

# Evaluasi Kebijakan Pemesanan *Material* Menggunakan Metode *Min–Max Inventory* Dengan Kendala Kapasitas Gudang: Pendekatan Eksperimental (Studi Kasus: PT PLN (Persero) UP3 Teluk Naga)

Riska Riantini<sup>1</sup>, Rizki Revianto Putera<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Departemen Teknik Industri, Fakultas Rekayasa Sistem Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
Jl. Raya ITS, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111  
Email: [6010241065@student.its.ac.id](mailto:6010241065@student.its.ac.id), [revianto@its.ac.id](mailto:revianto@its.ac.id)

## ABSTRAK

Tingginya *stockout*, rendahnya *fill rate*, dan ketidakefisienan utilisasi gudang merupakan permasalahan utama dalam sistem logistik material PT PLN (Persero) UP3 Teluk Naga. Penelitian ini mengevaluasi kebijakan *Min–Max Inventory* berbasis kapasitas gudang dengan mengintegrasikan klasifikasi *ABC*, karakteristik permintaan *ADI–CV<sup>2</sup>*, karakteristik fisik material, serta kapasitas tiga tipe gudang. Eksperimentasi numerik dilakukan menggunakan data pemakaian, pemesanan, *lead time*, dimensi material, dan kapasitas gudang periode 2022–2024 dalam 10 skenario kebijakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Skenario 10, dengan *target cycle service level* sebesar 96% untuk kelas A, 94% untuk kelas B, dan 90% untuk kelas C, mampu menurunkan total inventory cost sebesar 26,19%, jumlah *stockout* sebesar 95,36%, dan frekuensi *stockout* sebesar 78,72%, serta meningkatkan *fill rate* dari 87,79% menjadi 98,85%. Pada kondisi persediaan maksimum sebagai *worst-case scenario*, utilisasi gudang tertutup dan semi terbuka masing-masing mencapai 99,92% dan 95,18%, sedangkan utilisasi gudang terbuka menurun dari 661,11% menjadi 56,34%. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi kebijakan persediaan, karakteristik permintaan, dan strategi penempatan material dapat meningkatkan kinerja persediaan meskipun dihadapkan pada keterbatasan kapasitas gudang.

**Kata kunci:** *ABC Analysis*; *ADI–CV<sup>2</sup>*; Eksperimental, Kapasitas Gudang; *Min–Max Inventory*; *Stockout*

## ABSTRACT

*High stockout levels, low fill rate, and inefficient warehouse utilization are major issues in the material logistics system of PT PLN (Persero) UP3 Teluk Naga. This study evaluates a capacity-based Min–Max Inventory policy by integrating ABC classification, ADI–CV<sup>2</sup> demand characteristics, material physical characteristics, and the capacity of three warehouse types. Numerical experimentation was conducted using data on material usage, ordering, lead time, material dimensions, and warehouse capacity for the 2022–2024 period across ten policy scenarios. The results show that Scenario 10, which applies cycle service level targets of 96% for class A, 94% for class B, and 90% for class C materials, reduces total inventory cost by 26.19%, stockout quantity by 95.36%, and stockout frequency by 78.72%, while increasing the fill rate from 87.79% to 98.85%. Under the maximum inventory condition as a worst-case scenario, the utilization of the closed and semi-open warehouses reaches 99.92% and 95.18%, respectively, while the utilization of the open warehouse decreases from 661.11% to 56.34%. These results suggest that integrating inventory policy, demand characteristics, and material placement strategy can serve as a valuable approach to enhancing inventory performance, particularly in situations with limited warehouse capacity.*

**Keywords:** *ABC analysis*; *ADI–CV<sup>2</sup>*; experimental approach; min–max inventory; stockout; warehouse capacity

## Pendahuluan

Pada PT PLN (Persero) UP3 Teluk Naga, pengelolaan material masih menghadapi ketidakseimbangan antara ketersediaan, kebutuhan operasional, prioritas material, dan kapasitas penyimpanan. Berdasarkan data mutasi SAP periode 2022–2024, dari 249 *stock keeping unit* (SKU) yang dianalisis, *service level eksisting* belum mencerminkan tingkat prioritas material, karena material kelas A hanya mencapai *service level* 59%, kelas B sebesar 71%, sedangkan kelas C justru mencapai 87%. Kondisi ini menunjukkan adanya ketidaksesuaian antara kinerja pemenuhan material dan tingkat kekritisitas material, di mana material dengan prioritas lebih tinggi belum memperoleh tingkat pelayanan yang lebih baik. Pada saat yang sama, utilisasi gudang terbuka pada kondisi maksimum persediaan mencapai 661,11%, yang mengindikasikan ketidaksesuaian antara kebijakan pemesanan

dan kapasitas penyimpanan aktual. Dengan demikian, persoalan persediaan pada kondisi eksisting tidak hanya berkaitan dengan jumlah stok, tetapi juga mencakup ketidaktepatan prioritas pelayanan material dan ketidaksesuaian kapasitas gudang.

Berbagai penelitian mengkaji kebijakan pengendalian persediaan menggunakan *Min-Max Inventory* untuk mengendalikan tingkat persediaan dan meningkatkan kinerja layanan. [1], [2], [3], [4], [5] Klasifikasi seperti *ABC Analysis* telah banyak digunakan untuk mengelompokkan material berdasarkan nilai kepentingannya [6], [7], [8], [9] dan metode ADI-CV<sup>2</sup> digunakan untuk mengidentifikasi pola permintaan seperti *smooth, erratic, intermittent, dan lumpy*. [10], [11], [12] Penelitian terdahulu mengenai metode *Min-Max Inventory* umumnya berfokus pada penentuan titik pemesanan kembali, persediaan pengaman, dan batas maksimum persediaan untuk menjaga ketersediaan material. Namun, sebagian besar penelitian tersebut belum secara eksplisit mengintegrasikan kapasitas gudang sebagai kendala operasional yang dapat memengaruhi kelayakan kebijakan persediaan. Selain itu, persediaan yang diteliti cenderung homogen. Dalam praktik nyata, kebijakan persediaan yang mampu menurunkan risiko *stockout* secara perhitungan belum tentu dapat diterapkan apabila jumlah persediaan yang dihasilkan melebihi kapasitas penyimpanan aktual, terutama untuk material berukuran besar atau *bulky item*. Kesenjangan ini menjadi penting pada sistem pergudangan utilitas listrik karena material yang dikelola memiliki karakteristik yang beragam, baik dari jenis material (*multiple product*), dimensi fisik (*multiple size*), bentuk kemasan, pengaturan tata letak penyimpanan, maupun kebutuhan lokasi penyimpanan. Oleh karena itu, kebijakan pengendalian persediaan tidak cukup hanya menentukan jumlah material yang perlu disimpan, tetapi juga perlu mengevaluasi apakah jumlah tersebut masih layak terhadap kapasitas gudang tertutup, semi terbuka, dan terbuka. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan mengintegrasikan metode *Min-Max Inventory*, klasifikasi ABC, analisis pola permintaan ADI-CV<sup>2</sup>, konversi satuan *packaging*, serta pemetaan kebutuhan ruang penyimpanan ke dalam kerangka evaluasi multi indikator, yaitu biaya persediaan, utilisasi gudang, *service level*, jumlah dan frekuensi *stockout*, dan tingkat pemenuhan permintaan (*fill rate*) dibandingkan dengan kebijakan eksisting.

