

Perancangan Pemilihan Lokasi Gudang Pendukung Dalam Pengelolaan Material Pemeliharaan Pembangkit Listrik Tersebar Berdasarkan *Analytic Hierarchy Process* Dan *Goal Programming* (Studi Kasus : PT. PLN Nusantara Power Up Pandan)

Erwan Aprianto¹, Udisubakti Ciptomulyono²

^{1,2} Jurusan Teknik Sistem dan Industri, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem (FTIRS), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Kampus ITS Sukolilo, Kota Surabaya, Jawa Timur 60111

Email: erwanaprianto11@gmail.com, Udisubakti@ie.its.ac.id

¹ PT. PLN Nusantara Power UP Pandan

Jl.Prof. M. Hajairin Sibuluan Terpadu, KabupatenTapanuli Tengah, Sumatera Utara 22614

ABSTRAK

PT PLN Nusantara Power's Pandan Generation Unit (UP Pandan) manages various Hydropower Plants (PLTA) and Mini-Hydropower Plants (PLTMH) distributed across ten regencies in North Sumatra Province. Ensuring the availability of spare parts for maintenance activities is crucial for maintaining the continuity of the electrical system. However, the dispersed nature of these power plants presents challenges regarding distribution distances, travel risks, transit times, and logistics costs. These complexities are compounded by a storage structure split between a central warehouse and stock points at individual generation units. Establishing a sub-warehouse offers a potential solution to minimize distance, time, risk, and cost through strategic location selection. This study aims to determine the optimal sub-warehouse location by evaluating criteria such as distance, travel time, transportation costs, and risk, utilizing the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Goal Programming (GP) methods. AHP results indicate that risk is the highest-priority criterion (0.67427 or 67.43%), followed by distance from the central warehouse (0.12602 or 12.60%), transportation costs (0.12099 or 12.10%), and travel time (0.07871 or 7.87%). These weights were subsequently integrated into a GP model to evaluate three potential locations. The optimization results identified the Renun Hydropower Plant (X_2) as the best location for the sub-warehouse. Sensitivity analysis, involving a $\pm 20\%$ variation in risk weights, confirmed that the results remained consistent and feasible. Consequently, the Renun Hydropower Plant can effectively support the central warehouse in distributing spare parts to the dispersed power plants, thereby enhancing the reliability of maintenance and operational services across all managed generation units.

Kata kunci: Pengambilan Keputusan Multi Kriteria, Pembangkit Listrik Tenaga Air, *Analytic Hierarchy Process*, *Goal Programming*, *Sensitivity Analysis*, Gudang

ABSTRACT

PT PLN Nusantara Power's Pandan Generation Unit (UP Pandan) manages various Hydropower Plants (PLTA) and Mini-Hydropower Plants (PLTMH) distributed across ten regencies in North Sumatra Province. Ensuring the availability of spare parts for maintenance activities is crucial for maintaining the continuity of the electrical system. However, the dispersed nature of these power plants presents challenges regarding distribution distances, travel risks, transit times, and logistics costs. These complexities are compounded by a storage structure split between a central warehouse and stock points at individual generation units. Establishing a sub-warehouse offers a potential solution to minimize distance, time, risk, and cost through strategic location selection. This study aims to determine the optimal sub-warehouse location by evaluating criteria such as distance, travel time, transportation costs, and risk, using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Goal Programming (GP) methods. AHP results indicate that risk is the highest-priority criterion (0.67427 or 67.43%), followed by distance from the central warehouse (0.12602 or 12.60%), transportation costs (0.12099 or 12.10%), and travel time (0.07871 or 7.87%). These weights were subsequently integrated into a GP model to evaluate three potential locations. The optimization results identified the Renun Hydropower Plant (X_2) as the best location for the sub-warehouse. Sensitivity analysis, involving a $\pm 20\%$ variation in risk weights, confirmed that the results remained consistent and feasible. Consequently, the Renun Hydropower Plant can effectively support the central warehouse in distributing spare parts to the dispersed power plants, thus enhancing the reliability of maintenance and operational services across all managed generation units.

Keywords: Multi Criteria Decision Making, Hydroelectric Power Plant, *Analytic Hierarchy Process*, *Goal Programming*, *Sensitivity Analysis*, Warehouse

Pendahuluan

PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan (UP) Pandan adalah perusahaan listrik negara yang mengelola Pembangkit Listrik Tenaga Air kapasitas daya mikro hingga skala besar yang dikelola tersebar di 10 Kabupaten provinsi Sumatera Utara [1]. Di dalam setiap organisasi, rantai pasok mencakup seluruh fungsi yang terlibat dalam menerima dan memenuhi permintaan [2] dalam Mengembangkan kebijakan manajemen persediaan suku cadang yang efisien dengan mempertimbangkan permintaan stokastik, lateral *transshipment* antar gudang, substitusi *part* yang sama [3]. *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) merupakan teknik pengambilan keputusan yang mengaitkan alternatif keputusan dengan hasil kualitatif dan kuantitatif dalam suatu solusi yang terintegrasi yang dapat digunakan untuk berbagai permasalahan yang dihadapi dalam industri guna memperoleh alternatif keputusan yang optimal [4] diantaranya *Analytic Hierarchy Process* (AHP), *Analytic Network Process* (ANP), *Elimination Et Choix Traduisant la REalité* (ELECTRE), *Goal Programming* (GP), *Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT), *Multi-Attribute Value Theory* (MAVT), *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE), *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), dan *Weighted Sum Model* (WSM).

Dalam penelitian jurnal [5] mengutip [6] bahwa teori lokasi awalnya diperkenalkan oleh Weber untuk menempatkan satu gudang sedemikian rupa sehingga meminimalkan jarak keseluruhan antara pelanggan dan gudang agar memperpendek waktu respons dimungkinkan dengan memilih lokasi fasilitas atau gudang yang tepat. Masalah pemilihan lokasi fasilitas atau gudang bertujuan untuk menentukan lokasi terbaik dan jumlah fasilitas optimal. Jika pilihan yang tepat dilakukan, perusahaan dapat memperoleh keuntungan besar dan pangsa pasar yang signifikan di kondisi saat ini.

