

Optimasi Rantai Pasok Tandan Buah Segar Dan Pelepah (Limbah) Kelapa Sawit Pada Hulu Rantai Pasok Industri Kelapa Sawit

Martua Philipus Patia Raja¹, Nurhadi Siswanto²

^{1,2)} Departemen Teknik Sistem dan Industri, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Raya ITS, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111
Email: philippurba22@gmail.com

ABSTRAK

Industri kelapa sawit menghadapi tantangan utama berupa tingginya production loss, biaya logistik yang besar, serta belum optimalnya pemanfaatan limbah perkebunan, khususnya pelepah kelapa sawit. Penelitian ini mengembangkan model transshipment problem berbasis Mixed Integer Linear Programming (MILP) untuk mengoptimalkan sistem transshipment multi-komoditi yang mengintegrasikan distribusi tandan buah segar (TBS) dan limbah pelepah. Model dirumuskan dengan tiga fungsi tujuan, yaitu minimasi kerugian produksi (Z1), minimasi total biaya operasional (Z2), dan maksimasi keuntungan sosial-ekonomi (Z3) yang kemudian digabung menjadi 1 fungsi tujuan utama dengan satuan ekonomi. Studi kasus dilakukan di Kalimantan Timur dengan mempertimbangkan aliran TBS dari kebun ke pengepul dan pabrik kelapa sawit (PKS), serta aliran pelepah ke fasilitas pengolahan. Hasil optimasi baseline menunjukkan solusi optimal dengan nilai Z1 sebesar Rp3,13 miliar, Z2 sebesar Rp28,15 miliar, dan Z3 sebesar Rp470,18 miliar, sehingga menghasilkan nilai objektif total sebesar Rp438,89 miliar. Hasil ini menunjukkan bahwa model mampu menekan kerugian produksi, mengendalikan biaya operasional, serta menghasilkan manfaat sosial dan ekonomi yang signifikan. Analisis sensitivitas mengonfirmasi bahwa faktor cuaca dan kapasitas pengolahan pelepah merupakan parameter paling berpengaruh terhadap kinerja sistem, menegaskan pentingnya perencanaan kapasitas dan mitigasi risiko dalam mendukung keberlanjutan rantai pasok kelapa sawit.

Kata kunci: Transshipment multi-komoditi; Rantai pasok; Keberlanjutan sosial; Industri kelapa sawit; MILP; Optimasi

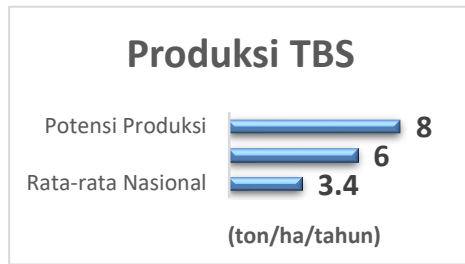
ABSTRACT

The palm oil industry faces significant challenges such as high production losses, large logistics costs, and the underutilization of plantation waste, especially oil palm fronds. This study develops a transshipment problem model using Mixed Integer Linear Programming (MILP) to optimize a multi-commodity transshipment system that manages the distribution of fresh fruit bunches (FFB) and frond waste. The model includes three objectives: minimizing production loss (Z1), minimizing total operational costs (Z2), and maximizing social-economical benefits (Z3), which are combined into a single primary goal expressed in economic terms. A case study in East Kalimantan examines FFB flows from plantations to collectors and palm oil mills (PKS), along with frond flows to processing facilities. The baseline optimization results show an optimal solution with Z1 valued at Rp3.13 billion, Z2 at Rp28.15 billion, and Z3 at Rp470.18 billion, giving a total objective value of Rp438.89 billion. These findings demonstrate that the proposed model effectively reduces production losses, controls operational costs, and yields significant social and economic benefits. Sensitivity analysis confirms that weather conditions and frond processing capacity are the most influential factors shaping overall system performance, emphasizing the importance of capacity planning and risk management to support a sustainable palm oil supply chain.

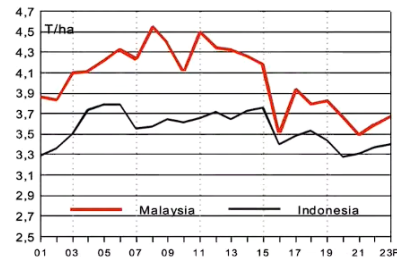
Keywords: Multi-commodity transshipment; Palm oil supply chain; Biomass waste utilization; Social sustainability; Mixed Integer Linear Programming; Multi-objective optimization

Pendahuluan

Industri perkebunan kelapa sawit merupakan salah satu pilar ekonomi penting di negara-negara berkembang dengan iklim tropis. Beberapa contohnya adalah Indonesia dan Malaysia yang telah menguasai hingga lebih dari 80% produksi minyak kelapa sawit di dunia [1]. Adapun produk dari pekebunan kelapa sawit disebut sebagai Tandan Buah Segar (TBS). Tandan buah segar adalah produk primer dari sektor perkebunan kelapa sawit, pada tahap hulu (produksi awal), dan disebut sebagai buah dari pohon kelapa sawit. Industri sawit juga mendorong pertumbuhan ekonomi, yaitu berkontribusi sebanyak 3,25% dari total PDB Indonesia[2], menyerap 16,2 juta tenaga kerja. Untuk program B-35 pada 2024 telah menghemat hingga Rp 123 T dan program B-40 pada 2025 diprediksi akan menghemat hingga Rp147,5 T [2].



Gambar 1. Nilai dari potensi produksi TBS dengan produksi swasta besar dan rata-rata nasional [2]



Gambar 2. Perbandingan produktivitas kelapa sawit antara Malaysia dan Indonesia (ton/ha) [2]

Berdasarkan grafik perbandingan jumlah produksi tandan buah segar antara Malaysia dan Indonesia pada Gambar 2, produktivitas sawit di Indonesia lebih rendah dibandingkan dengan Malaysia. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 1 di mana rata-rata produksi TBS nasional masih berada pada angka 3.4 ton/ha/tahun, dan untuk perusahaan swasta besar, jumlah produksi tandan buah segar masih berada pada angka 6 ton/ha/tahun [2]. Baik produktivitas perkebunan swasta besar maupun rata-rata perkebunan nasional, masih berada di bawah potensi produksi pada umumnya, yaitu 8 ton/ha/tahun.

Berdasarkan [3], [4], [5], negara-negara seperti Malaysia dan lain-lainnya memiliki produktivitas perkebunan kelapa sawit yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan banyak negara penghasil lainnya. Keberhasilan ini tidak terlepas dari integrasi berbagai faktor kunci yang saling mendukung. Kemajuan teknologi memainkan peran penting melalui penerapan pertanian presisi, pemanfaatan kecerdasan buatan (AI), serta teknologi *remote sensing* yang meningkatkan efisiensi produksi [3], [6]. Selain itu, dukungan pemerintah dalam bentuk kebijakan, regulasi, serta insentif terhadap praktik pertanian berkelanjutan turut memperkuat sistem produksi [7]. Praktik keberlanjutan seperti sistem agroforestri dan konservasi keanekaragaman hayati juga menjadi strategi utama dalam menjaga kelestarian lingkungan dan produktivitas lahan [3].

