

# Analisis Strategi Gudang Suku Cadang Transmisi Berbasis AHP–TOPSIS untuk Mendukung Keandalan Sistem (Studi Kasus: PT PLN (Persero))

Andri Setiawan<sup>1</sup> and Erwin Widodo<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Magister Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, Indonesia  
Jl. Raya ITS, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111  
Email: [97andrisetiawan@gmail.com](mailto:97andrisetiawan@gmail.com), [erwin@ie.its.ac.id](mailto:erwin@ie.its.ac.id)

## ABSTRAK

Keandalan sistem transmisi tenaga listrik sangat bergantung pada ketersediaan suku cadang kritis untuk kegiatan pemeliharaan dan pemulihan gangguan. PT PLN (Persero) saat ini mengoperasikan jaringan gudang terdesentralisasi yang menghadapi permasalahan berupa duplikasi persediaan, akumulasi *deadstock*, distribusi stok yang tidak merata, serta risiko kehabisan persediaan (*stockout*). Penelitian ini bertujuan mengevaluasi strategi gudang desentralisasi, sentralisasi, dan *hybrid* menggunakan kerangka *Multi-Criteria Decision-Making* (MCDM) yang mengintegrasikan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dan *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS). Penelitian dilakukan pada PT PLN (Persero) Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Tengah (UIT JBT) dengan menggunakan data operasional gudang dan penilaian pakar. Evaluasi dilakukan berdasarkan enam kriteria, yaitu biaya logistik, tingkat pelayanan, *lead time* distribusi, risiko *stockout*, utilisasi kapasitas gudang, dan fleksibilitas operasional. Hasil menunjukkan bahwa risiko *stockout* (0,305) merupakan kriteria paling berpengaruh, diikuti tingkat pelayanan (0,262) dan *lead time* distribusi (0,186). Strategi gudang *hybrid* memperoleh nilai TOPSIS tertinggi ( $C_i = 0,650$ ), sedangkan analisis sensitivitas menunjukkan konfigurasi 60% Hub–40% *Buffer* sebagai skenario terbaik. Penelitian ini menghasilkan kerangka pengambilan keputusan berorientasi keandalan untuk mendukung pemilihan strategi gudang suku cadang transmisi.

**Kata Kunci:** Strategi Gudang; Suku Cadang Transmisi; AHP–TOPSIS; Risiko *Stockout*; Keandalan Sistem

## ABSTRACT

*The reliability of electrical transmission systems depends on the availability of critical spare parts for maintenance and disturbance recovery activities. PT PLN (Persero) currently operates a decentralized warehouse network that faces inventory duplication, deadstock accumulation, uneven stock distribution, and stockout risk. This study evaluates three warehouse strategies—decentralized, centralized, and hybrid—using an integrated Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) framework based on the Analytical Hierarchy Process (AHP) and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). The research was conducted at PT PLN (Persero) Jawa Bagian Tengah Transmission Unit (UIT JBT) using operational warehouse data and expert judgments. Six evaluation criteria were considered: logistics cost, service level, distribution lead time, stockout risk, warehouse capacity utilization, and operational flexibility. The results indicate that stockout risk (0.305) is the most influential criterion, followed by service level (0.262) and distribution lead time (0.186). The hybrid warehouse strategy achieved the highest TOPSIS score ( $C_i = 0.650$ ), while sensitivity analysis identified the 60% Hub–40% Buffer configuration as the best-performing scenario. This study provides a reliability-oriented decision framework to support transmission spare-parts warehouse strategy selection.*

**Keywords:** Warehouse Strategy; Transmission Spare Parts; AHP–TOPSIS; Stockout Risk; System Reliability

## Pendahuluan

Keandalan sistem transmisi tenaga listrik semakin diakui tidak hanya ditentukan oleh integritas teknis peralatan, tetapi juga oleh kesiapan logistik rantai pasok suku cadang. Pada jaringan utilitas yang terintegrasi secara vertikal, kegagalan tak terencana pada peralatan kritis termasuk transformator daya (Trafo), *Circuit Breaker* (CB), *Disconnecting Switch* (DS), *Current Transformer* (CT), *Potential Transformer* (PT), dan *Lightning Arrester* (LA) dapat menimbulkan gangguan layanan yang bersifat berantai dengan konsekuensi

ekonomi dan sosial yang signifikan [1]. Oleh karena itu, kemampuan memulihkan fungsi sistem sangat bergantung pada ketersediaan, lokasi, dan responsivitas persediaan suku cadang strategis.

PT PLN (Persero) sebagai perusahaan penyedia tenaga listrik milik negara mengelola salah satu jaringan transmisi terbesar di Asia Tenggara. Pada Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Tengah (UIT JBT), suku cadang didistribusikan ke 23 lokasi gudang yang melayani wilayah Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Daerah Istimewa Yogyakarta. Hasil observasi menunjukkan terdapat 1.302 jenis suku cadang yang dikelola, dengan sebagian besar termasuk kategori *slow-moving*. Data historis menunjukkan akumulasi *deadstock* lebih dari delapan tahun serta variasi tingkat utilisasi gudang antara 46,24% hingga 95,79%. Selain itu, jumlah *deadstock* mencapai 75 unit pada tahun 2023. Kondisi ini menyebabkan duplikasi persediaan, fragmentasi *safety stock*, distribusi stok yang tidak merata, serta risiko *stockout* pada peralatan transmisi kritis yang berpotensi memengaruhi indikator keandalan seperti *Transmission Line Outage Duration* (TLOD), *Transmission Line Outage Frequency* (TLOF), *Transformer Outage Duration* (TROD), dan *Transformer Outage Frequency* (TROF).