Pada Penelitian [7] menggunakan pengambilan keputusan menggunakan model *Integer Linear Programming* (ILP) berbasis Fuzzy *Analytic Hierarchy Process* (AHP) merepresentasikan kemampuan setiap alternatif dalam memaksimalkan tingkat kepuasan pengirim dan pelanggan yang diformulasikan untuk memilih alternatif terbaik dengan biaya logistik serendah mungkin, akan tetapi hasil penelitian dan kompleksitas jaringan layanan *transshipment* yang mempengaruhi validitas hasil penelitian. Dalam penelitian yang lain oleh [5], menentukan gudang terbaik menggunakan *Analytic Hierarchy Process* (AHP) serta ditentukan dengan *Goal Programming* dengan variabel bobot kriteria jarak, faktor risiko, waktu tempuh, biaya transportasi, dan biaya pemasangan, namun belum mempertimbangkan solusi dengan ukuran atau kebutuhan gudang pendukung, dirangkai dalam penelitian [8], memaparkan analisis komparatif terhadap berbagai model optimasi alokasi ruang gudang hingga saat ini masih menghadapi berbagai tantangan. Tantangan tersebut disebabkan oleh besarnya jumlah informasi yang harus diproses, banyaknya alternatif keputusan yang mungkin dipilih, serta tingginya tingkat integrasi keputusan yang diperlukan dalam konteks pergudangan modern.

Penelitian [9] [10] merancang jaringan logistik yang andal berdasarkan masalah penempatan gudang pendukung yang penting terhadap gangguan dan berfungsi secara efisien saat terjadi gangguan. Pada penelitian oleh [11], untuk memilih lokasi gudang transit di negara Turki yang paling sesuai mempertimbangkan kriteria yang penting melalui pendekatan Intuitionistic Fuzzy *Multi-Criteria Decision Making* (IF-MCDM). Dalam penelitian lain [12] [13] pada perencanaan transportasi, pengambilan keputusan multikriteria secara spesifik, merupakan salah satu isu terpenting Metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) digunakan dalam proses evaluasi proyek, sedangkan model *Goal Programming* (GP) digunakan dalam proses seleksi yang menghasilkan keputusan pemilihan optimal proyek berdasarkan alokasi anggaran di bawah constraint multi-kriteria.

Penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode MCDM dapat digunakan untuk menentukan kepentingan relatif antarkriteria, sedangkan model optimasi dapat digunakan untuk memilih alternatif berdasarkan sejumlah batasan. Namun, sebagian besar penelitian dilakukan dalam konteks industri pertahanan, jaringan komersial, logistik bencana, atau pemilihan proyek. Penerapan model tersebut pada distribusi material pemeliharaan pembangkit listrik tenaga air yang tersebar secara geografis masih terbatas. Selain perbedaan konteks penelitian, metode AHP yang digunakan secara mandiri hanya menghasilkan bobot prioritas dan belum secara eksplisit mengevaluasi pencapaian target operasional. Sebaliknya, *Goal Programming* (GP) dapat mengakomodasi beberapa target, tetapi membutuhkan bobot preferensi yang dapat dipertanggungjawabkan. Penelitian terdahulu yang mengintegrasikan AHP dan *Goal Programming* juga belum secara khusus menghubungkan preferensi pengambil keputusan dengan target biaya, risiko, jarak, dan waktu distribusi material pemeliharaan pada jaringan pembangkit listrik tersebar. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan penelitian dalam penyusunan model pemilihan gudang pendukung yang sesuai dengan karakteristik operasional pembangkit listrik tenaga air.

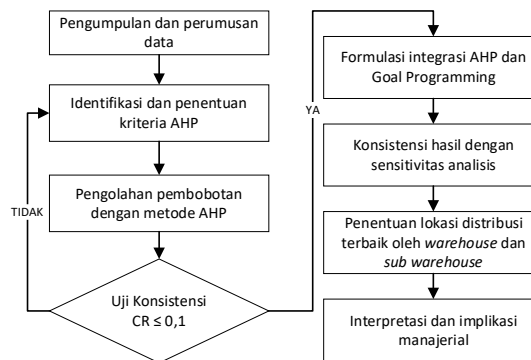
Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengintegrasikan AHP dan *Goal Programming* untuk memilih lokasi gudang pendukung (*sub-warehouse*) pada PT PLN Nusantara Power UP Pandan. AHP digunakan untuk memperoleh bobot kriteria berdasarkan penilaian responden, sedangkan *Goal Programming* digunakan untuk memilih satu lokasi dari tiga alternatif dengan meminimalkan deviasi terhadap target operasional. Ketahanan solusi selanjutnya diuji melalui analisis sensitivitas terhadap perubahan target faktor risiko. Kontribusi penelitian ini adalah menghasilkan model keputusan yang menggabungkan preferensi pemangku kepentingan dan batasan operasional dalam pemilihan gudang pendukung, terutama dalam mengurangi risiko keterlambatan

pengiriman material, meningkatkan ketersediaan spare part, serta mendukung keandalan operasi PLTA dan PLTMH yang tersebar.

Metode Penelitian

Tinjauan Pustaka

Tahap tinjauan pustaka dilakukan untuk memberikan rekomendasi lokasi optimal dalam pemilihan gudang pendukung (*sub-warehouse*) dalam pengelolaan material pemeliharaan pembangkit listrik dengan flowchart penelitian dijelaskan dalam gambar 1 berikut.