Salin itu, terdapat beberapa masalah yang berkaitan dengan rendahnya kapasitas produksi sawit di Indonesia adalah terjadi buruknya kualitas infrastruktur jalan di daerah perkebunan [2]. Dengan kondisi infrastruktur jalan yang buruk, maka akan menurunkan tingkat efisiensi proses distribusi panen, dimana Tandan Buah Segar (TBS) yang siap untuk dipanen, harus secepatnya diproses di pabrik (*mill*) untuk menghindari peningkatan kadar asam lemak bebas (*Free Fatty Acid* atau FFA) dalam *crude palm oil* (CPO). Masuknya Tandan Buah Segar (TBS) yang tidak memenuhi standar ke dalam pabrik pengolahan akan menyebabkan kerugian dalam aspek ekonomi bagi perusahaan terkait, karena dapat menurunkan kualitas minyak sawit mentah atau *crude palm oil* (CPO) atau dapat dihitung sebagai *production loss*.

Penanganan limbah yang efektif pada praktik industri kelapa sawit tidak hanya penting untuk mengurangi dampak lingkungan tetapi juga berpotensi untuk meningkatkan kesejahteraan dari peningkatan nilai ekonomi yang dihasilkan dari pengolahan limbah tersebut. Diketahui juga bahwa di Indonesia, terdapat jumlah limbah sawit yang tinggi, yaitu mencapai 60 juta ton/tahun [2]. Limbah kelapa sawit bisa berasal dari pengolahan Tandan Buah Segar di pabrik, maupun dari aktivitas perkebunan kelapa sawit. Limbah dari perkebunan kelapa sawit, yakni pelepah kelapa sawit memiliki potensi yang menjanjikan dikarenakan ketersediaannya yang sangat melimpah saat ini. Sebuah penelitian menyebutkan bahwa jumlah pelepah yang dapat dihasilkan per hektar per tahun adalah 10-34 ton/ha/tahun [8].

Berdasarkan tinjauan literatur, manajemen limbah merupakan aspek krusial yang belum optimal dalam penerapan rantai pasok kelapa sawit berkelanjutan. Studi [9] menegaskan bahwa keberlanjutan dipengaruhi oleh manajemen limbah, transportasi ramah lingkungan, serta kebijakan dan regulasi, sementara [10] melaporkan bahwa kinerja *Green Supply Chain Management* sektor perkebunan masih rendah (59,3%), menunjukkan perlunya perbaikan pada manajemen limbah dan efisiensi operasional. Selain itu, [11] melalui pendekatan SCOR-DS menunjukkan bahwa kinerja keberlanjutan aktor hulu masih berada di bawah standar industri (64,83%), yang mencerminkan lemahnya pengelolaan limbah di tingkat perkebunan. Temuan ini mengindikasikan adanya celah penelitian pada integrasi manajemen limbah di sektor hulu, sehingga penelitian ini difokuskan pada pengembangan model optimasi yang mengintegrasikan pengelolaan limbah pelepah kelapa sawit untuk meningkatkan keberlanjutan rantai pasok.

Penelitian ini akan dilakukan di regional Kalimantan Timur untuk mempermudah proses pengambilan data dan pengamatan lapangan. Optimasi dilakukan dengan mempertimbangkan 3 fungsi tujuan, yaitu minimasi *production loss* karena kurang baiknya integrasi pemetaan wilayah rantai pasok mulai dari jadwal panen perkebunan, penjemputan buah dari perkebunan untuk diantarkan ke pabrik yang berdampak pada penurunan kualitas sehingga tidak memenuhi standarisasi pabrik [12]. Untuk fungsi tujuan 2, yaitu minimasi total biaya atau *total cost*, dipilih dalam penelitian ini karena sebagai fungsi penyeimbang dari fungsi tujuan lain. Fungsi biaya mampu memberi batas realistis terhadap keputusan yang terlalu fokus pada satu tujuan. Dengan meminimalkan *cost*, maka akan dipastikan bahwa upaya mengurangi *production loss* atau meningkatkan dampak sosial tetap berada

dalam batas kemampuan sumber daya[13]. Untuk fungsi tujuan 3, yaitu maksimasi dampak sosial, dipilih karena penelitian ini dapat mendorong sistem yang mendukung kesejahteraan masyarakat lokal, misalnya peningkatan pendapatan petani dan pemberdayaan tenaga kerja lokal yang akan berdampak pada pengurangan kesenjangan sosial di daerah tersebut[14].

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode optimasi. Metode optimasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah model *Multi Integer Linear Programming (MILP)*. Permasalahan dalam pengambilan Keputusan yang dihadapi oleh industri ini adalah *transshipment problem*, dimana alokasi aliran material perlu dialokasikan dengan optimal dengan sumber daya terbatas dan menghasilkan keuntungan besar serta berdampak positif bagi sosial.

1. Definisi indeks dari model matematika

Tabel 1. Definisi indeks dari model matematika

Notasi	Deskripsi
$i = \{1, 2, \dots, I\}$	Indeks dan himpunan lokasi kebun
$j = \{1, 2, \dots, J\}$	Indeks dan himpunan lokasi pengepul TBS
$k = \{1, 2, \dots, K\}$	Indeks dan himpunan pabrik pengolahan TBS
$p = \{1, 2, \dots, M\}$	Indeks dan himpunan fasilitas pengelolaan pelepah (menjadi lidi)
$t = \{1, 2, \dots, T\}$	Indeks dan himpunan periode waktu (Bulan)
$c = \{TBS, CPO, Pe, PKO\}$	Indeks dan himpunan komoditas dalam sistem

2. Definisi parameter dan variabel keputusan

Tabel 2. Parameter Produksi dan Loss

Parameter	Definisi	Nilai	Satuan	Reference
Q_{it}	Potensi TBS (ton) pada kebun (i) di periode (t)	Data produksi	Ton	[1], [3], [4], [6], [12]
L_{it}	Persentase loss TBS (periode (t))	Data Proporsi <i>loss</i>	-	[9], [14], [24], [26]

Tabel 3. Parameter Harga dan Insentif

Parameter	Definisi	Nilai	Satuan	Reference
H_{TBS}	Harga jual TBS (Rp/ton)	3.000.000	Rp / ton	[12], [16]
H_{pe}	Harga jual produk pelepah	500.000	Rp / ton	[8], [9], [13]
H_{CPO}	Harga jual produk CPO	14.475.000	Rp / ton	[12], [16]
H_{PKO}	Harga jual produk PKO	12.454.950	Rp / ton	[12], [16]
I_i	Insentif petani (Rp/ton)	3.000.000	Rp / ton	[7], [10], [11], [22]
I_j	Insentif pengepul (Rp/ton)	3.500.000	Rp / ton	[15], [16]
V_p	Manfaat sosial ketika fasilitas pelepah dibuka	52.800.000	Rp / periode	[7], [10], [22], [26]