Adapun mafaat penelitian ini yaitu, kontribusi akademik penelitian terletak pada pengembangan kerangka evaluasi kebijakan persediaan yang menghubungkan keputusan pengendalian persediaan dengan keterbatasan kapasitas gudang. Berbeda dari penerapan *Min-Max Inventory* konvensional yang umumnya hanya berfokus pada perhitungan *safety stock, reorder point*, dan maksimum persediaan, penelitian ini memasukkan klasifikasi prioritas material berbasis ABC, penyaringan pola permintaan menggunakan ADI-CV<sup>2</sup>, konversi unit material ke satuan *packaging*, serta evaluasi kelayakan kapasitas gudang. Integrasi tersebut memberikan pendekatan yang lebih realistis dalam mengevaluasi kebijakan persediaan, khususnya pada sistem pergudangan dengan karakteristik material multi-SKU. Secara praktis, penelitian ini memberikan dasar pengambilan keputusan bagi manajemen gudang dalam menentukan kebijakan persediaan yang tidak hanya berorientasi pada penurunan *stockout*, tetapi juga mempertimbangkan efisiensi biaya dan keterbatasan ruang penyimpanan. Melalui penerapan *service level* yang berbeda berdasarkan klasifikasi ABC dan pemisahan material dengan pola permintaan yang tidak sesuai untuk perhitungan utama *Min-Max Inventory*, kebijakan yang dihasilkan dapat lebih adaptif terhadap prioritas material. Selain itu, pemetaan kebutuhan ruang terhadap kapasitas gudang membantu manajemen mengidentifikasi potensi kelebihan beban gudang serta menentukan strategi penyimpanan yang lebih tepat untuk material tertutup, semi terbuka, terbuka, maupun *bulky item*.

## Metode Penelitian

### Objek dan Lokasi Penelitian

Penelitian menggunakan data mutasi persediaan, pemesanan, pemakaian, harga material, *lead time*, dimensi material, dimensi *packaging*, lokasi penyimpanan, dan kapasitas efektif gudang selama Januari 2022–Desember 2024. Objek penelitian mencakup 249 SKU yang ditempatkan pada gudang tertutup, semi terbuka, dan terbuka. Kapasitas efektif didefinisikan sebagai ruang yang dapat digunakan untuk menyimpan material setelah memperhitungkan area yang tidak dapat digunakan untuk penyimpanan.

### Asumsi Model

Asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Waktu pemesanan (*lead time*) setiap material dianggap konstan dan diketahui berdasarkan jangka waktu yang tertuang pada kontrak pemesanan.
2. *Total inventory cost* terdiri dari *holding cost* dan *stockout cost*, *holding cost* didapatkan dari biaya penyisihan persediaan yang berlaku di PLN (1% dari rata-rata nilai persediaan)[13], dan *stockout cost* diasumsikan menggunakan pendekatan proporsional terhadap nilai material. Pendekatan ini dilakukan dengan mengasumsikan bahwa biaya *stockout* sebanding dengan tingkat kepentingan material yang direpresentasikan melalui klasifikasi ABC dianggap konstan sepanjang periode analisis.

$$C_i^{so} = \alpha_k P_i \quad (1)$$

Dimana:

$C_i^{so}$  : biaya *stockout* untuk item-*i*

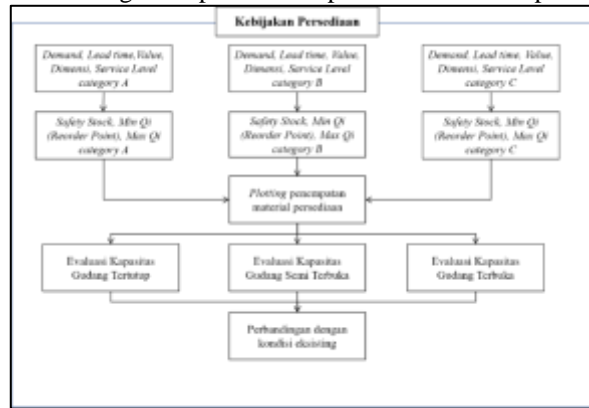
$\alpha_k$  : koefisien pinalti berdasarkan kategori ABC (A= 0,30; B= 0,20; C= 0,10)

$P_i$  : harga atau nilai unit item-*i*

- Kondisi operasional sistem SAP MM dianggap berfungsi optimal dan seluruh data permintaan, penerimaan, serta stok material yang digunakan dalam penelitian adalah valid dan akurat.

**Model Konseptual Penelitian**

Adapun model konseptual atau kerangka berpikir dalam penelitian ini ditampilkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Model konseptual penelitian

**2.4 Prosedur Penelitian**

Tahapan pengolahan data dilakukan sebagai berikut:

- Pengumpulan Data Awal

Pengumpulan data awal berupa data pemesanan, pemakaian material, *lead time*, kapasitas simpan maksimal gudang dan karakteristik masing-masing material.