Gambar 1. flowchart penelitian

Pengumpulan dan Perumusan Data

Dalam penelitian ini, beberapa langkah penelitian yang dilakukan untuk mendapatkan hasil yang diharapkan untuk memenuhi tujuan penelitian berisi lokasi PLTA Tersebar dengan mengidentifikasi kriteria dan data awal. Berdasarkan hasil diskusi dengan pemangku kepentingan dan *expertise judgement* dalam menentukan kriteria, didapatkan bahwa target biaya, risiko, jarak, dan waktu distribusi material menjadi fokus untuk kriteria pemilihan sub-warehouse salah satunya mempertimbangkan kejadian bencana alam yang terjadi pada beberapa area Pembangkit di Tahun 2025.

Pengolahan Data AHP

Metode simulasi *Analytic Hierarchy Process* telah banyak digunakan dalam berbagai studi dan penelitian. [5] [14] [15] melakukan perhitungan untuk menentukan variabel keputusan bersifat biner dalam mendapatkan bobot preferensi terhadap kebutuhan perhitungan multikriteria pemilihan suatu wilayah. Aplikasi lain dalam konteks yang sama, dan [7] [8] [16] [17] menggunakan AHP untuk menentukan variabel keputusan logistik material dalam mengatasi ketidakpastian dan memilih desain jaringan distribusi terbaik berdasarkan metrik kinerja dan karakteristik produk, guna mengoptimalkan biaya dan kualitas layanan dalam rantai pasok. Bobot setiap kriteria dan sub-kriteria diperoleh melalui matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*), dihitung menggunakan *eigenvalue method* atau *geometric mean* dengan urutan sebagai berikut penentuan kriteria, perbandingan kriteria, normalisasi matriks perbandingan, pembobotan kriteria dan perhitungan konsistensi.

Pengolahan Data GP

Goal Programming (GP) pertama kali diperkenalkan pada tahun 1955 oleh Charnes, Cooper, dan Ferguson dalam penelitian tentang analisis gaji eksekutif, dan *Goal Programming* (GP) didefinisikan secara jelas dalam studi Charnes dan Cooper. GP dapat dianggap sebagai cabang dari optimisasi multi-obyektif, yang merupakan bagian dari multicriteria decision analysis (MCDA)[5]. GP digunakan untuk mengoptimalkan tujuan multi-obyektif dengan meminimalkan deviasi dari tujuan yang diinginkan untuk masing-masing sasaran. Meskipun model *Goal Programming* (GP) sudah ada sejak 1950-an, penggunaannya aktif mulai pertengahan 1970-an. Beberapa penelitian yang menggunakan *Goal Programming* (GP) antara lain: [18] untuk pemilihan pemasok dengan tujuan meminimalkan deviasi dari harga, kualitas, dan waktu tunggu; untuk pemilihan proyek; [19] menggunakan *Analytical Network Process* (ANP) dan *Goal Programming* (GP) untuk mempertimbangkan interdependensi proyek dalam seleksi sistem informasi; [20] menggunakan *weighted Goal Programming* (GP) untuk menyelesaikan masalah perutean layanan kesehatan di rumah. Secara matematis, pendekatan *Goal Programming* (GP) dapat dinyatakan sebagai fungsi obyektif yang meminimalkan penyimpangan positif (*overachievement*) dan negatif (*underachievement*) dari target yang ditetapkan, di bawah seperangkat kendala sistem yang merepresentasikan hubungan antar variabel keputusan [21], Menurut penelitian [22], *Multi objective optimisation* dengan *Goal Programming* dan *Sensitivity analysis* untuk menilai dampak parameter/kriteria interval pengiriman & *delay penalty* terhadap biaya & pemilihan rute logistik. Untuk menghitung *Goal*

Programming dengan Analisa Sensitivitas, menurut Ignizio dalam [23] dapat dijelaskan dalam bentuk terbuka sesuai dengan keluaran AHP diantaranya Perumusan variabel keputusan, perumusan tujuan dan sasaran, penentuan tujuan mutlak, penentuan tingkat prioritas, penentuan fungsi pencapaian.

Hasil evaluasi pemilihan lokasi *sub-warehouse* dengan mempertimbangkan objectif, faktor-faktor yang dipertimbangkan, akan mendukung distribusi material di berbagai lokasi geografis PLTA dan PLTMH tersebar. Dengan memilih lokasi terbaik dari alternatif yang tersedia. Bobot kriteria yang diperoleh dari *Analytic Hierarchy Process* (AHP) diintegrasikan ke dalam *Goal Programming* (GP) untuk menentukan lokasi gudang yang optimal, dalam model persamaan 1 sebagaimana berikut:

$$\text{Min } Z = w_1 d_1^+ + w_2 d_2^+ + w_3 d_3^+ + w_4 d_4^+ \quad (1)$$

Parameter:

- w_1 : Bobot kriteria AHP kriteria biaya transportasi
- w_2 : Bobot kriteria AHP kriteria faktor risiko
- w_3 : Bobot kriteria AHP kriteria jarak *central warehouse*
- w_4 : Bobot kriteria AHP kriteria waktu tempuh
- d_1^+ : Deviasi positif jarak biaya transportasi
- d_2^+ : Deviasi positif faktor risiko
- d_3^+ : Deviasi positif jarak *central warehouse*
- d_4^+ : Deviasi positif waktu tempuh
- α_n : Parameter/koeffisien biaya transportasi
- b_n : Parameter/koeffisien faktor risiko
- c_n : Parameter/koeffisien kriteria jarak
- e_n : Parameter/koeffisien waktu tempuh

Dalam permodelan *Goal Programming*, masing masing nilai kriteria akan dibagi dengan sasaran yang ingin dicapai (*goal*), sehingga satuannya dapat dijumlahkan pada semua nilai kriteria melalui variabel keputusan berikut sebagaimana Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3 mengenai fungsi tujuan, obyektif dan nilai batasan.

