

Optimasi Strategi *Supply Chain* LPG Terminal Sekong dan Terminal Priok PT PP untuk Meningkatkan Efisiensi Operasional Penyaluran *Bulk* LPG di Wilayah Jawa Bagian Barat

Eri Wibowo^{1*}, Timotius FCW Sutrisno², David Sukardi Kodrar³, dan A.A.A Puty Andrina⁴

^{1,2,3,4} Universitas Ciputra, Indonesia

Journal of Economics and Management Sciences is licensed under a Creative Commons 4.0 International License.



ARTICLE HISTORY

Received: 26 October 25
Final Revision: 04 November 25
Accepted: 11 November 25
Online Publication: 31 December 25

KEYWORDS

LPG Terminal, Distribution Optimization, Total Cost, Heuristic, Linear Programming

KATA KUNCI

Terminal LPG, Optimasi Distribusi, Total Biaya, Heuristik, *Linear Programming*

CORRESPONDING AUTHOR

ewibowo02@magister.ciputra.ac.id

DOI

10.37034/jems.v8i1.268

A B S T R A C T

This study optimizes the distribution pattern of Liquefied Petroleum Gas (LPG) between the Sekong and Priok terminals in Western Java to improve cost efficiency and stock resilience. A two-stage approach is employed. First, a heuristic Evolutionary Algorithm (EA) in Microsoft Excel Solver is used to generate a feasible, low-cost initial allocation. Second, a Linear Programming (LP) model is built in Python (VS Code) using PuLP and pandas to obtain mathematically optimal solutions and validate the EA results. Operational data from 2024–2025 include SPBE demand volumes, distances, transport tariffs, and terminal capacities. Results indicate a redistribution of supply from Priok to Sekong that increases Priok's stock resilience (>4 days) and reduces total distribution costs versus the baseline. The LP model yields slightly lower total cost than EA, confirming their complementarity. The findings emphasize the need for dynamic allocation, inter-terminal coordination, and data-driven decision support to ensure security of supply and operational efficiency.

A B S T R A K

Penelitian ini mengkaji optimasi pola distribusi Liquefied Petroleum Gas (LPG) antara Terminal LPG (TLPG) Sekong dan TLPG Priok di wilayah Jawa bagian Barat untuk meningkatkan efisiensi biaya dan ketahanan stok. Pendekatan dua tahap digunakan. Tahap pertama menerapkan heuristik Evolutionary Algorithm (EA) pada Microsoft Excel Solver guna menghasilkan solusi awal pembagian suplai yang feasible dan biaya rendah. Tahap kedua menggunakan Linear Programming (LP) di Visual Studio Code (VS Code) bahasa Python dengan pustaka PuLP dan pandas untuk memperoleh solusi optimal secara matematis dan melakukan validasi hasil EA. Data operasional tahun 2024–2025 mencakup volume demand SPBE, jarak, tarif distribusi, dan kapasitas terminal. Hasil menunjukkan terjadi redistribusi suplai dari TLPG Priok ke TLPG Sekong yang meningkatkan ketahanan stok TLPG Priok (>4 hari) dan menurunkan total biaya distribusi dibanding kondisi eksisting. Model LP memberikan biaya sedikit lebih rendah dibanding EA, menegaskan komplementaritas kedua pendekatan. Temuan ini menyoroti pentingnya alokasi dinamis, koordinasi antar-terminal, dan dukungan sistem pengambilan keputusan berbasis data untuk menjaga security of supply dan efisiensi operasional.

1. Pendahuluan

Pertumbuhan pesat konsumsi LPG di Indonesia sejak program konversi minyak tanah tahun 2007 menjadikan LPG sebagai energi strategis yang menuntut efisiensi tinggi dalam rantai pasoknya. Konsumsi LPG domestik meningkat dari hanya 21 ribu MT pada 2007 menjadi 7,5 juta MT pada 2018 [1]. TLPG Priok sebagai pemasok utama Jawa Barat kini menghadapi tekanan kapasitas: ketahanan stok hanya sekitar tiga hari dan tingkat utilisasi dermaga mencapai 85%, mendekati batas operasional. Sebaliknya, TLPG Sekong di Merak masih memiliki kapasitas cadangan yang cukup besar dengan ketahanan stok rata-rata 8,5 hari. Ketimpangan ini menunjukkan bahwa kebijakan penentuan terminal pengirim berbasis jarak (*Center of Gravity*) yang selama

ini digunakan sudah tidak lagi efisien karena cenderung membebani TLPG Priok dan meningkatkan risiko *stock-out*.

Literatur terdahulu menunjukkan pentingnya integrasi tiga aliran utama dalam *supply chain* yaitu material, modal, dan informasi serta peran desain jaringan dalam mencapai efisiensi biaya dan ketahanan operasional [2], [3]. Kinerja operasional yang unggul akan berdampak positif pada aspek lain seperti kepuasan pelanggan dan pangsa pasar. Studi menunjukkan kinerja operasional yang baik (dari segi kualitas dan kecepatan) berkontribusi meningkatkan kepuasan pelanggan dan pada akhirnya mendorong peningkatan pendapatan dan profit [4]. Performa operasional berbanding lurus dengan peningkatan pangsa pasar perusahaan [5]. Oleh

karena itu, perusahaan berupaya terus menerus memperbaiki indikator operasionalnya.

Dalam konteks optimasi distribusi, berbagai pendekatan telah dikembangkan: *Mixed Integer Programming* untuk *multi-depot routing* [6], *Particle Swarm Optimization* untuk biaya distribusi total [7], serta algoritma heuristik seperti *sweep*, *savings*, dan *greedy* yang terbukti efisien dalam masalah rute dan kapasitas [8], [9], [10]. Sementara itu, pendekatan *Linear Programming* (LP) telah banyak diterapkan dalam masalah *transshipment* dan alokasi sumber daya karena kemampuannya memberikan solusi eksak terhadap fungsi objektif linear [11]. Meskipun demikian, sebagian besar studi belum secara spesifik membahas optimasi distribusi LPG yang melibatkan dua terminal laut (*seafed* terminal) dan ratusan titik SPBE dengan karakteristik *single-trip fixed delivery*.

Hasil tinjauan literatur yang dilakukan atas permasalahan lokasi-alokasi dalam perspektif *supply chain* menyatakan bahwa sebagian besar studi hanya mempertimbangkan satu eselon dan belum mengintegrasikan seluruh *driver* logistik seperti inventori, moda transportasi, dan kebijakan layanan pelanggan dalam satu model terpadu [12]. Selain itu, keterbatasan kapasitas pengisian harian, jam operasi, dan biaya terminal sering diabaikan dalam formulasi fungsi objektif maupun kendala model. Sedangkan faktor-faktor ini sangat menentukan efisiensi biaya dan ketahanan suplai di lapangan. Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan untuk menutup kesenjangan tersebut dengan mengembangkan model optimasi distribusi berbasis data aktual PT PP di Jawa bagian Barat yang mengintegrasikan metode heuristik dan *linear programming*.