Tabel 4. Parameter Biaya Transportasi

Parameter	Definisi	Nilai	Satuan	Reference
$cost_{ij}^{trans}$	Biaya transport dari kebun (i) ke pengepul (j)	Berdasarkan matriks jarak	Rp / ton	[15], [17], [18], [19], [20], [21]
$cost_{jk}^{trans}$	Biaya transport dari pengepul (j) ke PKS (k)	Berdasarkan matriks jarak	Rp / ton	[12], [16], [17], [18]
$cost_{ip}^{trans}$	Biaya transport dari kebun (i) ke fasilitas (p)	Berdasarkan matriks jarak	Rp / ton	[13], [14], [26]

Tabel 5. Parameter Biaya Proses dan Fasilitas

Parameter	Definisi	Nilai	Satuan	Reference
c_j^{proc}	Biaya proses pengepul (Rp/ton)	100.000	Rp / ton	Wawancara pengepul
c_k^{proc}	Biaya proses PKS (Rp/ton)	120.000	Rp / ton	Wawancara Pabrik
c_p^{proc}	Biaya proses pelepah (Rp/ton)	120.000	Rp / ton	Asumsi
F_p	CAPEX fasilitas pelepah	1.931.198.331,56	Rp	[13], [14], [26]
$OPEX_p$	Biaya operasional pelepah per periode	10.000.000	Rp / period	[15], [16], [26]

Tabel 6. Parameter Kapasitas dan konversi

Parameter	Definisi	Nilai	Satuan	Reference
Cap_k	Biaya proses PKS (Rp/ton)	21.450	Ton / period	Wawancara Parbik
Cap_p	Biaya proses pelepah (Rp/ton)	20	Ton / period	[13], [14], [26]
OER_{CPO}	Oil Extraction Rate CPO	0,23	-	[12], [16]
OER_{PKO}	Oil Extraction Rate PKO	0.05	-	[12], [16]
η_p	Efisiensi konversi pelepah menjadi produk	0.01	-	[8], [9], [13]

Tabel 7. Variabel Keputusan

Variabel	Definisi	Satuan	Reference
x_{ijt}	Ton TBS dikirim dari kebun (i) ke pengepul (j) pada periode (t)	Ton	[17], [18], [19], [20], [21]
y_{jkt}	Ton TBS dikirim dari pengepul (j) ke PKS (k) pada periode (t)	Ton	[12], [16], [17]
$x_{p_{ipt}}$	Ton pelepah dikirim dari kebun (i) ke fasilitas (p)	Ton	[13], [14], [26]
OF_p	1 jika fasilitas pelepah p dibuka	Biner	[13], [26]

3. Fungsi tujuan keseluruhan merupakan akumulasi fungsi tujuan dari 3 fungsi tujuan 1, 2, dan 3, yang ingin dioptimalkan untuk mendapatkan solusi optimal.

$$Max Z = Z_3 - (Z_1 + Z_2) \quad (1)$$

Pada Persamaan 1, Z_1, Z_2, Z_3 semua akan dikonversikan kedalam skala ekonomi. Model ini tidak menggunakan bobot eksplisit maupun normalisasi berbasis preferensi subjektif. Setiap komponen dinilai berdasarkan nilai ekonomi aktual atau yang dapat diverifikasi. Berbeda dengan pendekatan multiobjective berbasis Pareto frontier atau goal programming yang memerlukan penentuan bobot atau target aspirasi, penelitian ini memilih pendekatan single-objective berbasis monetisasi penuh untuk menjaga transparansi, replikabilitas, dan kemudahan interpretasi kebijakan. Dengan pendekatan ini, solusi optimal diperoleh dari keseimbangan alami antara biaya, kerugian, dan manfaat ekonomi yang terjadi di dalam sistem.

4. Fungsi tujuan 1 (Z_1) adalah minimasi *production loss* yang dihasilkan dari kebun i

$$Z_1 = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (Q_{it} \cdot L_t \cdot H_{TBS}) \quad (2)$$

Tabel 8. Terms dalam fungsi tujuan Z_1

Term	Penjelasan	Satuan
Z_1	Total kerugian ekonomi akibat <i>loss</i> TBS	Rp
Q_{it}	Potensi produksi TBS kebun i pada periode t	ton
L_{it}	Tingkat <i>loss</i> TBS kebun i pada periode t	-
$Q_{it} \cdot L_{it}$	Jumlah TBS yang hilang	ton
H_{TBS}	Harga TBS	Rp/ton

Adapun untuk tingkat loss tandan buah segar pada kebun i (L_{it}) akan berpacu pada tabel dibawah ini.

Tabel 9. Proporsi kriteria Loss berdasarkan curah hujan

Hari Hujan	Intensitas Hujan	BM	TK	BTP	BR age	Brondol	BLM rule	Buah Batu	BP	Kotoran	Air, Pasir
0	Kering	0.1	0.05	0.1	0.05	0.25	0.05	0.05	0.02	0.18	0.15
1	Ringan	0.1	0.05	0.09	0.05	0.26	0.05	0.04	0.02	0.18	0.16
2	Ringan-Sedang	0.1	0.05	0.08	0.08	0.24	0.06	0.04	0.02	0.16	0.17
3	Sedang	0.08	0.04	0.07	0.2	0.18	0.1	0.03	0.02	0.15	0.13
4	Sedang-Lebat	0.06	0.03	0.06	0.35	0.15	0.12	0.02	0.02	0.12	0.07
5	Lebat	0.05	0.02	0.04	0.45	0.1	0.11	0.02	0.02	0.12	0.07
6	Lebat	0.04	0.01	0.03	0.55	0.08	0.12	0.01	0.02	0.07	0.07
7	Lebat Ekstrem	0.03	0.01	0.02	0.65	0.05	0.12	0.01	0.01	0.05	0.05

Tabel 10. Definisi Kriteria Loss

Kriteria	Keterangan	Kriteria	Keterangan
BM	Buah Mentah	BLM rule	Tidak sesuai standar BLM (grading)
TK	Tangkai	Buah Batu	buah keras / batu
BTP	Buah Tidak Panen	BP	Buah Busuk
BR age	Bruising / restan umur buah	Kotoran	kontaminan daun, tanah, dll
Brondol	Brondolan tidak terangkut	Air, Pasir	kadar air dan pasir berlebih

Tabel 9 memperlihatkan proporsi loss berdasarkan intensitas hujan merupakan hasil kompilasi penilaian teknis pabrik yang menjadi objek amatan yang menyajikan distribusi penyebab loss tandan buah segar pada berbagai kondisi cuaca. Tabel proporsi ini nanti akan dijadikan sebagai acuan penentuan estimasi loss pada produksi harian pada model dengan melihat pola cuaca harian. Tabel 10 adalah detail dari kategori yang juga disajikan pada Tabel 9.

