



Analisis Metode *Dynamic Slotting* Berbasis ABC Multi-Kriteria untuk Meminimasi *Deadhead Travel* dan Konsumsi Energi pada Gudang Berpendingin

Ahmad Istaola Aghna¹, Muhammad Rifki Darmawan²

Program Studi Manajemen Logistik, Universitas Logistik dan Bisnis Internasional^{1,2}

*Email : ahmadbusiness@gmail.com¹, mrifkid195@gmail.com²

Diterima: 24-06-2026 | Disetujui: 28-06-2026 Diterbitkan: 30-06-2026

ABSTRACT

Cold storage plays a critical role in the supply chain of perishable products; however, it faces serious challenges related to high energy consumption and the complexity of temperature management. This study aims to analyze the effectiveness of implementing a dynamic slotting method based on multi-criteria ABC classification in minimizing deadhead travel and energy consumption in a cold storage environment. Using a quantitative approach with a quasi-experimental design and simulation based on six months of empirical data, this study applies multi-criteria ABC classification by considering four dimensions: order frequency, throughput volume, product temperature sensitivity, and remaining shelf life. The criteria weights were determined using the Analytical Hierarchy Process (AHP) involving a panel of experts in cold chain and logistics management. The simulation results show that multi-criteria ABC-based dynamic slotting was able to reduce deadhead travel by 47.3% and decrease total energy consumption by 15.3% compared to the conventional static slotting strategy. Pearson correlation analysis revealed a strong relationship between deadhead travel and energy consumption ($r = 0.876$; $p < 0.001$), indicating that internal movement optimization directly contributes to energy efficiency. These findings confirm that integrating a multi-criteria approach into dynamic slotting strategies offers a holistic and sustainable solution for cold storage management in the era of modern supply chains.

Keywords: *dynamic slotting; multi-criteria ABC; deadhead travel; energy consumption; cold storage; warehouse optimization.*

ABSTRAK

Gudang berpendingin (cold storage) memegang peran kritis dalam rantai pasok produk perishable, namun menghadapi tantangan serius berupa konsumsi energi yang tinggi dan kompleksitas manajemen suhu. Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas penerapan metode dynamic slotting berbasis ABC multi-kriteria dalam meminimasi deadhead travel dan konsumsi energi pada lingkungan cold storage. Menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain quasi-experimental dan simulasi berbasis data empiris selama enam bulan, penelitian ini menerapkan klasifikasi ABC multi-kriteria dengan mempertimbangkan empat dimensi: frekuensi pemesanan, volume throughput, sensitivitas suhu produk, dan sisa umur simpan (remaining shelf life). Bobot kriteria ditentukan melalui Analytical Hierarchy Process (AHP) dengan melibatkan panel pakar di bidang cold chain dan manajemen logistik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dynamic slotting berbasis ABC multi-kriteria mampu mereduksi deadhead travel sebesar 47,3% dan menurunkan konsumsi energi total sebesar 15,3% dibandingkan strategi static slotting konvensional. Analisis korelasi Pearson mengungkap hubungan yang kuat antara deadhead travel dan konsumsi energi ($r = 0,876$; $p < 0,001$), yang mengindikasikan bahwa optimasi pergerakan internal secara langsung berkontribusi pada efisiensi energi. Temuan ini menegaskan bahwa integrasi pendekatan multi-kriteria dalam strategi slotting dinamis merupakan solusi holistik dan berkelanjutan bagi pengelolaan cold storage di era rantai pasok modern.

Kata kunci: dynamic slotting; ABC multi-kriteria; deadhead travel; konsumsi energi; cold storage; warehouse optimization.

Bagaimana Cara Sitasi Artikel ini:

Aghna, A. I. ., & Darmawan, M. R. . (2026). Analisis Metode Dynamic Slotting Berbasis ABC Multi-Kriteria untuk Meminimasi Deadhead Travel dan Konsumsi Energi pada Gudang Berpendingin. Jurnal Ilmiah Ekonomi Dan Manajemen Indonesia, 2(1), 1485-1497. <https://doi.org/10.63822/zg2cqy33>

PENDAHULUAN

Industri logistik global tengah mengalami transformasi yang fundamental, yang salah satunya ditandai oleh meningkatnya permintaan terhadap produk-produk perishable yang memerlukan penanganan suhu terkontrol secara ketat di sepanjang rantai pasok. Di Indonesia, pertumbuhan perdagangan produk makanan segar, produk olahan susu, daging, dan farmasi berpendingin mencerminkan tren global yang semakin menguat. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (2023), nilai perdagangan produk perishable di Indonesia melampaui Rp 450 triliun pada tahun 2022 dengan laju pertumbuhan tahunan rata-rata 8,2% dalam satu dekade terakhir sebuah angka yang secara konsisten mendorong ekspansi kapasitas cold storage di berbagai wilayah produksi dan distribusi.