Tabel 1. Fungsi tujuan, obyektif dan batasan GP

No	Kriteria	Fungsi Tujuan	Fungsi Obyektif	Nilai Batasan
1	Biaya transportasi	Meminimalkan biaya transportasi	d_1^+	Rp. 450000
2	Faktor risiko	Meminimalkan faktor risiko	d_2^+	0,8
3	Jarak <i>central warehouse</i>	Meminimalkan jarak	d_3^+	250 km
4	Waktu tempuh	Meminimalkan waktu tempuh	d_4^+	6 Jam

Tabel 2. Kriteria dan fungsi tujuan GP

No	Kriteria	Fungsi Tujuan	
1	Biaya transportasi	$a_1\chi_1 + a_2\chi_2 + a_3\chi_3 + d_1^- - d_1^+ = F$	(2)
2	Faktor risiko	$b_1\chi_1 + b_2\chi_2 + b_3\chi_3 + d_2^- - d_2^+ = R$	(3)
3	Jarak <i>central warehouse</i>	$c_1\chi_1 + c_2\chi_2 + c_3\chi_3 + d_3^- - d_3^+ = L$	(4)
4	Waktu tempuh	$e_1\chi_1 + e_2\chi_2 + e_3\chi_3 + d_4^- - d_4^+ = T$	(5)

Tabel 3. Fungsi batasan GP

No	Fungsi Batasan	Batasan
1	Batasan tidak memilih <i>sub-warehouse</i> berulang	$\chi_i = 0 \text{ atau } 1 \text{ Untuk } i = 1, 2, \dots, n$
2	Batasan minimal dipilih 1 <i>sub-warehouse</i>	$X_1 + X_2 + X_3 = 1$
3	Batasan lainnya	$X_i \in \{0,1\}$

Tahap Analisa Sensitivitas

Analisa sensitivitas dalam integrasi metode AHP-GP untuk menentukan solusi optimal untuk pemilihan lokasi *sub-warehouse* yang dioptimalkan ke PLTA atau PLTMH yang tersebar. Pada AHP, prioritas overall dari kriteria sangat berpengaruh dalam mendapatkan bobot kriteria. Pada *Goal Programming*, analisa sensitivitas dilakukan dengan mengubah nilai (*right hand side*) untuk mengetahui konsistensi terukur dari pemilihan *sub-warehouse* yang optimal terhadap faktor yang telah ditetapkan

Hasil Dan Pembahasan

Pengumpulan Data

Alternatif lokasi *sub-warehouse* yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari tiga lokasi pembangkit yang dinilai memiliki potensi sebagai pusat distribusi material pemeliharaan seperti yang terdapat dalam tabel 4 sebagai dasar alternatif pada pemilihan *sub-warehouse* sebagaimana berikut.

Tabel 4. Unit Pembangkit Listrik tersebar

No	Unit Pembangkit	Kode	Lokasi	Keterangan
1	PLTA Asahan 3	X_1	Kab. Asahan	Memiliki ruang gudang
2	PLTA Renun	X_2	Kab. Dairi	Memiliki ruang gudang
3	PLTA Sipansihaporas	X_3	Kab. Tapanuli Tengah	Memiliki ruang gudang

Pengolahan Data

a. Pengolahan Data Metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

Berdasarkan hasil pengisian matriks perbandingan berpasangan, diperoleh hasil nilai rata-rata (*geometric mean*) yang digunakan sebagai dasar dalam penyusunan matriks perbandingan akhir pada metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Nilai rata-rata tersebut dalam Tabel 5 merepresentasikan tingkat kepentingan relatif antar kriteria berdasarkan persepsi dan pengalaman para responden terhadap kondisi operasional distribusi material pada pembangkit listrik tersebar.

Tabel 5. Matriks perbandingan berpasangan rata-rata dari 5 responden

KRITERIA	NILAI	KRITERIA
Biaya transportasi (C1)	0,2	Faktor risiko (C2)
Biaya transportasi (C1)	1	Jarak dari <i>central warehouse</i> (C3)
Biaya transportasi (C1)	1,4	Waktu tempuh (C4)
Faktor risiko (C2)	7,3	Jarak dari <i>central warehouse</i> (C3)
Faktor risiko (C2)	6,9	Waktu tempuh (C4)
Jarak dari <i>central warehouse</i> (C3)	2,2	Waktu tempuh (C4)

Pembobotan kriteria diatas, selanjutnya dihitung *Consistency Ratio* dengan parameter harus dibawah 10% (0,1) untuk menunjukkan bahwa "*value judgement*" dapat diterima konsistensinya dengan hasil akhir di tabel 6 berikut.

Tabel 6. Perhitungan konsistensi AHP

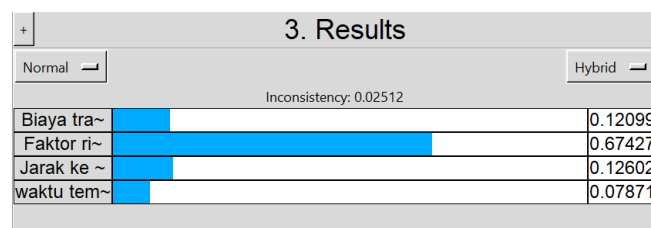
	λ_{max}	CI	RI	CR
Hasil	4,0668	0,0223	0,9	0,025

Hasil perhitungan akhir dalam *Consistency Ratio* dalam tabel 6 menunjukkan hasil 0,025 dimana nilai tersebut kurang dari (<) 0,1 sehingga perbandingan responden dinyatakan valid dan konsisten yang selanjutnya nilai bobot kriteria diintegrasikan dalam model *Goal Programming*. Hasil bobot kriteria tersebut dalam tabel 7 sebagaimana berikut:

Tabel 7. Perhitungan konsistensi bobot kriteria dan *Consistency Ratio* AHP

Kriteria	Kode	Bobot kriteria (W)	<i>Consistency Ratio</i> (CR)
Biaya transportasi	C1	0,123	0,025
Faktor risiko	C2	0,673	
Jarak <i>central warehouse</i>	C3	0,125	
Waktu tempuh	C4	0,079	

