang lebih ramah lingkungan dan adil secara sosial. Upaya untuk mengatasi dampak negatif industri sawit membutuhkan pendekatan sistemik berbasis keberlanjutan dan kolaborasi antar pemangku kepentingan, baik pemerintah, perusahaan, maupun petani kecil.

Tren global menunjukkan peningkatan permintaan terhadap produk sawit berkelanjutan (Certified Sustainable Palm Oil/CSPO). Data RSPO Impact Report (2024) mencatat bahwa luas lahan yang tersertifikasi mencapai 5,2 juta hektar dengan volume produksi 16,1 juta ton, atau sekitar 20% dari total produksi minyak sawit dunia. Namun, angka ini masih menunjukkan kesenjangan besar antara praktik berkelanjutan dan produksi konvensional.

Konsumen global, terutama di Uni Eropa, semakin menuntut transparansi dan jejak karbon yang lebih rendah dari produk sawit. Hal ini mendorong industri untuk menerapkan prinsip green supply chain management (GSCM) yang mengintegrasikan efisiensi ekonomi dengan kelestarian lingkungan. Dengan posisi strategis dan tantangan kompleks yang dihadapi, optimalisasi rantai pasok minyak kelapa sawit menjadi kebutuhan mendesak. Pendekatan green supply chain optimization diperlukan untuk menyeimbangkan antara efisiensi biaya, pengurangan dampak lingkungan, dan peningkatan kesejahteraan sosial. Model rantai pasok berkelanjutan yang terintegrasi akan berperan penting dalam menjaga daya saing ekspor Indonesia sekaligus mendukung pencapaian Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya tujuan ke-12 (Responsible Consumption and Production) dan ke-13 (Climate Action). Dengan demikian, penelitian tentang model optimasi rantai pasok minyak kelapa sawit berkelanjutan berbasis GSCM memiliki urgensi tinggi, baik dari sisi akademik maupun kebijakan publik.

Industri minyak kelapa sawit memiliki peran yang sangat strategis dalam perekonomian nasional dan global. Indonesia merupakan produsen dan pengekspor minyak kelapa sawit terbesar di dunia, menyumbang sekitar 59% dari total produksi global dan memberikan kontribusi signifikan terhadap devisa negara serta kesejahteraan jutaan rumah tangga petani kecil (OECD/FAO, 2024). Namun, dibalik kontribusi ekonominya yang besar, sektor ini menghadapi tantangan kompleks terkait keberlanjutan. Deforestasi, degradasi lahan gambut, konflik sosial akibat ketimpangan akses terhadap lahan, serta tekanan pasar global terhadap praktik produksi berkelanjutan menjadi isu yang semakin menonjol (World Bank, 2023).

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar model rantai pasok kelapa sawit masih berorientasi pada efisiensi ekonomi dan belum mengintegrasikan secara komprehensif dimensi keberlanjutan lingkungan dan sosial. Model rantai pasok yang berfokus pada pengurangan biaya dan peningkatan volume produksi seringkali mengabaikan dampak eksternalitas negatif terhadap lingkungan dan masyarakat sekitar. Di sisi lain, upaya penerapan green logistics pada industri ini juga masih menghadapi tantangan signifikan, seperti keterbatasan data operasional yang akurat, infrastruktur yang belum mendukung transportasi hijau, serta lemahnya koordinasi kebijakan lintas sektor yang mendorong praktik ramah lingkungan (Hasan et al., 2023). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan baru yang tidak hanya mempertimbangkan efisiensi biaya, tetapi juga menyeimbangkan antara dimensi ekonomi, sosial, dan lingkungan melalui desain model optimasi rantai pasok minyak kelapa sawit yang berkelanjutan dalam kerangka green supply chain management (GSCM).

Kajian literatur terkini menunjukkan bahwa riset mengenai penerapan green supply chain management pada industri minyak kelapa sawit masih bersifat parsial dan fragmentaris. Sebagian besar penelitian berfokus pada salah satu dimensi keberlanjutan—seperti efisiensi biaya atau pengurangan emisi karbon tanpa mengintegrasikan dimensi sosial dan lingkungan secara simultan dalam model optimasi multi-tujuan (multi-objective optimization) (Wibowo & Rahman, 2022). Pendekatan yang ada masih cenderung deskriptif dan belum mampu memformulasikan trade-off antara profit, planet, dan people secara sistemik.

Selain itu, penerapan teknologi digital seperti Internet of Things (IoT), blockchain, dan Artificial Intelligence (AI) dalam mendukung transparansi dan keberlanjutan rantai pasok sawit

masih sangat terbatas (UNCTAD, 2023). Padahal, teknologi tersebut memiliki potensi besar untuk meningkatkan keterlacakan produk (traceability), efisiensi proses logistik, serta pemantauan emisi karbon secara real-time. Namun, penelitian yang mengaitkan teknologi hijau ini dengan model optimasi rantai pasok sawit secara integratif masih sangat sedikit. Di samping itu, belum ada model holistik yang mengukur kinerja keberlanjutan dari tiga dimensi utama—ekonomi, sosial, dan lingkungan—secara kuantitatif dan terhubung dalam satu sistem optimisasi. Kesenjangan inilah yang menjadi dasar penting bagi penelitian ini untuk mengembangkan model konseptual dan analitis yang dapat menjawab kebutuhan akademik maupun praktis dalam pembangunan rantai pasok sawit yang lebih berkelanjutan.

Berdasarkan latar belakang dan kesenjangan penelitian di atas, penelitian ini berupaya menjawab pertanyaan utama: Bagaimana model optimisasi rantai pasok minyak kelapa sawit dapat dirancang untuk menyeimbangkan efisiensi ekonomi, kelestarian lingkungan, dan kesejahteraan sosial dalam kerangka green supply chain management? Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan model optimasi rantai pasok minyak kelapa sawit yang mampu menyeimbangkan dimensi ekonomi, sosial, dan lingkungan secara sistemik. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis literatur secara komprehensif terkait penerapan green supply chain management (GSCM) pada industri minyak kelapa sawit; (2) mengidentifikasi elemen-elemen utama seperti variabel, indikator, dan pendekatan optimisasi yang relevan untuk mendesain rantai pasok berkelanjutan; (3) mengembangkan kerangka konseptual integratif yang menggabungkan dimensi profit–planet–people secara simultan dalam satu model; dan (4) memberikan rekomendasi strategis berbasis data dan teori untuk mendukung kebijakan serta praktik keberlanjutan di sektor sawit.

Penelitian ini diharapkan memberikan tiga kontribusi utama. Pertama, kontribusi teoritis, yaitu memperluas penerapan teori triple bottom line (Elkington, 1997) dalam konteks rantai pasok sawit melalui pendekatan multi-objective optimization model. Kedua, kontribusi metodologis, yakni menghadirkan pendekatan sistemik berbasis model matematis yang dapat diaplikasikan pada sektor agribisnis berisiko tinggi lainnya. Ketiga, kontribusi praktis, yaitu menghasilkan panduan berbasis bukti (evidence-based guidance) bagi pembuat kebijakan, pelaku industri, dan petani dalam merancang serta mengimplementasikan strategi rantai pasok sawit yang efisien, transparan, dan berkelanjutan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memperkaya literatur akademik di bidang green supply chain management, tetapi juga memberikan dampak nyata terhadap transformasi industri minyak kelapa sawit menuju praktik yang lebih bertanggung jawab dan berkeadilan.