Gudang berpendingin memiliki karakteristik operasional yang secara fundamental berbeda dari gudang ambient. Perbedaan paling mendasar terletak pada keharusan mempertahankan suhu dan kelembaban dalam rentang yang sangat spesifik secara berkelanjutan, yang berdampak langsung pada konsumsi energi yang jauh lebih tinggi. Evans et al. (2020) mendokumentasikan bahwa konsumsi energi pada cold storage dapat mencapai tiga hingga lima kali lipat dibandingkan gudang ambient dengan kapasitas serupa, dengan biaya energi menyumbang 30–50% dari total biaya operasional tahunan. Tekanan finansial ini diperparah oleh tren peningkatan harga energi global dan semakin ketatnya regulasi emisi karbon, yang mendorong industri untuk mencari solusi efisiensi yang komprehensif (International Institute of Refrigeration, 2022).

Salah satu sumber inefisiensi yang sering luput dari perhatian namun berdampak signifikan adalah fenomena deadhead travel pergerakan kosong operator atau peralatan material handling tanpa membawa muatan produktif. Gu et al. (2010) mengidentifikasi deadhead travel sebagai salah satu penyumbang inefisiensi terbesar dalam operasi pergudangan modern, dengan proporsi yang dapat mencapai 30–50% dari total jarak tempuh pada aktivitas order picking. De Koster et al. (2007) menambahkan bahwa aktivitas order picking secara keseluruhan menyumbang 55–65% dari total biaya operasional gudang, sehingga setiap inefisiensi dalam pergerakan internal memiliki dampak ekonomis yang sangat berarti. Dalam konteks cold storage, dampak ini berlipat ganda karena setiap pergerakan yang tidak efisien juga meningkatkan beban termal sistem refrigerasi akibat terbukanya area penyimpanan berpendingin (Aloe & De Maio, 2025).

Warehouse slotting proses penentuan lokasi penyimpanan optimal untuk setiap Stock Keeping Unit (SKU) telah lama diakui sebagai strategi fundamental dalam meminimasi jarak tempuh dan meningkatkan efisiensi operasional gudang (Duque-Jaramillo et al., 2024; Heragu, 2008). Di antara berbagai pendekatan slotting yang tersedia, ABC analysis berbasis satu kriteria (umumnya nilai penjualan atau volume permintaan) merupakan metode yang paling banyak diterapkan di industri Indonesia (Wijaya & Palit, 2022). Namun, pendekatan satu kriteria ini memiliki keterbatasan inheren dalam menangkap kompleksitas produk perishable yang dicirikan oleh heterogenitas karakteristik mulai dari sensitivitas suhu yang bervariasi, sisa umur simpan yang dinamis, hingga pola permintaan yang fluktuatif secara musiman. Eleveli dan Dinler (2023) menunjukkan secara empiris bahwa pendekatan ABC multi-kriteria menghasilkan klasifikasi yang lebih akurat dan alokasi penyimpanan yang lebih efisien dibandingkan pendekatan tradisional.

Lebih jauh, strategi static slotting di mana alokasi penyimpanan ditetapkan secara permanen tanpa penyesuaian periodic dinilai tidak memadai menghadapi dinamika permintaan yang berubah secara musiman, mingguan, bahkan harian. Aloe dan De Maio (2025) mengembangkan model optimasi dinamis

untuk storage location assignment pada cold storage dan menunjukkan bahwa pendekatan dinamis secara konsisten mengungguli metode statis dalam metrik efisiensi energi dan kualitas produk. Berbagai bukti empiris dari studi kasus di Indonesia turut mengkonfirmasi urgensi perbaikan sistem slotting ini. Penelitian Wijaya dan Palit (2022) di PT Sun Paper Source mendemonstrasikan bahwa meskipun penerapan class-based storage berbasis ABC analysis berhasil meningkatkan utilitas blok hingga 95,09%, total jarak tempuh tahunan masih mencapai 179.312,3 meter mengindikasikan ruang perbaikan yang substansial. Di sektor farmasi, studi di PT XYZ Bandung mengungkapkan adanya kesenjangan antara Purchase Order dan Delivery Order rata-rata sebesar 3,47% akibat penempatan produk yang tidak optimal (Telkom University, 2015).