- Analisis ADI-CV<sup>2</sup>

Analisis ADI-CV<sup>2</sup> dilakukan untuk mengeliminasi SKU dengan sifat *lumpy* dan *intermittent* dari SKU yang berdistribusi stabil, sehingga penetapan *safety stock* dan parameter *reorder point* tidak bias serta pemilihan kebijakan pengendalian persediaan dapat disesuaikan dengan karakteristik *demand* masing-masing SKU.

$$ADI = \frac{\sum_{i=1}^N T}{N} \tag{2}$$

Dimana:

T : jumlah periode penelitian

N : jumlah periode yang memiliki permintaan non-nol

$$CV^2 = \left( \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\varepsilon_i - \varepsilon)^2}{N}}}{\varepsilon} \right)^2 \tag{3}$$

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i}{N} \tag{4}$$

Dimana:

N : jumlah periode yang memiliki permintaan non-nol

$\varepsilon_i$  : permintaan pada periode ke-*i*

$\varepsilon$  : rata-rata permintaan yang dihitung hanya dari periode dengan permintaan non-nol

Karakteristik material berpola *erratic demand* mempunyai nilai  $ADI \leq 1,32$  dan  $CV2 \geq 0,49$ , dan karakteristik material berpola *intermittent demand* mempunyai nilai  $ADI \geq 1,32$  dan  $CV2 \leq 0,49$ , sedangkan karakter material *lumpy demand* mempunyai nilai  $ADI \geq 1,32$  dan  $CV2 \geq 0,49$ . [14]

- Klasifikasi Material (ABC Analysis)

SKU yang lolos dari tahap analisis ADI-CV selanjutnya dikelompokkan menggunakan ABC Analysis berdasarkan nilai pemakaian material selama periode penelitian (2022–2024). Kelas A mencakup material dengan kumulatif nilai pemakaian hingga 80%, kelas B mencakup material dengan kumulatif nilai pemakaian lebih dari 80% sampai 95%, dan kelas C mencakup material dengan kumulatif nilai pemakaian lebih dari 95% sampai 100%. [1]

- Penentuan nilai *service level* sesuai Kelas ABC

*Service level* yang ditetapkan pada tahap ini menjadi input utama dalam perhitungan kebijakan *Min–Max Inventory*.

5. Perhitungan Parameter *Min-Max Inventory*

Berdasarkan parameter kebijakan yang telah ditetapkan, dilakukan perhitungan parameter *Min–Max Inventory* untuk masing-masing SKU. Nilai minimum persediaan ditentukan berdasarkan kebutuhan selama *lead time* dan *safety stock*, sedangkan nilai maksimum persediaan ditentukan sebagai batas atas persediaan dalam satu siklus pemesanan. Perhitungan nilai *minimum maximum inventory* dengan Persamaan 4 dan 5. [15]

$$Min_i = \left( d_i \times \frac{L_i}{30} \right) + SS_i \tag{4}$$

$$Max_i = 2 \left( d_i \times \frac{L_i}{30} \right) + SS_i \tag{5}$$

Dimana:

$d_i$  : rata-rata permintaan SKU-i (unit/bulan)

$L_i$  : *lead time* SKU-i (hari)

$\frac{L_i}{30}$  : *lead time* SKU-i (bulan)

$SS_i$  : *Safety Stock* SKU-i

Hasil perhitungan ini digunakan untuk menentukan variabel jumlah persediaan  $Q_i$  dalam model kapasitas gudang ditetapkan sebagai nilai maksimum persediaan (*maximum inventory level*) yang diperoleh dari metode *Min–Max Inventory*. Pendekatan ini digunakan untuk memastikan bahwa evaluasi kapasitas dilakukan pada kondisi terburuk (*worst-case scenario*), dimana tingkat persediaan berada pada level tertinggi dalam siklus pemesanan.

6. Pemetaan penyimpanan material ke gudang eksisting (Gudang Tertutup / Semi Terbuka / Terbuka)

Pada tahap ini, material dikelompokkan berdasarkan lokasi penyimpanannya, yaitu gudang tertutup, gudang semi terbuka, dan gudang terbuka.

7. Perhitungan utilisasi gudang

Sebelum dilakukan perhitungan utilisasi gudang, dilakukan konversi nilai *Min Inventory (ROP)*, dan *Max Inventory (Qi)* menggunakan satuan sesuai *packaging* masing-masing material misalnya dus, haspel, dan unit. Konversi ini dilakukan karena aktivitas penyimpanan dan penanganan material di gudang dilakukan berdasarkan satuan kemasan fisik (*handling unit*). [16] Selain itu, kapasitas gudang dihitung berdasarkan kebutuhan area maupun volume dari *packaging* tersebut, sehingga penggunaan satuan *packaging* memberikan representasi yang lebih realistis terhadap kondisi operasional gudang. Konversi tersebut disajikan pada Persamaan 6-8.

$$N_i = \left\lceil \frac{Q_i}{q_i^{pack}} \right\rceil \tag{6}$$

$$Min_i^{pack} = \left\lceil \frac{ROP_i}{q_i^{pack}} \right\rceil \tag{7}$$

$$Max_i^{pack} = \left\lceil \frac{Q_i^{max}}{q_i^{pack}} \right\rceil \tag{8}$$

Dimana:

$N_i$  : jumlah *packaging* item ke-i

$Q_i$  : jumlah persediaan hasil perhitungan dalam satuan unit

$q_i^{pack}$  : jumlah unit dalam satu *packaging*

$Min_i^{pack}$  : *Minimum inventory* dalam satuan pack

$ROP_i$  : *Minimum inventory (Reorder Point)*

$Max_i^{pack}$  : *Maximal inventory* dalam satuan pack

$Q_i^{max}$  : *Maximal inventory* dalam satuan unit

$\lceil \rceil$  : fungsi pembulatan ke atas

Fungsi pembulatan ke atas digunakan untuk mengonversi jumlah persediaan berbasis unit menjadi kebutuhan *packaging* dalam satuan diskrit. [16] Hal ini diperlukan karena media penyimpanan seperti haspel, peti, atau kemasan lainnya tidak dapat dialokasikan dalam bentuk pecahan. Kemudian evaluasi kapasitas gudang dilakukan dengan menghitung utilisasi gudang secara terpisah untuk setiap tipe gudang.

Gudang tertutup adalah gudang yang memiliki atap, dinding, pintu, dan ventilasi udara. [17] Utilisasi gudang tertutup dihitung berdasarkan jumlah *packaging* aktual masing-masing SKU yang dikalikan dengan volume per *packaging*, karena material disimpan menggunakan sistem rak bertingkat (*rack storage*) sehingga evaluasi kapasitas dilakukan berdasarkan volume penyimpanan efektif ( $m^3$ ).

$$V_i = v_i \times N_i \tag{9}$$

Dimana:

$v_i$  : volume luas per *packaging* SKU ke-i

$V_i$  : total kebutuhan volume penyimpanan SKU ke-i

Total kebutuhan volume yang dihitung dengan Persamaan 9 kemudian dibandingkan dengan kapasitas efektif gudang tertutup untuk mengevaluasi kelayakan penyimpanan seperti yang dituangkan dalam Persamaan 10.

$$\sum_{i=1}^n V_i \leq C^{vol} \quad (10)$$

Dimana:

$C^{vol}$  : kapasitas efektif gudang tertutup

$n$  : jumlah SKU yang disimpan

Gudang semi terbuka adalah gudang yang memiliki atap namun tidak berinding. [17] Pada gudang semi terbuka, karakteristik *packaging* material cenderung beragam. Sebagian besar material disimpan secara langsung menggunakan sistem *floor storage* berdasarkan luas tapak, sementara beberapa material disimpan dalam *packaging* dus dan peti. Oleh karena itu, kebutuhan area penyimpanan dihitung dengan mengalikan jumlah *packaging* aktual masing-masing SKU dengan luas tapak per *packaging* sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 11.

$$A_i = a_i \times N_i \quad (11)$$

Dimana:

$a_i$  : luas tapak per *packaging* SKU ke-i (m<sup>2</sup>/unit)

$A_i$ : total luas penyimpanan SKU ke-i (m<sup>2</sup>)

Namun, untuk material yang disimpan dalam kemasan peti, perhitungan kebutuhan luas tidak hanya mempertimbangkan jumlah peti secara langsung, tetapi juga memperhatikan batas kemampuan tumpuk peti. Hal ini dilakukan karena peti memiliki karakteristik penyimpanan yang memungkinkan untuk ditumpuk secara vertikal hingga batas tertentu. Sehingga jumlah alas tumpukan dasar bisa dihitung dengan Persamaan 12.

$$N_i^{base} = \left\lceil \frac{N_i}{s_i} \right\rceil \quad (12)$$

Dimana:

$N_i^{base}$  : Jumlah alas tumpukan dasar

$s_i$  : jumlah maksimal tumpukan

Total kebutuhan luas yang dihitung dalam Persamaan 11 dan 12, kemudian dijumlahkan untuk seluruh SKU dan dibandingkan dengan kapasitas efektif gudang semi terbuka, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (13).

$$\sum_{i=1}^n A_i \leq C^{area} \quad (13)$$

Dimana:

$C^{area}$ : kapasitas efektif gudang semi terbuka

Gudang terbuka adalah suatu lapangan yang digunakan untuk menyimpan material yang tidak terpengaruh oleh kondisi cuaca.[17] Berbeda dengan gudang sebelumnya, gudang terbuka menyimpan material berupa kabel yang disimpan dalam bentuk haspel dengan pola *triangular stacking*, yaitu penyusunan haspel secara bertingkat membentuk susunan segitiga. [18] Dalam penelitian ini, kapasitas maksimum satu kelompok tumpukan *triangular* adalah 2 (dua) layer. Perhitungan ini digunakan untuk menentukan jumlah total haspel yang dapat disimpan dalam satu susunan *triangular* sebagai dasar evaluasi kebutuhan area penyimpanan gudang terbuka, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 14.

$$F_i = \left\lceil \frac{N_i^{haspel} + 1}{2} \right\rceil \quad (14)$$

Dimana:

$F_i$  : *Footprint* atau jumlah haspel alas (lapisan bawah)

$N_i^{haspel}$ : jumlah total haspel kebutuhan SKU ke-i

Selanjutnya, kebutuhan luas penyimpanan kabel dihitung berdasarkan jumlah haspel aktual yang telah disesuaikan dengan pola *triangular stacking* dengan mengalikan jumlah *packaging* aktual tersebut dengan luas tapak per haspel yang ditunjukkan pada Persamaan 15.

$$A_i = a_i \times F_i \quad (15)$$

Evaluasi kelayakan kapasitas penyimpanan persediaan dinyatakan *feasible* apabila total kebutuhan area tidak melebihi kapasitas fisik gudang yang tersedia, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (16).

$$\sum_{i=1}^n A_i \leq C^{area} \quad (16)$$

Dimana:

$C^{area}$ : kapasitas efektif gudang terbuka

Persamaan tersebut menyatakan bahwa total kebutuhan ruang penyimpanan yang dihitung berdasarkan jumlah unit dan kebutuhan ruang per unit tidak boleh melebihi kapasitas gudang, sehingga sistem dinyatakan *feasible* apabila rasio  $\leq 1$ .

8. Evaluasi hasil eksperimen dan perbandingan dengan sistem eksisting

Evaluasi hasil dan perbandingan dengan sistem eksisting yang bertujuan untuk menilai efektivitas sistem usulan dibandingkan dengan kondisi aktual yang diterapkan oleh PLN UP3 Teluk Naga. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan beberapa parameter sebagai berikut:

a. *Total Inventory Cost* (Rp), yaitu gabungan dari penyimpanan, dan kekurangan stok.

$$TC = 0,01 \sum_{i=1}^n \bar{S}_i P_i + \sum_{i=1}^n \alpha_i SO_i P_i \quad (17)$$

Dimana:

TC : total biaya persediaan (Rp)

$\bar{S}_i$  : Saldo rata-rata persediaan material ke-*i*

$P_i$  : harga satuan material ke- *i*

$SO_i$  : jumlah unit *stockout* material ke-*i*

$\alpha_i$ : Persentase penalti *stockout* berdasarkan kelas ABC material ke-*i*

*n* : jumlah SKU yang dianalisis

b. *Warehouse Utilization* (%), yaitu tingkat pemanfaatan kapasitas gudang terhadap kapasitas maksimum yang tersedia. Perhitungan utilitas gudang tertutup ditunjukkan pada Persamaan (18), sedangkan utilitas gudang semi terbuka dan gudang terbuka ditunjukkan pada Persamaan (19).

$$U^{vol} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i)}{C^{vol}} \quad (18)$$

$$U^{area} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i)}{C^{area}} \quad (19)$$

Dimana:

$U^{vol}$  : utilisasi gudang tertutup

$U^{area}$ : utilisasi gudang semi terbuka dan gudang terbuka

$V_i$  : Total volume penyimpanan SKU ke-*i*

$A_i$  : Total luas penyimpanan SKU ke-*i*

$C^{vol}$  : kapasitas efektif gudang tertutup

$C^{area}$  : kapasitas efektif gudang semi terbuka dan gudang terbuka

c. Jumlah dan Frekuensi *Stockout*, yaitu jumlah dan frekuensi terjadinya kekurangan stok yang ditunjukkan pada Persamaan (20) dan (21).

$$Stockout_i = \sum_{t=1}^T \max(0, D_{it} - I_{it}) \quad (20)$$

$$Freq Stockout_i = \sum_{t=1}^T \delta (D_{it} > I_{it}) \quad (21)$$

Dimana:

$D_{it}$  : permintaan item ke-*i* pada periode ke-*t*

$I_{it}$  : persediaan tersedia item ke-*i* pada periode ke-*t*

*T* : jumlah periode pengamatan

d. *Service Level*

*Service level* menunjukkan tingkat kemampuan sistem persediaan dalam memenuhi permintaan tanpa terjadi *stockout*. Perhitungan *service level* eksisting menggunakan Persamaan (22).

$$SL_i = 1 - \frac{Freq\ Stockout_i}{T} \tag{22}$$

e. *Fill Rate*

*Fill Rate* yaitu menunjukkan proporsi total permintaan yang dapat dipenuhi langsung dari stok yang tersedia dan ditunjukkan pada Persamaan 23.

$$Fill\ Rate = \frac{\sum Demand\ terpenuhi}{\sum Total\ demand} \tag{23}$$

9. Analisis sensitivitas

Dilakukan analisis sensitivitas terhadap perubahan parameter permintaan yaitu, permintaan naik 5%, 10%, dan 15% dan *demand* turun 5%,10%, dan 15% untuk menilai sejauh mana model yang diusulkan mampu beradaptasi terhadap fluktuasi kebutuhan material.