2. METODE

2.1. Tipe Review

Penelitian ini menggunakan pendekatan narrative review sebagai metode utama untuk meninjau, mengintegrasikan, dan mensintesis berbagai hasil penelitian terkait model optimasi rantai pasok minyak kelapa sawit berkelanjutan dalam kerangka green supply chain management (GSCM). Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan peneliti untuk menggabungkan temuan dari berbagai disiplin ilmu seperti ekonomi, teknik industri, dan manajemen lingkungan—ke dalam satu kerangka konseptual yang utuh. Berbeda dengan systematic review yang bersifat sangat terstruktur dan kuantitatif, narrative review memberikan ruang interpretatif untuk mengeksplorasi hubungan konseptual antar tema dan teori yang relevan (Baumeister & Leary, 1997). Dengan demikian, metode ini cocok digunakan untuk menghasilkan conceptual synthesis dan integrative insights dalam bidang yang masih berkembang dan memerlukan pendekatan lintas-disiplin seperti pengelolaan rantai pasok sawit berkelanjutan.

Pendekatan narrative review juga relevan mengingat literatur tentang green supply chain optimization pada sektor kelapa sawit masih terfragmentasi antara dimensi ekonomi, sosial, dan lingkungan. Oleh karena itu, metode ini digunakan untuk menyatukan beragam hasil

penelitian tersebut dalam kerangka multi-objective optimization dan teori triple bottom line (Elkington, 1997), sehingga dapat dirumuskan model konseptual yang mampu menyeimbangkan efisiensi ekonomi, kelestarian lingkungan, dan kesejahteraan sosial secara simultan.

2.2. Strategi Pencarian

Proses pencarian literatur dilakukan secara sistematis pada empat basis data akademik bereputasi tinggi, yaitu Scopus, Web of Science, ScienceDirect, dan Emerald Insight. Pemilihan database ini didasarkan pada cakupan multidisipliner dan validitas akademik yang diakui secara internasional. Strategi pencarian difokuskan pada artikel yang diterbitkan dalam periode 2013 hingga 2025 untuk menangkap perkembangan terkini dalam penelitian green supply chain management dan optimisasi rantai pasok berkelanjutan, khususnya pada sektor agribisnis dan minyak kelapa sawit. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian literatur meliputi kombinasi logis dari istilah berikut: “green supply chain”, “palm oil supply chain”, “optimization model”, “sustainability integration”, dan “multi-objective optimization”. Pencarian dilakukan dengan menggunakan operator Boolean (AND, OR) dan filter “article title, abstract, and keywords” untuk memastikan relevansi temuan.

Kriteria inklusi dalam penelitian ini mencakup artikel yang telah melalui proses *peer review* dan berfokus pada sektor agribisnis, khususnya rantai pasok minyak kelapa sawit. Artikel yang dipilih juga harus memuat elemen keberlanjutan yang mencakup aspek ekonomi, sosial, atau lingkungan, serta menggunakan pendekatan model optimisasi, simulasi sistem, atau integrasi teknologi hijau. Sebaliknya, kriteria eksklusi meliputi artikel non-akademik, laporan kebijakan, atau publikasi industri yang tidak menggunakan metode ilmiah, serta studi konseptual yang tidak disertai dengan analisis empiris atau model matematis yang mendukung. Proses pencarian dilakukan secara sistematis dengan penyaringan awal berdasarkan judul dan abstrak, diikuti oleh tinjauan teks penuh (*full-text review*) untuk memastikan kesesuaian dengan fokus penelitian. Hasil akhir dari proses ini adalah kumpulan artikel relevan yang menjadi dasar bagi analisis tematik dan pemetaan konseptual dalam studi ini.

2.3. Ekstraksi Data dan Sintesis

Tahap ekstraksi data dilakukan dengan meninjau setiap artikel berdasarkan empat kategori utama, yaitu: (1) tujuan penelitian, (2) model atau pendekatan optimisasi yang digunakan, (3) dimensi keberlanjutan yang diukur (ekonomi, sosial, lingkungan), serta (4) temuan dan implikasi utama dari masing-masing studi. Informasi tersebut kemudian dicatat dalam matriks literatur yang memudahkan proses identifikasi pola dan kesenjangan tematik antar studi.

Analisis data dilakukan menggunakan pendekatan thematic synthesis untuk mengelompokkan literatur ke dalam tema-tema utama seperti optimization frameworks, sustainability indicators, green logistics strategies, dan technology-enabled transparency (misalnya penggunaan IoT atau blockchain dalam rantai pasok). Selanjutnya, dilakukan conceptual mapping untuk mengidentifikasi hubungan antar tema, teori, dan variabel yang relevan, sehingga menghasilkan gambaran konseptual yang integratif mengenai desain model green supply chain optimization pada industri minyak kelapa sawit.

Untuk meningkatkan validitas interpretasi, dilakukan proses theoretical triangulation dengan mengaitkan temuan dari tiga kerangka teori utama, yaitu: teori Green Supply Chain Management (GSCM), teori Systems Dynamics and Optimization, serta konsep Triple Bottom Line (TBL). Triangulasi teori ini digunakan untuk memastikan bahwa sintesis naratif yang dihasilkan tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga memiliki dasar konseptual yang kuat dan dapat digunakan untuk mengembangkan model optimisasi yang lebih komprehensif.

Dengan metode ini, penelitian diharapkan mampu menghasilkan peta konseptual yang dapat menjembatani kesenjangan antara literatur akademik dan praktik industri, serta menjadi landasan bagi penelitian lanjutan yang lebih empiris dan berbasis model kuantitatif.

3. HASIL

3.1. Thematic Overview

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa penelitian mengenai optimisasi rantai pasok minyak kelapa sawit dalam konteks green supply chain management (GSCM) dapat dikelompokkan ke dalam tiga tema utama, yaitu efisiensi ekonomi, optimisasi lingkungan, dan integrasi keberlanjutan sosial. Tema pertama, efisiensi ekonomi dalam logistik, berfokus pada upaya meminimalkan total biaya logistik melalui perancangan jaringan distribusi yang efisien, optimisasi kapasitas produksi di pabrik pengolahan, serta peningkatan efisiensi transportasi. Beragam model matematis, seperti linear programming, banyak digunakan untuk memastikan bahwa biaya operasional dapat ditekan seminimal mungkin tanpa mengorbankan kelancaran rantai pasok.