Pertanyaan utama penelitian ini mencakup: bagaimana menentukan pola alokasi suplai yang optimal antara TLPG Priok dan TLPG Sekong agar total biaya distribusi minimal dengan tetap memenuhi permintaan harian SPBE dan batasan kapasitas terminal; sejauh mana redistribusi suplai dapat meningkatkan ketahanan stok TLPG Priok tanpa mengganggu efisiensi sistem; serta bagaimana efektivitas pendekatan gabungan *Evolutionary Algorithm* dan *Linear Programming* dalam menurunkan total biaya dan menyeimbangkan utilisasi antar-terminal. Tujuan penelitian adalah mengurangi total biaya distribusi dengan tetap memenuhi permintaan dan kendala kapasitas, serta meningkatkan ketahanan stok TLPG yang kritis, serta menyediakan dasar pengambilan keputusan strategis bagi manajemen dalam meningkatkan efisiensi operasional dan ketahanan suplai energi nasional.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus eksploratif yang difokuskan pada optimasi distribusi *Liquefied Petroleum Gas* (LPG) di wilayah Jawa bagian Barat dengan objek kajian PT PP. Pendekatan yang

digunakan adalah gabungan antara metode heuristik dan algoritma *Linear Programming* (LP) untuk menentukan pola suplai dan distribusi optimal antara dua Terminal LPG (TLPG) utama yakni TLPG Sekong (Cilegon) dan TLPG Priok (Jakarta) ke 132 titik distribusi Stasiun Pengisian Bulk Elpiji (SPBE). Tujuan penelitian ini adalah memperoleh kombinasi alokasi distribusi dengan total biaya minimum, tanpa melanggar batasan kapasitas, waktu operasi, dan ketentuan *security of supply* pemerintah.

Mengacu pada desain penelitian yang telah disusun untuk mengembangkan model optimasi distribusi LPG di wilayah Jawa bagian barat, dilakukan pengumpulan data-data yang menggambarkan keadaan aktivitas pendistribusian LPG *bulk* yang selama ini berlangsung di wilayah Jawa bagian barat. Data dianalisis sesuai metode penelitian yang telah dijabarkan, data dimaksud antara lain adalah skema pola suplai LPG *bulk* di wilayah Jawa bagian barat, urutan aktivitas operasional di setiap TLPG, kapasitas penyaluran TLPG, waktu operasional maksimum per hari di TLPG, daftar SPBE di wilayah Jawa bagian barat, volume *demand* LPG *bulk* setiap SPBE tahun 2024-2025, jarak jalur pengangkutan dari setiap TLPG ke setiap SPBE, dan satuan biaya dari setiap proses pengangkutan dari produsen LPG (eselon-1) sampai dengan SPBE (eselon-3). Dari pengumpulan data yang telah dilakukan dapat dirumuskan bahwa:

- Proses suplai dan distribusi LPG *bulk* PT PP di wilayah Jawa bagian barat melalui 3 eselon: *supplier*, TLPG, dan SPBE, dengan satuan biaya per berat produk dalam MetricTon serta variabel penyusun total biaya atas proses operasional pengangkutan pada setiap eselon dan antar eselon.
- Terdapat 2 lokasi TLPG di wilayah Jawa bagian barat yang dapat dianalisis yaitu TLPG Sekong di kota Cilegon dan TLPG Priok di kota Jakarta, dengan durasi jam operasional 16 jam per hari dan masing-masing memiliki kapasitas fasilitas, dan utilisasi sarfas tertentu.
- Jumlah SPBE yang perlu dilayani adalah 132 lokasi yang masing-masing memiliki *demand* yang relatif konstan dan jarak jalur pengangkutan tertentu ke setiap TLPG.
- Pengiriman LPG *bulk* ke SPBE didasarkan pada permintaan harian dari SPBE yang disampaikan kepada PT PP pada hari sebelumnya untuk divalidasi dan persiapan operasional di TLPG.
- Operasional pengiriman LPG *bulk* dari *Supplier*/TLPG ke TLPG menggunakan kapal / moda laut yang dipengaruhi oleh utilisasi dermaga dan waktu perjalanan.
- Operasional pengiriman LPG *bulk* dari TLPG ke SPBE dilakukan dengan ketentuan 1 trip 1 tujuan SPBE menggunakan mobil tangki / moda darat yang dipengaruhi oleh utilisasi fasilitas pengisian,

batasan jam operasional TLPG, waktu perjalanan, dan ketentuan keselamatan tentang durasi waktu berkendara.

- g) Sebaran Lokasi pusat *demand* memberikan beban dan utilisasi TLPG yang tidak merata.
- h) Setiap TLPG perlu mampu memenuhi ketentuan *security of supply* Cadangan Operasional minimum di TLPG = 3 hari (Permen ESDM No 12 tahun 2022).
- i) Keterbatasan kapasitas *storage* dan pengisian TLPG Priok. Tidak dapat dilakukan Pengembangan/ Penambahan Kapasitas *Storage* di TLPG Tg Priok karena terkendala ketersediaan lahan, dimana solusi jangka panjangnya adalah tambahan investasi.
- j) Perbedaan total biaya distribusi pada masing-masing TLPG.
- k) Perlu tolok ukur tingkat kesesuaian dan kelayakan biaya untuk distribusi LPG.

Pengukuran kinerja operasional sering dibedakan menjadi ukuran finansial dan non-finansial. Meskipun demikian, indikator inti biasanya mencakup biaya, kualitas, fleksibilitas, dan pengiriman [13]. Dalam konteks *lean supply chain*, peningkatan kinerja operasional tampak nyata melalui berkurangnya waktu siklus, persediaan yang lebih ramping, serta proses yang lebih andal. Contohnya, implementasi *lean* di berbagai perusahaan manufaktur terbukti meningkatkan *on-time delivery*, menurunkan level persediaan, serta meningkatkan produktivitas dan kualitas secara simultan [14]. Indikator-indikator tersebut relevan pula untuk penyaluran LPG: *supply chain* LPG yang ringkas dan memiliki infrastruktur optimal diharapkan mampu mencapai tingkat produktivitas lebih tinggi (misal volume LPG tersalur per hari meningkat), kualitas pengiriman yang lebih baik (minim keterlambatan atau kerusakan), dan pelanggan yang lebih puas.

Kinerja keuangan dalam konteks manajemen *supply chain* merujuk pada hasil-hasil finansial yang dipengaruhi oleh efektivitas dan efisiensi operasi *supply chain*. Indikator kinerja keuangan dapat berupa efisiensi biaya, profitabilitas, pengembalian investasi (ROI), margin keuntungan, *return on sales* (ROS), dan indikator lain yang mencerminkan kesehatan finansial dari operasi logistik [13]. Dalam distribusi LPG PT PP, kinerja keuangan dapat diukur misalnya melalui: biaya distribusi per ton LPG yang berhasil ditekan, pencapaian target anggaran biaya operasi, besarnya penghematan biaya hasil inisiatif efisiensi, atau peningkatan margin operasi dari kegiatan penyaluran LPG.

Pendekatan heuristik digunakan sebagai langkah awal untuk menghasilkan solusi awal (*initial feasible solution*) [15], sementara LP digunakan sebagai tahap optimasi lanjutan untuk menentukan alokasi optimal

yang meminimalkan total biaya distribusi [11]. Penelitian-penelitian LP sebelumnya menunjukkan bahwa pendekatan optimasi matematis dan simulasi dapat memberikan solusi yang efektif untuk tantangan distribusi energi di wilayah dengan kondisi geografis dan infrastruktur yang kompleks [16], [17], [18], [19]. Fokus penelitian bukan untuk menguji hipotesis statistik, tetapi pada perancangan sistem keputusan operasional untuk menghasilkan solusi matematis praktis yang dapat direplikasi dan diimplementasikan secara operasional di perusahaan energi.