10. Kesimpulan dan Saran

Langkah terakhir dari penelitian ini adalah menarik kesimpulan dan menyusun rekomendasi kebijakan berdasarkan hasil evaluasi dan analisis perbandingan yang telah dilakukan mencakup efektivitas penerapan metode *Min–Max Inventory* terhadap peningkatan ketersediaan material dan efisiensi penggunaan kapasitas gudang, tingkat perbaikan *service level* dan pengurangan kejadian *stockout* maupun *overstock*, serta hasil validasi model terhadap kondisi aktual operasional gudang PLN UP3 Teluk Naga.

### Hasil Dan Pembahasan

#### Karakteristik SKU dan Kapasitas Gudang

Berdasarkan data mutasi persediaan pada SAP tahun 2022 - 2024 terdapat 249 SKU yang tercatat di mutasi gudang PT PLN (Persero) UP3 Teluk Naga. Hasil perhitungan ADI-CV<sup>2</sup> menunjukkan terdapat 44 SKU berpola *smooth* dan *erratic* sedangkan 205 SKU berpola *intermittent* dan *lumpy* sehingga dieliminasi dari analisis lanjutan. Hasil perhitungan klasifikasi ABC diperoleh bahwa item dengan kategori A yaitu sebanyak 6 SKU secara kumulatif menyumbang sampai dengan 80% dari total pemakaian persediaan, kategori B sebanyak 13 SKU meningkatkan total pemakaian material sampai dengan 95%, dan sisanya 25 SKU meningkatkan kontribusi sampai dengan 100% terhadap total pemakaian. Berdasarkan hasil observasi di lapangan dan perhitungan *average inventory* sesuai rentang waktu penelitian, material dengan kategori *lumpy* dan *intermittent* menghabiskan kapasitas gudang yang disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil Perhitungan Luasan Gudang Tersedia untuk Material Berpola Erratic and Smooth

Tipe Gudang	Kapasitas Total	Luas Terpakai Kategori <i>Lumpy and Intermittent</i>	Utilitas Terpakai Kategori <i>Lumpy and Intermittent</i>	Kapasitas Tersedia
Gudang Tertutup (m <sup>3</sup> )	111,768	15,654073	14,01%	96,114
Gudang Semi Terbuka (m <sup>2</sup> )	276,93	57,368817	20,72%	219,561
Gudang Terbuka (m <sup>2</sup> )	162,5	72,942876	44,89%	89,557

#### Skenario Eksperimentasi dan Evaluasi Kelayakan Skenario

Selanjutnya dilakukan eksperimentasi perhitungan *Min-Max Inventory* dengan *service level* material kelas A,B, dan C sebesar 99%, Skema ini dipilih untuk menguji kondisi utilisasi gudang pada tingkat pemenuhan persediaan yang sangat tinggi, sehingga dapat diketahui apakah peningkatan *service level* secara maksimum masih dapat dipenuhi oleh kapasitas gudang yang tersedia. Maka diperoleh masing-masing *Qi* dan kebutuhan luasan gudang sebagaimana dituangkan dalam Tabel 2.

**Tabel 2.** Hasil Perhitungan *Min-Max Inventory* dengan Kendala Kapasitas Gudang – Skenario 1

No.	SKU	ABC Class	Penempatan Material	Average Demand	Lead Time (bulan)	SS	Min Inventory	Max Inventory	q <sub>i</sub> <sup>pack</sup>	v <sub>i</sub> atau a <sub>i</sub>	S <sub>i</sub>	Min <sub>i</sub> <sup>pac</sup>	Max <sub>i</sub> <sup>pac</sup>	V <sub>i</sub> min Atau A <sub>i</sub> min	V <sub>i</sub> max Atau A <sub>i</sub> max
1	2190224	A	Gudang Tertutup	7627	1	17857	25484	33111	12	0,03168	-	2124	2760	67,2883	87,436
2	2090032	B	Gudang Tertutup	85	1	161	246	331	3	0,050116	-	82	111	4,10951	5,5628
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
34	3070151	C	Gudang Semi Terbuka	71	1	236	307	378	4	0,3478	6	77	95	4,5214	5,5648
35	3070154	C	Gudang Semi Terbuka	30	1	83	113	143	3	0,24	6	38	48	1,68	1,92
36	4190129	C	Gudang Semi Terbuka	26	1	55	81	107	12	0,175	10	7	9	0,175	0,175
37	3110015	A	Gudang Terbuka	1229 2	1,5	24030	42468	60906	250	4,176	1	170	244	709,92	1018,9
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

44	3050030	C	Gudang Terbuka	299	0,466667	599	739	879	2000	1,08	2	1	1	1,08	1,08
----	---------	---	----------------	-----	----------	-----	-----	-----	------	------	---	---	---	------	------

Sebagai contoh, SKU 3110015 yang termasuk material kelas A dan ditempatkan pada gudang terbuka memiliki nilai *minimum inventory* sebesar 42.468 unit dan *maximum inventory* sebesar 60.906 unit. Dengan kapasitas satu *packaging* sebesar 250 meter, jumlah *packaging* yang dibutuhkan dihitung menggunakan fungsi pembulatan ke atas, menghasilkan  $Min_i^{pack}$  sebanyak 170 *packaging*, sedangkan  $Max_i^{pack}$  sebanyak 244 *packaging*. Setelah jumlah *packaging* diperoleh, kebutuhan luas penyimpanan dihitung dengan mengalikan jumlah *packaging* aktual dengan luas per *packaging*. SKU 3110015 memiliki luas per *packaging* sebesar 4,176 m<sup>2</sup>, sehingga kebutuhan luas penyimpanan pada kondisi minimum adalah 709,92 m<sup>2</sup> dan pada kondisi maksimum adalah 1.018,94 m<sup>2</sup>. Berdasarkan Tabel 2 selanjutnya dilakukan evaluasi kelayakan kapasitas gudang dengan cara menjumlahkan seluruh kebutuhan luas penyimpanan berdasarkan penempatan material. Tabel 3 menampilkan hasil perhitungan tersebut.

