

# Optimasi Jaringan Rantai Pasok Biomassa Berbasis Limbah Pertanian Untuk Menjamin Keberlanjutan Energi di Indonesia

Muhammad Dzikri Ramadhan<sup>1)</sup>, Ilham Basith Abdillah<sup>2)</sup>, dan Muhammad Khairul Anwar<sup>3\*)</sup>

<sup>1, 2, 3)</sup>Program Studi Teknik Industri Fakultas Teknik Universitas Al-Azhar

Jl. Pintu Air IV, No.214 Padang Bulan-Medan Johor 20142

\*Corresponding author E-mail: [khoirulawr354@gmail.com](mailto:khoirulawr354@gmail.com)

Naskah Masuk: Mei 2026; Diterima: Juni 2026; Terbit: Juli 2026

## ABSTRACT

*This study develops a Mixed Integer Linear Programming (MILP)-based biomass supply chain network optimization model for the case of rice husk waste in five districts of North Sumatra that supply two cofiring coal-fired power plants (Pangkalan Susu and Labuhan Angin). Optimization results show a total supply chain cost of IDR 204.7 billion per year, with all five processing facilities still required because the total capacity is close to the limit of exhaustion resulting in an optimization cost efficiency of 0% compared to the existing scenario. The model is only able to meet 80% of the biomass needs of both power plants, indicating the current network capacity limitations. Sensitivity analysis shows that the total cost changes proportionally ( $\pm 15.3\%$  to  $\pm 22.9\%$ ) to tariff fluctuations of  $\pm 20-60\%$ . These findings recommend expansion of processing facility capacity and transportation tariff subsidies as policy priorities to support the national biomass cofiring target.*

**Keywords:** Supply Chain, biomass, industrial engineering, optimization, renewable energy.

## ABSTRAK

*Penelitian ini mengembangkan model optimasi jaringan rantai pasok biomassa berbasis Mixed Integer Linear Programming (MILP) untuk kasus limbah sekam padi di lima kabupaten Sumatera Utara yang memasok dua PLTU cofiring (Pangkalan Susu dan Labuhan Angin). Hasil optimasi menunjukkan total biaya rantai pasok sebesar Rp 204,7 miliar per tahun, dengan seluruh lima fasilitas pengolahan tetap diperlukan karena kapasitas total mendekati batas lenyihan menyebabkan efisiensi biaya optimasi sebesar 0% dibandingkan skenario eksisting. Model hanya mampu memenuhi 80% kebutuhan biomassa kedua PLTU, mengindikasikan keterbatasan kapasitas jaringan saat ini. Analisis sensitivitas menunjukkan total biaya berubah proporsional ( $\pm 15,3\%$  hingga  $\pm 22,9\%$ ) terhadap fluktuasi tarif  $\pm 20 - 60\%$ . Temuan ini merekomendasikan ekspansi kapasitas fasilitas pengolahan dan subsidi tarif transportasi sebagai prioritas kebijakan untuk mendukung target cofiring biomassa nasional.*

**Kata Kunci:** Rantai pasok, biomassa, teknik industri, optimasi, energi terbarukan

## I. PENDAHULUAN

Meskipun potensinya sangat besar, pemanfaatan biomassa di Indonesia masih terkendala oleh struktur rantai pasok yang tidak efisien. Karakteristik limbah pertanian yang terbesar secara geografis (*dispered*), bersifat musiman, serta memiliki densitas optimasi pada titik pengumpulan, fasilitas pengolahan, dan jaringan distribusi, biaya operasional dan membengkak sehingga biomassa sulit bersaing dengan energi konvensional [1].

Optimasi jaringan rantai pasok bukan sekedar masalah efisiensi biaya, melainkan pilar utama dalam menjamin keberlanjutan energi. Keberlanjutan disini mencakup tiga dimensi yaitu Ekonomi dengan meminimalkan biaya logistik dan inventasi infrastruktur [2]. Lingkungan dengan mengurangi jejak karbon dari aktivitas transportasi. Sosial yaitu dengan memberikan nilai tambah bagi petani melalui pemanfaatan limbah yang sebelumnya tidak bernilai [3].

Banyak penelitian sebelumnya berfokus pada teknis konversi biomassa menjadi energi, namun masih sedikit yang mengintegrasikan model matematis optimasi jaringan dengan kondisi spesifikasi geografis dan kebijakan energi di Indonesia [4]. Penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut dengan mengusulkan metode optimasi yang mempertimbangkan ketidakpastian pasokan limbah pertanian dan variasi lokasi permintaan energi di Indonesia [5].