5. Fungsi tujuan 2 (Z_2) adalah minimasi total biaya yang dikeluarkan diseluruh lini sistem.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_2 = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} C_{ij}^{\text{trans}} \cdot x_{ijt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} C_{jk}^{\text{trans}} \cdot y_{jkt} + \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} C_{ip}^{\text{trans}} \cdot xp_{ipt} + \sum_{i \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} C_{kt}^{\text{proc}} \cdot y_{jkt} + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} C_p^{\text{proc}} \cdot xp_{ipt} + \sum_{p \in P} F_p \cdot OF_p + \sum_{t \in T} OPEX_p \cdot OF_p \end{aligned} \quad (3)$$

Tabel 11. Terms dalam fungsi tujuan 2

Term	Keterangan	Satuan
$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} C_{ij}^{\text{trans}} \cdot x_{ijt}$	Total biaya transportasi TBS dari kebun i ke pengepul j pada periode t	Rp
$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} C_{jk}^{\text{trans}} \cdot y_{jkt}$	Total biaya transportasi TBS dari pengepul j ke PKS k pada periode t	Rp
$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} C_{ip}^{\text{trans}} \cdot xp_{ipt}$	Total biaya transportasi pelepah dari kebun i ke fasilitas pelepah p pada periode t	Rp
$\sum_{i \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} C_{kt}^{\text{proc}} \cdot y_{jkt}$	Total biaya proses TBS di PKS k	Rp
$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} C_p^{\text{proc}} \cdot xp_{ipt}$	Total biaya proses di PKS k	Rp
$\sum_{p \in P} F_p \cdot OF_p$	Total biaya investasi awal (CAPEX) pembukaan fasilitas pelepah	Rp
$\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} OPEX_p \cdot OF_p$	Total biaya operasional (OPEX) fasilitas pelepah selama periode perencanaan	Rp

6. Fungsi tujuan 3 (Z_3) adalah maksimasi keuntungan sosial dan ekonomi.

$$\begin{aligned}
 \text{Max } Z_3 = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} I_{\text{farmer}} \cdot x_{ijt} + \sum_{i \in J} \sum_{j \in K} \sum_{t \in T} I_{\text{collector}} \cdot y_{jkt} \\
 & \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} (y_{jkt} \cdot \text{OER}_{\text{CPO}} \cdot H_{\text{CPO}} + y_{jkt} \cdot \text{OKR}_{\text{PKO}} \cdot H_{\text{PKO}}) + \\
 & \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} (x_{p_{ipt}} \cdot \eta_p \cdot H_p) + \sum_{p \in P} \text{OF}_p \cdot V_{\text{Sosial}}
 \end{aligned} \quad (4)$$

Tabel 12. Terms dalam fungsi tujuan 3

Term	Keterangan	Satuan
$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} I_{\text{farmer}} \cdot x_{ijt}$	Total insentif yang diterima petani dari aliran TBS kebun→pengepul	Rp
$\sum_{i \in J} \sum_{j \in K} \sum_{t \in T} I_{\text{collector}} \cdot y_{jkt}$	Total insentif yang diterima pengepul dari aliran TBS pengepul→PKS	Rp
$\sum_{i \in J} \sum_{j \in K} \sum_{t \in T} (y_{jkt} \cdot \text{OER}_{\text{CPO}} \cdot H_{\text{CPO}})$	Total pendapatan CPO dari TBS yang diproses	Rp
$\sum_{i \in J} \sum_{j \in K} \sum_{t \in T} (y_{jkt} \cdot \text{OKR}_{\text{Kernel}} \cdot H_{\text{Kernel}})$	Total pendapatan Kernel dari TBS yang diproses	Rp
$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} (x_{p_{ipt}} \cdot \eta_p \cdot H_p)$	Total pendapatan dari produk pelepah yang diolah	Rp
$\sum_{p \in P} \text{OF}_p \cdot V_{\text{Sosial}}$	Total manfaat sosial dari pembukaan fasilitas pelepah	Rp

Selain dari pendapatan yang diperoleh setiap entitas dalam sistem, manfaat sosial akan tergambar dari pembukaan lapangan kerja dengan dibukanya fasilitas pelepah. Berikut adalah contoh manfaat sosial dari pembukaan fasilitas pengolahan pelepah.

Tabel 13. Status Pembukaan Fasilitas Pelepah dan Manfaat Sosial pada Model Baseline dan Smoothing

Fasilitas Pelepah	Status OF (Baseline)	Status OF (Smoothing)	Manfaat Sosial per Fasilitas (Rp)
P1	1	1	52.800.000
P2	1	1	52.800.000
P3	1	1	52.800.000
P4	1	1	52.800.000
Total	4 fasilitas	4 fasilitas	211.200.000

Tabel 13 diatas memperlihatkan manfaat yang dapat diperoleh dengan terbuka fasilitas pelepah, dimana jika 1 fasilitas dibuka, maka akan menyerap 16 tenaga kerja (berdasarkan kebutuhan untuk menjalankan proses didalam fasilitas pengolahan pelepah). Jika diasumsikan upah yang diperoleh tiap pekerja adalah Rp 3.300.000 (UMR Kalimantan Timur), maka secara akumulatif untuk 1 fasilitas akan diperoleh manfaat bagi pekerja sebesar Rp 52.800.000. Dalam sistem model, dirancang 4 fasilitas, sehingga jika seluruh fasilitas dibuka, maka manfaat sosial yang diperoleh adalah 211.200.000 per periode waktu (bulan).

7. Fungsi kendala, merupakan persamaan atau pertidaksamaan yang menjadi pembatas nilai dari variabel.

Subject to

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} \leq Q_{it}(1 - L_t) \quad \forall i, t \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} x_{p_{ipt}} \leq \eta_p \cdot Q_{it} \quad \forall i, t \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijt} \geq \sum_{k \in K} y_{jkt} \quad \forall j, t \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} y_{jkt} \leq Cap_k \quad \forall k, t \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} xp_{ijkt} \leq Cap_p \cdot OF_p \quad \forall p, t \quad (9)$$

$$y_{jkt} = 0, \text{ jika } jarak_{ij} + jarak_{jk} > batas_maks \quad (10)$$

$$\begin{aligned} x_{ijt}, y_{jkt}, xp_{ipt} &\geq 0 \\ OF_{ijt} &\in \{0,1\} \end{aligned} \quad (11)$$

Seluruh *constraints* yang ditampilkan dirancang untuk merepresentasikan batasan fisik dan operasional utama dalam rantai pasok kelapa sawit terintegrasi. Persamaan 16 adalah *constraint* keseimbangan aliran memastikan bahwa total aliran tandan buah segar (TBS) dari kebun tidak melebihi produksi efektif setelah mempertimbangkan *production loss*, sehingga menjaga konservasi material dan konsistensi aliran dalam sistem [17], [18]. Persamaan 17, yakni batasan kapasitas pelepah memodelkan pembentukan limbah sebagai fungsi proporsional dari produksi tandan buah segar, sejalan dengan pendekatan pemodelan *by-product* dalam rantai pasok agroindustri [16], [20]. Persamaan 18, yakni keseimbangan aliran di tingkat pengepul memastikan tidak terjadi pembentukan aliran semu, sementara Persamaan 19, batasan kapasitas PKS merefleksikan keterbatasan nyata fasilitas pengolahan [19], [22]. Persamaan 20 adalah *constraint* terkait integrasi variabel biner pada fasilitas pelepah menghubungkan keputusan pembukaan fasilitas dengan kapasitas operasionalnya, sebagaimana umum digunakan dalam model *facility location-allocation* [23], [24]. Selain itu, Persamaan 21 batasan kelayakan berbasis jarak membatasi aliran yang berpotensi menyebabkan *restan* dan penurunan kualitas tandan buah segar akibat keterlambatan transportasi [25]. Persamaan 21, yakni *constraint* terkait non-negatif dan keputusan fasilitas bersifat biner untuk memastikan formulasi *Mixed Integer Linear Programming* yang valid dan konsisten [26].