Logistik suku cadang pada industri infrastruktur kritis memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan pengelolaan persediaan konvensional karena permintaannya relatif jarang terjadi, tidak dapat diprediksi secara pasti, namun memiliki konsekuensi operasional yang tinggi ketika material yang dibutuhkan tidak tersedia pada saat gangguan terjadi. Muckstadt [2] menjelaskan bahwa suku cadang kritis memerlukan kebijakan persediaan yang menempatkan ketersediaan sebagai prioritas utama dibandingkan minimisasi biaya. Silver, Pyke, dan Peterson [3] mengembangkan kerangka dasar penentuan *safety stock* pada kondisi variasi permintaan dan *lead time*, sedangkan Huiskonen [4] menunjukkan pentingnya pengelolaan persediaan pada sistem multi-lokasi. Muckstadt [2] menegaskan bahwa pengelolaan *service parts* memerlukan pendekatan yang berbeda dibandingkan persediaan reguler karena karakteristik permintaan yang sporadis namun memiliki konsekuensi operasional yang tinggi. Namun demikian, penerapan konsep-konsep tersebut pada pengelolaan suku cadang transmisi tenaga listrik masih relatif terbatas.

Pemilihan strategi gudang yang tepat merupakan faktor penting dalam mendukung ketersediaan suku cadang. Sistem desentralisasi menawarkan respons lokal yang cepat, tetapi berpotensi menimbulkan duplikasi persediaan. Sebaliknya, sistem sentralisasi meningkatkan visibilitas persediaan dan mengurangi duplikasi, namun dapat meningkatkan *lead time* distribusi [5], [6]. Konfigurasi gudang *hybrid* muncul sebagai alternatif yang mengombinasikan konsolidasi persediaan terpusat dengan penyimpanan *buffer* lokal untuk menjaga responsivitas operasional [7]. Perkembangan transformasi digital dan visibilitas rantai pasok juga mendorong penerapan strategi gudang yang lebih terintegrasi dan responsif terhadap perubahan kebutuhan operasional [8], [9], [10], [11]. Frazelle [12] menunjukkan bahwa setiap konfigurasi gudang memiliki keunggulan dan kelemahan masing-masing, sehingga pemilihannya harus mempertimbangkan berbagai kriteria secara simultan.

Dalam konteks pengambilan keputusan multi-kriteria, metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) banyak digunakan untuk menentukan bobot kriteria melalui perbandingan berpasangan [13], sedangkan *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) digunakan untuk menentukan peringkat alternatif berdasarkan kedekatannya terhadap solusi ideal [14], [15]. Berbagai penelitian telah membuktikan efektivitas kombinasi AHP–TOPSIS dalam bidang logistik dan manajemen rantai pasok [16], [17].

Meskipun demikian, penelitian terdahulu umumnya berfokus pada pemilihan lokasi gudang, optimasi persediaan, dan efisiensi biaya logistik. Masih sedikit penelitian yang mengintegrasikan tingkat kriticalitas suku cadang, risiko *stockout*, tingkat pelayanan, dan fleksibilitas operasional ke dalam satu kerangka evaluasi strategi gudang yang terpadu, khususnya pada pengelolaan suku cadang transmisi tenaga listrik. Penelitian terkini juga menunjukkan bahwa ketahanan rantai pasok (*supply chain resilience*) dan kemampuan beradaptasi terhadap gangguan semakin menjadi faktor penting dalam pengambilan keputusan logistik pada infrastruktur kritis, [18], [19], [4]. Selain itu, penelitian yang secara sistematis membandingkan konfigurasi gudang desentralisasi, sentralisasi, dan *hybrid* pada lingkungan utilitas kritis juga masih terbatas.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas desain gudang, optimasi persediaan, dan evaluasi rantai pasok menggunakan metode MCDM, sebagian besar penelitian masih berfokus pada efisiensi biaya dan lokasi gudang. Penelitian yang secara simultan mengevaluasi strategi desentralisasi, sentralisasi, dan *hybrid* pada pengelolaan suku cadang transmisi tenaga listrik masih sangat terbatas. Selain itu, belum banyak studi yang mengintegrasikan kriteria keandalan seperti risiko *stockout*, tingkat pelayanan, dan fleksibilitas operasional ke dalam kerangka pengambilan keputusan untuk infrastruktur utilitas kritis.

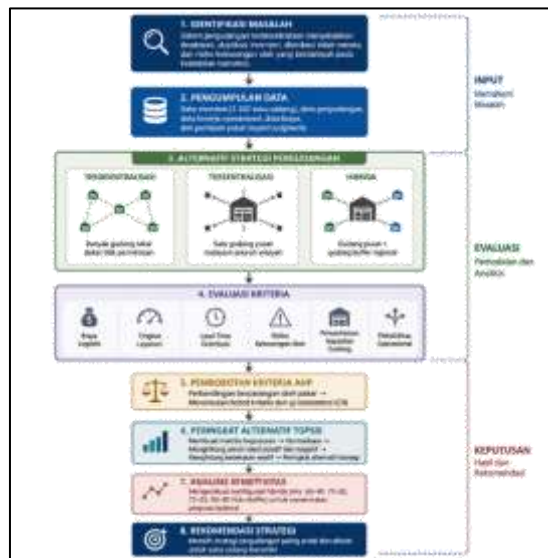
Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan dan menerapkan kerangka AHP–TOPSIS terintegrasi untuk mengevaluasi strategi gudang desentralisasi, sentralisasi, dan *hybrid* pada pengelolaan suku cadang transmisi PT PLN (Persero) UIT JBT serta mengidentifikasi konfigurasi yang paling sesuai berdasarkan pertimbangan keandalan dan efisiensi logistik.