Dalam melakukan perhitungan konsistensi AHP menggunakan *excel*, juga dilakukan kalkulasi menggunakan *software Super Decisions* dapat dilihat pada Gambar 1 dengan mengacu pada hasil pada tabel 7, yang memberikan hasil yang sama dengan solusi menggunakan *excel*. Nilai bobot yang tinggi menunjukkan bahwa kriteria tersebut sebagai berikut:



Gambar 2. Nilai rangking bobot kriteria dalam Super Decisions

Pada kesimpulan pengolahan AHP pada gambar 2 diatas, perhitungan menggunakan rumus dan *software* memiliki nilai yang sama, yaitu nilai *Consistency Ratio* sebesar 0,025 dimana nilai tersebut dibawah 10% atau 0,1 sehingga hasil tersebut bersifat konsisten dan bobot tertinggi terdapat pada kriteria faktor risiko sebesar 67,427% yang *inline* dengan latar belakang bencana yang pernah terjadi.

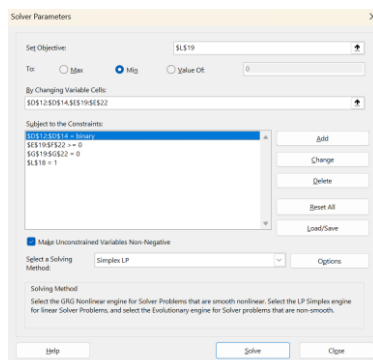
b. Pengolahan Data Metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

Dari pembobotan AHP untuk kriteria, tahap selanjutnya digunakan untuk melakukan modelling ke dalam *Goal Programming* untuk mendapatkan optimasi obyektif. Dari semua fungsi tujuan diatas, jika disimpulkan sebagaimana dalam tabel 8 menjelaskan parameter dari nilai kriteria dan fungsi tujuan dalam pemilihan *sub-warehouse*.

Tabel 8. Pengolahan Data berdasarkan Kriteria dan fungsi tujuan

No	Kriteria	Fungsi Tujuan
1	Biaya Transportasi	$344500x_1 + 386900x_2 + 14487x_3 + d_1^- - d_1^+ = 450000$
2	Faktor Risiko	$0,88x_1 + 0,53x_2 + 0,53x_3 + d_2^- - d_2^+ = 0,8$
3	Jarak	$192x_1 + 219x_2 + 8,2x_3 + d_3^- - d_3^+ = 250$
4	Waktu Tempuh	$4,875x_1 + 5,475x_2 + 0,205x_3 + d_4^- - d_4^+ = 6$

Pada tahap berikutnya, hasil kombinasi fungsi tujuan, target yang ingin dicapai dalam *Goal Programming* pemilihan *sub-warehouse*, maka hasil interpretasi *binary* dilakukan permodelan dari *excel solver* dengan parameter yang dimasukkan sesuai dengan batasan pada gambar 3 dengan hasil pengolahan data tabel 9 didapatkan PLTA Renun memperoleh hasil generate *excel* dari 4 kriteria yang sudah ditentukan.

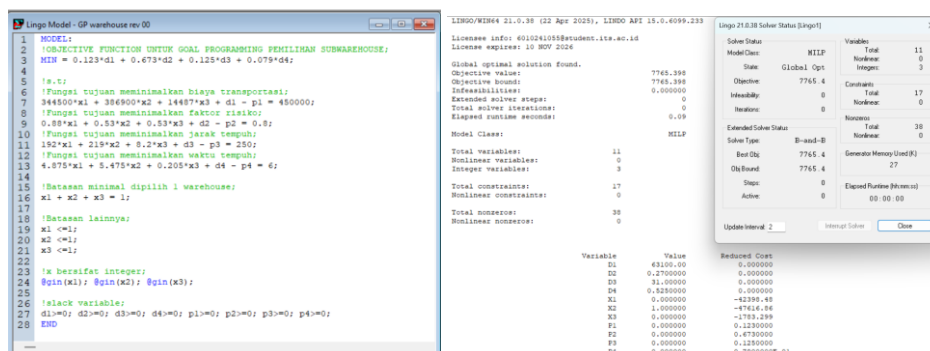


Gambar 3. Solver parameter dalam perhitungan variabel *binary*

Tabel 9. Pemilihan *sub-warehouse* dengan perhitungan variabel *binary*

No	Kode	X_i (Binary)	Biaya	Risiko	Jarak	Waktu	Selected Biaya	Selected Risiko	Selected Jarak	Selected Waktu
1	X_1	0	344500	0,88	195	4,875	0	0	0	0
2	X_2	1	386900	0,53	219	5,475	386900	0,53	219	5,475
3	X_3	0	14487	0,53	8,20	0,205	0	0	0	0

Dalam permodelan GP selain menggunakan *excel solver*, dilakukan validasi tambahan menggunakan *software* LINGO (*Linear, Integer, Nonlinear, and Global Optimization*) dimana terdiri dari fungsi obyektif, fungsi tujuan, dan batasan dan hasil penyelesaian ditampilkan pada Gambar 4 dan hasil pengolahan pada variabel keputusan ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Permodelan *Goal Programming* (GP) menggunakan *software* LINGO