Hasil Dan Pembahasan

Peneliti melakukan penelitian di provinsi Kalimantan Timur, tepatnya di 3 kota, yaitu Kota Bontang, Kabupaten Kutai Timur, dan Kabupaten Kutai Kartanegara. Wawancara dilakukan ke beberapa kebun rakyat dan pengepul yang tersebar di 3 kota tersebut. Untuk pabrik yang dijadikan objek amatan adalah PT Dinamika Prima Arta, Dept. Purchasing. Berikut adalah hasil dari optimasi model yang diusulkan oleh peneliti.

Tabel 14. Hasil optimasi model yang diajukan

Status	Z1	Z2	Z3	Z Total
Optimal	3,134,385,207	28,153,412,154	470,181,903,421	438,894,106,060

Tabel 15. Hasil optimasi Z1 untuk setiap periode t

Periode	Loss (ton)	Persentase Loss dari Gross Supply
T1	300,35	~1,9%
T2	420,69	~3,0%
T3	323,76	~2,5%

Secara keseluruhan, nilai Z1 menunjukkan bahwa kerugian akibat *loss* TBS sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional setiap periode. Periode T1 memberikan kinerja terbaik dengan *loss* terendah, T2 menjadi periode paling tidak efisien dengan kerugian terbesar, sedangkan T3 menunjukkan pemulihan parsial. Temuan ini menegaskan bahwa stabilitas penanganan pascapanen dan kelancaran distribusi merupakan faktor kunci dalam meminimalkan *loss* dan menjaga nilai ekonomi TBS dalam rantai pasok.

Tabel 16. Referensi parameter dan variabel keputusan

No.	Komponen Biaya (Z2)	Nilai (Rp)	Penjelasan Singkat
1	Biaya Transport TBS Kebun → Pengepul (cost_IJ)	7.016.420.166	Biaya pengangkutan TBS dari seluruh kebun menuju pengepul; komponen biaya terbesar karena banyak rute dan volume tinggi.
2	Biaya Transport TBS Pengepul → PKS (cost_JK)	7.065.474.346	Biaya distribusi TBS dari pengepul menuju PKS; nilainya hampir sama dengan cost_IJ karena volume yang besar.
3	Biaya Proses TBS di PKS (cost_proc_PKS)	4.221.487.514	Biaya pemrosesan TBS di PKS; bergantung pada total tonase TBS yang masuk PKS.
4	Biaya Transport Pelepah (cost_IP)	1.141.236.801	Biaya angkut pelepah dari kebun menuju fasilitas pelepah; relatif rendah karena volume pelepah lebih kecil dari TBS.

No.	Komponen Biaya (Z2)	Nilai (Rp)	Penjelasan Singkat
5	Biaya Proses Pelepah (cost_proc_p)	864.000.001	Biaya pengolahan pelepah di fasilitas; mengikuti jumlah tonase pelepah yang diproses.
6	Biaya CAPEX Fasilitas Pelepah (cost_CAPEX_p)	7.724.793.326	Biaya investasi pembukaan fasilitas pelepah; salah satu komponen terbesar.
7	Biaya OPEX Fasilitas Pelepah (cost_OPEX_p)	120.000.000	Biaya operasional rutin fasilitas pelepah selama 3 periode.
8	Total Biaya Operasional Periode T1 (cost_T1)	7.459.438.004	Total seluruh biaya operasional selama periode T1.
9	Total Biaya Operasional Periode T2 (cost_T2)	6.708.267.720	Total seluruh biaya operasional selama periode T2.
10	Total Biaya Operasional Periode T3 (cost_T3)	6.260.913.104	Total seluruh biaya operasional selama periode T3.
11	Total Z2_val (Biaya Operasional Sistem)	28.153.410.000	Jumlah keseluruhan biaya operasional sistem, termasuk transport, proses, CAPEX, OPEX.

Tabel ini menyajikan gambaran rinci komponen penyusun biaya operasional sistem (Z2) dalam pengelolaan aliran TBS dan pelepah dari kebun hingga fasilitas pengolahan. Terlihat bahwa biaya transportasi tandan buah segar, baik dari kebun ke pengepul maupun dari pengepul ke PKS, menjadi kontributor terbesar terhadap total biaya, yang mencerminkan besarnya volume angkutan serta variasi jarak distribusi. Biaya signifikan lainnya berasal dari CAPEX fasilitas pelepah yang merepresentasikan kebutuhan investasi jangka panjang, diikuti oleh biaya proses TBS di PKS yang menunjukkan tingginya kebutuhan energi, tenaga kerja, dan operasional. Sementara itu, biaya transportasi dan proses pelepah relatif lebih kecil karena volume alirannya lebih terbatas, serta OPEX fasilitas pelepah yang rendah menandakan bahwa biaya rutin per periode tidak sebesar investasi awalnya.

Tabel 17. Struktur Komposisi Biaya Operasional Total (Z2)

Kategori Utama	Komponen Termasuk	Total (Rp)	Persentase dari Z2
Transportasi	cost_IJ + cost_JK + cost_IP	15.22 M	≈ 54%
Proses	cost_proc_PKS + cost_proc_p	5.08 M	≈ 18%
Investasi (CAPEX)	cost_CAPEX_p	7.72 M	≈ 27%
OPEX Fasilitas	cost_OPEX_p	0.12 M	≈ <1%
Total Z2	-	28.15 M	100%

Tabel 6. menunjukkan pembagian total biaya operasional sistem (Z2) ke dalam empat kategori utama: transportasi, proses, CAPEX, dan OPEX fasilitas. Biaya transportasi menjadi komponen terbesar (±54%), menandakan bahwa pergerakan tandan buah segar dan pelepah merupakan aktivitas paling mahal. Biaya proses menyumbang sekitar 18% akibat kebutuhan energi dan operasional, sementara CAPEX fasilitas berkontribusi signifikan (±27%) sebagai beban investasi awal. Sebaliknya, OPEX fasilitas relatif sangat kecil (<1%). Struktur ini menegaskan bahwa efisiensi logistik dan strategi w investasi berperan penting dalam menekan biaya Z2.