**Tabel 1.** Matriks Tinjauan Literatur Terkait Strategi Gudang dan Metode MCDM

Penulis/ Tahun	Metode	Objek Penelitian	Konfigurasi Gudang	Fokus Keandalan	Gap pada Penelitian
-------------------	--------	---------------------	-----------------------	--------------------	---------------------

Basten & van Houtum (2014) [1]	Tinjauan Literatur	Suku cadang multi-lokasi	Tidak spesifik	Ya (ketersediaan suku cadang)	Belum menggunakan MCDM; belum membahas strategi gudang
Huiskonen (2001) [4]	Analisis Konseptual	Logistik suku cadang pemeliharaan	Tidak spesifik	Ya (ketersediaan material)	Tidak mengevaluasi alternatif konfigurasi gudang
Freitas et al. (2020) [7]	Studi Kasus	Gudang Hybrid	Hub-Buffer-Lokal	Sebagian	Tidak menggunakan pembobotan MCDM; tidak mempertimbangkan risiko <i>stockout</i>
Mohammed et al. (2019) [17]	Hybrid MCDM-FMOO	Optimasi rantai pasok	Berbagai konfigurasi	Sebagian	Tidak berfokus pada suku cadang transmisi dan keandalan sistem
Penelitian Ini (2026)	AHP + TOPSIS	Suku cadang transmisi PLN	Desentralisasi / Sentralisasi / Hybrid	Ya – risiko <i>stockout</i> dominan	Penelitian pertama yang mengintegrasikan MCDM berorientasi keandalan untuk strategi gudang suku cadang transmisi pada infrastruktur utilitas

### Metode Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Kerangka Penelitian Metode AHP–TOPSIS untuk Pemilihan Strategi Gudang

### Desain dan Kerangka Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain penelitian kuantitatif berbasis analisis pengambilan keputusan dengan menggabungkan pengumpulan data empiris dari sistem operasional PLN, penilaian pakar secara terstruktur, serta analisis *Multi-Criteria Decision-Making* (MCDM). Penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang berurutan, yaitu: (1) identifikasi permasalahan sistem melalui analisis *fishbone* pada konfigurasi gudang desentralisasi yang saat ini diterapkan; (2) pemodelan tiga alternatif strategi gudang; (3) estimasi kuantitatif kinerja alternatif berdasarkan enam kriteria evaluasi; (4) pembobotan kriteria menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) berdasarkan perbandingan berpasangan dari para pakar; (5) pemeringkatan alternatif menggunakan *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS); serta (6) analisis sensitivitas terhadap proporsi konfigurasi gudang *hybrid*. Alur lengkap penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

### Hirarki Keputusan dan Kriteria Evaluasi

Struktur pengambilan keputusan dalam penelitian ini disusun dalam bentuk hirarki tiga tingkat yang terdiri atas tujuan, kriteria, dan alternatif. Tujuan penelitian adalah menentukan strategi gudang yang paling sesuai untuk pengelolaan suku cadang transmisi. Tingkat kedua terdiri atas enam kriteria evaluasi, sedangkan tingkat ketiga terdiri atas tiga alternatif strategi gudang. Keenam kriteria tersebut ditetapkan berdasarkan kebutuhan operasional PT PLN (Persero) serta kesesuaiannya dengan kerangka kinerja logistik yang telah diakui dalam literatur [20], [3].

Tabel 2. Definisi, Jenis, dan Dasar Evaluasi Kriteria

No.	Kriteria	Jenis	Satuan	Definisi dan Dasar Evaluasi
-----	----------	-------	--------	-----------------------------

C1	Biaya Logistik	Cost	Rupiah (Total)	Total biaya yang terdiri atas biaya transportasi, penanganan material, dan penyimpanan berdasarkan data operasional PLN.
C2	Tingkat Pelayanan	Benefit	% Pemenuhan	Persentase permintaan material yang dapat dipenuhi terhadap total permintaan. Kriteria ini menunjukkan tingkat ketersediaan material dalam mendukung operasi.
C3	Lead Time Distribusi	Cost	Hari	Rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk mendistribusikan material dari gudang ke lokasi kebutuhan.
C4	Risiko <i>stockout</i>	Cost	Indeks (0–1)	Tingkat risiko ketidakterediaan material pada saat dibutuhkan berdasarkan kondisi persediaan dan kemampuan pemenuhan kebutuhan.
C5	Utilisasi Kapasitas Gudang	Benefit	% Utilisasi	Persentase pemanfaatan kapasitas penyimpanan terhadap total kapasitas gudang yang tersedia.
C6	Fleksibilitas Operasional	Benefit	Indeks (0–1)	Kemampuan sistem pergudangan dalam merespons perubahan kebutuhan material, kondisi darurat, dan redistribusi persediaan.

**Pemilihan Pakar dan Pengumpulan Penilaian AHP**

Sebanyak tujuh pakar dipilih menggunakan teknik *purposive sampling* dari PT PLN (Persero) Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Tengah (UIT JBT). Pemilihan pakar didasarkan pada tiga kriteria, yaitu: (a) memiliki keterlibatan langsung dalam operasional pergudangan atau manajemen logistik; (b) memiliki pengalaman dalam pengambilan keputusan terkait pengelolaan dan distribusi suku cadang; serta (c) memiliki pengalaman kerja minimal lima tahun pada jabatan yang relevan. Rentang pengalaman pakar antara 7 hingga 33 tahun menunjukkan tingkat kompetensi dan pemahaman yang memadai terhadap permasalahan logistik suku cadang transmisi. Oleh karena itu, penilaian yang diberikan dianggap representatif untuk mendukung proses pembobotan kriteria menggunakan metode AHP. Profil lengkap para pakar disajikan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Ringkasan Profil Pakar untuk Perbandingan Berpasangan AHP