Data yang digunakan merupakan data sekunder aktual operasional tahun 2024–2025 yang diperoleh dari laporan internal PT PP serta hasil observasi perusahaan di TLPG Sekong dan TLPG Priok, yang dapat dilihat pada Tabel 1. Jenis data meliputi:

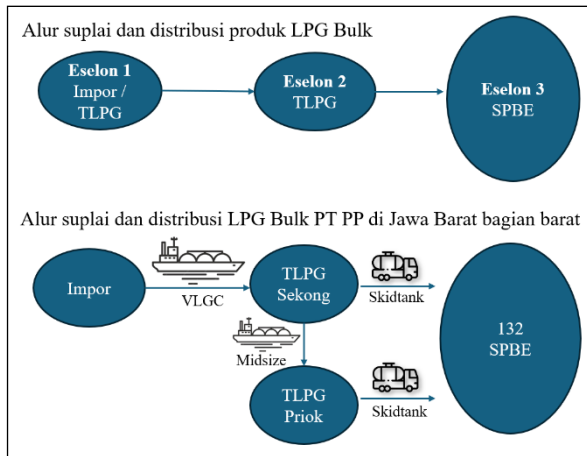
- a) Jarak antara terminal dengan setiap 132 SPBE (Km).
- b) Volume permintaan harian LPG di setiap SPBE (MetricTon/hari).
- c) Tarif angkutan kapal laut dan transportasi darat (Rp/MetricTon Km).
- d) Biaya operasional terminal (Rp/MT).
- e) Kapasitas maksimum pengisian harian TLPG Sekong (2.889 MT/hari) dan TLPG Priok (4.334 MT/hari).
- f) Jam operasi maksimum 16 jam per hari per terminal.

Tabel 1. Data Kondisi Operasional TLPG di Jawa Barat

Terminal LPG	Sekong	Priok
Lokasi	Cilegon, Banten	Priok, Jakarta
Area distribusi	SPBE Provinsi Banten (moda darat) Konsinyasi ke TLPG (moda Laut) Priok, Balongan, Semarang, Cilacap, Lampung, Pontianak (197.000 MT / bulan)	SPBE Jakarta, Bogor, Bekasi, Bandung (moda darat) Konsinyasi ke TLPG – tidak ada
Kapasitas timbun	101.772 Mton	12.515 Mton
Kapasitas pengisian Mobil Tangki	1.928 Mton/hari	4.334 Mton/hari
Rata-rata salur	2.890 Mton/hari	3.194 Mton/hari
Utilisasi sarfas timbun	75-80%	75-80%
Utilisasi sargas salur ke SPBE	67%	74%
Utilisasi Sarfas Dermaga	59%	85%
Ketahanan Stock rata-rata harian	8,5 hari	3,0 hari

Analisis awal dilakukan terhadap sistem *supply chain existing* PT PP, khususnya ketidakseimbangan distribusi antara dua TLPG utama. TLPG Priok memiliki tingkat

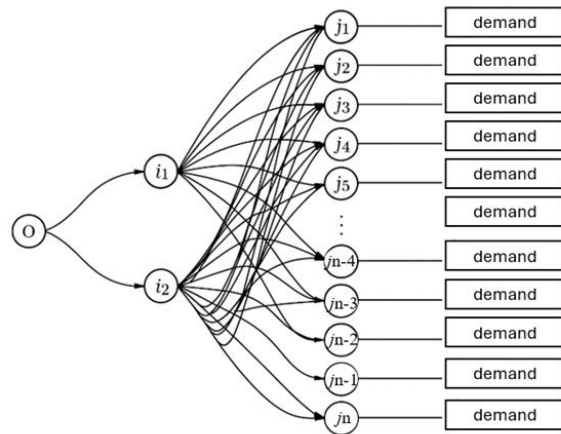
utilisasi dermaga dan fasilitas tinggi (85%) serta ketahanan stok rendah (3 hari), sedangkan TLPG Sekong masih memiliki kapasitas cadangan signifikan dengan ketahanan stok 8,5 hari.



Gambar 1. Alur Rantai Suplai LPG Bulk Jawa Barat

Dari hasil observasi dan data aktual tahun 2024–2025, diidentifikasi variabel-variabel utama penyusun sistem:

- a) *Input*: jarak terminal–SPBE (Km), volume permintaan harian (MT/hari), biaya suplai laut (Rp/MT), biaya distribusi darat (Rp/MT·Km), dan kapasitas pengisian TLPG (MT/hari).
- b) *Proses*: suplai laut ke TLPG, penyimpanan, operasional dan pengisian di terminal ke mobil tangki, distribusi darat ke SPBE.
- c) *Output*: total biaya distribusi (Rp) dan rasio pemanfaatan kapasitas terminal (%).



Gambar 2. Alokasi Distribusi LPG Bulk 3 Eselon

Untuk memformulasikan masalah tersebut digunakan pendekatan matematis deterministik melalui model LP [10] dalam bentuk Persamaan (1).

$$Min Z = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n (C_i^{laut} (import\ dan/atau\ konsinyasi) + C_i^{operasi} + C_{ij}^{darat} \cdot D_{ij}) \cdot X_{ij} \tag{1}$$

Dimana Z merupakan fungsi tujuan yang merupakan total biaya distribusi LPG. X adalah variabel Keputusan yang merupakan nilai volume LPG yang dikirim antar-terminal dan SPBE. C adalah biaya yang muncul dalam proses *handling* produk antara lain biaya transportasi laut, operasional terminal dan transportasi darat. C_i^{laut} adalah biaya suplai laut ke terminal i (Rp/MetricTon). $C_i^{operasi}$ adalah biaya operasional terminal i (Rp/MetricTon). C_{ij}^{darat} adalah biaya distribusi darat dari terminal i ke SPBE j (Rp/MetricTon·Km). D adalah jarak distribusi dari TLPG ke setiap SPBE. Indeks i menunjukkan Banyaknya Terminal LPG sebagai *warehouse*, pada penelitian ini i bernilai 1 sampai dengan 2. Indeks j menunjukkan Banyaknya SPBE di wilayah Jawa Bagian Barat yang disupply dari TLPG Priok dan TLPG Sekong, pada penelitian ini j bernilai 1 s.d. n, dimana n merupakan jumlah total SPBE eksisting dari TLPG Priok dan TLPG Sekong yaitu 132 unit.

Tabel 2. Data Satuan Biaya Suplai, Storage dan Distribusi LPG Bulk

TLPG	Suplai Fee Sekong (Rp/MT)	Suplai Fee Priok (Rp/MT)	Storage Fee Sekong (Rp/MT)	Storage Fee Priok (Rp/MT)	Satuan total biaya Suplai dan Storage (Rp/MT)	Satuan biaya Distribusi (Rp/MT.Km)
	a	b	c	d	a+b+c+d	e
Sekong	1.237.500	-	428.477	-	528.227	1.535
Priok	1.237.500	355.547	428.477	99.750	1.593.047	1.535

Pada suplai *chain* LPG, biaya yang muncul dapat diperinci pada Persamaan (2).

$$\begin{aligned} \text{Biaya suplai (import/konsiyasi)} &= \text{tarif angkutan kapal} \times \text{volume LPG} \\ \text{Biaya terminal} &= \text{tarif operasi} \times \text{volume LPG} \\ \text{Biaya distribusi} &= \text{tarif Mobil Tangki LPG} \times \text{jarak SPBE} \times \text{volume LPG} \end{aligned} \tag{2}$$

Agar model optimasi dapat menggambarkan kondisi aktual, maka diperlukan serangkaian fungsi kendala yang merepresentasikan batasan operasional dan kebijakan perusahaan. Terdapat batasan-batasan dalam *supply chain* LPG Bulk PT PP di wilayah Jawa bagian barat antara lain:

- a) Kebutuhan (*demand*) harian masing-masing SPBE harus terpenuhi, dengan Persamaan (3). Dimana D_j adalah kebutuhan LPG SPBE j (MetricTon) setiap SPBE hanya dilayani oleh satu terminal.
- e) *Population size* jumlah individu (solusi acak) yang dijalankan dalam satu generasi. Penelitian menggunakan nilai 150 dinilai cukup stabil antara akurasi dan waktu proses.