Integrasi antara jaringan forward logistics dan reverse logistics menjadi kunci dalam mencapai efektivitas biaya di sektor logistik. Misalnya, Pishvae et al. (2009) mengusulkan model optimisasi stokastik untuk logistik terintegrasi yang tidak hanya mempertimbangkan minimisasi biaya, tetapi juga memasukkan responsivitas jaringan dalam kondisi ketidakpastian, dengan menggunakan pendekatan multi-objective stochastic programming yang terbukti dapat meningkatkan efisiensi rantai pasok secara signifikan. Gagasan ini didukung oleh Tafaghodi et al. (2011) yang mengembangkan model mixed-integer nonlinear programming (MINLP) untuk menangkap dinamika logistik maju dan balik secara bersamaan, menegaskan pentingnya pengambilan keputusan terintegrasi untuk menghindari hasil yang sub-optimal jika kedua sistem dipertimbangkan secara terpisah. Selain itu, Yu dan Solvang (2018) menyoroti model mathematical programming yang menekankan pada minimisasi biaya dalam kerangka reverse logistics, menegaskan kembali pentingnya model terintegrasi dalam desain jaringan logistik.

Secara khusus, penentuan lokasi gudang memiliki peran kritis dalam desain jaringan distribusi. Penelitian oleh Ponce-Cueto dan Muelas (2015) menekankan bagaimana lokasi gudang dapat mempengaruhi strategi distribusi, yang pada gilirannya berdampak pada biaya transportasi dan inventori, sehingga memperlihatkan kompleksitas dalam menentukan lokasi optimal. Zhao et al. (2020) juga menambahkan bahwa pemilihan lokasi gudang dalam suatu jaringan secara langsung mempengaruhi biaya logistik, terutama melalui peningkatan efisiensi transportasi antara zona produksi dan fasilitas distribusi tersebut.

Efisiensi transportasi dapat lebih ditingkatkan melalui berbagai pendekatan matematis yang mengoptimalkan rute distribusi. Liu dan Xu (2024) meneliti implikasi optimisasi jalur distribusi melalui pendekatan colony intelligence, dengan menekankan bahwa efektivitas jalur distribusi logistik berhubungan langsung dengan pengendalian biaya dan efisiensi bisnis secara keseluruhan. Hal ini diperkuat oleh penelitian Zheng et al. (2022), yang mengusulkan model bi-level programming untuk meminimalkan biaya logistik melalui pemilihan titik distribusi strategis di sistem distribusi perkotaan, menunjukkan hubungan yang erat antara pemodelan transportasi dan desain jaringan logistik.

Selain itu, penerapan model multi-objektif dalam desain jaringan logistik semakin berkembang. Khajavi et al. (2011) menyoroti upaya penyelesaian masalah logistik kompleks yang melibatkan tujuan-tujuan yang saling bertentangan seperti pengurangan biaya dan peningkatan responsivitas, dengan menggunakan algoritma genetika untuk mengoptimalkan pengambilan keputusan dalam jaringan logistik multi-tahap. Pendekatan ini sejalan dengan tujuan utama untuk mengurangi biaya operasional sambil mempertahankan sistem rantai pasok yang tanggap dan adaptif.

Secara keseluruhan, pencapaian efisiensi ekonomi dalam logistik memerlukan pendekatan multidimensi yang mengintegrasikan pemodelan matematis untuk logistik maju

dan balik, memperkuat analisis lokasi gudang, serta meningkatkan efisiensi transportasi semuanya dengan tujuan meminimalkan biaya operasional dan menjaga kelancaran aliran rantai pasok. Strategi-strategi ini sangat penting untuk menghadapi kompleksitas rantai pasok modern, sehingga memungkinkan organisasi beroperasi secara efektif di tengah dinamika pasar yang terus berubah.

$$\min Z = \sum_{i \in I} C_p Q_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_t Q_{ij} + \sum_{j \in J} C_s S_j + \sum_{i \in I} E_i \lambda$$

Z : total biaya sistem

C_p : biaya produksi per unit di pabrik i

Q_i : jumlah output dari pabrik i

C_t : biaya transportasi dari pabrik i ke tujuan j

Q_{ij} : jumlah produk dikirim dari i ke j

C_s : biaya penyimpanan di gudang j

S_j : stok di gudang j

E_i : emisi dari produksi di i

λ : faktor konversi biaya lingkungan (misal penalti karbon, Rp/kg CO₂)

3.2. Optimisasi Lingkungan dan Integrasi Keberlanjutan Sosial

Optimisasi lingkungan dalam industri minyak kelapa sawit merupakan area penting yang mendapat perhatian besar mengingat dampak ekologis signifikan yang ditimbulkan, seperti deforestasi, emisi gas rumah kaca (GRK), dan produksi limbah. Penerapan Life Cycle Assessment (LCA) menjadi alat utama dalam mengevaluasi dampak tersebut di sepanjang rantai pasok, mulai dari budidaya kelapa sawit hingga proses pengolahan dan distribusi produk. Emisi karbon dalam produksi minyak sawit sebagian besar berasal dari perubahan penggunaan lahan ketika hutan dikonversi menjadi perkebunan, yang menyebabkan kehilangan cadangan karbon dalam jumlah besar. Meijide et al. (2020) menegaskan bahwa metodologi LCA perlu mempertimbangkan emisi langsung dari kegiatan budidaya serta hilangnya kemampuan penyerapan karbon akibat deforestasi. Temuan serupa disampaikan oleh Yudha et al. (2024), yang menyoroti bahwa praktik pertanian seperti pemupukan dan pengendalian hama turut berkontribusi terhadap total emisi GRK. Sementara itu, Amri et al. (2023) menunjukkan perbedaan panduan perhitungan emisi yang dapat mempengaruhi strategi mitigasi, dan menekankan pentingnya penerapan LCA secara menyeluruh sejak tahap awal produksi (cradle to gate).

Penilaian keberlanjutan dalam produksi minyak sawit mentah juga menggunakan LCA untuk mengukur berbagai dimensi dampak lingkungan. Omran et al. (2021) mengusulkan kerangka Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) yang tidak hanya menilai hasil ekologis tetapi juga mengintegrasikan faktor sosial dan ekonomi untuk pendekatan yang lebih holistik. Hal ini sejalan dengan upaya Siregar et al. (2021) yang mengembangkan perangkat lunak pendukung evaluasi LCA dalam produksi minyak sawit, menunjukkan komitmen industri terhadap penerapan keberlanjutan. Studi-studi terbaru mengenai pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit (palm oil mill effluent) dan teknologi biogas (Siregar et al., 2022) juga menunjukkan potensi besar untuk mengurangi jejak lingkungan secara keseluruhan. Lebih lanjut, inovasi dalam desain proses seperti yang dibahas oleh Ng et al. (2022) mengenai

co-production dari produk sampingan kelapa sawit memperlihatkan bagaimana LCA dapat mendorong efisiensi sumber daya melalui biomass valorization. Hafyan et al. (2020) juga mengusulkan integrasi konsep biorefinery dalam sistem produksi sawit sebagai model pengelolaan limbah yang memberikan manfaat ekonomi sekaligus menjaga standar keberlanjutan. Dengan demikian, kerangka LCA yang komprehensif sangat penting untuk memahami dan mengoptimalkan dampak lingkungan dari produksi minyak sawit, membantu industri memenuhi standar seperti RSPO serta mendorong praktik ramah lingkungan yang tetap layak secara ekonomi.