Sebagai negara agraris, Indonesia menghasilkan limbah pertanian dalam jumlah massif dari komoditas utama seperti padi, jagung dan kelapa sawit. Limbah – limbah pertanian ini dapat dibagikan menjadi dua kategori yaitu limbah primer yang dimaksud seperti jerami yang terjadi dilahan saat panen dan yang kedua yaitu limbah sekunder seperti sekam padi dan ampas tebu yaitu terjadi saat pemrosesan [6]. Keunggulan limbah pertanian dibandingkan biomassa hutan adalah siklus

regenerasinya yang cepat dan tidak berkompetisi dengan penggunaan lahan hutan.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan model optimasi jaringan rantai pasok biomassa yang komprehensif guna meminimalkan total biaya logistik sekaligus memaksimalkan reliabilitas pasokan energi [7]. Hasil dari analisis ini diharapkan dapat menjadi rekomendasi strategis bagi pemerintahan dan pemangku kepentingan dalam merancang peta jalan (*roadmap*) energi baru terbarukan.

## II. METODE

Metode penelitian ini di rancang untuk menjawab tantangan optimasi jaringan rantai pasok biomassa dengan pendekatan kuantitatif dengan menggunakan model *Mixed Integer Linier Programming* (MILP) untuk menentukan konfigurasi jaringan yang paling efisien di Indonesia [8].

### A. Manajemen Rantai Pasok Biomassa (*Biomassa Supply Chain Management*)

Manajemen rantai pasok biomassa (BSCM) melibatkan koordinasi aliran material, informasi dan keuangan dari titik asal hingga ke pengguna akhir. Rantai pasok biomassa yang komprehensif terdiri dari empat tahapan utama yaitu, pertama pemanenan dan pengumpulan yang berupa proses pengumpulan limbah dari petani [9]. Selanjutnya yang kedua pra-pengolahan (*pre-treatment*) dimana proses pengecilan ukuran, pengeringan atau densifikasi untuk meningkatkan densitas energi. Ketiga penyimpanan yang dimaksud dengan mitigasi terhadap sifat musiman pasokan limbah. Keempat transportasi yaitu aliran logistik menuju pembangkit energi.

Indonesia memiliki tantangan unik berupa konektivitas antar pulau menunjukkan bahwa biaya transportasi dapat mendominasi hingga 30 – 50% dari total biaya produksi energi biomassa. Kompleksitas ini menurut integrasi modal transportasi darat dan laut serta penentuan lokasi fasilitas antara *intermediate facilities* yang strategis guna meminimalkan total biaya logistik [10].

### B. Sumber dan Pengolahan Data

Data ketersediaan biomassa sekam padi diperoleh dari data produksi Gabah Kering Giling (GKG) Badan Pusat Statistik (BPS) Provinsi Sumatera Utara tahun 2024 untuk lima kabupaten terpilih. Konversi produksi GKG menjadi volume sekam padi menggunakan faktor konversi sebesar 20%, mengacu [6]. Data permintaan biomassa diperoleh dari kapasitas kebutuhan *cofiring* PLTU Pangkalan Susu dan PLTU Labuhan Angin berdasarkan data PT PLN (Persero)/Kementerian ESDM. Model dirumuskan sebagai persoalan *Mixed Integer Linear Programming* dan diselesaikan menggunakan solver PuLP berbasis *Python* melalui lingkungan komputasi *Google Colaboratory*.

### C. Pendekatan Matematis dan Teknik Optimasi

Optimasi jaringan bertujuan untuk keputusan strategis taktis dan operasional melalui pendekatan kuantitatif. Model *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) merupakan teknik yang paling sering digunakan dalam literatur untuk menyelesaikan masalah lokasi fasilitas dan alokasi aliran material [11]. Variabel keputusan biner digunakan untuk menentukan apakah suatu fasilitas (*facility location problem*) dan alokasi aliran material. Variabel keputusan biner digunakan untuk menentukan apakah suatu fasilitas seperti pusat

pengumpulan atau pabrik pelet harus dibangun dilokasi tertentu sementara variabel kontinu menentukan jumlah massa yang dikirim antar titik [12].

Penelitian terbaru mulai beralih dari model *single objective* (hanya biaya) menuju *multi-objective* yang mengintegrasikan aspek lingkungan. Selain itu, karena pasokan limbah pertanian sangat beruntung pada musim dan cuaca, pengguna *Stochastic Programming* atau *Robust Optimization* diperlukan untuk menangani ketidakpastian parameter pasokan harga di masa depan.