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = D_j \quad \forall j \quad (3)$$

- b) Kapasitas penyaluran maksimum per hari di setiap terminal tidak dapat dilampaui, dengan Persamaan (4). Dimana S_i merupakan kapasitas penyaluran terminal i (MetricTon). S_{i1} adalah kapasitas penyaluran TLPG Sekong yaitu 2.889 MetricTon per hari dan S_{i2} adalah kapasitas penyaluran terminal TLPG Priok yaitu 4.334 MetricTon per hari.

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq S_i \quad \forall i \quad (4)$$

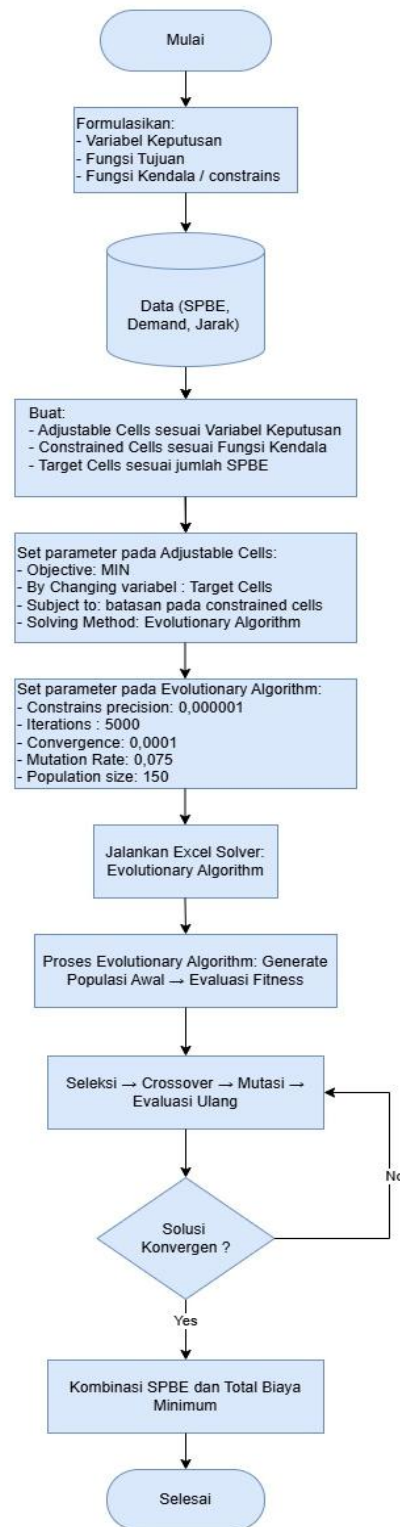
Ukuran data terdiri atas 132 titik distribusi (SPBE) yang diklasifikasikan berdasarkan jarak dan volume permintaan harian, serta dua titik suplai (TLPG Sekong dan TLPG Priok). Pengolahan data dilakukan pada perangkat komputer dengan sistem Microsoft Windows 11, menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel Solver dan Visual Studio Code (Python 3.12).

2.1 Metode Heuristik: *Evolutionary Algorithm* (EA)

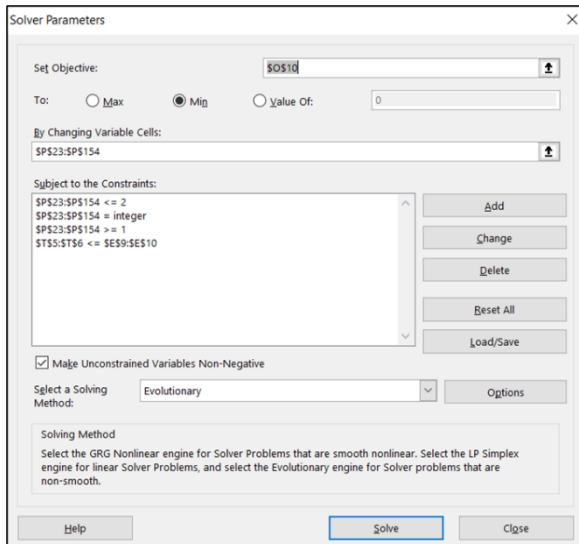
Tahap awal optimasi dilakukan dengan metode heuristik berbasis *Evolutionary Algorithm* (EA) yang diimplementasikan melalui Microsoft Excel Solver *Evolutionary Mode*. EA merupakan algoritma metaheuristik berbasis populasi yang meniru proses seleksi alam, *crossover*, dan mutasi untuk menghasilkan solusi *near-optimal* pada permasalahan non-linier kompleks [10], [20]. *Flowchart* metode ini sesuai dengan Gambar 3.

Penentuan set parameter penting pada Solver *Evolutionary Algorithm* di Excel dilakukan pada pilihan opsi sesuai Gambar 4. Parameter dimaksud beserta efek dan pengaturannya:

- a) *Constraints precision* merupakan tingkat ketelitian dalam memenuhi batasan. Penelitian menggunakan nilai 0,000001 (0,0001%) dinilai cukup akurat dan masih efisien secara waktu.
- b) *Iterations* jumlah generasi pengulangan perhitungan dalam rangka mencari nilai minimum. Penelitian menggunakan nilai 5000 dinilai sesuai dengan jumlah data yang besar (132 SPBE).
- c) *Convergence* merupakan batas perubahan rata-rata nilai *fitness* antar generasi untuk menghentikan iterasi. Penelitian menggunakan nilai *default* 0.0001 (0.01%) dinilai cukup akurat dan masih efisien secara waktu.
- d) *Mutation Rate* merupakan probabilitas perubahan acak sebagian nilai variabel pada tiap generasi. Penelitian menggunakan nilai *default* 0.075 (7,5%) untuk keseimbangan eksplorasi dan stabilitas.



Gambar 3. *Flowchart* Optimasi Heuristik Berbasis *Evolutionary Algorithm*



Gambar 4. Excel Solvers: Setting Tujuan, Sel pengatur dan Constraints

Proses perhitungan yang terjadi pada Solver *Evolutionary* saat program dijalankan adalah iterasi berdasarkan populasi solusi awal acak, kemudian melalui proses bertahap antara lain: seleksi (mempertahankan solusi dengan total biaya lebih rendah), *crossover* (menggabungkan sebagian elemen solusi terbaik), dan mutasi (mengganti sebagian kecil nilai secara acak untuk eksplorasi solusi baru). Proses ini diulang hingga nilai fungsi tujuan konvergen atau batas iterasi maksimum tercapai.