Pakar	Jabatan Fungsional	Bidang Keahlian	Pengalaman (Tahun)	Unit / Tingkatan
E1	Senior Manager Logistik	Operasi pergudangan dan pengendalian persediaan	> 20	Unit Induk
E2	Manajer Suku Cadang Transmisi	Perencanaan material dan pengadaan suku cadang kritis	15–20	Unit Pelaksana
E3	Spesialis Pengendalian Persediaan	<i>safety stock</i> dan manajemen risiko <i>stockout</i>	10–15	Unit Induk
E4	Senior Engineer Manajemen Proyek	Kesiapan material dan logistik proyek	> 25	Unit Induk
E5	Manajer Manajemen Risiko	Risiko operasional dan keberlanjutan pasokan	> 20	Unit Induk
E6	Supervisor Operasi Gudang	Distribusi material, penanganan material, dan operasi pergudangan	7–10	Unit Layanan
E7	Analisis Tanggap Darurat	Prosedur material darurat dan respons cepat gangguan	10–15	Unit Pelaksana

Setiap pakar secara independen menyusun matriks perbandingan berpasangan berukuran 6×6 menggunakan skala fundamental sembilan tingkat yang dikembangkan oleh Saaty [13], di mana nilai 1 menunjukkan tingkat kepentingan yang sama dan nilai 9 menunjukkan tingkat kepentingan yang sangat dominan. Penilaian dari seluruh pakar kemudian diagregasikan menggunakan metode *geometric mean* untuk menghasilkan satu matriks perbandingan kelompok (*group comparison matrix*). Nilai perbandingan agregat dihitung menggunakan Persamaan:

$$Geometric\ Mean = \left( \prod_{k=1}^7 a_{ij}^{(k)} \right)^{1/7} \tag{1}$$

Dengan GM menyatakan nilai perbandingan agregat,  $a_{ij}^{(k)}$  merupakan nilai perbandingan yang diberikan oleh pakar ke- $k$ , dan  $n$  merupakan jumlah total pakar yang terlibat.

Matriks agregat yang dihasilkan selanjutnya digunakan untuk menentukan bobot akhir masing-masing kriteria serta mengevaluasi tingkat konsistensi penilaian melalui perhitungan nilai  $\lambda_{max}$ , *Consistency Index* (CI), dan *Consistency Ratio* (CR). Tingkat konsistensi penilaian dievaluasi menggunakan CI dan CR, dengan nilai CR < 0,10 digunakan sebagai batas penerimaan konsistensi. Hasil perhitungan menunjukkan nilai CR kelompok sebesar 0,020, yang mengindikasikan bahwa tingkat konsistensi penilaian para pakar berada dalam kategori dapat diterima dan layak digunakan dalam proses analisis AHP.

**Estimasi Kinerja Kuantitatif**

Nilai kinerja setiap alternatif pada masing-masing kriteria diperoleh berdasarkan data operasional PLN, hasil pengukuran lapangan, dan simulasi skenario. Komponen biaya logistik yang terdiri atas biaya transportasi ( $Rp/km \times jarak \times volume$ ), biaya penanganan material ( $Rp/unit \times volume$ ), dan biaya penyimpanan ( $Rp/unit \times jumlah\ unit\ tersimpan$ ) dihitung untuk setiap konfigurasi strategi gudang menggunakan parameter operasional aktual yang berlaku di lingkungan PLN. *Lead time* distribusi dihitung menggunakan rata-rata tertimbang untuk skenario *hybrid* berdasarkan proporsi pemenuhan kebutuhan material dari gudang *hub* dan gudang *buffer* (60%–40%).

Risiko *stockout* diukur menggunakan indeks komposit ternormalisasi yang disusun berdasarkan frekuensi *stockout* historis dan tingkat ketidakseimbangan persediaan antar gudang. Sementara itu, fleksibilitas operasional dinilai menggunakan indeks komposit berbasis penilaian pakar yang mencakup lima subdimensi, yaitu kecepatan respons terhadap gangguan, kemudahan akses material, kemampuan menghadapi lonjakan permintaan, kemudahan redistribusi stok, dan ketersediaan kapasitas *buffer* untuk kondisi darurat.

#### **Analisis Sensitivitas Proporsi Gudang hybrid**

Untuk menentukan proporsi konfigurasi *hybrid* yang paling sesuai, dilakukan simulasi terhadap empat kombinasi distribusi *hub-buffer*, yaitu 80%–20%, 75%–25%, 70%–30%, dan 60%–40%. Pada setiap konfigurasi dihitung total biaya logistik dan indeks fleksibilitas operasional. Hasil simulasi tersebut digunakan untuk mengidentifikasi konfigurasi dengan keseimbangan terbaik antara efisiensi biaya logistik dan kemampuan respons operasional terhadap kebutuhan material.

#### **Prosedur Perhitungan AHP dan TOPSIS**

Proses perhitungan AHP dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu: (1) penyusunan matriks perbandingan berpasangan kelompok berukuran  $6 \times 6$  menggunakan agregasi *geometric mean*; (2) normalisasi matriks dan perhitungan vektor prioritas; (3) perhitungan nilai eigen maksimum ( $\lambda_{max}$ ); (4) perhitungan *Consistency Index* (CI) dan *Consistency Ratio* (CR); serta (5) penentuan bobot akhir masing-masing kriteria.

Selanjutnya, metode TOPSIS diterapkan melalui tahapan: (1) penyusunan matriks keputusan; (2) normalisasi matriks keputusan; (3) pembentukan matriks ternormalisasi terbobot menggunakan bobot kriteria hasil AHP; (4) penentuan solusi ideal positif (A+) dan solusi ideal negatif (A-); (5) perhitungan jarak Euclidean masing-masing alternatif terhadap solusi ideal; (6) perhitungan nilai kedekatan relatif ( $C_i$ ); serta (7) pemeringkatan alternatif berdasarkan nilai  $C_i$  terbesar hingga terkecil.

Pada penelitian ini, kriteria biaya logistik (C1), *lead time* distribusi (C3), dan risiko *stockout* (C4) diperlakukan sebagai kriteria biaya (cost criteria) yang harus diminimalkan. Sebaliknya, tingkat pelayanan (C2), utilisasi kapasitas gudang (C5), dan fleksibilitas operasional (C6) diperlakukan sebagai kriteria manfaat (benefit criteria) yang harus dimaksimalkan.