### D. Keberlanjutan Energi dan Kebijakan Nasional

Keberlanjutan energi bukan hanya tentang ketersediaan teknis tetapi keselarasan dengan target regulasi [13]. Analisis keberlanjutan dalam rantai pasok biomassa diukur melalui tiga dimensi [14] yaitu, Ekonomi yang dimana ekonomi sangat penting dalam energi biomassa dengan efisiensi biaya dan daya saing terhadap harga energi fosil. Lingkungan yang berfungsi sebagai emisi gas rumah kaca melalui analisis *life cycle assessment (LCA)*. Sosial yang berdampak terhadap penyerapan tenaga kerja lokal dan peningkatan pendapatan petani melalui pemanfaatan limbah [15].

Tinjauan terhadap peraturan pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang kebijakan energi nasional menekankan target bauran energi EBT sebesar 23% pada tahun 2025. Regulasi mengenai *cofiring* biomassa pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) batu bara menjadi pendorong utama kebutuhan akan jaringan rantai pasok biomassa yang teroptimasi di tingkat nasional. Untuk mempermudah analisis, sistem rantai pasok dimodelkan sebagai jaringan *multi-echelon* yang terdiri dari, titik pasokan (i) seperti lahan pertanian atau penggilingan sebagai sumber limbah. Pusat pengumpulan atau *pre-treatment* (j) yang dimaksud dengan lokal potensial untuk proses pengeringan dan pemadatan (peletisasi). Titik permintaan (k) yaitu Pembangkit Listrik (PLTU *cofiring*). Model ini bertujuan meminimalkan total biaya pasok (Z) yang terdiri dari biaya pembukaan fasilitas, biaya operasional, dan biaya transportasi.

$$\min Z = \sum_{j \in J} F_j Y_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} X_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{jk} X_{jk} \quad (1)$$

Dimana:

- $F_j$ : Biaya tetap untuk membangun fasilitas dilokasi j
- $Y_j$ : Variabel biner (1 jika fasilitas dibangun, 0 jika tidak ada)
- $C_{ij} C_{jk}$ : Biaya transportasi perunit massa antar titik.
- $X_{ij}, X_{jk}$ : Volume biomassa yang dikirim antar titik.

### E. Kendala (*Flow Conservation*)

- Keseimbangan aliran (*Flow Conservation*) memastikan jumlah biomassa yang masuk ke pusat pengolahan sama dengan yang keluar setelah dikurangi faktor penyusutan.
- Kapasitas fasilitas, total pengiriman ke lokasi j tidak boleh melebihi kapasitas maksimum yang ditetapkan.
- Pemenuhan permintaan, total pengiriman ke lokasi k harus memenuhi atau melebihi target kebutuhan energi pembangkit.

- Ketersediaan bahan baku, biomassa yang diambil dari titik I tidak boleh melebihi potensi limbah yang dihasilkan di daerah tersebut.

Model divalidasi dengan membandingkan hasil optimasi terhadap kondisi *baseline* kondisi rantai pasok saat ini tanpa optimasi. Selanjutnya, dilakukan analisis skenario untuk melihat dampak kebijakan pemerintahan, seperti:

- Skenario A: Perubahan skema subsidi transportasi biomassa.
- Skenario B: Peningkatan target persentase *cofiring* pada PLTU nasional.
- Skenario C: Gangguan pasokan akibat anomali cuaca (El Nino/La Nina) yang memengaruhi hasil panen.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Keterangan Tabel

Model optimasi jaringan rantai pasok biomassa yang dijalankan menghasilkan konfigurasi jaringan yang membutuhkan seluruh lima fasilitas *pre-treatment* tetap beroperasi. Perbandingan antara skenario *eksisting*, yaitu kondisi seluruh fasilitas dibuka tanpa optimasi lokasi dengan skenario optimal hasil keluaran model MILP disajikan pada Tabel 1.