2.2 Metode *Linear Programming* (LP)

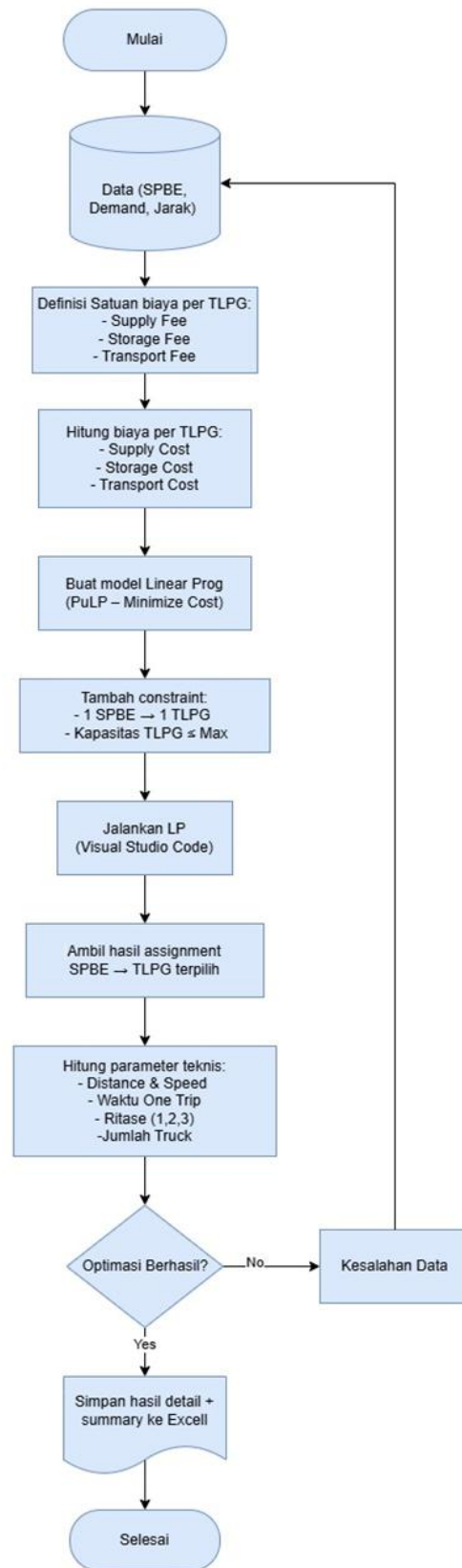
Hasil dari tahap heuristik digunakan sebagai *input* awal untuk model LP yang dikembangkan menggunakan Python (library: PuLP dan pandas) pada Visual Studio Code (VS Code). Tujuan LP adalah menentukan nilai optimal dari X_{ij} untuk meminimalkan biaya distribusi total dengan tetap memenuhi batasan operasional yang telah dimodelkan. Flowchart algoritma pelaksanaan optimasi sesuai dengan Gambar 5.

Pengguna Python dapat menambahkan *library*, yaitu kumpulan fungsi dan modul siap pakai yang mempercepat proses komputasi dan analisis data. *Library* memungkinkan peneliti untuk menghindari penulisan kode dari awal, karena fungsi umum seperti optimasi, statistik, atau manipulasi data sudah tersedia. Pada penelitian ini *library* yang dapat digunakan untuk pengolahan data optimasi adalah

- PuLP, untuk *linear programming* dan *optimization modeling*.
- Pandas, untuk data *processing*, *cleaning*, dan *statistical analysis* yang memiliki keunggulan dapat terhubung langsung dengan *file excel* sebagai sumber data dan keluaran hasil data penelitiannya.

Eksekusi perhitungan pada *Linear Programming* yang dikembangkan di VS Code terjadi pada *library* PuLP

untuk meminimalkan nilai total biaya. Keluaran dari proses ini adalah daftar SPBE yang telah terpilih masing-masing titik suplai TLPG nya.



Gambar 5. Flowchart Optimasi *Linear Programming*

3. Hasil dan Pembahasan

Penggunaan metode Heuristik *Evolutionary Algorithm* memberikan total volume pelayanan sebesar 5.122,334 ton per hari, dengan alokasi 2.886,575 ton/hari berasal

dari TLPG Sekong dan 2.235,758 ton/hari dari TLPG Priok. Kapasitas maksimum masing-masing terminal adalah 2.889,6 ton/hari untuk Sekong dan 4.334,4 ton/hari untuk Priok, sehingga hasil optimasi tetap berada dalam batas distribusi yang diizinkan.

	N	O	P	Q	R	S	T
20	SOLVER						
21	Code	SPBE Description	KODIFIKASI	Suptlai Point	Biaya Suptlai	Biaya Terminal	Biaya Distribusi
22							
23	C2240	SPBE-GREGITAN DINAMIKA		2 Priok	45.785.350	15.181.627	1.037.084
24	C2246	SPPBE-POWER PLUS		2 Priok	46.360.364	15.372.291	1.984.035
25	C2249	SPPBE- BUMI MITRA WITRA		1 Sekong	57.018.623	19.742.342	7.711.629
26	C224A	SPPBE-GASINDO JAYA PRATAMA		2 Priok	75.981.790	25.194.241	3.288.330
27	C224B	SPPBE-SURYA PRATAMA GAS		1 Sekong	7.789.584	2.697.095	2.406.670
28	C2254	SPPBE-NURALAM PERTIWI SAKTI		2 Priok	17.993.890	5.966.461	104.063
29	C2255	SPPBE-ERIKS DHARMA SENTOSA		2 Priok	7.860.785	2.606.500	98.498
30	C2256	SPPBE-SURYANDRA NUSA BHAKTI		2 Priok	23.578.894	7.818.352	136.362
31	C2258	SPPBE-BUMINDO GASUTAMA		2 Priok	8.987.060	2.979.953	173.248
32	C225D	SPPBE-PRAHAJA PANCA VANO		1 Sekong	62.815.500	21.749.474	10.818.304
33	C225E	SPPBE PUTRA PANCA GASINDO		1 Sekong	20.704.001	7.168.631	2.119.391
34	C225G	SPPBE-RADISA UNGGUL SEJAHTERA		1 Sekong	49.582.353	17.167.580	12.119.822
35	C225H	SPPBE-GALANG ARTHA SEMESTA		1 Sekong	40.340.032	13.967.484	1.911.637
36	C225O	SPPBE-ENERGI B.CEMERLANG		1 Sekong	49.677.891	17.200.659	13.123.259
37	C225Q	SPPBE-MUSTIKA FORTUNA ABADI		2 Priok	60.560.243	20.080.724	8.177.966
38	C225S	SPPBE-UKARMANDIRI MULYA SARI		2 Priok	54.485.948	18.066.593	1.911.637
39	C225T	SPBE-INTIM WIRA ENERGI		1 Sekong	29.398.138	10.178.922	4.778.527
40	C225U	SPBE-Nusa Energi Sejahtera Ab		2 Priok	52.933.010	17.551.668	5.061.250
41	C225X	SPBE-JATIWARNA GAS UTAMA		1 Sekong	73.295.394	25.378.072	12.741.416
42	C2261	SPPBE-PURNATARUM MURNI RAHAYU		1 Sekong	29.949.047	10.369.670	10.628.009
43	C2262	SPPBE-IRAJAYA		2 Priok	14.835.912	4.919.331	1.148.284
44	C2263	SPPBE-BINA LOKA CIPTA		2 Priok	11.887.353	3.941.640	622.164
45	C2264	SPPBE-KARYABHAKTI INSAN UTAMA		1 Sekong	28.672.985	9.927.842	3.109.476
46	C2267	SPPBE-MANDALAGIRI KARYA RAYA		2 Priok	14.358.045	4.760.878	2.471.703
47	C2268	SPPBE-INDONESIA BINTANG C.		1 Sekong	57.455.320	19.893.545	18.678.175
48	C226H	SPPBE-PATRA TRADING - SUKABUMI		1 Sekong	33.562.915	11.620.950	9.161.894

	T	U
4	Hasil Volume Pelayanan (MT/hari)	Kapasitas Pengisian (DOT Maksimum) MT/hari
5	2886,575491	2.889,6
6	2235,758512	4.334,4
7	5122,334003	7.224,0

