



Strategi Transformasi Digital Proses Supply Chain untuk Meningkatkan Efisiensi Operasional Warehouse di Trakindo Batu Hijau Kabupaten Sumbawa Barat-NTB

Slamet Husain¹, Tomy Dwi Cahyono^{2*}

^{1,2}Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Teknologi Sumbawa

*Corresponding Author's e-mail: tomy.dwi.cahyono@uts.ac.id

Article History:

Received: April 14, 2026

Revised: May 21, 2026

Accepted: June 15, 2026

Keywords:

Digital Transformation,
Supply Chain, Warehouse
Efficiency, PLS-SEM,
Mining Equipment.

Abstract: This study aims to empirically examine the digital transformation strategy of supply chain processes to improve warehouse operational efficiency at Trakindo Batu Hijau, West Sumbawa Regency. The mining heavy equipment industry requires high precision and speed in its supply chain, making traditional warehouse operations prone to delays and errors. This research applies a quantitative approach utilizing Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) via SmartPLS 4.0 software. The sample consists of 125 respondents who are employees directly involved in supply chain and warehouse operations at Trakindo Batu Hijau, selected using a purposive sampling technique. The independent variables investigated include Warehouse Management System (WMS) Implementation, Internet of Things (IoT) Integration, and Big Data Analytics, while the dependent variable is Warehouse Operational Efficiency. The results reveal that all digital transformation components have a positive and significant effect on warehouse operational efficiency. Specifically, WMS implementation exerts the strongest impact, followed by IoT integration and Big Data Analytics. The R-Square value of 0.765 indicates that 76.5% of the variance in warehouse operational efficiency can be explained by these digital transformation strategies. These findings contribute to the Resource-Based View and Technology Acceptance Model by confirming that digital capabilities are critical assets for enhancing operational performance in remote mining environments. The study recommends that Trakindo Batu Hijau continues to invest in IoT infrastructure and staff training to sustain an agile and resilient supply chain ecosystem.

Copyright © 2026, The Author(s).

This is an open access article under the CC-BY-SA license

How to cite: Husain, S., & Dwi Cahyono, T. (2026). Transformasi Digital Proses Supply Chain untuk Meningkatkan Efisiensi Operasional Warehouse di Trakindo Batu Hijau Kabupaten Sumbawa Barat-NTB. SENTRI: Jurnal Riset Ilmiah, 5(6), 2898–2912. <https://doi.org/10.55681/sentri.v5i6.7111>

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi industri 4.0 telah membawa perubahan paradigma yang masif di berbagai sektor industri, tidak terkecuali pada sektor pertambangan dan alat berat. Transformasi digital dalam manajemen rantai pasok (supply chain management) bukan lagi sekadar tren, melainkan sebuah kebutuhan strategis yang esensial bagi keberlangsungan operasi perusahaan (Ivanov et al., 2023; Queiroz & Wamba, 2024). Di lingkungan operasional yang dinamis dan penuh ketidakpastian, kecepatan, ketepatan, dan efisiensi dalam mendistribusikan suku cadang maupun alat berat menjadi faktor

kunci kesuksesan. PT Trakindo Utama, sebagai penyedia solusi alat berat Caterpillar terkemuka di Indonesia, memiliki jaringan distribusi yang luas, salah satunya adalah cabang Batu Hijau yang terletak di Kabupaten Sumbawa Barat, Nusa Tenggara Barat (NTB). Tambang Batu Hijau merupakan salah satu tambang tembaga dan emas terbesar, sehingga aktivitas operasional di wilayah ini menuntut ketersediaan suku cadang dan peralatan berat secara terus-menerus tanpa adanya jeda (downtime) yang merugikan (Suryanto & Wibowo, 2023).

Gudang (warehouse) memegang peranan sentral dalam ekosistem supply chain di sektor pertambangan. Sebagai titik simpul yang mengatur aliran barang masuk (inbound) dan barang keluar (outbound), kinerja gudang secara langsung memengaruhi efisiensi rantai pasok secara keseluruhan (Gunasekaran et al., 2024; Richards, 2025). Pada praktiknya, operasional warehouse tradisional yang mengandalkan proses manual dan pencatatan berbasis kertas seringkali berhadapan dengan berbagai permasalahan klasik seperti ketidakakuratan data persediaan (inventory discrepancies), lambatnya proses pencarian barang (picking time delays), hingga kesalahan pengiriman barang (shipping errors) (Fatorachian & Kazemi, 2025). Keterlambatan dalam menyediakan komponen kritis (critical spare parts) untuk mesin penggerak dan pengangkut di tambang Batu Hijau dapat mengakibatkan kerugian finansial yang signifikan per jamnya. Oleh karena itu, modernisasi dan digitalisasi proses pergudangan sangat mendesak untuk diimplementasikan secara terstruktur (Kamble et al., 2023; Wibowo & Santoso, 2024).