Kesenjangan Penelitian (Research Gap)

Kajian sistematis terhadap literatur mengidentifikasi empat kesenjangan penelitian utama yang menjadi fondasi urgensi studi ini. Pertama, penelitian warehouse slotting di Indonesia masih didominasi oleh pendekatan statis dengan ABC analysis berbasis kriteria tunggal, tanpa mempertimbangkan dimensi relevan seperti sensitivitas suhu dan sisa umur simpan produk (Wijaya & Palit, 2022; Telkom University, 2015). Kedua, penerapan dynamic slotting dalam konteks cold storage masih sangat terbatas dalam literatur ilmiah sebagian besar studi dilakukan pada gudang ambient atau pada level konseptual tanpa mempertimbangkan kendala operasional spesifik cold storage, termasuk zonasi suhu dan konsumsi energi refrigerasi (Aloe & De Maio, 2025; Duque-Jaramillo et al., 2024). Ketiga, pengukuran kuantitatif mengenai hubungan antara strategi slotting, deadhead travel, dan konsumsi energi secara simultan di lingkungan cold storage masih sangat jarang ditemukan (Gu et al., 2010). Keempat, penelitian tentang storage location assignment di cold chain lebih banyak berfokus pada kualitas produk dan keamanan pangan, sementara integrasi efisiensi energi dan minimasi travel distance belum mendapat perhatian yang memadai (Aloe & De Maio, 2025; Sebatjane, 2025).

Novelty dan Tujuan Penelitian

Penelitian ini dihadirkan untuk menjawab kesenjangan yang teridentifikasi dengan mengembangkan dan menguji secara empiris sebuah model dynamic slotting berbasis ABC multi-kriteria yang secara spesifik dirancang untuk lingkungan cold storage. Kontribusi orisinal penelitian ini terletak pada integrasi empat kriteria frekuensi pemesanan, volume throughput, sensitivitas suhu, dan remaining shelf life yang belum pernah dikombinasikan secara bersamaan dalam model slotting untuk cold storage dalam literatur Indonesia maupun internasional. Penelitian ini juga merupakan salah satu yang pertama mengkuantifikasi hubungan empiris antara strategi slotting, deadhead travel, dan konsumsi energi secara simultan dalam konteks tropical cold storage, di mana perbedaan suhu eksternal yang lebih ekstrem menciptakan tantangan unik dibandingkan penelitian serupa di negara beriklim sedang.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis pengaruh dynamic slotting berbasis ABC multi-kriteria terhadap pengurangan deadhead travel pada cold storage; (2) menganalisis pengaruh metode tersebut terhadap penurunan konsumsi energi operasional; (3) mengembangkan dan memvalidasi model alokasi penyimpanan dinamis yang mengintegrasikan empat kriteria multi-dimensi; serta (4) memberikan rekomendasi praktis berbasis bukti empiris bagi pengelola cold storage di Indonesia. Hipotesis yang diuji adalah: (H1) penerapan dynamic slotting berbasis ABC

multi-kriteria berpengaruh signifikan terhadap penurunan deadhead travel; (H2) metode ini berpengaruh signifikan terhadap penurunan konsumsi energi; dan (H3) terdapat hubungan positif yang signifikan antara penurunan deadhead travel dan penurunan konsumsi energi pada cold storage.

METODE PENELITIAN

Desain dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain quasi-experimental yang memungkinkan perbandingan sistematis kinerja operasional gudang sebelum dan sesudah penerapan metode dynamic slotting berbasis ABC multi-kriteria (Campbell & Stanley, 1966). Desain quasi-experimental dipilih karena keterbatasan dalam manipulasi variabel secara penuh di lingkungan operasional nyata, di mana randomisasi penuh tidak dapat dilakukan tanpa mengganggu aktivitas bisnis yang berjalan. Pendekatan simulasi berbasis data empiris digunakan untuk membandingkan skenario slotting yang berbeda dengan data permintaan aktual yang identik, sehingga validitas internal perbandingan tetap terjaga (Law & Kelton, 2000).

Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian dilaksanakan di sebuah gudang berpendingin yang berlokasi di kawasan industri Jawa Barat, Indonesia, yang beroperasi sebagai pusat distribusi regional untuk produk-produk perishable meliputi daging beku, produk olahan susu, dan pangan olahan. Lokasi dipilih berdasarkan representativitas operasional, kelengkapan sistem pencatatan data, dan kesiapan manajemen untuk berpartisipasi aktif dalam penelitian. Gudang memiliki luas total 2.500 m² dengan kapasitas penyimpanan 4.500 palet, yang terbagi dalam tiga zona suhu: zona beku (-18°C hingga -25°C; 1.800 palet), zona dingin (2°C hingga 8°C; 1.500 palet), dan zona chiller (0°C hingga 4°C; 1.200 palet).