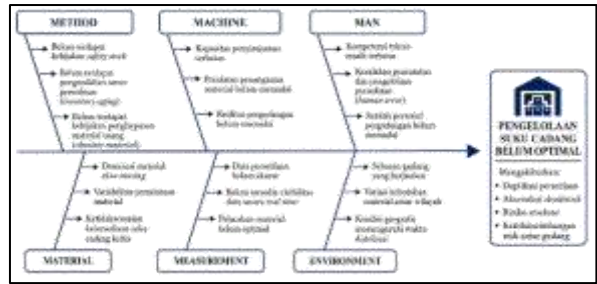
## **Hasil Dan Pembahasan**

### **Diagnosa Sistem Eksisting**

Sistem pergudangan yang saat ini diterapkan di UIT JBT menggunakan konfigurasi desentralisasi yang terdiri atas 23 lokasi gudang yang tersebar pada berbagai Unit Pelaksana Transmisi (UPT) dan mengelola sebanyak 1.302 jenis suku cadang. Hasil observasi lapangan menunjukkan bahwa sebagian besar material termasuk dalam kategori *slow-moving*, dengan beberapa kasus penurunan kondisi fisik material setelah disimpan lebih dari delapan tahun. Data *deadstock* menunjukkan tren yang cukup signifikan, yaitu sebanyak 20 unit pada tahun 2021, meningkat menjadi 63 unit pada tahun 2022, mencapai 75 unit pada tahun 2023, dan tercatat 18 unit pada tahun 2024. Kondisi ini mengindikasikan masih adanya permasalahan dalam pengelolaan dan pergerakan persediaan.

Selain itu, tingkat utilisasi gudang menunjukkan variasi yang cukup besar antar lokasi, yaitu berkisar antara 46,24% pada Gudang Semarang hingga 95,79% pada Gudang Bogor. Variasi tersebut menunjukkan adanya ketidakseimbangan distribusi persediaan antar gudang, bukan semata-mata disebabkan oleh keterbatasan kapasitas penyimpanan secara keseluruhan.

Analisis akar penyebab menggunakan metode *fishbone* mengidentifikasi lima kelompok penyebab utama, yaitu: (1) belum optimalnya mekanisme pengendalian persediaan yang terintegrasi; (2) belum tersedianya visibilitas kebutuhan material antar unit secara menyeluruh; (3) kebijakan pengisian kembali persediaan (*replenishment*) yang belum selaras; (4) belum adanya kriticalitas suku cadang; serta (5) belum tersedianya kerangka strategis dalam penentuan konfigurasi gudang. Teixeira et al. [21] menyatakan bahwa klasifikasi suku cadang berdasarkan berbagai atribut seperti tingkat kriticalitas, frekuensi penggunaan, dan nilai ekonomis dapat meningkatkan efektivitas pengelolaan persediaan. Diagram *fishbone* yang menggambarkan permasalahan sistem eksisting disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Fishbone Permasalahan Pengelolaan Suku Cadang di PT PLN (Persero) UIT JBT

Analisis biaya logistik dilakukan untuk mengevaluasi implikasi ekonomi dari setiap alternatif strategi gudang. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa terdapat perbedaan biaya yang cukup signifikan antar konfigurasi yang dianalisis. Biaya transportasi menjadi komponen biaya dominan pada seluruh alternatif, sehingga memberikan pengaruh terbesar terhadap total biaya logistik. Rincian komponen biaya logistik untuk setiap strategi gudang disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Komponen Biaya Logistik pada Setiap Strategi Gudang

Strategi Gudang	Biaya Transportasi	Biaya Penanganan	Biaya Penyimpanan	Total Biaya Logistik
Desentralisasi	1.177.807.500	455.100.000	346.040.000	1.978.947.500
Sentralisasi	2.922.310.875	303.400.000	302.785.000	3.528.495.875
Hybrid (60–40)	2.122.017.525	364.080.000	320.087.000	2.806.184.525

**Analisis Biaya Logistik**

Strategi desentralisasi menghasilkan total biaya logistik terendah sebesar Rp1.978.947.500. Kondisi ini disebabkan oleh jarak distribusi material yang relatif lebih pendek sehingga biaya transportasi dapat ditekan. Namun demikian, keunggulan biaya tersebut diimbangi oleh biaya penyimpanan tertinggi dibandingkan alternatif lainnya, yang mencerminkan adanya duplikasi persediaan pada 23 lokasi gudang yang tersebar.

Sebaliknya, strategi sentralisasi menghasilkan total biaya logistik tertinggi sebesar Rp3.528.495.875. Tingginya biaya tersebut terutama dipengaruhi oleh biaya transportasi yang meningkat akibat distribusi material dari satu gudang pusat ke berbagai unit operasional yang tersebar secara geografis.

Strategi hybrid berada pada posisi menengah dengan total biaya logistik sebesar Rp2.806.184.525. Konfigurasi ini mampu mengurangi biaya transportasi dibandingkan strategi sentralisasi serta menurunkan biaya penyimpanan dibandingkan strategi desentralisasi. Dengan demikian, strategi hybrid menawarkan keseimbangan antara efisiensi biaya logistik dan kemampuan pelayanan distribusi material.

**Kapasitas dan Utilisasi Gudang**

Konfigurasi desentralisasi memiliki total kapasitas penyimpanan sebesar 11.009 unit dengan tingkat utilisasi agregat sebesar 78,58%. Namun demikian, tingkat utilisasi antar gudang menunjukkan variasi yang cukup besar, yaitu antara 46,24% pada Gudang Semarang hingga 95,79% pada Gudang Bogor. Kondisi tersebut mengindikasikan adanya ketidakseimbangan distribusi persediaan antar lokasi gudang.