Tabel 18. Komponen keuntungan sosial dan ekonomi (Z3)

No	Komponen Z3	Nilai (Rp)
1	Pendapatan CPO	140.543.873.070
2	Pendapatan Kernel	11.830.143.581
3	Pendapatan Produk Pelepah	43.200.000.041
4	Insentif untuk Petani	126.644.623.729
5	Insentif untuk Pengepul	147.752.063.001
6	Manfaat Sosial Fasilitas Pelepah	211.200.000
Total Keuntungan Sosial & Ekonomi		470.181.903.421

Tabel 8 menunjukkan bahwa total keuntungan sosial dan ekonomi (Z3) mencapai Rp 470,18 miliar, yang berasal dari pendapatan produk dan manfaat sosial. Kontributor utama adalah pendapatan CPO sebesar Rp 140,54 miliar, diikuti oleh PKO sebesar Rp 11,83 miliar. Produk pelepah juga memberikan kontribusi signifikan sebesar Rp 43,20 miliar, menunjukkan peningkatan nilai tambah melalui diversifikasi biomassa. Dari aspek sosial, insentif petani (Rp 126,64 miliar) dan pengepul (Rp 147,75 miliar) menjadi komponen penting dalam memperkuat kesejahteraan aktor hulu.

Tabel 19. Kontribusi Manfaat Sosial Fasilitas Pelepah terhadap Z3)

Fasilitas Pelepah	OF	Status	Manfaat sosial per fasilitas (Rp)	Total manfaat (Rp)
P1	1	Buka	52.800.000	52.800.000

P2	1	Buka	52.800.000	52.800.000
P3	1	Buka	52.800.000	52.800.000
P4	1	Buka	52.800.000	52.800.000
Total			211.200.000	

Tabel 9 tersebut menunjukkan bahwa seluruh fasilitas pelepah (P1–P4) dipilih untuk dibuka (OF = 1) oleh model optimasi. Setiap fasilitas memberikan manfaat sosial yang sama sebesar Rp 52,8 juta, sehingga total manfaat sosial yang dihasilkan mencapai Rp 211,2 juta. Hasil ini mengindikasikan bahwa pembukaan fasilitas pelepah memberikan kontribusi sosial yang signifikan dan konsisten—terutama dalam bentuk penciptaan lapangan kerja dan penguatan ekonomi lokal—serta dinilai layak secara sosial dalam struktur solusi

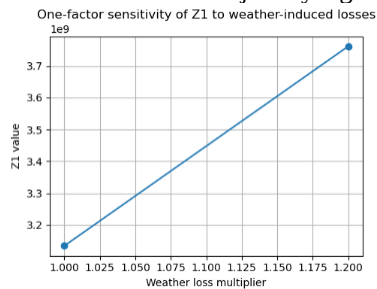
Sensitivity Analysis

Analisis sensitivitas dalam penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan One-At-a-Time (OAT) untuk mengevaluasi respons model terhadap perubahan parameter kunci secara terkontrol. Pada pendekatan OAT, satu parameter diubah secara bertahap dalam rentang yang telah ditentukan, sementara parameter lainnya dipertahankan pada nilai baseline. Dengan demikian, pengaruh individual masing-masing parameter terhadap fungsi objektif dapat diisolasi dan dianalisis secara jelas. Total skenario OAT yang diuji adalah 42 skenario.

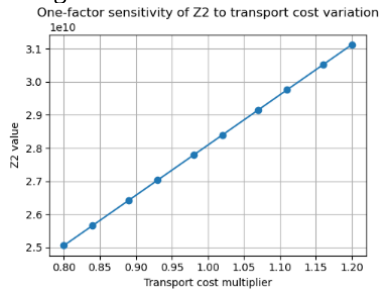
Tabel 20. Ruang lingkup skenario analisis sensitivitas parameter Model

Parameter	Rentang	Level yang diuji	$\Delta Z1$ (%)	$\Delta Z2$ (%)	$\Delta Z3$ (%)	Dampak Dominan
Transport multiplier	0.8 – 1.2	10	0.0%	-21.6%	0.0%	Z2
PKS capacity factor	0.7 – 1.3	10	0.0%	-0.7%	-0.9%	Z3
Pelepah capacity	10 – 30 ton/hari	10	0.0%	-7.2%	-9.2%	Z3
OPEX	5 – 15 juta	10	0.0%	-0.4%	0.0%	Z2
Weather loss factor	dry – wet	2	-20.0%	0.3%	0.4%	Z1

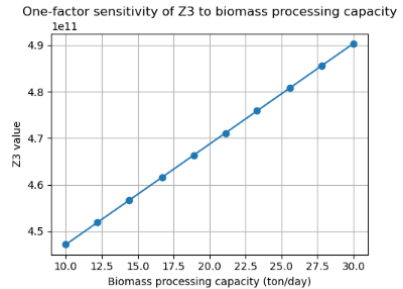
Tabel 10 menegaskan bahwa kerugian produksi (Z1) terutama dipengaruhi oleh kondisi cuaca yang bersifat eksogen, kinerja ekonomi (Z2) sangat sensitif terhadap variasi biaya transportasi, dan manfaat sosial (Z3) terutama ditentukan oleh kapasitas pemanfaatan biomassa. Tidak ditemukannya parameter yang secara simultan mendominasi seluruh fungsi tujuan menunjukkan bahwa model yang diusulkan memiliki ketahanan struktural serta trade-off keberlanjutan yang seimbang.



Gambar 3. Hasil sensitivity analysis one factor dengan Z1

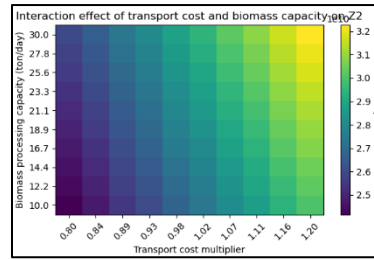


Gambar 4. Hasil sensitivity analysis one factor dengan Z2



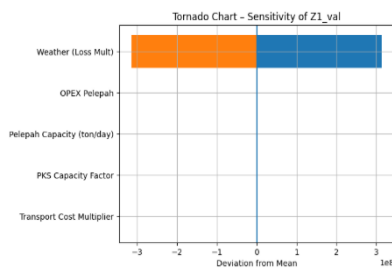
Gambar 5. Hasil sensitivity analysis one factor dengan Z3

Berdasarkan Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6, dapat dilihat bahwa hasil analisis setiap fungsi objektif memiliki sensitivitas yang berbeda. Nilai Z1 terutama dipengaruhi oleh kehilangan akibat kondisi cuaca, Z2 sensitif terhadap biaya transportasi dan kapasitas pemanfaatan biomassa, sedangkan Z3 didominasi oleh kapasitas pengolahan biomassa. Secara umum, model menunjukkan kestabilan terhadap variasi parameter moderat, sementara perubahan pada faktor kehilangan dan kapasitas biomassa menyebabkan pergeseran solusi optimal yang lebih signifikan.

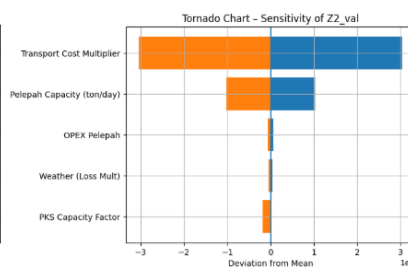


Gambar 6. Heatmap pengaruh interaksi antara transport cost multiplier dan kapasitas pengolahan pelepah terhadap nilai fungsi biaya operasional total (Z2).