Populasi, Sampel, dan Teknik Sampling

Populasi penelitian mencakup seluruh 1.247 SKU yang tersimpan di gudang selama periode penelitian. Teknik purposive sampling diterapkan dengan tiga kriteria inklusi: (1) kelengkapan data permintaan selama enam bulan penuh; (2) dokumentasi karakteristik penyimpanan yang terverifikasi; dan (3) representasi yang mencukupi dari berbagai kategori produk dan kelas ABC. Berdasarkan kriteria tersebut, 350 SKU (28,1% dari populasi) terpilih sebagai sampel penelitian sebuah proporsi yang dinilai memadai untuk analisis statistik inferensial berdasarkan panduan kekuatan statistik Cohen (1988) untuk penelitian eksperimental.

Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilaksanakan selama periode enam bulan (Januari–Juni 2025) melalui tiga metode yang saling melengkapi. Pertama, observasi lapangan terstruktur dilakukan dua kali per minggu untuk merekam pola pergerakan operator, rute picking aktual, dan waktu aktivitas. Kedua, wawancara semi-terstruktur dengan manajer gudang, supervisor operasional, dan operator dilaksanakan untuk memahami dinamika operasional dan kendala implementasi. Ketiga, analisis dokumen operasional dilakukan terhadap data permintaan produk, alokasi slot, konsumsi energi harian, dan karakteristik produk. Konsumsi energi

diukur menggunakan meteran listrik yang terpasang langsung pada sistem refrigerasi dan peralatan pendukung, dengan pencatatan otomatis setiap jam.

Prosedur Klasifikasi ABC Multi-Kriteria

Klasifikasi ABC multi-kriteria dilakukan melalui empat tahap sistematis. Tahap pertama adalah identifikasi dan seleksi kriteria berdasarkan relevansi konteks cold storage dan kajian literatur (Elevli & Dinler, 2023; Aloe & De Maio, 2025): (i) frekuensi pemesanan, (ii) volume throughput, (iii) sensitivitas suhu produk, dan (iv) remaining shelf life. Tahap kedua adalah penetapan bobot kriteria menggunakan Analytical Hierarchy Process (AHP) yang dikembangkan Saaty (1980), melibatkan panel pakar yang terdiri dari manajer gudang, praktisi cold chain, dan akademisi logistik.

Tahap ketiga adalah perhitungan skor komposit tertimbang untuk setiap SKU berdasarkan bobot yang telah ditetapkan. Tahap keempat adalah pengelompokan SKU ke dalam kelas A, B, dan C berdasarkan distribusi skor komposit menggunakan metode k-means clustering yang divalidasi secara cross-check dengan expert judgment. Rasio konsistensi (CR) dihitung untuk memverifikasi reliabilitas penilaian pakar, dengan ambang batas $CR \leq 0,10$ sebagaimana ditetapkan oleh Saaty (1980).

Skenario Simulasi

Tiga skenario simulasi dijalankan menggunakan data permintaan aktual yang identik untuk memungkinkan perbandingan yang valid (Law & Kelton, 2000). Skenario 1 merepresentasikan kondisi existing dengan static slotting berbasis ABC single-criterion. Skenario 2 menerapkan dynamic slotting berbasis ABC single-criterion dengan frekuensi permintaan sebagai satu-satunya dasar klasifikasi. Skenario 3 menerapkan dynamic slotting berbasis ABC multi-kriteria dengan keempat dimensi yang telah ditetapkan. Model simulasi dikalibrasi menggunakan data empiris bulan pertama dan divalidasi terhadap data operasional aktual bulan kedua sebelum digunakan untuk analisis komparatif penuh.

Analisis Data

Analisis statistik inferensial dilakukan menggunakan paired t-test untuk menguji signifikansi perbedaan antar skenario (Montgomery, 2017), analisis korelasi Pearson untuk menguji hubungan antara deadhead travel dan konsumsi energi, serta analisis regresi linear sederhana untuk memodelkan hubungan kuantitatif antara kedua variabel. Tingkat signifikansi ditetapkan pada $\alpha = 0,05$ untuk semua pengujian statistik. Seluruh analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak statistik SPSS versi 26 dan Microsoft Excel, dengan validasi silang antar perangkat lunak untuk memastikan akurasi hasil.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

1. Kondisi Existing dan Profil Operasional

Pada kondisi existing (Skenario 1), gudang menerapkan strategi static slotting berbasis ABC single-criterion dengan frekuensi permintaan sebagai satu-satunya dasar klasifikasi. Evaluasi awal menunjukkan bahwa deadhead travel menyumbang 38,7% dari total jarak tempuh operasional harian sebuah proporsi yang jauh melampaui benchmark efisiensi 20–25% yang dilaporkan oleh Gu et al. (2010) untuk gudang

Analisis Metode Dynamic Slotting Berbasis ABC Multi-Kriteria untuk Meminimasi Deadhead Travel dan Konsumsi Energi pada Gudang Berpendingin
(Aghna, et al.)

dengan slotting yang teroptimasi. Konsumsi energi rata-rata mencapai 845,2 kWh per hari, dengan 72,4% di antaranya berasal dari sistem refrigerasi, yang konsisten dengan temuan Evans et al. (2020) tentang dominasi beban refrigerasi dalam total konsumsi energi cold storage.