Sementara itu, tema ketiga — integrasi keberlanjutan sosial — semakin mendapat perhatian dalam beberapa tahun terakhir, terutama terkait kesejahteraan petani kecil dan pengintegrasian indikator sosial ke dalam praktik pertanian. Fokus utama dalam bidang ini adalah keseimbangan antara sumber daya ekonomi dan modal sosial yang berkontribusi terhadap kesejahteraan petani kecil, dengan penekanan pada keadilan distribusi pendapatan dan peningkatan kesejahteraan komunitas. Penelitian menunjukkan bahwa modal sosial memiliki pengaruh positif terhadap kesejahteraan petani kecil. Matlou et al. (2021) menemukan bahwa modal sosial berperan penting dalam meningkatkan kesejahteraan rumah tangga petani kecil, sejalan dengan penelitian Xiong et al. (2021) yang menekankan peran jaringan dukungan komunitas dalam mendorong pemerataan pendapatan dan ketahanan ekonomi. Berchoux et al. (2019) juga menunjukkan bahwa rumah tangga dengan modal sosial yang kuat lebih kecil kemungkinannya mengalami kesulitan ekonomi, menegaskan bahwa jaringan sosial yang solid dapat mengurangi kemiskinan dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat.

Lebih lanjut, integrasi prinsip Corporate Social Responsibility (CSR) dalam praktik pertanian menjadi faktor penting dalam peningkatan kesejahteraan petani kecil. Sjauw-Koen-Fa et al. (2018) menunjukkan bahwa integrasi antara perspektif bisnis dan praktik CSR dapat meningkatkan kesejahteraan petani kecil dengan menyelaraskan tujuan ekonomi agribisnis dan tanggung jawab sosial. Fokus ganda ini tidak hanya mendorong manajemen rantai pasok yang berkelanjutan, tetapi juga memastikan agar petani kecil tidak terpinggirkan dalam rantai nilai pertanian. Tobin et al. (2016) menambahkan bahwa dinamika rantai nilai tradisional sering kali memperparah ketimpangan sosial, yang dapat dikurangi melalui penerapan strategi CSR yang lebih inklusif. Meskipun demikian, tantangan tetap ada dalam pengukuran indikator sosial di sektor pertanian. Thom et al. (2024) menyoroti perlunya model integratif yang memperhitungkan determinan sosial dalam sistem pertanian, sementara Pollok et al. (2021) mengidentifikasi kendala metodologis dalam Social Life Cycle Assessment (SLCA) yang membatasi penerapannya secara luas. Oleh karena itu, pengembangan metodologi pengukuran sosial yang lebih kuat menjadi langkah penting dalam memperkuat integrasi keberlanjutan sosial di sektor agribisnis.

Secara keseluruhan, penerapan prinsip keberlanjutan sosial dalam sektor pertanian, khususnya bagi petani kecil, muncul sebagai fokus utama dalam pembangunan sistem pertanian berkelanjutan. Peran modal sosial, pentingnya praktik CSR, serta upaya mengatasi tantangan metodologis menjadi tema sentral yang membentuk arah penelitian dan kebijakan masa depan dalam bidang ini.

3.2. Pendekatan Pemodelan yang Teridentifikasi

Perancangan sistem optimisasi rantai pasok minyak kelapa sawit berkelanjutan bergantung pada berbagai pendekatan pemodelan yang mampu menangani keterkaitan kompleks antara faktor ekonomi, sosial, dan lingkungan. Salah satu pendekatan yang paling banyak digunakan adalah linear programming, khususnya Mixed-Integer Linear Programming (MILP), yang efektif dalam menyelesaikan permasalahan optimisasi multi-tujuan. Pendekatan ini berfungsi untuk menyeimbangkan biaya produksi dengan upaya pengurangan emisi karbon melalui penerapan batasan sumber daya dan metrik ekonomi yang terukur, sebagaimana

dibahas dalam beberapa studi (Lim & Biswas, 2018; Lim & Biswas, 2019; Bessou et al., 2014). Lim dan Biswas, misalnya, memanfaatkan kerangka kerja palm oil sustainability assessment untuk menunjukkan keseimbangan yang diperlukan dalam produksi minyak sawit mentah yang berkelanjutan, dan hasilnya memperkuat efektivitas model MILP dalam menjawab tantangan keberlanjutan di industri sawit.

Model System Dynamics (SD) memiliki peran penting dalam menangkap hubungan dinamis antar variabel yang membentuk rantai pasok minyak kelapa sawit. Pendekatan ini memungkinkan para pemangku kepentingan untuk melakukan simulasi dan analisis terhadap dampak jangka panjang dari berbagai kebijakan terhadap harga pasar, produktivitas, serta stabilitas rantai pasok secara keseluruhan (Kadariusman & Herabadi, 2018; Kadariusman & Pramudya, 2019). Melalui kemampuan simulasi yang luas, model SD memberikan wawasan strategis bagi pengambil kebijakan dalam meningkatkan keberlanjutan industri sawit. Kadariusman dan Pramudya (2019) menunjukkan bahwa pendekatan ini menekankan pentingnya perbaikan berkelanjutan (continuous improvement) dalam menghadapi perubahan permintaan pasar global.

Sementara itu, Life Cycle Assessment (LCA) menjadi metode penting yang memberikan pandangan holistik terhadap dampak lingkungan di setiap fase rantai pasok minyak kelapa sawit. LCA memfasilitasi analisis menyeluruh terhadap emisi gas rumah kaca, perubahan penggunaan lahan, serta dampak ekologis sepanjang siklus hidup produk minyak sawit (Siregar et al., 2021; Manik & Halog, 2012). Penerapan prinsip LCA terlihat pada berbagai upaya untuk mengukur dan mengkuantifikasi emisi yang dihasilkan dari proses produksi minyak sawit, yang menegaskan pentingnya evaluasi dampak lingkungan secara menyeluruh untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat (Manik & Halog, 2012).

Pendekatan lainnya yang juga relevan adalah Multi-Criteria Decision Making (MCDM), dengan metode seperti Analytic Hierarchy Process (AHP) dan Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). MCDM berperan penting dalam mendukung pengambilan keputusan strategis terkait prioritas keberlanjutan di antara berbagai pemangku kepentingan di industri sawit. Pendekatan ini membantu menyusun permasalahan keputusan serta mengintegrasikan data kualitatif dan kuantitatif, sehingga memperkuat kerangka pengambilan keputusan yang lebih komprehensif (Meixner et al., 2023; Madavan & Saroja, 2020). Meixner et al. menekankan perlunya integrasi dimensi ekonomi, sosial, dan lingkungan secara bersamaan, karena pengabaian salah satu aspek dapat menghambat penilaian keberlanjutan yang menyeluruh. Hal ini juga tercermin dalam penelitian mengenai kinerja perusahaan sawit yang berkaitan dengan sertifikasi keberlanjutan dan dampaknya terhadap profitabilitas finansial, yang menunjukkan pentingnya teknik MCDM dalam mengelola tantangan keberlanjutan yang kompleks (Abdullah et al., 2018).