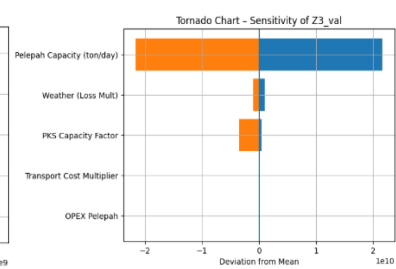
Analisis sensitivitas dua faktor dilakukan untuk mengidentifikasi efek interaksi antar parameter. Gambar 7 menampilkan peta panas (heatmap) interaksi antara pengali biaya transportasi dan kapasitas pengolahan biomassa terhadap nilai Z2. Hasil menunjukkan bahwa pengaruh biaya transportasi terhadap Z2 semakin kuat pada tingkat kapasitas biomassa yang lebih tinggi, menandakan bahwa dampak parameter tidak bersifat independen dan kebijakan satu faktor berpotensi kurang optimal.



Gambar 7. Tornado chart analisis sensitivitas parameter terhadap nilai kerugian produksi (Z1)



Gambar 8. Tornado chart analisis sensitivitas parameter terhadap biaya operasional total (Z2)



Gambar 9. Tornado chart analisis sensitivitas parameter terhadap keuntungan sosial dan ekonomi (Z3).

Untuk menilai pengaruh relatif masing-masing parameter, dilakukan analisis tornado. Gambar 8 menunjukkan bahwa kehilangan akibat kondisi cuaca paling memengaruhi Z1, sementara pada Gambar 9, biaya transportasi dan kapasitas pengolahan biomassa menjadi faktor dominan bagi Z2. Adapun Gambar 10, Z3 terutama ditentukan oleh kapasitas pengolahan biomassa. Konsistensi hasil ini dengan analisis sensitivitas satu faktor dan analisis interaksi menegaskan bahwa pemanfaatan biomassa dan mitigasi kehilangan merupakan titik pengungkit utama dalam meningkatkan keberlanjutan sistem.

Validasi Model

Model baseline merepresentasikan kondisi aktual (*as-is*) rantai pasok kelapa sawit tanpa intervensi operasional, sehingga digunakan sebagai titik acuan (*benchmark*) evaluasi kinerja sistem. Skenario *smoothing harvest schedule* selanjutnya diterapkan untuk menstabilkan suplai harian ke pabrik, dan perbandingan nilai fungsi tujuan (Z) digunakan untuk menilai efektivitas perbaikan yang diusulkan.

Tabel 21. Hasil Running Model Baseline optimasi dengan Python

Model	Z1	Z2	Z3	Z Total
Baseline	Rp. 3,134,385,207	Rp. 28,153,412,154	Rp. 470,181,903,421	Rp. 438,894,106,060
Smoothing	Rp. 3,045,417,303	Rp. 27,604,179,581	Rp. 457,284,976,043	Rp. 426,635,379,159

Selanjutnya, solusi optimal dari kedua model dibandingkan, dengan perbedaan utama terletak pada jadwal panen yang memengaruhi pola produksi harian. Model baseline menunjukkan fluktuasi produksi yang tinggi, sedangkan model smoothing menghasilkan produksi harian yang lebih stabil. Hasil menunjukkan bahwa model smoothing menurunkan fluktuasi, kerugian produksi, dan biaya, namun mengurangi fleksibilitas aliran TBS ke rute dan fasilitas dengan kontribusi sosial-ekonomi tertinggi, sehingga nilai manfaat sosial (Z3) dan nilai objektif total lebih rendah dibandingkan model baseline.

Selanjutnya dilakukan uji kewajaran. Berikut adalah hasil uji kewajaran dari beberapa parameter penting dalam model.

Tabel 22. Uji Kewajaran

Indikator	Baseline (Aktual / As-Is)	Smoothing (Perbaikan)	Kriteria Kewajaran	Interpretasi
Biaya transportasi per ton-km	Dalam kisaran matriks biaya input	Sedikit lebih rendah	Konsisten dengan tarif input	Biaya logistik realistis, tidak ada distorsi ekstrem
Loss (% dari gross supply)	1,9% – 3,0%	Lebih rendah dari baseline	Sesuai data historis	Tingkat kehilangan realistis dan terkendali
Utilisasi kapasitas PKS (%)	≤ 100%	≤ 100%	Tidak melampaui kapasitas	Operasional PKS feasible
Pemanfaatan fasilitas (ton/periode)	= kapasitas (600 ton)	= kapasitas (600 ton)	Sesuai batas fasilitas	Kapasitas menjadi faktor pembatas, wajar
Pelanggaran constraint	Tidak ada	Tidak ada	Semua kendala terpenuhi	Solusi feasible secara teknis

Hasil uji kewajaran menunjukkan bahwa solusi optimal berada dalam rentang operasional yang realistis, dengan biaya transportasi, tingkat loss TBS, dan utilisasi fasilitas yang konsisten dengan data dan kapasitas aktual. Perbandingan antara model baseline dan *smoothing* memperlihatkan peningkatan stabilitas operasional tanpa menghasilkan nilai ekstrem, sehingga model dinilai valid dan relevan secara manajerial. Penerapan *smoothing* mengubah distribusi aliran TBS dengan mengurangi konsentrasi pada rute ber-volume puncak dan memanfaatkan rute alternatif secara lebih seimbang, sekaligus menggeser sebagian tonase dari periode beban tinggi ke periode beban rendah. Seluruh fasilitas pelepah tetap dibuka pada kedua skenario, menunjukkan bahwa keputusan pembukaan fasilitas bersifat robust terhadap perubahan pola pasokan dan bahwa *smoothing* menurunkan fluktuasi logistik tanpa mengurangi volume total yang diproses secara signifikan.

Simpulan

Penelitian ini berhasil menjawab seluruh tujuan yang ditetapkan. Model optimasi yang dikembangkan mampu menentukan pembukaan fasilitas pengolahan pelepah secara optimal dan mengintegrasikan distribusi pelepah ke dalam rantai pasok kelapa sawit. Meskipun potensi pelepah sangat besar, hasil menunjukkan bahwa pemanfaatannya masih dibatasi oleh kapasitas pengolahan harian, sehingga kapasitas fasilitas menjadi faktor pembatas utama dan membuka peluang Pengembangan di masa mendatang. Evaluasi kinerja menunjukkan peningkatan efisiensi distribusi, penurunan *production loss*, serta peningkatan keuntungan sosial dan ekonomi melalui pendapatan petani, pengepul, dan manfaat sosial fasilitas pelepah. Analisis sensitivitas mengonfirmasi bahwa kondisi cuaca dan kapasitas pengolahan merupakan parameter paling berpengaruh terhadap kinerja sistem, menegaskan kontribusi penelitian ini dalam mendukung rantai pasok kelapa sawit yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- [1] J. Zheng, W. Wu, S. Yuan, H. Fu, W. Li, and L. Yu, "Multisource-Domain Generalization-Based Oil Palm Tree Detection Using Very-High-Resolution (VHR) Satellite Images," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 19, 2022, doi: 10.1109/LGRS.2021.3061726.
- [2] Badan Pengelola Dana Perkebunan, "Grant Riset Sawit Lomba Riset Sawit Tingkat Mahasiswa." Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: http://www.youtube.com/watch?v=jJbdKcNTy_I
- [3] A. Abubakar, S. Kasim, M. Y. Ishak, and M. K. Uddin, "Maximizing Oil Palm Yield: Innovative Replanting Strategies for Sustainable Productivity," *J. Environ. Earth Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 61–75, 2023, doi: 10.30564/jees.v5i2.5904.
- [4] K. H. D. Tang and H. M. S. Al Qahtani, "Sustainability of oil palm plantations in Malaysia," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 22, no. 6, pp. 4999–5023, 2020, doi: 10.1007/s10668-019-00458-6.
- [5] W. Li, D. Fu, F. Su, and Y. Xiao, "Spatial–Temporal Evolution and Analysis of the Driving Force of Oil Palm Patterns in Malaysia from 2000 to 2018," *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 9, no. 4, p. 280, 2020, doi: 10.3390/ijgi9040280.
- [6] M. N. Akhtar, E. Ansari, S. S. N. Alhady, and E. Abu Bakar, "Leveraging on Advanced Remote Sensing- and Artificial Intelligence-Based Technologies to Manage Palm Oil Plantation for Current Global Scenario: A Review," *Agriculture*, vol. 13, no. 2, 2023, doi: 10.3390/agriculture13020504.