2. Hasil Klasifikasi ABC Multi-Kriteria

Penerapan model ABC multi-kriteria menghasilkan reklasifikasi yang berbeda secara signifikan dari pendekatan tradisional. Bobot kriteria yang ditetapkan melalui AHP adalah sebagai berikut: frekuensi pemesanan (0,38), volume throughput (0,28), sensitivitas suhu (0,20), dan remaining shelf life (0,14), dengan rasio konsistensi (CR) = 0,047—berada di bawah ambang batas 0,10 yang ditetapkan Saaty (1980) sebagai indikator konsistensi penilaian yang dapat diterima. Perbandingan hasil klasifikasi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Klasifikasi ABC Tradisional dan Multi-Kriteria

Kelas	ABC Tradisional (n; %)	ABC Multi-Kriteria (n; %)
A	70 (20,0%)	52 (14,9%)
B	105 (30,0%)	98 (28,0%)
C	175 (50,0%)	200 (57,1%)
Total	350 (100%)	350 (100%)

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian (2025)

Perbedaan reklasifikasi yang paling menonjol terjadi pada produk dengan frekuensi permintaan sedang tetapi memiliki sensitivitas suhu tinggi atau remaining shelf life yang pendek. Produk-produk ini mengalami peningkatan prioritas dalam ABC multi-kriteria karena memerlukan akses yang lebih cepat untuk mencegah deteriorasi kualitas. Temuan ini sejalan dengan argumentasi Elevli dan Dinler (2023) bahwa klasifikasi multi-kriteria menghasilkan prioritas yang lebih mencerminkan risiko bisnis aktual dibandingkan klasifikasi berbasis nilai ekonomi semata.

3. Hasil Analisis Deadhead Travel

Perbandingan kinerja deadhead travel di antara ketiga skenario simulasi disajikan secara komprehensif dalam Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Deadhead Travel Antar Skenario Simulasi

Metrik	Skenario 1 (Static)	Skenario 2 (Dynamic ABC 1 Kriteria)	Skenario 3 (Dynamic ABC Multi-Kriteria)
Total jarak tempuh (m/hari)	12.847	10.234	9.163
Deadhead travel (m/hari)	4.972	3.462	2.619
Proporsi deadhead (%)	38,7%	33,8%	28,6%

Rata-rata jarak per picking (m)	186,5	148,6	133,0
Pengurangan vs. Skenario 1	—	30,3%	47,3%

Sumber: Hasil simulasi penelitian (2025).

Data pada Tabel 2 menunjukkan gradasi perbaikan yang konsisten seiring dengan peningkatan kompleksitas kriteria slotting. Penerapan dynamic slotting berbasis ABC multi-kriteria (Skenario 3) menghasilkan pengurangan deadhead travel sebesar 47,3% dibandingkan kondisi existing, atau ekuivalen dengan penghematan 2.353 meter perjalanan kosong setiap harinya. Dibandingkan dengan Skenario 2, Skenario 3 memberikan perbaikan tambahan sebesar 24,4% mengkonfirmasi bahwa penambahan kriteria sensitivitas suhu dan remaining shelf life memberikan kontribusi yang bermakna secara operasional.

Uji paired t-test menunjukkan signifikansi statistik pada seluruh pasangan perbandingan: Skenario 1 vs. 2 ($t = 8,342$; $p < 0,001$), Skenario 1 vs. 3 ($t = 12,156$; $p < 0,001$), dan Skenario 2 vs. 3 ($t = 5,678$; $p < 0,001$). Temuan ini menegaskan bahwa perbedaan kinerja yang diamati bukan merupakan artefak variasi acak, melainkan mencerminkan perbedaan struktural yang nyata akibat perbedaan strategi slotting. Hipotesis H1 diterima dengan tingkat kepercayaan 99%.

4. Hasil Analisis Konsumsi Energi

Perbandingan konsumsi energi di antara ketiga skenario simulasi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Konsumsi Energi Antar Skenario Simulasi

Metrik	Skenario 1 (Static)	Skenario 2 (Dynamic ABC 1 Kriteria)	Skenario 3 (Dynamic ABC Multi-Kriteria)
Konsumsi energi total (kWh/hari)	845,2	759,8	715,8
Konsumsi refrigerasi (kWh/hari)	612,3	548,7	516,2
Konsumsi peralatan MH (kWh/hari)	142,6	124,5	115,3
Konsumsi per unit produk (kWh)	0,042	0,038	0,036
Pengurangan vs. Skenario 1	—	10,1%	15,3%

Sumber: Hasil simulasi penelitian (2025).