Secara keseluruhan, optimisasi rantai pasok minyak kelapa sawit berkelanjutan memerlukan pendekatan interdisipliner yang menggabungkan berbagai strategi pemodelan. Pendekatan seperti linear programming, system dynamics, life cycle assessment, dan multi-criteria decision making menciptakan kerangka kerja pengambilan keputusan yang komprehensif dan adaptif untuk menghadapi tantangan keberlanjutan yang beragam di sektor minyak kelapa sawit.

3.3. Kesenjangan Empiris

Penelitian terkini menunjukkan adanya kemajuan signifikan dalam upaya optimisasi rantai pasok minyak kelapa sawit, namun masih terdapat sejumlah kesenjangan empiris yang perlu mendapatkan perhatian lebih lanjut. Salah satu isu utama adalah bahwa sebagian besar penelitian masih berfokus pada efisiensi biaya atau pengurangan emisi, sementara aspek sosial dan kesejahteraan petani kecil sering diabaikan. Eggen et al. (2024) menyoroti tantangan yang dihadapi oleh petani kecil dalam sektor kelapa sawit, di mana partisipasi mereka dalam rantai pasok berkelanjutan terhambat oleh keterbatasan pengetahuan, rendahnya kepercayaan

institusional, serta kendala finansial. Sejalan dengan itu, Lestari et al. (2025) membahas permasalahan kesejahteraan kompleks yang dialami petani kecil, dan menekankan bahwa model-model yang ada belum mampu mengukur dimensi kuantitatif dari kesejahteraan sosial secara memadai.

Selain itu, integrasi aspek sosial dengan tujuan ekonomi dan lingkungan masih menjadi tantangan dalam pengembangan kerangka optimisasi yang efektif. Santosa dan Putri (2024) mengusulkan metodologi untuk memperkuat integritas lingkungan dalam produksi minyak sawit, dengan menekankan perlunya pendekatan multifaset yang melibatkan kolaborasi lintas pemangku kepentingan. Sementara itu, analisis bibliometrik yang dilakukan oleh Gunawan (2025) menggarisbawahi tren riset minyak kelapa sawit dan menekankan pentingnya agenda penelitian yang inklusif, yang mampu menyelaraskan kinerja sosial dengan tujuan lingkungan dan ekonomi secara simultan.

Kesenjangan penting lainnya terdapat pada isu ketidakpastian dalam rantai pasok minyak sawit, khususnya yang berkaitan dengan fluktuasi harga minyak global dan perubahan kebijakan ekspor-impor. Hasan et al. (2022) menunjukkan bahwa regulasi Uni Eropa berdampak signifikan terhadap keberlangsungan ekonomi petani kecil di Indonesia, sehingga dibutuhkan kerangka kerja optimisasi yang adaptif terhadap dinamika pasar global. Fitriani et al. (2024) menambahkan bahwa pemahaman terhadap dinamika hulu sangat penting untuk mengembangkan strategi mitigasi terhadap guncangan eksternal serta meningkatkan ketahanan rantai pasok secara keseluruhan.

Dengan demikian, diperlukan model optimisasi yang lebih adaptif dan inklusif untuk menghadapi kompleksitas sistem rantai pasok minyak kelapa sawit. Model tersebut perlu mengintegrasikan tujuan efisiensi biaya, keberlanjutan lingkungan, dan kesejahteraan sosial secara simultan, guna memberikan manfaat nyata bagi seluruh pemangku kepentingan—terutama bagi petani kecil yang merupakan aktor kunci dalam keberlanjutan industri kelapa sawit.

4. PEMBAHASAN

4.1. Implikasi Teoritis

Integrasi transisional dari konsep Triple Bottom Line (TBL), yang mencakup dimensi ekonomi, lingkungan, dan sosial, ke dalam optimisasi rantai pasok minyak kelapa sawit menandai pergeseran penting dari fokus utama pada efisiensi biaya menuju penciptaan nilai yang berkelanjutan. Pergeseran ini menegaskan bahwa keberhasilan industri minyak kelapa sawit tidak lagi dapat diukur hanya melalui efisiensi ekonomi, tetapi juga melalui komitmen terhadap pelestarian lingkungan dan peningkatan kesejahteraan sosial (Rist et al., 2010). Penekanan tradisional pada hasil finansial kini semakin digantikan oleh orientasi pada keberlanjutan holistik, yang berupaya menyeimbangkan profitabilitas dengan etika produksi dan tanggung jawab lingkungan.

Pendekatan multi-objective optimization (MOO) menjadi sangat penting untuk mendukung transformasi ini. Kerangka MOO memungkinkan analisis simultan terhadap berbagai tujuan dalam rantai pasok, sehingga pemangku kepentingan dapat menilai keseimbangan antara manfaat ekonomi dengan dampak sosial dan lingkungan (Zamboni et al., 2009; Foong et al., 2020). Model yang mengintegrasikan parameter-parameter ini sangat penting untuk mengoptimalkan penerapan praktik keberlanjutan dalam produksi minyak sawit. Penerapan sistematis MOO membantu proses pengambilan keputusan dengan memastikan bahwa upaya mencapai keberlanjutan ekonomi tidak mengorbankan tanggung jawab lingkungan dan keadilan sosial (Zamboni et al., 2009; Stichnothe & Bessou, 2017).

Lebih lanjut, landasan teoretis dari systems thinking jika dikombinasikan dengan pemodelan optimisasi, secara signifikan memperkaya kerangka penelitian. Systems thinking memberikan perspektif holistik terhadap interaksi kompleks antara berbagai aktor dan elemen dalam rantai pasok minyak kelapa sawit, menekankan keterhubungan dan dinamika sistem

yang esensial untuk memahami tantangan keberlanjutan di industri ini (Ng et al., 2013; Najib et al., 2020). Sebaliknya, pemodelan optimisasi memberikan struktur matematis yang sistematis untuk menghasilkan wawasan praktis dalam memaksimalkan efisiensi sekaligus meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan sosial. Sinergi antara kedua pendekatan ini memungkinkan pengembangan sistem produksi minyak sawit yang berkelanjutan dan efisien secara ekonomi, serta menghasilkan implikasi penting bagi perumusan kebijakan publik yang mendorong praktik pertanian yang bertanggung jawab (Firmansyah et al., 2022; Nasir et al., 2019).