- [7] P. Usapein, N. Tuntiwiwattanapun, P. Polburee, P. Veerakul, C. Seekao, and O. Chavalparit, "Transition Pathway Palm Oil Research Framework Toward a Bio-Circular-Green Economy Model Using SWOT Analysis: A Case Study of Thailand," *Front. Environ. Sci.*, vol. Volume 10-2022, 2022, doi: 10.3389/fenvs.2022.877329.
- [8] Y. Chantanumat *et al.*, "Characterization of bio-oil and biochar from slow pyrolysis of oil palm plantation and palm oil mill wastes," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 13, no. 15, pp. 13813–13825, 2023, doi: 10.1007/s13399-021-02291-2.
- [9] H. C. Aprilianto and H. Rau, "A Multi-Objective Optimization Approach for Generating Energy from Palm Oil Wastes," *Energies*, vol. 18, no. 11, 2025, doi: 10.3390/en18112947.
- [10] A. Mulyadi, R. Rayendra, Satriardi, and I. O. Sinatra, "An integrated approach to enhance green supply chain performance in the palm oil industry," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1441, no. 1, 2025, doi: 10.1088/1755-1315/1441/1/012008.
- [11] R. Adwiyah and others, "Kinerja Keberlanjutan Aktor Hulu Perkebunan Sawit Berdasarkan Pendekatan SCOR-DS," *Nama J. (Perlu dicari)*, vol. Volume Jurnal (Perlu dicari), no. Nomor Jurnal (Perlu dicari), p. Halaman (Perlu dicari), 2024.
- [12] P. Sembiring, H. Mawengkang, H. Sadyadharma, F. Bu'Ulolo, and Fajriana, "Mixed Integer Linear Programming model for Crude Palm Oil Supply Chain Planning," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 300, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/300/1/012015.
- [13] F. Y. Foo, Z. M. Zainuddin, and S. P. Hang, "Palm Oil Biomass Supply Chain Multi-Objective Two-Echelon Location-Routing Optimization," *Malaysian J. Math. Sci.*, vol. 18, no. 4, pp. 867–901, 2024, doi: 10.47836/mjms.18.4.12.
- [14] Z. Fang, M. Wang, L. Ji, Y. Xie, and J. Zhen, "Multi-objective inexact optimization of the biomass supply chain from an energy-land-carbon nexus perspective," *Energy Nexus*, vol. 17, no. November 2024, p. 100358, 2025, doi: 10.1016/j.nexus.2024.100358.
- [15] J. K. Ooi, K. S. Woon, and H. Hashim, "A multi-objective model to optimize country-scale municipal solid waste management with economic and environmental objectives: A case study in Malaysia," *J. Clean. Prod.*, vol. 316, no. January, p. 128366, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128366.
- [16] D. Norita, Y. Arkeman, M. Romli, and H. Mulyati, "A Modelling of Multi-Objective Sustainability Palm Kernel Supply Chain Based on Hybrid NSGA-II and Reinforcement Learning," *Int. J. Eng. Res. Adv. Technol.*, vol. 08, no. 07, pp. 23–30, 2022, doi: 10.31695/ijerat.2022.8.7.4.
- [17] R. Giusti, D. Manerba, and R. Tadei, "Multiperiod transshipment location–allocation problem with flow synchronization under stochastic handling operations," *Networks*, vol. 78, no. 1, pp. 88–104, 2021, doi: 10.1002/net.22007.
- [18] T. G. Crainic, R. Giusti, D. Manerba, and R. Tadei, "The Synchronized Location-Transshipment Problem," *Transp. Res. Procedia*, vol. 52, pp. 43–50, 2021, doi: 10.1016/j.trpro.2021.01.007.
- [19] A. Kumar, R. Chopra, and R. R. Saxena, "An Efficient Algorithm to Solve Transshipment Problem in Uncertain Environment," *Int. J. Fuzzy Syst.*, vol. 22, no. 8, pp. 2613–2624, 2020, doi: 10.1007/s40815-020-00923-9.
- [20] H. Garg, A. Mahmoodirad, and S. Niroomand, "Fractional two-stage transshipment problem under uncertainty: application of the extension principle approach," *Complex Intell. Syst.*, vol. 7, no. 2, pp. 807–822, 2021, doi: 10.1007/s40747-020-00236-2.
- [21] N. Wichapa and P. Khokhajaikiat, "A novel holistic approach for solving the multi-criteria transshipment problem for infectious waste management," *Decis. Sci. Lett.*, vol. 8, no. 4, pp. 441–454, 2019, doi: 10.5267/j.dsl.2019.5.002.
- [22] S. Wang and X. Tian, "Research on Sustainable Closed-Loop Supply Chain Synergy in Forest Industry Based on High-Quality Development: A Case Study in Northeast China," *Forests*, vol. 13, no. 10, 2022, doi: 10.3390/f13101587.
- [23] K. Phan and P. Ho, "Choosing a distribution center to improve the Vietnamese fruit and vegetable supply chain by the hybrid applied Mathematical optimization and SAW Choosing a distribution center to improve the Vietnamese fruit and vegetable supply chain by the hybrid appli," *Adv. Model. Simul. Eng. Sci.*, 2020.
- [24] Y. Jiang, B. Bian, B. Zheng, and J. Chu, "A time space network optimization model for integrated fresh fruit harvest and distribution considering maturity," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 190, no. January, p. 110029, 2024, doi: 10.1016/j.cie.2024.110029.
- [25] T. Octa, N. Selmi, M. Hmiden, and L. Ben, "Special Issue from the conference Organization of Knowledge and Advanced Meta-heuristic algorithms for the multi-item transshipment problem," vol. 25, no. 1, 2020.
- [26] D. Aghajani, H. Seraji, H. Kaur, and J. Vilko, "A sustainable integrated model for multi-objective planning of an agri-food supply chain under uncertain parameters: A case study," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 188, no. January, p. 108766, 2024, doi: 10.1016/j.compchemeng.2024.108766.