Hasil penyelesaian *Analytic Hierarchy Process* (AHP) diintegrasikan ke dalam *Goal Programming* (GP) dari perhitungan *excel solver* dan *software LINGO* menunjukkan hasil yang sama seperti tabel 9. Hasil optimasi menunjukkan bahwa PLTA Renun yang berlokasi di Kabupaten Dairi memperoleh nilai variabel keputusan sebesar 1, sehingga ditetapkan sebagai *Sub-warehouse* terpilih. Sementara itu, PLTA Asahan 3 yang berlokasi di Kabupaten Toba dan PLTA Sipansihaporas yang berlokasi di Kabupaten Tapanuli Tengah, masing-masing memperoleh nilai variabel keputusan sebesar 0, sehingga kedua alternatif tersebut tidak dipilih. Setelah diperoleh hasil optimasi yang menunjukkan bahwa PLTA Renun terpilih sebagai *Sub-warehouse* dengan nilai variabel keputusan $X_2 = 1$, langkah berikutnya adalah mengevaluasi tingkat pencapaian setiap fungsi tujuan yang telah ditetapkan pada model *Goal Programming*. Evaluasi tersebut bertujuan untuk mengetahui apakah alternatif yang terpilih telah memenuhi target pada masing-masing kriteria, yaitu biaya transportasi, faktor risiko, jarak dari *central warehouse*, dan waktu tempuh. Hasil evaluasi fungsi tujuan disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Pencapaian fungsi tujuan GP

Kode	Kriteria	Target/ Goal	Aktual Terpilih	Selisih dibawah target (d-)	Selisih diatas target (d+)	Pencapaian Goal
C1	Biaya Transportasi	450000	344500(0)+ 415166,67(1)+ 14486,67(0)= 415166,67	34833,33	0	Tercapai
C2	Faktor Risiko	0,88	0,88(0)+ 0,53(1)+ 0,53(0)= 0,53	0,35	0	Tercapai
C3	Jarak <i>Central Warehouse</i>	250	195(0)+ 219(1) + 8,2(0)= 219	31	0	Tercapai
C4	Waktu Tempuh	6	4,875(0)+ 5,875(1)+ 0,205(0)= 5,875	0,125	0	Tercapai

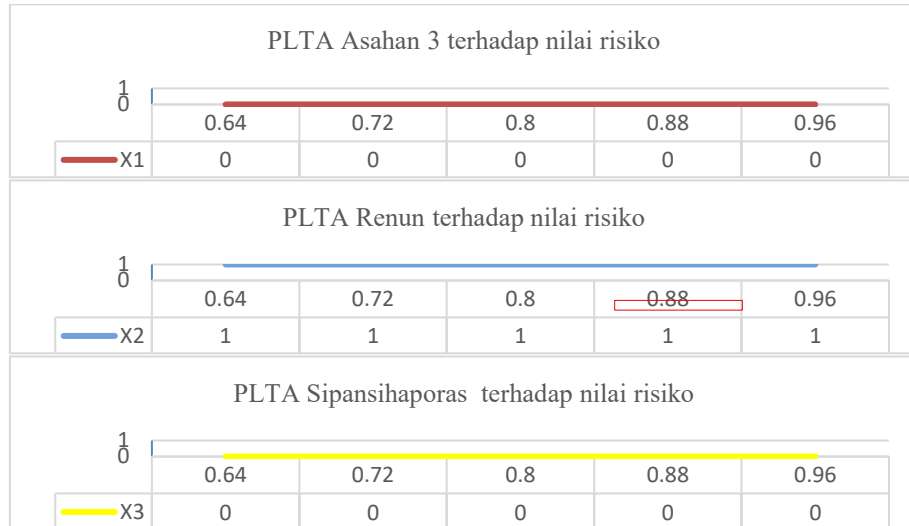
Berdasarkan Tabel 10, seluruh fungsi tujuan berhasil dicapai oleh model *Goal Programming* yang ditunjukkan dengan nilai deviasi positif (d^+) sebesar 0 pada seluruh kriteria. Kondisi ini menunjukkan bahwa nilai aktual hasil optimasi tidak melebihi target yang telah ditetapkan sehingga seluruh sasaran yang diinginkan dapat dipenuhi. Pada kriteria biaya transportasi (C1), target yang ditetapkan sebesar Rp450,000 sedangkan hasil optimasi menghasilkan biaya distribusi sebesar Rp415,166.67. Dengan demikian terdapat deviasi negatif (d^-) sebesar Rp34,833.33 yang menunjukkan bahwa biaya distribusi berada di bawah target maksimum yang ditetapkan. Nilai deviasi positif sebesar nol mengindikasikan bahwa tidak terjadi pelampauan terhadap target biaya. Pada kriteria faktor risiko (C2), target maksimum ditetapkan sebesar 0.88, sedangkan hasil optimasi menunjukkan nilai risiko sebesar 0.53. Hal ini menghasilkan deviasi negatif sebesar 0.35, sehingga tingkat risiko distribusi masih berada dalam batas yang dapat diterima. Tidak adanya deviasi positif menunjukkan bahwa pemilihan PLTA Renun sebagai *Sub-warehouse* tidak meningkatkan tingkat risiko melebihi target yang telah ditentukan. Selanjutnya, pada kriteria jarak dari *central warehouse* (C3), target maksimum yang digunakan adalah 250 km, sedangkan hasil optimasi menunjukkan jarak distribusi sebesar 219 km. Dengan demikian diperoleh deviasi negatif sebesar 31 km, yang berarti jarak distribusi masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan. Hasil ini menunjukkan bahwa lokasi PLTA Renun masih memenuhi persyaratan jangkauan distribusi yang telah ditentukan dalam model. Adapun pada kriteria waktu tempuh (C4), target maksimum yang ditetapkan adalah 6 jam, sedangkan hasil optimasi menunjukkan waktu tempuh sebesar 5.875 jam. Selisih sebesar 0.125 jam direpresentasikan sebagai deviasi negatif, yang menunjukkan bahwa waktu distribusi masih lebih cepat dibandingkan target yang ditetapkan. Secara keseluruhan, hasil evaluasi pada Tabel 10 menunjukkan bahwa seluruh fungsi tujuan berhasil dipenuhi oleh alternatif *sub-warehouse* yang dipilih. Hal ini dibuktikan dengan tidak adanya deviasi positif pada setiap kriteria, sehingga fungsi obyektif *Goal Programming* yang meminimalkan deviasi positif berhasil mencapai nilai optimum. Dengan demikian, pemilihan PLTA Renun sebagai *sub-warehouse* tidak hanya memenuhi seluruh target operasional yang telah ditetapkan, tetapi juga memberikan solusi yang optimal berdasarkan kombinasi bobot prioritas hasil metode AHP dan kendala yang diterapkan pada model *Goal Programming* berdasarkan kombinasi biaya (C1), faktor risiko (C2), jarak (C3), dan waktu (C4). Hal tersebut juga didukung faktor geografis PLTA Renun lebih mendukung berdasarkan penilaian dan diskusi dengan *expert judgement* dengan mempertimbangkan akses jalan dan jangkauan ke pembangkit listrik tersebar lainnya.