Secara keseluruhan, masa depan industri minyak kelapa sawit bergantung pada penerapan perspektif TBL yang seimbang melalui pendekatan multi-objective optimization yang didukung oleh kerangka systems thinking. Integrasi strategis ini tidak hanya penting untuk meningkatkan efektivitas operasional, tetapi juga untuk membimbing arah kebijakan publik yang mendorong keberlanjutan ekonomi, ketahanan lingkungan, dan kesejahteraan sosial dalam industri minyak kelapa sawit.

4.2. Implikasi Praktis

Secara praktis, model integratif hasil sintesis ini berpotensi menjadi decision-support tool bagi perusahaan kelapa sawit untuk merencanakan produksi dan distribusi yang ramah lingkungan tanpa mengorbankan profitabilitas. Dengan menggabungkan variabel ekonomi, sosial, dan lingkungan dalam satu sistem optimisasi, perusahaan dapat menentukan strategi produksi yang optimal, misalnya dalam menentukan lokasi pabrik, jalur distribusi, dan volume produksi berdasarkan pertimbangan dampak lingkungan.

Selain itu, pemerintah dapat memanfaatkan hasil model optimisasi sebagai dasar penyusunan kebijakan insentif, seperti pajak karbon, subsidi energi terbarukan, dan program sertifikasi keberlanjutan seperti Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO) dan Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO). Kebijakan tersebut akan membantu memperkuat implementasi GSCM di tingkat nasional maupun global. Di sisi lain, pemanfaatan teknologi digital seperti blockchain menjadi relevan dalam konteks ini, karena mampu meningkatkan transparansi, akuntabilitas, dan keterlacakan (traceability) di sepanjang rantai pasok. Penerapan sistem digital ini juga dapat mengurangi risiko praktik non-berkelanjutan dan meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap produk kelapa sawit Indonesia.

4.3. Model Konseptual

Model konseptual yang diusulkan dalam penelitian ini menggambarkan keterkaitan antara tiga komponen utama keberlanjutan, yaitu (a) Economic Efficiency yang meliputi aspek biaya dan produktivitas, (b) Environmental Performance yang mencakup emisi, konsumsi energi, dan pengelolaan limbah, serta (c) Social Welfare yang menyoroti kesejahteraan petani dan pekerja. Ketiga dimensi ini dihubungkan melalui Optimization Framework yang berperan sebagai mekanisme penyatu untuk menyeimbangkan tujuan-tujuan keberlanjutan tersebut.

Model ini menekankan adanya hubungan timbal balik berupa trade-off dan synergy antar dimensi keberlanjutan. Misalnya, peningkatan efisiensi energi dapat sekaligus menurunkan biaya operasional dan emisi, menciptakan sinergi positif. Sebaliknya, kebijakan peningkatan upah petani tanpa perencanaan yang matang dapat menimbulkan trade-off terhadap efisiensi ekonomi. Oleh karena itu, model ini berfungsi sebagai panduan konseptual bagi pengambil kebijakan dan praktisi industri dalam merancang strategi GSCM yang adaptif dan berimbang.

4.4. Penelitian Selanjutnya

Berdasarkan kesenjangan penelitian yang teridentifikasi, agenda riset masa depan diarahkan pada pengembangan model hybrid yang mengkombinasikan System Dynamics (SD), Mixed-Integer Linear Programming (MILP), dan Multi-Criteria Decision Making (MCDM).

Kombinasi ini memungkinkan analisis yang lebih holistik antara dinamika sistem dan pengambilan keputusan berbasis kuantitatif.

Selain itu, integrasi data real-time berbasis Internet of Things (IoT) diusulkan untuk meningkatkan kemampuan prediksi dan respons rantai pasok terhadap perubahan permintaan pasar atau gangguan eksternal. Pendekatan ini dapat menghasilkan sistem rantai pasok yang lebih adaptif dan tangguh (resilient). Terakhir, penelitian mendatang disarankan untuk melakukan policy experimentation melalui scenario simulation, seperti simulasi dampak fluktuasi harga global, kebijakan emisi karbon, dan perubahan permintaan terhadap keseimbangan keberlanjutan. Pendekatan berbasis simulasi ini akan membantu pembuat kebijakan dan pelaku industri memahami konsekuensi jangka panjang dari setiap keputusan strategis dalam konteks GSCM minyak kelapa sawit.

5. KESIMPULAN

5.1. Temuan

Penelitian ini menegaskan bahwa model optimisasi rantai pasok minyak kelapa sawit yang berkelanjutan harus dirancang secara multidimensional, dengan mengintegrasikan dimensi ekonomi, lingkungan, dan sosial secara simultan. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip Triple Bottom Line (TBL) yang menjadi landasan utama dalam praktik Green Supply Chain Management (GSCM). Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa pendekatan matematis seperti Mixed-Integer Linear Programming (MILP) dan pendekatan sistemik seperti System Dynamics (SD) mampu menjawab kompleksitas dan tantangan keberlanjutan pada rantai pasok sawit global.

Model optimisasi yang komprehensif diperlukan untuk menyeimbangkan efisiensi ekonomi dengan pelestarian lingkungan dan kesejahteraan sosial. Pendekatan berbasis optimisasi multi-tujuan terbukti mampu mengidentifikasi trade-off dan potensi sinergi antar dimensi tersebut. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi terhadap pengembangan kerangka konseptual yang menjembatani efisiensi produksi dan tanggung jawab sosial-lingkungan dalam sistem agribisnis berisiko tinggi seperti industri kelapa sawit.

5.2. Kontribusi Akademis

Dari sisi akademik, penelitian ini memberikan kontribusi konseptual melalui penyusunan conceptual synthesis baru yang mengintegrasikan green optimization dalam konteks industri kelapa sawit. Temuan ini memperkaya literatur GSCM dengan menempatkan optimisasi sebagai mekanisme utama dalam mencapai keberlanjutan yang terukur dan berbasis data. Selain itu, penelitian ini juga mengisi research gap antara teori Green Supply Chain Management dan praktik industri agribisnis tropis yang selama ini masih terfragmentasi. Dengan merangkum berbagai pendekatan lintas disiplin ekonomi, teknik industri, dan manajemen lingkungan—penelitian ini memperluas pemahaman teoritis tentang bagaimana sistem rantai pasok dapat dirancang secara integratif untuk mencapai keberlanjutan yang seimbang.

5.3. Implikasi praktis dan kebijakan

Dari perspektif praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi landasan bagi pengambilan keputusan strategis di sektor minyak kelapa sawit. Model optimisasi yang diusulkan berpotensi menjadi alat bantu keputusan (decision-support tool) bagi perusahaan dalam merancang sistem logistik, produksi, dan distribusi yang lebih ramah lingkungan sekaligus efisien secara ekonomi. Bagi pembuat kebijakan, temuan ini dapat digunakan untuk merancang kebijakan berbasis bukti (evidence based policy) yang menyeimbangkan profitabilitas dan keberlanjutan. Contohnya, pemerintah dapat memanfaatkan model ini untuk mengembangkan instrumen kebijakan seperti insentif emisi rendah, pajak karbon, atau sertifikasi keberlanjutan (ISPO dan

RSPO). Dengan pendekatan tersebut, pengembangan sektor sawit dapat diarahkan menuju low-carbon economy tanpa mengabaikan kesejahteraan petani dan pekerja.