	N	O	P	Q	R
4	No	TLPG	Biaya Suptlai	Biaya Terminal	Biaya Distribusi
5	1	Sekong	Rp 3.572.137.170	Rp 1.236.830.162	Rp 639.908.489
6	2	Priok	Rp 3.561.667.948	Rp 1.180.987.203	Rp 202.978.805
7	Total Biaya		Rp 7.133.805.118	Rp 2.417.817.365	Rp 842.887.294
8					
9	TOTAL COST (OPTIMASI)				
10	Rp 10.394.509.778				
11					
12	EKSISTING		SELISIH	PER BULAN	PER TAHUN
13	Rp 10.659.765.392		Rp 265.255.614	Rp 7.427.157.202	Rp 89.125.886.420

Gambar 6. Hasil Solver optimasi *Evolutionary Algorithm*

Hasil optimasi pada Gambar 6 menunjukkan total biaya suplai sebesar Rp 7.133.805.118, biaya terminal sebesar Rp 2.417.817.365, dan biaya distribusi sebesar Rp 842.887.294, sehingga total biaya keseluruhan setelah optimasi mencapai Rp 10.394.509.778. Dibandingkan dengan kondisi eksisting sebesar Rp 10.659.765.392, terjadi penghematan biaya sebesar Rp 265.255.614 per bulan, atau setara dengan Rp 7.427.157.202 per tahun (\pm Rp 89,12 miliar per tahun).

biaya optimal yang dihasilkan model LP adalah sebesar Rp 10.320.926.014 per hari, dengan rincian alokasi biaya sebagai berikut:

- TLPG Priok melayani permintaan sebesar 2.226 MT/hari dengan total biaya distribusi Rp 4.892.255.281,
- TLPG Sekong melayani permintaan sebesar 2.889 MT/hari dengan total biaya distribusi Rp 5.428.670.733.

Selanjutnya, hasil perhitungan optimasi metode *Linear Programming* pada VS Code menunjukkan bahwa total

```

PS C:\Programming\Python\lgcostoptimasi> python tes3.py
      SPBE      Demand      Distance      Chosen_Depot      Speed      Unit      Supply_Cost      Storage_Cost      Transport_Cost      Total_Cost
0      SPBE-GREGITAN DINAMIKA      28.740744      23.5      Priok      25      ...      1 4.578536e+07      1.518104e+07      1.037881e+06      6.200407e+07
1      SPPBE-POWER PLUS      29.10169643      44.4      Priok      30      ...      1 4.636037e+07      1.537230e+07      1.984030e+06      6.371670e+07
2      SPPBE- BUMI MITRA MITRA      46.07565476      109.0      Sekong      30      ...      3 5.701862e+07      1.974236e+07      7.711609e+06      8.447259e+07
3      SPPBE-GASINDO JAYA PRATAMA      47.69589286      44.9      Priok      30      ...      2 7.598180e+07      2.519426e+07      3.288322e+06      1.044644e+08
4      SPPBE-SURYA PRATAMA GAS      6.294613095      139.1      Priok      30      ...      1 1.082761e+07      3.324985e+06      1.344445e+06      1.469794e+07
..      ..      ..      ..      ..      ..      ..      ..      ..      ..
127      SPPBE-JAYA ABADI PUTRATAMA      59.326071      140.9      Sekong      30      ...      4 7.341601e+07      2.541986e+07      1.283523e+07      1.116711e+08
128      SPPBE-MANGGAR MAS PRATAMA      49.870714      73.2      Sekong      30      ...      2 6.171501e+07      2.136845e+07      5.605362e+06      8.868882e+07
129      SPBE-PUSPA DAMAYANTI      21.822530      88.6      Priok      30      ...      1 3.476432e+07      1.152725e+07      2.700767e+06      4.899233e+07
130      SPBE PACIFIC ENERGY NUSANTARA      26.565655      84.1      Sekong      30      ...      1 3.287500e+07      1.138277e+07      3.430548e+06      4.768832e+07
131      SPBE ELANG BANTEN MAKMUR PERKASA      31.515298      83.1      Sekong      30      ...      1 3.900010e+07      1.350358e+07      4.021327e+06      5.652509e+07

[132 rows x 12 columns]
Chosen_Depot      Total_Demand      Total_Cost
0      Priok      2225.589182      4.892255e+09
1      Sekong      2889.236131      5.428671e+09
Optimasi selesai. Hasil detail + ringkasan disimpan ke Hasil_Optimasi_SPBE.xlsx
    
```

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	SPBE	Demand	Distance	Chosen_Depot	Speed	One_Trip	Ritase	Unit	Supply_Cost	Storage_Cost	Transport_Cost	Total_Cost
2	SPBE-GREGITAN DINAMIKA	28,74074405	23,5	Priok	25	0,94	3	1	45785356,08	15181637,01	1037081,439	62004074,53
3	SPPBE-POWER PLUS	29,10169643	44,4	Priok	30	1,48	2	1	46360370,19	15372301,8	1984030,155	63716702,14
4	SPPBE- BUMI MITRA MITRA	46,07565476	109	Sekong	30	3,63	1	3	57018622,77	19742358,33	7711609,077	84472590,17
5	SPPBE-GASINDO JAYA PRATAMA	47,69589286	44,9	Priok	30	1,5	2	2	75981799,03	25194258,4	3288321,837	104464379,3
6	SPPBE-SURYA PRATAMA GAS	6,294613095	139,1	Priok	30	5,14	1	1	10027614,51	3324984,591	1344445,381	14697044,48
7	SPPBE-NURALAM PERTIWI SAKTI	11,29526786	6	Priok	25	0,24	3	1	17993892,57	5966465,454	104062,6251	24064420,65
8	SPPBE-ERIKS DHARMA SENTOSA	4,934434524	13	Priok	25	0,52	3	1	7860786,115	2606501,545	98498,07327	10565785,73
9	SPPBE-SURYANDRA NUSA BHAKTI	14,80113095	6	Priok	25	0,24	3	1	23578897,26	7818357	136361,9314	31533616,19
10	SPPBE-BUMINDO GASUTAMA	5,641428571	20	Priok	25	0,8	3	1	8987060,861	2979954,89	173247,1431	12140262,89
11	SPPBE-PRAHAJA PANCA VANO	50,76	7	Priok	25	0,28	3	1	80863065,72	26812802,52	545590,3068	108221458,5
12	SPPBE PUTRA PANCA GASINDO	16,73050595	82,5	Sekong	30	2,75	2	1	20704001,12	7168636,999	2119385,778	29992023,89
13	SPPBE-RADISA UNGGUL SEJAHTERA	40,06654762	197	Sekong	30	7,07	1	3	49582352,68	17167594,12	12119791,29	78869738,09
14	SPPBE-GALANG ARTHA SEMESTA	32,59800595	217	Sekong	30	7,73	1	2	40340032,37	13967495,8	10861698,94	65169227,1
15	SPPBE-ENERGI B.CEMERLANG	40,14375	103	Priok	30	3,43	1	3	63950880,51	21205012,63	6348953,649	91504846,79
16	SPPBE-MUSTIKA FORTUNA ABADI	38,01535714	243	Sekong	30	9,1	1	3	47044004,46	16288706,18	14184444,78	77517155,43
17	SPPBE-UKARMANDIRI MULYA SARI	34,20235119	36,4	Priok	30	1,21	3	1	54485952,96	18066605,36	1911632,204	74464190,52
18	SPBE-INTIM WIRA ENERGI	23,75607143	131	Sekong	30	4,87	1	2	29398138,39	10178930,22	4778514,525	44355583,14
19	SPBE-Nusa Energi Sejahtera Ab	33,22752976	99,2	Priok	30	3,31	2	1	52933016,6	17551678,36	5061237,536	75545932,5
20	SPBE-JATIWARNA GAS UTAMA	59,22860119	32,5	Priok	30	1,08	3	1	94353945,44	31286146,32	2955710,057	128595801,8
21	SPPBE-PURNATARUM MURNI RAHAYU	24,20125	286	Sekong	30	10,53	1	2	39241051,34	13586980,17	13925424,8	66753456,3
22	SPPBE-IRAJAYA	9,312916667	172	Sekong	30	6,23	1	1	11524734,38	3990370,595	2459581,151	17974686,12
23	SPPBE-BINA LOKA CIPTA	7,46202381	54,3	Priok	30	1,81	2	1	11887354,64	3941642,451	622161,9576	16451159,05
24	SPPBE-KARYABHAKTI INSAN UTAMA	23,17008929	87,4	Sekong	30	2,91	2	1	28672985,49	9927850,347	3109468,291	41710304,13
25	SPPBE-MANDALAGIRI KARYA RAYA	9,012946429	269	Sekong	30	9,97	1	1	11153521,21	3861840,247	3722768,771	18738130,22
26	SPPBE-INDONESIA BINTANG C.	46,42854167	158,1	Priok	30	5,77	1	3	73962849,02	24524809,28	11271037,76	109758696,1
27	SPPBE-PATRA TRADING - SUKABUMI	27,12154762	220	Sekong	30	7,83	1	2	33562915,18	11620959,36	9161870,334	54345744,87
28	SPPBE-TIRTATAMA ELPINDO	36,05348214	63,9	Priok	30	2,13	2	1	57434891,57	19044422,71	3537488,747	80016803,03
29	SPPBE-PRIMA ENERGI PERSADA	41,49068452	107,4	Sekong	30	3,58	1	3	51344722,1	17777804,03	6842296,249	75964822,38
30	SPPBE-SINAR TELAGA GUCI EMAS	33,2528869	31,2	Priok	30	1,04	3	1	52973411,72	17565072,69	1593055,63	72131540,05
31	SPPBE-CATUR JAYA PERKASA	58,14824405	142	Sekong	30	5,23	1	4	17958452,01	24915185,16	12678618,71	109552255,9
32	SPPBE-REKAT GAS MITRA CIPTA	23,21691540	285	Sekong	30	10,5	1	2	41200055,45	14375480,14	1453002,54	70004073,04