TABEL 1. PERBANDINGAN TOTAL BIAYA RANTAI PASOK BIOMASSA ANTARA SKENARIO EKSTING DAN SKENARIO OPTIMAL

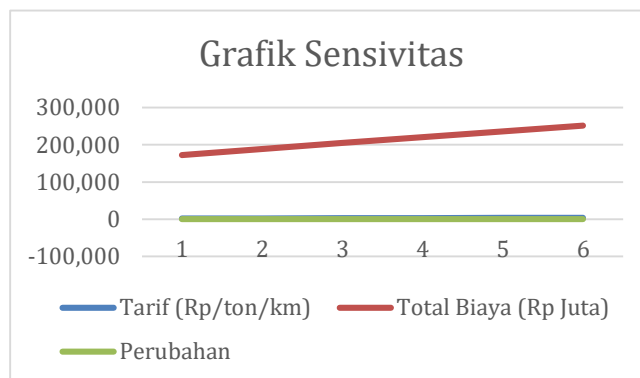
Komponen	Skenario Eksisting	Skenario Optimal
Fasilitas dibuka	5 dari 5	5 dari 5
Biaya tetap fasilitas	Rp 75.000.000.000	Rp 75.000.000.000
Biaya transport supply fasilitas	-	Rp 7.178.127.878
Biaya transport fasilitas PLTU	-	Rp 71.057.144.004
Biaya Operasional	-	Rp 51.500.000.000
Total biaya tahunan	Rp 204.735.271.882	Rp 204.735.271.882
Efisiensi biaya	-	0,0%
Pemenuhan PLTU Pangkalan Susu	-	172.800/216.000 ton (80,0%)
Pemenuhan PLTU Labuhan Anginn	-	33.200/41.500 ton (80,0%)

Total biaya rantai pasok optimal tercatat sebesar Rp204.735.271.882 per tahun, dengan komposisi biaya tetap fasilitas sebesar 36,6%, biaya transportasi dari titik pasokan ke fasilitas sebesar 3,5%, biaya transportasi dari fasilitas ke PLTU sebesar 34,7%, dan biaya operasional sebesar 25,2%. Efisiensi biaya optimasi tercatat sebesar 0,0% terhadap skenario *eksisting*. Hal ini terjadi karena kapasitas total kelima fasilitas, yaitu sekitar 250.000 ton, hampir setara dengan kebutuhan gabungan kedua PLTU sebesar 257.500 ton, sehingga model tidak memiliki ruang untuk menutup fasilitas manapun tanpa mengorbankan pemenuhan permintaan. Temuan ini justru mengonfirmasi bahwa jaringan *eksisting* telah berada pada titik kapasitas minimum yang dibutuhkan. Sejalan dengan keterbatasan tersebut, model hanya mampu memenuhi 80,0% kebutuhan biomassa PLTU Pangkalan Susu dan 80,0% kebutuhan biomassa PLTU Labuhan Angin, yang mengindikasikan bahwa kapasitas fasilitas pengolahan saat ini belum memadai untuk mendukung target *cofiring* secara penuh.

Untuk menguji ketahanan hasil optimasi terhadap perubahan biaya logistik, dilakukan analisis sensitivitas terhadap tarif transportasi pada enam skenario, sebagaimana disajikan pada Tabel 2 dan diilustrasikan pada Gambar 1.

TABEL 2. HASIL ANALISIS SENSITIVITAS TOTAL BIAYA TERHADAP PERUBAHAN TARIF TRANSPORTASI

Tarif (Rp/ton/km)	Total Biaya (Rp Juta)	Perubahan
1.500	173.441,2	-15,3%
2.000	189.088,2	-7,6%
2.500 (dasar)	204.735,3	0,0%
3.000	220.382,3	7,6%
3.500	236.029,4	15,3%
4.000	251.676,4	22,9%



Gambar 1. Grafik sensitivitas total biaya terhadap perubahan tarif transportasi

Hasil analisis menunjukkan bahwa total biaya rantai pasok berubah secara proporsional terhadap tarif transportasi, dengan penurunan tarif sebesar 40% (menjadi Rp1.500/ton/km) menurunkan total biaya sebesar 15,3%, sementara kenaikan tarif sebesar 60% (menjadi Rp4.000/ton/km) meningkatkan total biaya sebesar 22,9%. Tingkat sensitivitas ini mengonfirmasi bahwa biaya transportasi, khususnya dari fasilitas menuju PLTU yang berkontribusi 34,7% dari total biaya, merupakan komponen paling berpengaruh terhadap keekonomian jaringan rantai pasok biomassa *cofiring* di Sumatera Utara.

### IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan tiga temuan utama. Pertama, model MILP berhasil mengidentifikasi bahwa seluruh lima fasilitas *pre-treatment* di wilayah studi (Serdang Bedagai, Deli Serdas, Simalungun, Tapanuli Utara, dan Langkat) perlu tetap beroperasi, karena kapasitas total jaringan hampir setara kebutuhan gabungan dua PLTU. Kedua, biaya rantai pasok optimal sebesar Rp 204,7 miliar/tahun didominasi oleh biaya tetap fasilitas (36,6%) dan transportasi ke PLTU (34,7%), dengan tingkat pemenuhan kebutuhan biomassa baru mencapai 80%, menunjukkan jaringan saat ini belum mampu memenuhi permintaan *cofiring* secara penuh. Ketiga, jaringan cukup sensitif terhadap tarif transportasi kenaikan tarif 60% dari Rp 2.500 menjadi Rp 4.000/ton/km meningkatkan total biaya hingga 22,9%, mengonfirmasi bahwa biaya logistik adalah faktor risiko utama keberlanjutan energi biomassa di Indonesia.