**Tabel 3.** Hasil Perhitungan Kelayakan Utilitas Gudang – Skenario 1

Uraian	Kapasitas Efektif Gudang	$V_i^{min}$ Atau $A_i^{min}$	$V_i^{max}$ Atau $A_i^{max}$	Utilitas Gudang (%)		Kelayakan Utilitas Gudang	
				Min	Max	Min	Max
Gudang Tertutup	96,114	75,61065	108,8416	78,67	113,2	Layak	Tidak Layak
Gudang Semi Terbuka	219,561	87,84192	132,8132	40,01	60,49	Layak	Layak
Gudang Terbuka	89,557	177,0448	251,568	197,6	280,9	Tidak Layak	Tidak Layak

Berdasarkan Tabel 3 diketahui bahwa skenario 1 tidak layak dijalankan dengan kondisi gudang yang memiliki keterbatasan kapasitas. Hasil ini menunjukkan bahwa material berdimensi besar dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap kebutuhan kapasitas gudang, meskipun jumlah SKU yang terlibat relatif terbatas. Oleh karena itu, evaluasi kapasitas gudang tidak hanya perlu mempertimbangkan jumlah unit persediaan, tetapi juga kapasitas *packaging*, dimensi material, dan kebutuhan luas aktual yang ditimbulkan oleh masing-masing SKU. Selanjutnya, dilakukan pengembangan beberapa skenario kebijakan persediaan untuk memperoleh alternatif yang layak terhadap keterbatasan kapasitas gudang. Semua skenario diringkas pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Uji Kelayakan Skenario *Min-Max Inventory* terhadap Kapasitas Gudang

No	Uraian Skenario	Utilisasi Gudang			Kesi-mpulan
		Gudang Tertutup	Gudang Semi Terbuka	Gudang Terbuka	
1	<i>Service Level</i> A= 99%, B= 99%, C = 99%	117,14 %	77,03%	1315,30 %	Tidak layak
2	<i>Service Level</i> A= 95%, B= 80%, C = 70%	93,64%	60,25%	1120,23 %	Tidak layak
3	Tidak menyimpan <i>Safety Stock</i> ( <i>Service Level</i> 50%)	54,52%	41,69%	775,11 %	Tidak layak
4	Hanya menyimpan <i>safety stock</i> ( <i>average demand x Lead time</i> )	27,47%	21,23%	392,31 %	Tidak layak
5	Gudang Semi Terbuka dialihkan untuk menyimpan material kabel selain SKU 3110517, kemudian penyimpanan SKU tersebut disusun secara <i>horizontal stacking</i> dan <i>Service Level</i> = 50%)	54,52%	76,36%	810,10 %	Tidak layak
6	SKU 3110015 ( <i>bulky item</i> ) dikeluarkan dari kebijakan normal, <i>service level</i> kategori A,B dan C sama 68%	67,13%	49,35%	97,69%	Layak
7	SKU 3110015 ( <i>bulky item</i> ) dikeluarkan dari kebijakan normal, <i>service level</i> kategori A dimaksimalkan, kategori B dan C minimum ( <i>Service Level</i> A= 87%; B= 36%; C=30%)	75,80%	47,78%	93,66%	Layak
8	SKU 3110015 ( <i>bulky item</i> ) dikeluarkan dari kebijakan normal, <i>service level</i> berdasarkan <i>naive method</i> ( <i>Service Level</i> A= 74%; B= 68%; C=65%)	70,75%	50,59%	99,42%	Layak
9	SKU 3110015 dikeluarkan dari kebijakan normal, Gudang Terbuka hanya bisa menyimpan SKU kategori A (kategori B dan C dipindah ke gudang semi) dan <i>service level</i> A=96%, B= 93%, dan C=90%	99,61%	88,72%	70,07%	Layak
10	SKU 3110015 dikeluarkan dari kebijakan normal, Gudang Terbuka hanya bisa menyimpan SKU kategori B dan C (kategori A dipindah ke gudang semi) dan <i>service level</i> A=96%, B= 94%, dan C=90%	99,92%	95,18%	56,34%	Layak

Hasil uji kelayakan menunjukkan skema dengan mengeluarkan SKU 3110015 layak secara operasional karena tidak melebihi kapasitas gudang. SKU 3110015 yaitu *CABLE PWR; NA2XSEYBY; 3X240mm<sup>2</sup>; 20kV; UG* adalah *bulky item* karena disimpan dalam bentuk haspel berdiameter 2,4 meter dengan lebar 1,74 meter, serta memiliki isi sebanyak 250 meter per haspel. Karakteristik dimensi tersebut menyebabkan kebutuhan ruang penyimpanan per unit menjadi sangat besar, sehingga keberadaan SKU ini memberikan tekanan signifikan terhadap kapasitas gudang. Oleh karena itu, diperlukan kebijakan alternatif yang lebih adaptif.

**Perbandingan Indikator Kinerja**

Selanjutnya perbandingan antara kondisi eksisting dan usulan dinilai berdasarkan 4 (empat) indikator kinerja persediaan dijabarkan dalam Tabel 5

**Tabel 5.** Perbandingan Indikator Kinerja Persediaan pada Kondisi Eksisting dan Kondisi usulan

No.	Indikator Kinerja	Nilai Eksisting	Skenario 6	Skenario 7	Skenario 8	Skenario 9	Skenario 10
1	Total <i>Inventory Cost</i>	903.361.530	651.553.772	662.594.532	642.950.917	688.078.795	666.748.361
a	<i> Holding Cost</i>	66.944.926	437.787.462	503.871.830	464.710.845	653.986.915	633.411.449
b	<i>Biaya Stockout</i>	836.416.604	213.766.310	158.722.702	178.240.072	34.091.880	33.336.912
2	<i>Warehouse utilization</i>						
	Gudang Tertutup	80,20%	67,13%	75,80%	70,75%	99,61%	99,92%
	Gudang Semi Terbuka	79,29%	49,35%	47,78%	50,59%	88,72%	95,18%

	Gudang Terbuka	661,11%	97,69%	93,66%	99,42%	70,07%	56,34%
3	Jumlah <i>Stockout</i>	584.517	17.757	404.231	166.588	27.500	27.097
a	<i>Frequency</i>	343	175	418	177	75	73
b	Jumlah <i>Stockout</i>	584.517	171.757	404.231	166.588	27.500	27.097
4	<i>Fill Rate</i>	87,79%	96,426%	88,86%	96,414%	98,83%	98,85%

Tabel hasil skenario menunjukkan bahwa peningkatan kebijakan persediaan menghasilkan konsekuensi yang berbeda pada setiap indikator kinerja, sehingga pemilihan skenario tidak dapat didasarkan hanya pada satu ukuran.