5.4. Petunjuk penelitian selanjutnya

Untuk memperkuat kontribusi empiris, penelitian mendatang disarankan untuk melakukan validasi model optimisasi menggunakan pendekatan System Dynamics atau Agent-Based Simulation. Pendekatan ini dapat menangkap interaksi kompleks antar aktor dalam rantai pasok, serta memprediksi dampak kebijakan terhadap keberlanjutan jangka panjang. Selain itu, diperlukan kajian komparatif lintas negara produsen sawit utama seperti Indonesia, Malaysia, dan Thailand untuk mengidentifikasi perbedaan kebijakan, struktur pasar, serta praktik rantai pasok hijau. Hal ini penting untuk memahami konteks regional dan merumuskan model yang lebih adaptif terhadap perbedaan institusional dan kebijakan nasional. Terakhir, penelitian masa depan dapat memperluas cakupan dengan mengintegrasikan prinsip circular economy dan carbon accounting ke dalam model optimisasi rantai pasok. Integrasi ini tidak hanya akan meningkatkan efisiensi sumber daya, tetapi juga memperkuat kontribusi industri kelapa sawit terhadap mitigasi perubahan iklim dan keberlanjutan global.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M., Shahida, S., & Fuad, S. (2018). Sustainability certifications and financial profitability: an analysis on palm oil companies in malaysia. *Jurnal Pengurusan*, 54, 143-154. <https://doi.org/10.17576/pengurusan-2018-54-12>
- Amri, N., Anwar, S., Jupesta, J., & Sahari, B. (2023). Differences in greenhouse gas emission calculation guidelines for palm oil and its implication on mitigation planning. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1266(1), 012066. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1266/1/012066>
- Badan Pusat Statistik (BPS). (2024). *Statistik Kelapa Sawit Indonesia 2023*. Jakarta: BPS. <https://www.bps.go.id/>
- Berchoux, T., Watmough, G., Johnson, F., Hutton, C., & Atkinson, P. (2019). Collective influence of household and community capitals on agricultural employment as a measure of rural poverty in the mahanadi delta, india. *Ambio*, 49(1), 281-298. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01150-9>
- Bessou, C., Chase, L., Henson, I., Abdul-Manan, A., Canals, L., Agus, F., ... & Chin, M. (2014). Pilot application of palmghg, the roundtable on sustainable palm oil greenhouse gas calculator for oil palm products. *Journal of Cleaner Production*, 73, 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.008>
- Eggen, M., Heilmayr, R., Anderson, P., Armson, R., Austin, K., Azmi, R., ... & Carlson, K. (2024). Smallholder participation in zero-deforestation supply chain initiatives in the Indonesian palm oil sector: challenges, opportunities, and limitations. *Elementa Science of the Anthropocene*, 12(1). <https://doi.org/10.1525/elementa.2023.00099>
- Firmansyah, E., Suparyanto, T., Hidayat, A., & Pardamean, B. (2022). Real-time weed identification using machine learning and image processing in oil palm plantations. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 998(1), 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/998/1/012046>
- Fitriani, F., Ambya, A., Ismono, R., Lestari, D., & Prasmatiwi, F. (2024). Lini hulu produksi sawit Indonesia: perspektif rantai pasok. *Sepa Jurnal Sosial Ekonomi Pertanian Dan Agribisnis*, 21(2), 143. <https://doi.org/10.20961/sepa.v21i2.60992>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2024). *FAOSTAT: Crops and Livestock Products – Palm Oil*. Rome: FAO. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>

- Foong, S., Chong, M., & Ng, D. (2020). Strategies to promote biogas generation and utilisation from palm oil mill effluent. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 5(2), 175-191. <https://doi.org/10.1007/s41660-020-00121-y>
- Global Forest Watch. (2024). Deforestation Data Dashboard: Indonesia. World Resources Institute. <https://www.globalforestwatch.org/>
- Gunawan, W. (2025). Elucidating indonesia's palm oil supply chain trends: a bibliometric approach. *JSSEW*, 3(1), 1-20. <https://doi.org/10.61511/jssew.v3i1.2025.1852>
- Hafyan, R., Bhullar, L., Mahadzir, S., Bilad, M., Nordin, N., Wirzal, M., ... & Abdullah, B. (2020). Integrated biorefinery of empty fruit bunch from palm oil industries to produce valuable biochemicals. *Processes*, 8(7), 868. <https://doi.org/10.3390/pr8070868>
- Hasan, M., Fadhil, I., Fahmid, M., & Ahmad, T. (2022). Impact of the european union regulations on indonesian oil palm smallholder farmers. *International Journal of Oil Palm*, 5(1). <https://doi.org/10.35876/ijop.v5i1.69>
- Kadariusman, Y. and Herabadi, A. (2018). Improving sustainable development within indonesian palm oil: the importance of the reward system. *Sustainable Development*, 26(4), 422-434. <https://doi.org/10.1002/sd.1715>
- Kadariusman, Y. and Pramudya, E. (2019). The effects of india and china on the sustainability of palm oil production in indonesia: towards a better understanding of the dynamics of regional sustainability governance. *Sustainable Development*, 27(5), 898-909. <https://doi.org/10.1002/sd.1949>
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2023). Outlook Komoditas Perkebunan: Kelapa Sawit 2023. Jakarta: Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian.
- Khajavi, L., Seyedhosseini, S., & Makui, A. (2011). An integrated forward/reverse logistics network optimization model for multi-stage capacitated supply chain. *Ibusiness*, 03(02), 229-235. <https://doi.org/10.4236/ib.2011.32030>
- Lestari, D., Fitriani, F., Prasmatiwi, F., Sayekti, W., & Lestari, F. (2025). Analysis of the welfare gap among smallholder palm oil farmers in two scheme farming management: a case study in lampung province, indonesia. *Asian Journal of Agriculture and Rural Development*, 15(1), 1-10. <https://doi.org/10.55493/5005.v15i1.5275>
- Lim, C. and Biswas, W. (2018). Sustainability assessment for crude palm oil production in malaysia using the palm oil sustainability assessment framework. *Sustainable Development*, 27(3), 253-269. <https://doi.org/10.1002/sd.1872>
- Lim, C. and Biswas, W. (2019). Sustainability implications of the incorporation of a biogas trapping system into a conventional crude palm oil supply chain. *Sustainability*, 11(3), 792. <https://doi.org/10.3390/su11030792>
- Liu, X. and Xu, J. (2024). Simulation research on logistics distribution path based on colony intelligence optimisation. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1). <https://doi.org/10.2478/amns-2024-1480>
- Madavan, R. and Saroja, S. (2020). Decision making on the state of transformers based on insulation condition using ahp and topsi methods. *Iet Science Measurement & Technology*, 14(2), 137-145. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5337>
- Manik, Y. and Halog, A. (2012). A meta-analytic review of life cycle assessment and flow analyses studies of palm oil biodiesel. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 9(1), 134-141. <https://doi.org/10.1002/ieam.1362>
- Matlou, R., Bahta, Y., Owusu-Sekyere, E., & Jordaan, H. (2021). Impact of agricultural drought resilience on the welfare of smallholder livestock farming households in the northern cape province of south africa. *Land*, 10(6), 562. <https://doi.org/10.3390/land10060562>
- Meijide, A., Rúa, C., Guillaume, T., Röhl, A., Hassler, E., Stiegler, C., ... & Knohl, A. (2020). Measured greenhouse gas budgets challenge emission savings from palm-oil biodiesel. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14852-6>