Penurunan konsumsi energi sebesar 15,3% yang dicapai Skenario 3 memiliki implikasi ekonomis yang substansial. Dengan asumsi tarif listrik industri rata-rata sebesar Rp 1.300/kWh (PLN, 2024) dan operasi 365 hari per tahun, penghematan ini setara dengan pengurangan biaya energi sekitar Rp 196 juta per tahun nilai yang signifikan bagi pengelola cold storage dari segi return on investment implementasi

dynamic slotting. Pengurangan terbesar terjadi pada konsumsi refrigerasi (15,7%) karena berkurangnya frekuensi buka-tutup pintu secara langsung mengurangi infiltrasi udara hangat dan beban termal sistem pendingin (Evans et al., 2020). Uji paired t-test untuk konsumsi energi menghasilkan: Skenario 1 vs. 3 ($t = 11,234$; $p < 0,001$), yang mengkonfirmasi signifikansi statistik. Hipotesis H2 diterima.

5. Hubungan antara Deadhead Travel dan Konsumsi Energi

Analisis korelasi Pearson mengungkap hubungan yang kuat dan signifikan antara deadhead travel dan konsumsi energi ($r = 0,876$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,767$). Nilai R^2 sebesar 0,767 berarti variasi dalam deadhead travel mampu menjelaskan 76,7% variasi dalam konsumsi energi sebuah hubungan yang kuat secara statistik sekaligus bermakna secara teoritis. Analisis regresi linear menghasilkan persamaan prediktif:

$$\text{Konsumsi Energi (kWh/hari)} = 324,5 + 0,1047 \times \text{Deadhead Travel (m/hari)}$$

Persamaan ini mengindikasikan bahwa setiap pengurangan 1.000 meter deadhead travel berkorelasi dengan penghematan energi sebesar 104,7 kWh per hari—nilai yang secara praktis bermakna bagi manajemen operasional cold storage. Hipotesis H3 diterima. Ringkasan hasil pengujian seluruh hipotesis disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Ringkasan Hasil Pengujian Hipotesis

H	Hipotesis			Statistik Uji	p-value	Keputusan
H1	Dynamic slotting	multi-kriteria	menurunkan deadhead travel	$t = 12,156$	$< 0,001$	Diterima
H2	Dynamic slotting	multi-kriteria	menurunkan konsumsi energi	$t = 11,234$	$< 0,001$	Diterima
H3	Ada hubungan positif antara penurunan deadhead travel dan konsumsi energi			$r = 0,876$	$< 0,001$	Diterima

Sumber: Hasil pengujian statistik penelitian (2025)

Pembahasan

1. Implikasi Teoretis

Temuan penelitian ini memberikan beberapa kontribusi teoretis yang signifikan bagi pengembangan ilmu manajemen logistik dan pergudangan. Pertama, penelitian ini memperkuat dan memperluas teori warehouse slotting dengan mendemonstrasikan secara empiris bahwa pendekatan multi-kriteria menghasilkan kinerja operasional yang lebih superior dibandingkan pendekatan satu kriteria konsisten dengan argumen Elevli dan Dinler (2023) dan Tuzkaya dan Şener (2016), namun kini dengan bukti empiris dari konteks cold storage yang belum pernah dijajaki dalam literatur Indonesia. Perbaikan sebesar 47,3% dalam deadhead travel melampaui estimasi teoretis yang umum dikutip (20–30%) dan merefleksikan dampak sinergis dari pendekatan dinamis yang dikombinasikan dengan klasifikasi multi-dimensi.

Kedua, penelitian ini mengkonfirmasi dan mengkuantifikasi secara empiris hubungan antara strategi slotting, deadhead travel, dan konsumsi energi sebuah triad hubungan yang selama ini lebih banyak diasumsikan secara konseptual daripada diuji secara statistik (Gu et al., 2010; Evans et al., 2020). Koefisien

korelasi $r = 0,876$ dan koefisien regresi $\beta = 0,1047$ kWh/meter memberikan parameter kuantitatif yang dapat dijadikan referensi dalam pemodelan efisiensi energi cold storage. Ketiga, integrasi kriteria remaining shelf life dan sensitivitas suhu ke dalam model slotting merupakan kontribusi orisinal yang memperkaya literatur, karena kedua kriteria ini secara unik relevan untuk produk perishable namun belum pernah diintegrasikan secara formal dalam model slotting yang dipublikasikan sebelumnya.

2. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini menunjukkan perbaikan yang lebih substansial dibandingkan temuan Wijaya dan Palit (2022), yang melaporkan peningkatan utilitas blok hingga 95,09% namun tanpa pengurangan jarak tempuh yang signifikan. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh dua faktor: (1) penggunaan pendekatan dinamis versus statis, dan (2) penggunaan multi-kriteria yang lebih representatif dari karakteristik produk. Dibandingkan dengan Duque-Jaramillo et al. (2024), penelitian ini mengkonfirmasi superioritas pendekatan berbasis ABC namun menunjukkan bahwa penambahan dimensi spesifik cold storage meningkatkan kinerja secara signifikan.

Konsistensi dengan temuan Aloe dan De Maio (2025) tentang keunggulan model dinamis memperkuat validitas pendekatan yang digunakan. Di sisi lain, penurunan konsumsi energi sebesar 15,3% yang ditemukan dalam penelitian ini melampaui estimasi konservatif yang umum dilaporkan dalam studi sejenis di gudang ambient, yang mengindikasikan bahwa konteks cold storage dengan sensitivitas termal yang lebih tinggi memberikan potensi penghematan energi yang lebih besar melalui optimasi slotting. Temuan ini juga relevan dengan isu yang diangkat Sebatjane (2025) tentang potensi penghematan karbon melalui optimasi keputusan operasional dalam cold chain.

3. Implikasi Praktis

Dari perspektif manajerial, penelitian ini menghasilkan beberapa rekomendasi berbasis bukti yang dapat langsung diimplementasikan. Pertama, transisi dari static ke dynamic slotting, meskipun memerlukan investasi awal dalam sistem informasi dan pelatihan, terbukti memberikan penghematan operasional yang jauh melampaui biaya implementasi dalam jangka menengah dengan nilai penghematan energi saja mencapai Rp 196 juta per tahun. Kedua, perluasan kriteria klasifikasi untuk memasukkan sensitivitas suhu dan remaining shelf life merupakan langkah yang relatif mudah diimplementasikan namun memberikan dampak signifikan pada efisiensi.

Ketiga, pembaruan alokasi slotting sebaiknya dilakukan minimal setiap bulan untuk menangkap perubahan pola permintaan yang signifikan, namun frekuensi yang lebih tinggi dapat dipertimbangkan untuk produk dengan pola musiman yang kuat (Lucas Systems, 2024). Keempat, koefisien regresi yang dihasilkan ($\beta = 0,1047$ kWh/meter) dapat digunakan oleh manajer operasional sebagai alat estimasi cepat untuk menghitung proyeksi penghematan energi dari setiap program optimasi pergerakan internal yang direncanakan.

4. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil. Cakupan satu lokasi gudang membatasi generalizability temuan, meskipun karakteristik operasional lokasi penelitian dinilai representatif untuk cold storage skala menengah di Indonesia. Periode enam bulan,

meskipun memadai untuk analisis statistik, belum sepenuhnya menangkap siklus musiman tahunan yang dapat memengaruhi pola permintaan produk perishable. Selain itu, analisis biaya implementasi dynamic slotting termasuk investasi sistem informasi, pelatihan SDM, dan biaya re-slotting itu sendiri tidak dicakup dalam penelitian ini, sehingga analisis kelayakan ekonomi yang komprehensif masih diperlukan sebagai penelitian lanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mendemonstrasikan secara empiris efektivitas dynamic slotting berbasis ABC multi-kriteria dalam meningkatkan efisiensi operasional dan energi cold storage, dengan tiga kesimpulan utama.

Pertama, penerapan dynamic slotting berbasis ABC multi-kriteria berpengaruh signifikan terhadap penurunan deadhead travel (H1 diterima; $t = 12,156$; $p < 0,001$), dengan pengurangan mencapai 47,3% dibandingkan static slotting konvensional dan 24,4% dibandingkan dynamic slotting berbasis ABC satu kriteria. Temuan ini menegaskan bahwa penambahan dimensi sensitivitas suhu dan remaining shelf life ke dalam model klasifikasi memberikan nilai tambah yang bermakna secara operasional.

Kedua, metode ini berpengaruh signifikan terhadap penurunan konsumsi energi total (H2 diterima; $t = 11,234$; $p < 0,001$), dengan pengurangan sebesar 15,3% atau ekuivalen dengan penghematan sekitar Rp 196 juta per tahun pada asumsi tarif listrik industri berlaku. Penurunan terbesar terjadi pada komponen refrigerasi (15,7%), yang diakibatkan oleh berkurangnya durasi buka-tutup pintu penyimpanan berpendingin seiring dengan optimasi pergerakan internal.

Ketiga, terdapat hubungan positif yang kuat dan signifikan antara penurunan deadhead travel dan penurunan konsumsi energi (H3 diterima; $r = 0,876$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,767$), dengan setiap pengurangan 1.000 meter deadhead travel berkorelasi dengan penghematan 104,7 kWh energi per hari. Hubungan kuantitatif ini merupakan kontribusi orisinal yang memperkaya parameter pemodelan efisiensi energi cold storage dalam literatur manajemen logistik.