	A	B	C
1	Chosen_Depot	Total_Demand	Total_Cost
2	Priok	2.226	4.892.255.281
3	Sekong	2.889	5.428.670.733
4	Total Biaya		10.320.926.014

Gambar 7. Hasil optimasi Linear Programming

Jika dibandingkan dengan hasil optimasi heuristik *Evolutionary Algorithm* pada tahap sebelumnya (total biaya Rp 10.394.509.778), hasil dari pendekatan Linear Programming, seperti yang terlihat pada Gambar 7, menunjukkan peningkatan efisiensi biaya sebesar Rp 73.583.764 per hari. Perbedaan ini disebabkan oleh sifat LP yang menggunakan pendekatan deterministik dengan penyelesaian matematis presisi tinggi dalam pemilihan kombinasi optimal, dibandingkan dengan metode heuristik yang cenderung mendekati solusi optimal melalui iterasi berbasis populasi.

Hasil LP ini memperkuat validasi bahwa pola alokasi suplai antara TPLG Sekong dan TPLG Priok yang dihasilkan sebelumnya telah berada pada kisaran optimal. Penerapan model *Linear Programming* dalam VS Code berbasis Python memberikan keuntungan tambahan berupa kemampuan analisis sensitivitas,

fleksibilitas pembaruan data input, serta transparansi proses pemodelan matematis yang dapat direplikasi untuk perencanaan distribusi LPG di periode selanjutnya.

Hasil perbandingan antara kondisi eksisting dan hasil optimasi menggunakan dua pendekatan Heuristik *Evolutionary Algorithm* dan *Linear Programming* menunjukkan adanya peningkatan efisiensi biaya dan keseimbangan distribusi antara TPLG Sekong dan TPLG Priok. Tabel 3 merangkum parameter utama yang dibandingkan, meliputi volume penyaluran (MT/hari), total biaya distribusi (Rp/hari), serta ketahanan stok (hari) pada masing-masing terminal.

Tabel 3. Perbandingan Kondisi Awal dan Hasil Optimasi TLPG

Parameter	Kapasitas TLPG	Kondisi Saat ini	Heuristik <i>Evolutionary Algorithm</i>	<i>Linear Programming</i>
Volume Penyaluran (MT/hari)				
TLPG Sekong	2.890	1.928,0	2.880,0	2.889,0
TLPG Priok	4.334	3.194,0	2.242,0	2.233,0
Total Biaya Distribusi (Rp/hari)				
TLPG Sekong		3.546.644.865,0	5.448.875.821,0	5.428.670.733,0
TLPG Priok		7.113.300.764,0	4.945.633.956,0	4.892.255.281,0
Total		10.659.945.628,0	10.394.509.777,0	10.320.926.014,0
% vs Kondisi Saat ini		100%	98%	97%
Ketahanan Stock (Hari)				
TLPG Sekong	76.329	39,6	26,5	26,4
TLPG Priok	9.386	2,9	4,2	4,2

Dari sisi volume penyaluran, hasil optimasi menunjukkan adanya redistribusi beban suplai antara kedua terminal. TLPG Sekong yang semula menyalurkan 1.928 MT/hari meningkat menjadi 2.834 MT/hari pada metode heuristik *Evolutionary Algorithm* dan 2.889 MT/hari pada metode LP. Sebaliknya, TLPG Priok yang sebelumnya menyalurkan 3.194 MT/hari mengalami penyesuaian menjadi 2.289 MT/hari pada metode heuristik dan 2.233 MT/hari pada hasil optimasi LP. Pola ini menggambarkan adanya pergeseran alokasi distribusi yang lebih proporsional terhadap kapasitas maksimum masing-masing terminal (4.334 MT/hari untuk Priok dan 2.890 MT/hari untuk Sekong).

Dari aspek biaya, hasil optimasi menunjukkan penurunan total biaya distribusi dibandingkan kondisi saat ini yang mencapai Rp 10.659.765.392 per hari. Melalui pendekatan *Evolutionary Algorithm*, total biaya dapat ditekan menjadi Rp 10.394.509.777, atau sekitar 98% dari kondisi aktual. Sementara itu, pendekatan *Linear Programming* menghasilkan biaya yang lebih efisien, yaitu Rp 10.320.926.014, atau 97% dari kondisi eksisting. Penurunan ini mengindikasikan bahwa metode LP memberikan solusi optimal secara matematis dalam mengalokasikan suplai dengan mempertimbangkan seluruh batasan kapasitas dan jarak distribusi.

Selanjutnya, dari sisi ketahanan stok harian, terjadi peningkatan signifikan dibandingkan kondisi aktual. TLPG Priok yang semula memiliki ketahanan stok rata-rata 2,9 hari meningkat menjadi 4,1 hari pada metode heuristik dan 4,2 hari pada metode LP. Sedangkan TLPG Sekong menunjukkan ketahanan stok relatif stabil, yaitu 26,9 hari untuk metode heuristik dan 26,4 hari untuk metode LP. Peningkatan ketahanan stok TLPG Priok mencerminkan adanya redistribusi beban suplai yang lebih seimbang antar-terminal, sehingga risiko kehabisan stok di terminal dengan tingkat utilisasi tinggi dapat diminimalkan. Atas hal ini PT PP mendapatkan solusi untuk TLPG Priok terkait ketentuan yang harus dipenuhi oleh PT PP tentang ambang batas ketentuan *security of supply* Cadangan Operasional minimum di TLPG adalah 3 hari (Peraturan Menteri ESDM No 12 tahun 2022).