c. Analisa Sensitivitas *Goal Programming*

Pada tahap ini, dilakukan analisis berbeda yang selanjutnya dilakukan analisa sensitivitas lebih lanjut. Pada peringkat bobot pada AHP, diketahui bahwa nilai faktor risiko menjadi peringkat pertama, dilakukan perubahan nilai sebesar -20%, -10%, 0%, 10%, 20% dari batasan (*right hand side*) nilai faktor risiko tersebut. Hasil permodelan ditunjukkan pada Tabel 11, perubahan pada nilai risiko yang tersedia tidak mempengaruhi *sub-warehouse* optimal yang dipilih dan untuk setiap perubahan nilai risiko terdapat slack yang merupakan nilai selisih dari batasan nilai risiko yang ditetapkan.

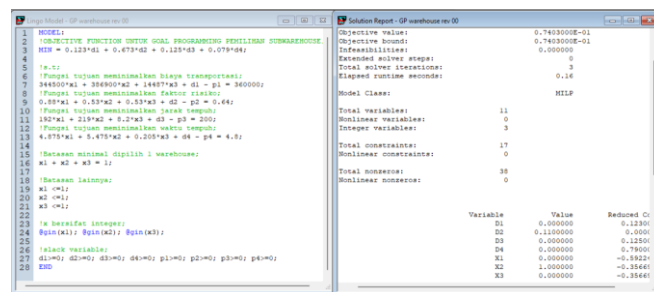
Tabel 11. Variasi dalam nilai faktor risiko

Faktor Risiko		Sub-warehouse dipilih	Nilai risiko	Slack
perubahan	faktor risiko			
-20%	0,64	X ₂	0,53	0,11
-10%	0,72	X ₂	0,53	0,19
0%	0,8	X ₂	0,53	0,27
10%	0,88	X ₂	0,53	0,35
20%	0,96	X ₂	0,53	0,43

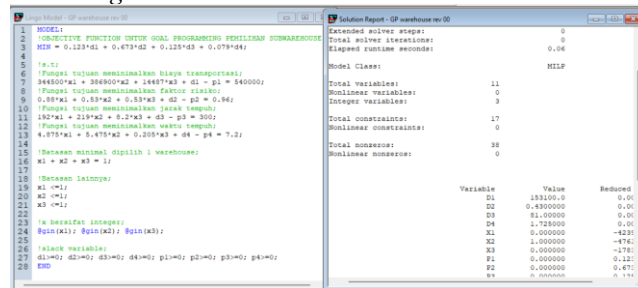


Gambar 5. Optimasi pemilihan *sub-warehouse* dari dampak perubahan faktor risiko

Pada Gambar 5 menunjukkan keputusan pemilihan masing-masing dari 3 PLTA yang akan dijadikan *sub-warehouse* terhadap nilai faktor risiko yang tersedia dengan hasil konsisten terpilih PLTA Renun. Perhitungan dilakukan kembali dengan perubahan nilai sebesar +20% dan -20% dari nilai batasan (*right hand side*) terhadap keseluruhan fungsi tujuan untuk menguji tingkat *robustness* model secara menyeluruh.



Gambar 6. Hasil perubahan *right hand side* sebesar -20% dari nilai Batasan dengan *software* LINGO



Gambar 7. Hasil perubahan *right hand side* sebesar +20% dari nilai batasan *software* LINGO

Hasil perhitungan menggunakan *software* LINGO seperti gambar 6 dan gambar 7 diatas, hasilnya tetap terpilih PLTA Renun dengan nilai variabel keputusan X₂ = 1, sebagai hasil optimal *sub-warehouse* di PLN Nusantara Power UP Pandan dalam mengelola material pemeliharaan dalam pengelolaan pembangkit listrik tenaga air tersebar.

Simpulan

Berdasarkan data pengolahan dan pemodelan dalam penelitian ini diambil kesimpulan hasil pengolahan data menggunakan AHP, diperoleh bahwa faktor risiko merupakan kriteria yang memiliki prioritas tertinggi dalam pemilihan lokasi *Sub-warehouse*, dengan bobot sebesar 0,67427 (67,43%). Selanjutnya, kriteria jarak dari *central warehouse* menempati urutan kedua dengan bobot 0,12602 (12,60%), diikuti oleh biaya transportasi sebesar 0,12099 (12,10%), sedangkan waktu tempuh menjadi kriteria dengan prioritas terendah, yaitu sebesar 0,07871 (7,87%). Berikutnya Integrasi model AHP dan GP untuk pemilihan lokasi optimal menunjukkan bahwa dipilih PLTA Renun (X_2) yang memberikan hasil terbaik untuk dijadikan *sub-warehouse* dari 2 lokasi alternatif lainnya. Berdasarkan hasil integrasi tersebut, dilakukan analisa sensitivitas terhadap perubahan bobot faktor risiko sebesar $\pm 20\%$, namun tetap tidak mengubah hasil pemilihan lokasi *sub-warehouse*, di mana PLTA Renun (X_2) tetap menjadi alternatif yang terpilih pada seluruh skenario pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa model yang dikembangkan memiliki tingkat stabilitas dan robustitas yang baik terhadap perubahan bobot kriteria faktor risiko. Namun, penelitian ini masih menggunakan empat kriteria dan belum mengintegrasikan aspek distribusi dinamis melalui model set covering secara penuh. Penelitian berikutnya dapat mempertimbangkan penambahan kriteria operasional, multi-sub-warehouse, kapasitas penyimpanan, pola permintaan spare part, serta integrasi model jaringan distribusi yang lebih kompleks