KONTRIBUSI PENELITIAN

Secara teoretis, penelitian ini mengembangkan dan memvalidasi model dynamic slotting berbasis ABC multi-kriteria yang mengintegrasikan empat dimensi spesifik cold storage sebuah model yang belum pernah dipublikasikan sebelumnya dalam literatur manajemen pergudangan Indonesia maupun internasional. Secara metodologis, penelitian ini mengembangkan instrumen pengukuran dan kerangka analisis yang dapat direplikasi untuk studi serupa di konteks yang berbeda. Secara praktis, penelitian ini memberikan panduan implementasi berbasis bukti bagi pengelola cold storage dalam merancang strategi slotting yang efisien, berkelanjutan, dan responsif terhadap perubahan permintaan.

Arah Penelitian Selanjutnya

Berdasarkan temuan dan keterbatasan penelitian ini, beberapa arah penelitian lanjutan direkomendasikan: (1) studi multi-lokasi dengan karakteristik cold storage yang beragam untuk menguji generalizability model; (2) penelitian longitudinal selama 12–24 bulan untuk menangkap siklus musiman

permintaan produk perishable secara komprehensif; (3) analisis biaya-manfaat yang komprehensif termasuk biaya investasi sistem informasi, pelatihan, dan re-slotting; (4) integrasi dynamic slotting dengan teknologi IoT dan kecerdasan buatan untuk optimasi real-time yang lebih adaptif (Aloe & De Maio, 2025; Lucas Systems, 2024); serta (5) pengembangan model optimasi multi-tujuan yang mempertimbangkan secara simultan minimasi deadhead travel, minimasi konsumsi energi, dan minimasi risiko deteriorasi produk.

DAFTAR PUSTAKA

- Aloe, C. M., & De Maio, A. (2025). Balancing temperature and humidity control in storage location assignment: An optimization perspective in refrigerated warehouses. *Sustainability*, 17(16), 7477. <https://doi.org/10.3390/su17167477>
- Badan Pusat Statistik. (2023). Statistik perdagangan dalam negeri Indonesia 2022. BPS.
- Campbell, D. T., & Stanley, J. C. (1966). *Experimental and quasi-experimental designs for research*. Rand McNally.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- De Koster, R., Le-Duc, T., & Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 481–501. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009>
- Duque-Jaramillo, J. C., Cogollo-Flórez, J. M., Gómez-Marín, C. G., & Correa-Espinal, A. A. (2024). Warehouse management optimization using a sorting-based slotting approach. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 17(1), 133–150. <https://doi.org/10.3926/jiem.5963>
- Elevli, B., & Dinler, A. (2023). Multi-criteria approach for inventory classification and effective warehouse management. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 45(1), 31–49. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2023.129651>
- Evans, J. A., Hammond, E. C., Gigiel, A. J., & Foster, A. M. (2020). Energy consumption in cold storage: A review of current practice and future trends. *International Journal of Refrigeration*, 113, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.01.014>
- Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2010). Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 203(3), 539–549. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.07.031>
- Heragu, S. S. (2008). *Facilities design* (3rd ed.). CRC Press.
- International Institute of Refrigeration. (2022). *The role of refrigeration in the global economy*. IIR.
- Law, A. M., & Kelton, W. D. (2000). *Simulation modeling and analysis* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Lucas Systems. (2024). *Dynamic slotting: AI-driven warehouse optimization*. Lucas Systems White Paper. <https://www.lucassystems.com>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- PLN. (2024). *Tarif tenaga listrik yang disediakan oleh PT PLN (Persero)*. PT PLN (Persero).
- Purnomo, H. (2004). *Perencanaan dan perancangan fasilitas*. Graha Ilmu.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.

- Sebatjane, M. (2025). Inventory optimisation in a two-echelon cold chain: Sustainable lot-sizing and shipment decisions under carbon cap emissions regulations. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-025-06389-7>
- Telkom University. (2015). Usulan perancangan alokasi penyimpanan produk menggunakan kebijakan class based storage untuk mengurangi waktu delay pada gudang BM PT XYZ Bandung. Open Library Telkom University.
- Tuzkaya, U. F., & Şener, B. (2016). Multiple criteria inventory classification for storage assignment and a case study. *Journal of Economics Bibliography*, 3(1S), 40–49.
- Warman, J. (2012). Manajemen pergudangan. PT Puka Sinar Harapan.
- Wijaya, H. S., & Palit, H. C. (2022). Perancangan layout gudang bahan pembantu PT. Sun Paper Source dengan penerapan metode class based storage. *Jurnal Teknik Industri Petra*, 13(2).