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa pendekatan *Linear Programming* memberikan hasil

yang lebih optimal dibandingkan metode heuristik *Evolutionary Algorithm*, baik dari sisi efisiensi biaya maupun kestabilan ketahanan stok. Implementasi model ini dapat menjadi dasar bagi perusahaan untuk menetapkan pola distribusi LPG antar-terminal secara lebih rasional, berbasis data aktual, serta mendukung pencapaian efisiensi operasional jangka panjang.

4. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan kombinasi metode heuristik *Evolutionary Algorithm* dan *Linear Programming* berhasil menghasilkan solusi distribusi yang optimal dengan tetap memenuhi seluruh batasan (*constraints*) operasional. Melalui optimasi yang dilakukan, redistribusi beban suplai dari TLPG Priok ke TLPG Sekong terbukti mampu meningkatkan ketahanan stok harian TLPG Priok dari di bawah batas minimum 3 hari menjadi di atas 4 hari, sekaligus menurunkan total biaya distribusi secara keseluruhan sebesar $\pm 3\%$ dibandingkan kondisi eksisting. Selain itu, TLPG Sekong beroperasi pada kapasitas mendekati optimal (99–100%), sedangkan TLPG Priok beroperasi pada tingkat utilisasi sekitar 51%, yang menunjukkan tercapainya keseimbangan kapasitas dan efisiensi infrastruktur. Pendekatan *Linear Programming* menghasilkan biaya distribusi yang lebih rendah dibandingkan metode heuristik, menegaskan bahwa kombinasi kedua metode ini dapat digunakan secara komplementer untuk memperoleh hasil yang lebih presisi dan realistis. Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa optimalisasi pola distribusi LPG antar-terminal dapat menjadi alternatif strategis untuk meningkatkan efisiensi operasional, keandalan pasokan (*security of supply*), serta mendukung pengambilan keputusan investasi sarana dan fasilitas di masa mendatang. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan pengembangan model dengan mempertimbangkan variabel dinamis seperti cuaca, keterlambatan kapal, dan fluktuasi musiman permintaan menggunakan pendekatan multi-periode dinamis atau simulasi berbasis sistem logistik yang lebih kompleks, guna meningkatkan kemampuan prediksi dan adaptabilitas model terhadap kondisi operasi nyata di lapangan.

Daftar Rujukan

- [1] Risnata, A. D., & Moeis, A. O. (2021). Developing KPI's of Supply Chain LPG Using Analytic Hierarchy Process: a Case

- Study of LPG Scheduling at Indonesia's LPG Main Terminal. Retrieved from <https://easychair.org/publications/preprint/nJ6P>
- [2] Cohen, M. A., & Mallik, S. (1997). Global Supply Chains: Research and Applications. *Production and Operations Management*, 6(3), 193–210. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.1997.tb00426.x>
- [3] Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M., & Shapiro, A. (2005). A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 167(1), 96–115. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.01.046>
- [4] Sharma, S., & Modgil, S. (2019). TQM, SCM and operational performance: an empirical study of Indian pharmaceutical industry. *Business Process Management Journal*, 26(1), 331–370. <https://doi.org/10.1108/BPMJ-01-2018-0005>
- [5] Ghobakhloo, M., & Azar, A. (2018). Business excellence via advanced manufacturing technology and lean-agile manufacturing. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(1), 2–24. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2017-0049>
- [6] Mogale, D. G., Ghadge, A., & Jena, S. K. (2025). Modelling and optimising a multi-depot vehicle routing problem for freight distribution in a retail logistics network. *Computers & Industrial Engineering*, 207, 111315. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111315>
- [7] Febry, T., & Widya Mandala, Y. (2015). Total Cost of Distribution Model Considering 4-echelon, Transportation Modes and Loading unloading Charges. In *Proceeding Seminar Nasional PPS-MTI UNPAR 2015*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2746.7605>
- [8] Saraswati, R., Sutopo, W., & Hisjam, M. (2017). Penyelesaian Capacitated Vehicle Routing Problem dengan Menggunakan Algoritma Sweep untuk Penentuan Rute Distribusi Koran: Studi Kasus. *Jurnal Manajemen Pemasaran*, 11(2), 41–44. <https://doi.org/10.9744/pemasaran.11.2.41-44>
- [9] Hashi, E. K., Hasan, M. R., & Zaman, M. S. (2015). A heuristic solution of the Vehicle Routing Problem to optimize the office bus routing and scheduling using Clarke & Wright's savings algorithm. *2015 International Conference on Computer and Information Engineering (ICCIE)*, 13–16. <https://doi.org/10.1109/CCIE.2015.7399306>
- [10] Talbi, E. (2009). *Metaheuristics*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470496916>
- [11] Hiller, F., & Lieberman, G. (2005). *Introduction to Operation Research (8th Edition)*. McGraw Hill.
- [12] Masudin, I. (2019). Location-Allocation Problems in the Perspective of Supply Chain: Approaches and Applications. *Jurnal Teknik Industri*, 20(1), 1–11. <https://doi.org/10.22219/jtiumm.vol20.no1.1-11>
- [13] Alkhwaldah, R. A., ALShalabi, F. S., Alshawabkeh, Z. A., Alsha'ar, H. Y., Alzoubi, M. Y., Alshawabkeh, R. O., & Dweiri, M. A. (2023). The mediating role of organizational capabilities on the relationship between lean supply chain and operational performance. *Uncertain Supply Chain Management*, 11(1), 11–20. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2022.12.005>
- [14] Garcia-Buendia, N., Moyano-Fuentes, J., Maqueira, J. M., & Avella, L. (2023). The lean supply chain management response to technology uncertainty: consequences for operational performance and competitiveness. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 34(1), 67–86. <https://doi.org/10.1108/JMTM-07-2022-0250>
- [15] Laporte, G. (2009). Fifty Years of Vehicle Routing. *Transportation Science*, 43(4), 408–416. <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0301>
- [16] Trivedi, S. K., Roy, A. D., Kumar, P., Jena, D., & Sinha, A. (2024). Prediction of consumers refill frequency of LPG: A study using explainable machine learning. *Heliyon*, 10(1), e23466. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23466>
- [17] Mavi, R. K., Mavi, N. K., Shekarabi, S. A. H., Pepper's, M., & Arisian, S. (2023). Supply Chain Resilience: A Common Weights Efficiency Analysis with Non-discretionary and Non-controllable Inputs. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 24(S1), 77–99. <https://doi.org/10.1007/s40171-024-00380-5>
- [18] Tian, M., Zhong, S., Al Ghassani, M. A., Johanning, L., & Sucala, V. I. (2024). Simulation and feasibility assessment of a green hydrogen supply chain: a case study in Oman. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(22), 13313–13328. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32563-z>
- [19] Akbar, M. D., Rahman, A., & Mada Tantrika, C. F. (2013). Optimalisasi Aliran Distribusi dan Alokasi Material dengan Metode Linear Programming (Studi Kasus: PT. PLN (PERSERO) APJ Distribusi Malang). *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Sistem Industri*, 1(2), 127990.
- [20] Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2015). *Introduction to Evolutionary Computing*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44874-8>