Pada strategi sentralisasi, tingkat utilisasi meningkat menjadi 90,00% dengan kapasitas penyimpanan sebesar 9.612 unit. Hasil ini menunjukkan adanya peningkatan efisiensi pemanfaatan kapasitas akibat konsolidasi persediaan. Akan tetapi, tingkat utilisasi yang mendekati batas kapasitas maksimum berpotensi mengurangi fleksibilitas operasional dalam menghadapi perubahan kebutuhan material.

Sementara itu, strategi hybrid menghasilkan tingkat utilisasi sebesar 80,00% dengan kapasitas penyimpanan sebesar 10.814 unit. Konfigurasi ini mampu menjaga keseimbangan antara efisiensi penggunaan kapasitas dan ketersediaan ruang cadangan, sekaligus mengurangi ketimpangan utilisasi yang ditemukan pada sistem desentralisasi.

**Indeks Fleksibilitas Operasional**

Fleksibilitas operasional diukur berdasarkan penilaian pakar terhadap lima subdimensi, yaitu kecepatan respons terhadap gangguan, kemudahan akses material, kemampuan menghadapi lonjakan permintaan, kemudahan redistribusi persediaan, dan ketersediaan kapasitas buffer untuk kondisi darurat. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa strategi hybrid memperoleh indeks fleksibilitas tertinggi sebesar 0,44, diikuti strategi desentralisasi sebesar 0,41, dan strategi sentralisasi sebesar 0,15.

Rendahnya indeks fleksibilitas pada strategi sentralisasi menunjukkan tingginya ketergantungan terhadap satu gudang pusat sebagai sumber distribusi material. Kondisi ini berpotensi menciptakan titik kegagalan tunggal (single point of failure) yang dapat menghambat respons terhadap gangguan darurat.

Sebaliknya, strategi hybrid memperoleh nilai fleksibilitas tertinggi karena mampu mengombinasikan konsolidasi persediaan pada gudang hub dengan ketersediaan material pada gudang buffer regional. Kombinasi

tersebut memungkinkan sistem merespons secara efektif baik untuk kebutuhan pemeliharaan rutin maupun pemulihan gangguan darurat.

**Hasil Pembobotan Kriteria Menggunakan AHP**

Analisis AHP kelompok menghasilkan nilai *Consistency Ratio* (CR) sebesar 0,020, yang berada di bawah batas penerimaan 0,10. Hasil ini menunjukkan bahwa tingkat konsistensi penilaian dari tujuh pakar yang terlibat berada pada kategori dapat diterima. Bobot prioritas akhir setiap kriteria yang diperoleh dari normalisasi vektor eigen matriks perbandingan berpasangan agregat disajikan pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Bobot Prioritas Kriteria dan Hasil Analisis Konsistensi AHP

Peringkat	Kriteria	Jenis	Bobot	Interpretasi
1	Risiko <i>Stockout</i> (C4)	Cost	0,305	Prioritas tertinggi – risiko <i>stockout</i> berdampak langsung terhadap kontinuitas pasokan listrik; kondisi <i>stockout</i> dapat memperpanjang durasi gangguan sistem transmisi.
2	Tingkat Pelayanan (C2)	Benefit	0,262	Prioritas kedua – kemampuan pemenuhan kebutuhan material berpengaruh langsung terhadap kecepatan pemulihan gangguan.
3	<i>Lead Time</i> Distribusi (C3)	Cost	0,186	Prioritas ketiga – waktu distribusi yang lebih lama berpotensi meningkatkan TLOD dan TROD; sangat penting pada kondisi gangguan darurat.
4	Fleksibilitas Operasional (C6)	Benefit	0,12	Prioritas keempat – kemampuan sistem dalam beradaptasi terhadap perubahan kebutuhan material dan kondisi operasional yang dinamis.
5	Utilisasi Kapasitas Gudang (C5)	Benefit	0,071	Prioritas kelima – mencerminkan efisiensi pemanfaatan fasilitas penyimpanan namun bukan faktor utama dalam pengambilan keputusan.
6	Biaya Logistik (C1)	Cost	0,056	Prioritas terendah – efisiensi biaya dianggap kurang dominan dibandingkan aspek keandalan pada konteks infrastruktur kritis.
<b>CR = 0.020 &lt; 0.10 (Konsisten)   λmax = 6.15   n = 6   RI = 1.24   CI = 0.025</b>				

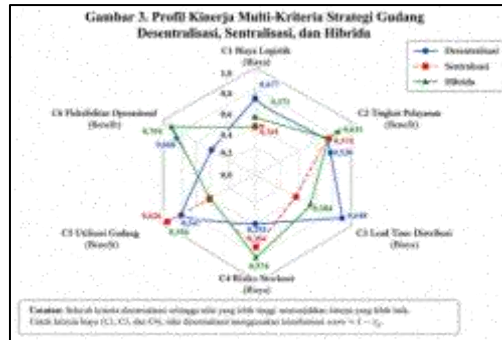
Dominannya bobot risiko *stockout* (0,305) dibandingkan biaya logistik (0,056) merupakan salah satu temuan utama dari analisis AHP. Hasil ini menunjukkan bahwa dalam konteks pengelolaan suku cadang transmisi, aspek keandalan memiliki pengaruh yang lebih besar dibandingkan efisiensi biaya dalam proses pengambilan keputusan. Kondisi tersebut mencerminkan karakteristik infrastruktur kritis, di mana ketidaktersediaan material pada saat terjadi gangguan dapat menyebabkan peningkatan durasi pemadaman, risiko gangguan berantai, serta penurunan kinerja operasional sistem. Oleh karena itu, ketersediaan suku cadang dan kontinuitas pelayanan menjadi pertimbangan yang lebih penting dibandingkan upaya minimisasi biaya logistik semata. Temuan ini sejalan dengan penelitian mengenai supply chain resilience yang menekankan bahwa ketahanan sistem dan kontinuitas pelayanan merupakan faktor yang semakin dominan dibandingkan efisiensi biaya pada lingkungan operasional yang bersifat kritis [6], [18].