### REFERENSI

- [1] A. Ahmudi, C. Hudaya, I. Garniwa, S. Z. Amraini, A. Sugiyono, and J. Mulyo, "Optimizing Potential Supply Chain of Biomass Agricultural

- Waste for Co-firing of Coal Power Plant Using MCDA , GIS , and Linear Programming in the Java and Sumatra Islands , Indonesia,” vol. 3, no. 1, 2025, doi: 10.60084/ljes.v3i1.249.
- [2] F. Imansuri, R. A. Hadiguna, and F. Afrinaldi, “Jurnal Optimasi Sistem Industri Model Optimasi Perancangan Jaringan Rantai Pasok Biomassa dari Tandan Kosong Kelapa Sawit di Sumatera Barat,” vol. 1, pp. 1–13, 2019, doi: 10.25077/josi.v18.n1.p1-13.2019.
- [3] N. Isnaeni and D. Arista, “Karakteristik limbah pertanian dan dampaknya : Mengapa pengelolaan ramah lingkungan penting ?,” vol. 1, no. 2, pp. 67–76, 2024.
- [4] H. Thaheer, Supply Chain Model to Support the Sustainability of Biomass based Power Plants : Indonesia case, vol. 1, no. 1. Association for Computing Machinery. doi: 10.1145/3557738.3557946.
- [5] Siregar, Z. H., Mawardi, M., & Rigitta, P., “Pengembangan Dan Potensi Green Technology Sebagai,” vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2021.
- [6] K. Sleman, “Potensi Limbah Hasil Pertanian Padi menjadi Sumber Bioenergi melalui Konsep Biorefineri dengan Pendekatan P-Graph dan Analisis Ekonomi Teknik,” vol. 9, no. January, pp. 16–32, 2025, doi: 10.20885/ajie.vol9.iss1.art2.
- [7] A. Putri, L. Safitri, G. Ananda, and P. Indrawan, “Strategi Optimasi Dalam Rantai Pasok Tebu Untuk Meningkatkan Efisiensi,” vol. 2, 2025.
- [8] H. Ren and W. Gao, “A MILP model for integrated plan and evaluation of distributed energy systems,” vol. 87, pp. 1001–1014, 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.09.023.
- [9] L. S. Tanjung, R. Dani, E. Putra, R. J. Farhas, and T. Lestari, “Evaluasi Penerapan Supply Chain Management Pabrik Kelapa Sawit di PT . X,” vol. 25, pp. 121–133, 2025.
- [10] E. Nsafe et al., “Prosiding National Seminar on Accounting , Finance , and Manajemen Rantai Pasok Komoditas Sawit Berkelanjutan di Indonesia Tahun 2005-2022 : Analisis Bibliometrik,” vol. 3, no. 3, pp. 10–25, 2023.
- [11] Z. Darajat, M. Septiani, A. Sukasri, M. Assumpta, and N. Ole, “Pemodelan dan Optimasi Pengaruh Variasi Suhu Pirolisis Lambat terhadap Yield dan Nilai Kalor Biochar Tongkol Jagung,” pp. 275–285, 2026.
- [12] Z. H. Siregar, U. N. Harahap, and M. Zurairah, “Perencanaan Bahan Baku Menggunakan Metode Min-Max Pada PT . TALENTA Conference Series Perencanaan Bahan Baku Menggunakan Metode Min-Max Pada PT . Pacific Palmindo Industri,” vol. 3, no. 2, 2020, doi: 10.32734/ee.v3i2.1073.
- [13] Judijanto, and U. Airlangga, “Pengelolaan limbah pertanian sebagai sumber energi terbarukan,” Prosiding Seminar Nasional Indonesia. vol. 3, no. 2, pp. 61–70, 2025.
- [14] R. C. Sondakh, “Perbandingan Biomassa Pertanian Sebagai Energi Terbarukan Briket Arang,” vol. 25, no. 1, pp. 45–52, 2022.
- [15] R. Eka et al., “Potential of Biomass Raw Material for Biochar Production : A Review,” vol. 4, no. Agustus, pp. 528–553, 2025.