- Meixner, O., Hackl, S., & Haas, R. (2023). Assessing the sustainability of palm oil by expert interviews—an application of the analytic hierarchy process. *Sustainability*, 15(24), 16954. <https://doi.org/10.3390/su152416954>
- Najib, N., Kanniah, K., Cracknell, A., & Yu, L. (2020). Synergy of active and passive remote sensing data for effective mapping of oil palm plantation in malaysia. *Forests*, 11(8), 858. <https://doi.org/10.3390/f11080858>
- Nasir, N., Aziz, M., & Banitalebi, A. (2019). Carbon absorption control model of oil palm plantation. *Sains Malaysiana*, 48(4), 921-925. <https://doi.org/10.17576/jsm-2019-4804-25>
- Ng, R., Ng, D., & Tan, R. (2013). Systematic approach for synthesis of integrated palm oil processing complex. part 2: multiple owners. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(30), 10221-10235. <https://doi.org/10.1021/ie400846g>
- Ng, Z., Gan, H., Putranto, A., Rhamdhani, M., Zein, S., George, O., ... & Butar, I. (2022). Process design and life cycle assessment of furfural and glucose co-production derived from palm oil empty fruit bunches. *Environment Development and Sustainability*, 25(12), 13937-13958. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02633-8>
- Omran, N., Sharaai, A., & Hashim, A. (2021). Visualization of the sustainability level of crude palm oil production: a life cycle approach. *Sustainability*, 13(4), 1607. <https://doi.org/10.3390/su13041607>
- Pishvae, M., Jolai, F., & Razmi, J. (2009). A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*, 28(4), 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2010.05.001>
- Pollok, L., Spierling, S., Endres, H., & Grote, U. (2021). Social life cycle assessments: a review on past development, advances and methodological challenges. *Sustainability*, 13(18), 10286. <https://doi.org/10.3390/su131810286>
- Ponce-Cueto, E. and Muelas, M. (2015). Design of an integrated forward and reverse logistics network optimization model for commercial goods management. *International Journal of Production Management and Engineering*, 3(1), 25. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2015.3314>
- Rist, L., Feintrenie, L., & Levang, P. (2010). The livelihood impacts of oil palm: smallholders in indonesia. *Biodiversity and Conservation*, 19(4), 1009-1024. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9815-z>
- Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO). (2024). Impact Report 2024. Kuala Lumpur: RSPO Secretariat. <https://rspo.org/>
- Santosa, Y. and Putri, M. (2024). How can we verify deforestation in palm oil mill industries? a proposed methodology. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1407(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1407/1/012021>
- Siregar, K., Supriyanto, S., Rani, D., Nurdiansyah, Y., & Wijayanto, F. (2021). Conceptual design of inventory analysis software to support the life cycle assessment in palm oil production. *E3s Web of Conferences*, 226, 00028. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122600028>
- Siregar, K., Supriyanto, S., Rani, D., Nurdiansyah, Y., & Wijayanto, F. (2021). Conceptual design of inventory analysis software to support the life cycle assessment in palm oil production. *E3s Web of Conferences*, 226, 00028. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122600028>
- Siregar, K., Supriyanto, S., Susanto, D., Setiawan, A., & Sofiah, I. (2022). Development software to evaluate environmental impact for palm oil (*elaeis guineensis jacq*) industry using life cycle assessment approach in indonesia. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1038(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1038/1/012010>
- Sjauw-Koen-Fa, A., Blok, V., & Omta, O. (2018). Exploring the integration of business and csr perspectives in smallholder sourcing. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies*, 8(4), 656-677. <https://doi.org/10.1108/jadee-06-2017-0064>

- Stichnothe, H. and Bessou, C. (2017). Challenges for life cycle assessment of palm oil production system. *Indonesian Journal of Life Cycle Assessment and Sustainability*, 1(2). <https://doi.org/10.52394/ijolcas.v1i2.28>
- Tafaghodi, L., Seyed-Hosseni, S., & Makui, A. (2011). A mathematical model for optimization of an integrated network logistic design. *Management Science Letters*, 1(4), 415-426. <https://doi.org/10.5267/j.msl.2011.05.003>
- Thom, A., Bélières, J., Conradie, B., Salgado, P., Vigne, M., & Fangueiro, D. (2024). Exploring social indicators in smallholder food systems: modeling children's educational outcomes on crop-livestock family farms in madagascar. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1356985>
- Tobin, D., Glenna, L., & Devaux, A. (2016). Pro-poor? inclusion and exclusion in native potato value chains in the central highlands of peru. *Journal of Rural Studies*, 46, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2016.06.002>
- United States Department of Agriculture (USDA). (2024). *Oilseeds: World Markets and Trade Report (May 2024)*. Washington, DC: USDA Foreign Agricultural Service. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/>
- World Resources Institute (WRI). (2024). *Peatland and Fire Monitoring Report*. Jakarta: WRI Indonesia. <https://wri-indonesia.org/>
- Xiong, F., Zhu, S., Xiao, H., Kang, X., & Xie, F. (2021). Does social capital benefit the improvement of rural households' sustainable livelihood ability? based on the survey data of jiangxi province, china. *Sustainability*, 13(19), 10995. <https://doi.org/10.3390/su131910995>
- Yu, H. and Solvang, W. (2018). Improving the decision-making of reverse logistics network design part i: a milp model under stochastic environment., 431-438. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5768-7_46
- Yudha, Y., Biney, M., & Tarigan, S. (2024). Life cycle assessment of oil palm plantation in riau province: evaluating environmental impacts. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1379(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1379/1/012008>
- Zamboni, A., Bezzo, F., & Shah, N. (2009). Spatially explicit static model for the strategic design of future bioethanol production systems. 2. multi-objective environmental optimization. *Energy & Fuels*, 23(10), 5134-5143. <https://doi.org/10.1021/ef9004779>
- Zhao, Z., Li, X., & Zhou, X. (2020). Distribution route optimization for electric vehicles in urban cold chain logistics for fresh products under time-varying traffic conditions. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2020/9864935>
- Zheng, C., Zhang, C., Ma, J., Wu, F., & Sun, K. (2022). Location selection of metro-based distribution nodes for underground logistics system with bi-level programming model. *Symmetry*, 14(11), 2411. <https://doi.org/10.3390/sym14112411>