**Hasil Pemeringkatan TOPSIS**

Penerapan metode TOPSIS pada matriks keputusan yang telah dibobot menggunakan AHP menghasilkan nilai kedekatan relatif (Ci) untuk setiap alternatif sebagaimana disajikan pada Tabel 6. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa strategi gudang *hybrid* memperoleh nilai Ci tertinggi sehingga menempati peringkat pertama di antara seluruh alternatif yang dievaluasi. Hasil ini menunjukkan bahwa strategi *hybrid* mampu memberikan keseimbangan yang lebih baik terhadap seluruh kriteria yang dipertimbangkan dibandingkan strategi desentralisasi maupun sentralisasi.

**Tabel 6.** Nilai Preferensi TOPSIS dan Peringkat Alternatif Strategi Gudang

Peringkat	Strategi Gudang	D+ (Jarak ke Solusi Ideal Positif)	D- (Jarak ke Solusi Ideal Negatif)	Nilai Ci	Keputusan
1	Hybrid	0,055	0,102	0,650	Paling Direkomendasikan ★
2	Desentralisasi	0,087	0,086	0,497	Alternatif Layak (Baseline)
3	Sentralisasi	0,098	0,044	0,308	Kurang Sesuai



**Gambar 3.** Diagram Radar Profil Kinerja Multi-Kriteria Tiga Strategi Gudang

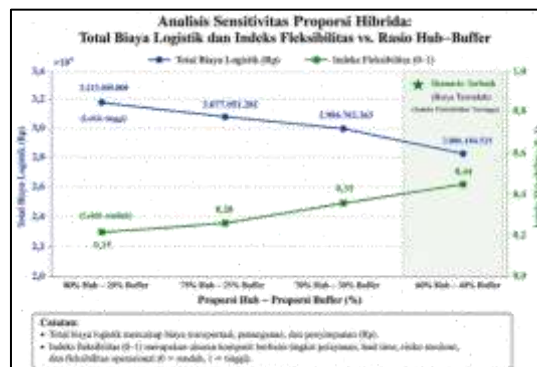
**Analisis Sensitivitas Proporsi Gudang Hybrid**

Untuk menentukan proporsi konfigurasi *hybrid* yang paling sesuai, dilakukan simulasi terhadap empat kombinasi proporsi proporsi *hub-buffer*. Setiap konfigurasi dievaluasi berdasarkan total biaya logistik dan indeks fleksibilitas operasional untuk mengidentifikasi keseimbangan antara efisiensi biaya dan kemampuan respons terhadap kebutuhan material. Hasil analisis sensitivitas disajikan pada Tabel 7.

**Tabel 7.** Analisis Sensitivitas Proporsi Hub-Buffer terhadap Biaya Logistik dan Kinerja Operasional

Proporsi Hub-Buffer	Biaya Transportasi (Rp)	Total Biaya Logistik (Rp)	Indeks Fleksibilitas	Interpretasi
80% Hub – 20% Buffer	Lebih tinggi	Lebih tinggi	Rendah	Tidak Direkomendasikan
75% Hub – 25% Buffer	2.422.127.531	3.077.051.281	Rendah	Kurang Fleksibel
70% Hub – 30% Buffer	2.322.090.863	2.986.762.363	Sedang	Layak
60% Hub – 40% Buffer	2.122.017.525	2.806.184.525	0,44 (Tertinggi)	★ Skenario Terbaik dari Alternatif yang Diuji

Tabel 7 menunjukkan bahwa peningkatan proporsi *buffer* cenderung menurunkan biaya logistik sekaligus meningkatkan fleksibilitas operasional. Dari seluruh konfigurasi yang dievaluasi, proporsi 60% Hub-40% *buffer* menghasilkan total biaya logistik terendah sebesar Rp2.806.184.525 dan indeks fleksibilitas tertinggi sebesar 0,44. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi tersebut mampu memberikan keseimbangan yang baik antara konsolidasi persediaan pada gudang *hub* dan responsivitas lokal melalui gudang *buffer*. Namun demikian, temuan ini perlu diinterpretasikan sebagai skenario dengan kinerja terbaik di antara alternatif yang diuji (*best-performing scenario among the evaluated alternatives*), bukan sebagai solusi optimal absolut, karena analisis sensitivitas hanya dilakukan pada rentang proporsi yang dievaluasi dalam penelitian ini.



**Gambar 4.** Analisis Sensitivitas Proporsi Gudang hybrid: Total Biaya Logistik dan Indeks Fleksibilitas terhadap Rasio Hub-Buffer

**Simpulan**

Penelitian ini mengevaluasi strategi gudang desentralisasi, sentralisasi, dan *hybrid* untuk pengelolaan suku cadang transmisi PT PLN (Persero) menggunakan pendekatan terintegrasi *Analytical Hierarchy Process (AHP)* dan *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak terdapat satu strategi yang unggul pada seluruh kriteria evaluasi. Strategi desentralisasi memiliki

keunggulan pada biaya logistik dan kecepatan distribusi, namun menghadapi risiko duplikasi persediaan dan *stockout* yang lebih tinggi. Strategi sentralisasi meningkatkan visibilitas persediaan dan efisiensi utilisasi gudang, tetapi menyebabkan peningkatan *lead time* distribusi dan penurunan fleksibilitas operasional. Berdasarkan hasil TOPSIS, strategi *hybrid* memperoleh nilai preferensi tertinggi ( $C_i = 0,650$ ), sehingga menjadi alternatif yang paling sesuai untuk pengelolaan suku cadang transmisi.