**Analisa Sensitivitas**

Analisa sensitivitas dilakukan untuk menguji ketahanan kebijakan persediaan usulan terbaik (Skenario 10) apabila terjadi perubahan *demand*, tetapi nilai parameter pengendalian persediaan tetap dipertahankan seperti kondisi awal. Hasil Analisa sensitivitas disajikan dalam Tabel 6.

**Tabel 6.** Hasil Analisa Sensitivitas

Perubahan Demand	Total Inventory Cost	Holding Cost	Stockout Cost	Freq. Stockout	Total Stockout	Fill Rate
-15%	638.175.920	628.737.619	9.438.300	46	11.079	99,52%
-10%	654.029.402	634.508.701	19.520.701	54	14.467	99,40%
-5%	659.035.220	635.854.474	23.180.746	65	19.819	99,28%
0%	666.748.361	633.411.449	33.336.912	73	27.097	98,85%
5%	687.581.412	637.368.374	50.213.038	89	38.018	98,99%
10%	705.600.892	637.368.374	68.232.518	103	50.921	98,82%
15%	724.694.734	637.368.374	87.326.360	113	68.693	98,63%

Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa peningkatan *demand* secara konsisten memperbesar risiko *stockout*, dari 11.079 unit pada *demand* -15% menjadi 68.693 unit pada *demand* +15%, sehingga sistem persediaan masih sangat dipengaruhi oleh perubahan kebutuhan aktual. Meskipun demikian, *fill rate* relatif tinggi pada rentang 98,63%–99,52%, kenaikan *stockout cost* dari Rp 9.438.300 menjadi Rp 87.326.360 menunjukkan bahwa dampak utama peningkatan *demand* bukan pada penambahan biaya simpan, melainkan pada meningkatnya risiko ketidakmampuan sistem memenuhi kebutuhan material secara tepat waktu. Sehingga lonjakan permintaan yang bersifat ekstrem tetap memerlukan strategi mitigasi tambahan, terutama pada material kelas A dan *bulky item* yang memiliki dampak tinggi terhadap pelayanan dan kapasitas gudang. Strategi mitigasi yang dapat diterapkan mencakup peninjauan periodik parameter *Min–Max*, penyesuaian *service level* untuk material kritis, prioritas pemenuhan material *fast moving*, serta penerapan *direct delivery*, *cross-docking*, pemakaian material antar unit, atau *project-based ordering* ketika peningkatan persediaan tidak memungkinkan secara kapasitas. Dengan demikian, hasil sensitivitas tidak hanya menunjukkan ketahanan skenario usulan, tetapi juga memberikan dasar bagi kebijakan persediaan yang lebih adaptif terhadap kondisi permintaan puncak.

**Implikasi manajerial dan batasan**

Hasil penelitian menegaskan bahwa masalah utama bukan hanya seberapa besar ruang gudang digunakan, tetapi apakah ruang tersebut digunakan untuk menyimpan material yang tepat. Kebijakan *Min–Max* perlu disertai segmentasi material berdasarkan nilai, pola permintaan, dan kebutuhan ruang. *Bulky item* yang tidak terakomodir jika disimpan di gudang eksisting maka sebaiknya dipertimbangkan kebijakan *direct delivery*, *cross-docking*, atau *project-based ordering* dengan koordinasi antara *supplier* dan unit pengguna.[19], [20], [21], [22] Pertama, *direct delivery* dapat digunakan untuk material yang telah memiliki tujuan penggunaan yang jelas, sehingga material dari pemasok dapat langsung diarahkan ke lokasi proyek atau unit pengguna tanpa harus disimpan terlebih dahulu disimpan di gudang. Kedua, *cross-docking* dapat diterapkan untuk material yang tetap perlu melalui proses penerimaan dan administrasi gudang, tetapi tidak memerlukan penyimpanan dalam jangka waktu lama. Melalui pendekatan ini, gudang berfungsi sebagai titik transit sementara sebelum material didistribusikan ke lokasi penggunaan. Ketiga, *project-based ordering* dapat diterapkan untuk material berukuran besar, atau sangat bergantung pada program kerja tertentu. Dengan pendekatan ini, pemesanan material dilakukan berdasarkan kebutuhan pekerjaan yang telah teridentifikasi, sehingga risiko penumpukan material *bulky item* di gudang dapat dikurangi.

Implikasi manajerial dari temuan ini adalah bahwa kebijakan persediaan perlu dibedakan berdasarkan karakteristik fisik dan pola permintaan material. Material reguler dengan pola permintaan relatif stabil dapat dikelola menggunakan parameter *Min–Max Inventory* secara langsung, sedangkan *bulky item* memerlukan kombinasi antara pengendalian persediaan dan strategi distribusi yang lebih adaptif. Dengan demikian, kebijakan persediaan tidak hanya diarahkan untuk menurunkan *stockout*, tetapi juga untuk menjaga agar utilisasi gudang tetap berada dalam batas kapasitas yang layak secara operasional.

Penelitian ini memiliki keterbatasan, terutama dalam cakupan evaluasi terhadap SKU dengan pola permintaan *lumpy* dan *intermittent*. Sehingga penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji kelompok SKU tersebut secara lebih spesifik karena material dengan frekuensi permintaan rendah tetap memerlukan alokasi kapasitas gudang. Selain itu, studi lanjutan dapat mengevaluasi skema pemenuhan alternatif, seperti *cross-docking*, *Vendor Managed Inventory (VMI)*, dan *project-based ordering* untuk *bulky item*, dengan mempertimbangkan koordinasi antara pemasok, bagian logistik, dan *user* pengguna.