Daftar Pustaka

- [1] PT. PLN (PERSERO), *Manual Book Pembangkit & Harian Deklarasi Kesiapan Pembangkit PLN*. 2026.
- [2] Sunil. Chopra and Peter. Meindl, *Supply chain management : strategy, planning, and operation*. Pearson, 2016.
- [3] F. E. Achamrah, F. Riane, and S. Limbourg, "Spare parts inventory routing problem with transshipment and substitutions under stochastic demands," *Appl. Math. Model.*, vol. 101, pp. 309–331, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.apm.2021.08.029.
- [4] G. P. Bhole, "Multi Criteria Decision Making (MCDM) Methods and its applications," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 5, pp. 899–915, May 2018, doi: 10.22214/ijraset.2018.5145.
- [5] M. G. Bayrakçı and Ö. F. Baykoç, "An integrated modelling approach for an optimal location of warehouses in the defence industry organisation," *Operations Research and Decisions*, vol. 33, no. 2, pp. 35–52, 2023, doi: 10.37190/ord230203.
- [6] Z. Drezner and G. O. Wesolowsky, "Network design: selection and design of links and facility location," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 37, no. 3, pp. 241–256, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0965-8564(02)00014-9.
- [7] T. He, W. Ho, C. L. K. Man, and X. Xu, "A fuzzy AHP based integer linear programming model for the multi-criteria transshipment problem," *International Journal of Logistics Management*, vol. 23, no. 1, pp. 159–179, 2012, doi: 10.1108/09574091211226975.
- [8] I. Contreras and E. Fernández, "General network design: A unified view of combined location and network design problems," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 219, no. 3, pp. 680–697, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.ejor.2011.11.009.
- [9] M. Mohammadi, R. Tavakkoli-Moghaddam, A. Siadat, and J. Y. Dantan, "Design of a reliable logistics network with hub disruption under uncertainty," *Appl. Math. Model.*, vol. 40, no. 9–10, pp. 5621–5642, May 2016, doi: 10.1016/j.apm.2016.01.011.
- [10] P. Kailomsom and C. Khompatraporn, "A Multi-Objective Optimization Model for Multi-Facility Decisions of Infectious Waste Transshipment and Disposal," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 6, Mar. 2023, doi: 10.3390/su15064808.
- [11] N. Yesilcayir, G. Ayvazoglu, S. Celik, and I. Peker, "Transit warehouse location selection by IF AHP-TOPSIS integrated methods for disaster logistics: A case study of Turkey," *Research in Transportation Business and Management*, vol. 57, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.rtbm.2024.101232.
- [12] M. Hamurcu, "Transportation planning with analytic hierarchy process and goal programming," 2018.
- [13] I. Putu, A. Putra Wiguna, I. Made, and M. Sudiartha, "Determination of Optimal Warehouse Location at PT. Sumber Alfaria Trijaya Tbk (Bali Branch)." [Online]. Available: www.ajhssr.com
- [14] S. Çıkmak, B. Kantoğlu, and G. Kırbaç, "Evaluation of the effects of blockchain technology characteristics on SCOR model supply chain performance measurement attributes using an integrated fuzzy MCDM methodology," *International Journal of Logistics Research and Applications*, vol. 27, no. 6, pp. 1015–1045, 2024, doi: 10.1080/13675567.2023.2193736.
- [15] R. R. Shrestha *et al.*, "APPLICATION OF AHP AND GIS FOR OPTIMAL SOLAR SITE IDENTIFICATION IN MADHESH PROVINCE, NEPAL," *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, vol. 14, no. 3, 2022, doi: 10.13033/ijahp.v14i3.986.

- [16] D. K. Sharma and R. K. Jana, "A hybrid genetic algorithm model for transshipment management decisions," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 122, no. 2, pp. 703–713, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.ijpe.2009.06.036.
- [17] M. Tavana, A. Shaabani, S. Mansouri Mohammadabadi, and N. Varzgani, "An integrated fuzzy AHP-fuzzy MULTIMOORA model for supply chain risk-benefit assessment and supplier selection," *International Journal of Systems Science: Operations and Logistics*, vol. 8, no. 3, pp. 238–261, 2021, doi: 10.1080/23302674.2020.1737754.
- [18] K. Mukherjee and A. Bera, "Application of goal programming in project selection decision — A case study from the Indian coal mining industry," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 82, no. 1, pp. 18–25, Apr. 1995, doi: 10.1016/0377-2217(94)00197-K.
- [19] N. K. Kwak, C. W. Lee, and J. H. Kim, "An MCDM model for media selection in the dual consumer/industrial market," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 166, no. 1, pp. 255–265, Oct. 2005, doi: 10.1016/J.EJOR.2004.02.016.
- [20] A. Ö. Dengiz, K. D. Atalay, and F. Altıparmak, "A goal programming approach for multi objective, multi-trips and time window routing problem in home health care service," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 36, no. 4, pp. 2167–2181, 2021, doi: 10.17341/gazimmfd.853882.
- [21] C. N. Liao and H. P. Kao, "Supplier selection model using Taguchi loss function, analytical hierarchy process and multi-choice goal programming," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 58, no. 4, pp. 571–577, May 2010, doi: 10.1016/j.cie.2009.12.004.
- [22] N. Dini, S. Yaghoubi, and H. Bahrami, "Route selection of periodic multimodal transport for logistics company: An optimisation approach," *Research in Transportation Business and Management*, vol. 54, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.rtbm.2024.101123.
- [23] U. Ciptomulyono, "Pengambilan Keputusan Multi Kriteria," Surabaya, Aug. 2024.