Hasil pembobotan AHP menunjukkan bahwa risiko *stockout* (0,305) dan tingkat pelayanan (0,262) merupakan kriteria yang paling berpengaruh dalam pemilihan strategi gudang, sedangkan biaya logistik memiliki bobot terendah (0,056). Temuan ini menunjukkan bahwa aspek keandalan dan kontinuitas pelayanan memiliki peran yang lebih dominan dibandingkan efisiensi biaya dalam konteks pengelolaan suku cadang pada infrastruktur ketenagalistrikan yang bersifat kritis.

Analisis sensitivitas proporsi *hub-buffer* menunjukkan bahwa konfigurasi 60% *Hub*–40% *Buffer* menghasilkan kombinasi terbaik antara efisiensi logistik dan fleksibilitas operasional di antara alternatif yang diuji. Konfigurasi ini menghasilkan total biaya logistik sebesar Rp2.806.184.525 dan indeks fleksibilitas tertinggi sebesar 0,44, sehingga mampu menyeimbangkan konsolidasi persediaan pada gudang *hub* dengan responsivitas lokal melalui gudang *buffer*.

Penelitian ini berkontribusi secara metodologis melalui penerapan kerangka AHP–TOPSIS untuk evaluasi strategi gudang pada lingkungan infrastruktur kritis, serta memberikan kontribusi praktis berupa kerangka pendukung keputusan berbasis data bagi transformasi sistem pergudangan PT PLN (Persero). Meskipun demikian, penelitian ini masih terbatas pada satu unit transmisi dan belum mempertimbangkan ketidakpastian permintaan maupun aspek kelayakan investasi. Selain itu, implementasi strategi gudang *hybrid* di masa mendatang dapat didukung melalui transformasi digital, peningkatan visibilitas persediaan, serta pemanfaatan sistem inventori cerdas berbasis data real-time guna meningkatkan koordinasi antar gudang, mempercepat pengambilan keputusan, dan memperkuat keandalan pasokan suku cadang transmisi [8], [10], [4].

## Daftar Pustaka

- [1] R. J. I. Basten and G. J. van Houtum, "System-oriented inventory models for spare parts," *Surv. Oper. Res. Manag. Sci.*, vol. 19, no. 1, pp. 34–55, 2014, doi: 10.1016/j.sorms.2014.05.002.
- [2] A. J. Muckstadt, *Analysis and Algorithms for Service Parts Supply Chains*. New York: Springer, 2005.
- [3] E. A. Silver, D. F. Pyke, and R. Peterson, *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*, 3rd ed. New York: Wiley, 1998.
- [4] J. Huiskonen, "Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 71, no. 1–3, pp. 125–133, May 2001, doi: 10.1016/S0925-5273(00)00112-2.
- [5] P. B. Alan Rushton, Phil Croucher, *The Handbook of Logistics and Distribution Management*, 5th ed. London: Kogan Page, 2014.
- [6] M. Christopher, *Logistics and Supply Chain Management*, 5th ed. Harlow: Pearson, 2016.
- [7] A. M. Freitas, F. J. G. Silva, L. P. Ferreira, J. C. Sá, M. T. Pereira, and J. Pereira, "Improving efficiency in a hybrid warehouse: A case study," *Procedia Manuf.*, vol. 38, no. 2019, pp. 1074–1084, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.195.
- [8] B. M. Mohsen, Y. A. Nahleh, and M. Mohsen, "Sustainable digitalization of manufacturing supply chains: An integrated framework for resilience, efficiency, and circularity," *Clean. Logist. Supply Chain*, vol. 19, no. September 2025, p. 100325, 2026, doi: 10.1016/j.clscn.2026.100325.
- [9] P. Li, Y. Chen, and X. Guo, "Digital transformation and supply chain resilience," *Int. Rev. Econ. Financ.*, vol. 99, no. March, p. 104033, 2025, doi: 10.1016/j.iref.2025.104033.
- [10] S. Winkelhaus and E. H. Grosse, "Logistics 4.0: a systematic review towards a new logistics system," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 1, pp. 18–43, 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1612964.
- [11] Yong Cao and Y. Sun, "Data Analysis and Forecasting," *IETI Trans. Data Anal. Forecast.*, vol. 2, no. 3, pp. 4–11, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3991/itdaf.v2i3.51413>
- [12] E. H. Frazelle, *World-Class Warehousing and Material Handling*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016.
- [13] R. W. Saaty, "The analytic hierarchy process-what it is and how it is used," *Math. Model.*, vol. 9, no. 3–5, pp. 161–176, 1987, doi: 10.1016/0270-0255(87)90473-8.
- [14] C.-L. Hwang and K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1981.
- [15] H. S. Shih, H. J. Shyur, and E. S. Lee, "An extension of TOPSIS for group decision making," *Math. Comput. Model.*, vol. 45, no. 7–8, pp. 801–813, 2007, doi: 10.1016/j.mcm.2006.03.023.
- [16] M. Behzadian, S. Khanmohammadi Otahgsara, M. Yazdani, and J. Ignatius, "A state-of-the-art survey of TOPSIS applications," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 17, pp. 13051–13069, 2012, doi: 10.1016/j.eswa.2012.05.056.

- [17] A. Mohammed, I. Harris, and K. Govindan, "A hybrid MCDM-FMOO approach for sustainable supplier selection and order allocation," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 217, pp. 171–184, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.02.003.
- [18] D. Ivanov and A. Dolgui, "A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0," *Prod. Plan. Control*, vol. 32, no. 9, pp. 775–788, 2021, doi: 10.1080/09537287.2020.1768450.
- [19] M. Christopher and H. Peck, "Building the Resilient Supply Chain," *International Journal of Logistics Management*, vol. 15, no. 2, pp. 1–13, 2004.
- [20] S. Chopra and P. Meindl, *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*, 6th ed. Boston: Pearson, 2016.
- [21] C. Teixeira, I. Lopes, and M. Figueiredo, "Multi-criteria Classification for Spare Parts Management: A Case Study," *Procedia Manuf.*, vol. 11, no. June, pp. 1560–1567, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.295.