## Simpulan

Evaluasi terhadap 249 SKU menunjukkan bahwa 44 SKU berpola *smooth* dan *erratic* dapat dianalisis menggunakan kebijakan *Min–Max*, sedangkan kebutuhan ruang 205 SKU berpola *intermittent* dan *lumpy* tetap diperhitungkan sebagai okupansi kapasitas eksisting. Kebijakan *Min–Max* tidak layak diterapkan secara langsung pada seluruh material karena SKU 3110015 sebagai *bulky item* menimbulkan kebutuhan ruang yang tidak kompatibel dengan kapasitas gudang terbuka. Skenario 10 dengan *target cycle service level* 96% untuk kelas A, 94% untuk kelas B, dan 90% untuk kelas C dinyatakan layak terhadap kapasitas gudang. Dibandingkan kondisi eksisting, skenario tersebut menurunkan *total inventory cost* sebesar 26,19%, jumlah *stockout* sebesar 95,36%, dan frekuensi *stockout* sebesar 78,72%, serta meningkatkan *fill rate* dari 87,79% menjadi 98,85%. Utilisasi gudang tertutup, semi terbuka, dan terbuka masing-masing menjadi 99,92%, 95,18%, dan 56,34%. Temuan menunjukkan bahwa peningkatan kinerja persediaan tidak hanya ditentukan oleh parameter *Min–Max*, tetapi juga oleh segmentasi *bulky item* dan penyesuaian lokasi penyimpanan. Temuan ini sejalan dengan [23] yang menegaskan bahwa efisiensi gudang sangat dipengaruhi oleh kombinasi desain *layout* dan aktivitas operasional. Dalam penelitian ini, perubahan penempatan material terbukti memberikan dampak positif terhadap kinerja operasional gudang.

## Daftar Pustaka

- [1] E. A. Silver, D. F. Pyke, and D. J. Thomas, “Inventory and Production Management in Supply Chains Fourth Edition,” 2017.
- [2] A. T. Fadhilah and J. A. Saifudin, “Pengendalian Persediaan Bahan Baku Menggunakan Metode Min-Max Stock,” *Rekayasa*, vol. 16, no. 2, pp. 212–218, Aug. 2023, doi: 10.21107/rekayasa.v16i2.15384.
- [3] B. Mesina, S. Audrey Perez, C. Tagapia, J. Andrei, C. Matthew, and S. Audrey, “Inventory Stock Control using Min-Max Analysis.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/378158357>
- [4] T. Phongthiya and C. Kasemset, “Min-Max Policy Implementation for Inventory Management in Steel Supply Sector,” *Technol. Horiz*, vol. 42, no. 2, 2025, doi: 10.55003/ETH.420202.
- [5] D. A. Sandi and D. P. Sari, “Optimalisasi Inventory Control Material Rutin Menggunakan Metode Min-Max Stock Pada Store Pt. Pln (Persero) Unit Induk Tanjung Jati B. Unit 1 & 2.”
- [6] H. Ravinder and R. B. Misra, “ABC Analysis For Inventory Management: Bridging The Gap Between Research And Classroom,” 2014.
- [7] N. Hernandoko and P. W. Laksono, “Inventory Control Using ABC Classification and Min-Max Stock Method in The Manufacture of Armored Vehicle Body Hull at PT XYZ,” in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Dec. 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202346502009.
- [8] I. M. D. P. Asana, M. L. Radhitya, K. K. Widiartha, P. P. Santika, and I. K. A. G. Wiguna, “Inventory control using ABC and min-max analysis on retail management information system,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Feb. 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1469/1/012097.
- [9] W. L. Ng, “A simple classifier for multiple criteria ABC analysis,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 177, no. 1, pp. 344–353, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.ejor.2005.11.018.
- [10] Z. Neu, B. Hicks, and J. Gopsill, “Operating minimally intelligent agent-based manufacturing systems across the Average demand Interval–coefficient of variation (ADI-CV) demand state space,” *Prod. Manuf. Res.*, vol. 12, no. 1, 2024, doi: 10.1080/21693277.2024.2323479.
- [11] Amallynda Ikhlasul and Wicaksono Erwin, “Tampilan Strategi Peramalan dan Pengendalian Persediaan Suku Cadang di Industri Pengolahan dan Importir Kayu Lapis,” *Go-Integratif: Jurnal Teknik Sistem dan Industri*, vol. 05, pp. 67–83, May 2024.
- [12] A. A. Syntetos, K. Nikolopoulos, J. E. Boylan, R. Fildes, and P. Goodwin, “The effects of integrating management judgement into intermittent demand forecasts,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 118, no. 1, pp. 72–81, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.ijpe.2008.08.011.
- [13] PT PLN (Persero), “Edaran Direksi PT PLN (Persero) Nomor 011.E/DIR/2007,” 2007.
- [14] R. H. Teunter, A. A. Syntetos, and M. Z. Babai, “Intermittent demand: Linking forecasting to inventory obsolescence,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 214, no. 3, pp. 606–615, 2011, doi: 10.1016/j.ejor.2011.05.018.
- [15] Mulyati Rahma, “Sentralisasi Pengelolaan Persediaan Material Dengan Metode Min-Max Untuk Menghilangkan Shadow Warehouse : Studi Kasus di PT Vale Tbk,” 2020.
- [16] R. Baxter, N. Hastings, A. Law, and E. J. . Glass, “World-Class Warehousing and Material Handling, Second Edition,” *Anim. Genet.*, vol. 39, no. 5, pp. 561–563, 2016, [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071842822%0Ahttps://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071842822.abstract>
- [17] PT PLN (Persero), “71550\_DIS.01.01\_F01050100\_2024 - Buku Panduan dan Tata Letak Gudang Distribusi,” 2024.
- [18] B. S. D AE urovic AE, P. Krishna, D. Pandey, and B. D. Pandey, “Layer stacking,” 2006.

- [19] S. Raicu, D. Costescu, M. Popa, and C. R. Bujor, "Strategic and tactical management of warehousing in distribution logistics," *Transportation Research Procedia*, vol. 79, no. 2022, pp. 385–392, 2024, doi: 10.1016/j.trpro.2024.03.051.
- [20] I. H. Mohamud, M. Abdul Kafī, S. A. Shahron, N. Zainuddin, and S. Musa, "The Role of Warehouse Layout and Operations in Warehouse Efficiency: A Literature Review," *Journal Europeen des Systemes Automatises*, vol. 56, no. 1, 2023, doi: 10.18280/jesa.560109.
- [21] J. Gu, M. Goetschalckx, and L. F. McGinnis, "Research on warehouse operation: A comprehensive review," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 177, no. 1, pp. 1–21, 2007, doi: 10.1016/j.ejor.2006.02.025.
- [22] C. G. S. Rebelo, M. T. Pereira, F. J. G. Silva, L. P. Ferreira, and J. C. Sá, "The relevance of space analysis in warehouse management," *Procedia Manuf.*, vol. 55, no. C, pp. 471–478, 2021, doi: 10.1016/j.promfg.2021.10.064.
- [23] J. Hyder and E. Hassini, "Optimizing warehouse space allocation to maximize profit in the postal industry," *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.*, vol. 195, no. October 2024, p. 103924, 2025, doi: 10.1016/j.tre.2024.103924.