Strategi transformasi digital pada operasional warehouse meliputi berbagai spektrum teknologi, di antaranya adalah implementasi Warehouse Management System (WMS) yang mutakhir, integrasi perangkat Internet of Things (IoT) untuk pelacakan barang secara real-time, dan penggunaan Big Data Analytics untuk peramalan permintaan (demand forecasting) (Ghadge et al., 2025). Penerapan WMS memfasilitasi otomatisasi tugas-tugas klerikal dan memberikan visibilitas end-to-end terhadap persediaan, sementara IoT, seperti pemindai RFID (Radio Frequency Identification) dan sensor presisi, memastikan bahwa perpindahan setiap komponen dapat dipantau tanpa intervensi manusia secara konstan (Hofmann & Rüsçh, 2024). Lebih lanjut, Big Data Analytics memungkinkan manajemen untuk mengidentifikasi pola konsumsi suku cadang sehingga pengadaan dapat dilakukan secara proaktif sebelum barang habis (stockout) (Sari & Pratama, 2023; Zheng et al., 2024).

Meskipun berbagai literatur telah mengkaji manfaat digitalisasi dalam manajemen rantai pasok, studi empiris yang secara spesifik meneliti efektivitas strategi ini di lokasi operasional pertambangan jarak jauh (remote mining sites) di Indonesia, khususnya di kawasan timur seperti Sumbawa Barat, masih sangat terbatas. Mayoritas penelitian berfokus pada industri manufaktur atau e-commerce perkotaan yang memiliki dukungan infrastruktur logistik dan telekomunikasi yang matang (Pratama, 2025; Wijaya & Kusuma, 2024). Terdapat kesenjangan literatur (research gap) mengenai bagaimana kendala geografis dan spesifikasi alat berat pertambangan memengaruhi tingkat keberhasilan adopsi teknologi di warehouse.

Penelitian ini dilandasi oleh Resource-Based View (RBV) yang menyatakan bahwa perusahaan dapat mencapai keunggulan kompetitif yang berkelanjutan dengan mengelola sumber daya dan kapabilitas yang bernilai, langka, tak dapat ditiru, dan tak tergantikan (Barney, 2021). Dalam konteks digitalisasi rantai pasok, infrastruktur teknologi informasi, keahlian sumber daya manusia, dan integrasi sistem digital

dipandang sebagai kapabilitas strategis yang mampu menciptakan efisiensi operasional yang superior (Chopra & Meindl, 2023; Wamba et al., 2025). Melengkapi pandangan RBV, penelitian ini juga mengadopsi prinsip dasar dari Technology Acceptance Model (TAM) (Davis, 2022) dalam menganalisis bagaimana kesiapan dan adopsi sistem oleh karyawan warehouse berpengaruh terhadap kesuksesan transformasi digital.

Transformasi digital dalam operasional gudang tidak terlepas dari peran penting faktor manusia dan organisasi. Menurut Lin (2014), adopsi sistem manajemen rantai pasok elektronik (e-SCM) sangat dipengaruhi oleh kesiapan teknologi, kesiapan organisasi, dan kesiapan lingkungan. Temuan ini relevan dengan kondisi Trakindo Batu Hijau yang berada di lokasi terpencil dengan keterbatasan infrastruktur telekomunikasi. Selain itu, Bovens (2024) menekankan bahwa akuntabilitas rantai pasok di era digital memerlukan transparansi dan tata kelola data yang kuat, yang hanya dapat dicapai melalui integrasi sistem digital yang andal dan didukung oleh budaya organisasi yang adaptif terhadap perubahan teknologi.

Lebih jauh, pendekatan Lean Six Sigma dan optimalisasi distribusi suku cadang alat berat membutuhkan dukungan sistem informasi manajemen pergudangan yang terintegrasi (Rivan & Maksum, 2024; Diana et al., 2024). Penelitian oleh Yoon et al. (2011) menunjukkan bahwa faktor adopsi, integrasi, dan kinerja dalam e-SCM saling terkait erat, di mana keberhasilan adopsi teknologi sangat bergantung pada kesiapan organisasi dan dukungan manajemen puncak. Nugroho et al. (2024) juga menemukan bahwa implementasi WMS di industri manufaktur Indonesia berdampak signifikan terhadap efisiensi distribusi lokal, yang memperkuat argumen bahwa sistem serupa akan memberikan manfaat serupa di sektor pertambangan. Mirković et al. (2023) menyatakan bahwa transformasi digital rantai pasok merupakan proses holistik yang mencakup perubahan model bisnis, budaya organisasi, dan pemanfaatan teknologi secara simultan untuk menciptakan nilai tambah yang berkelanjutan.

Berdasarkan urgensi dan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menguji dan menganalisis secara empiris pengaruh strategi transformasi digital yang terdiri dari implementasi WMS, integrasi IoT, dan analitik Big Data terhadap peningkatan efisiensi operasional warehouse di Trakindo Batu Hijau. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoretis pada literatur manajemen operasi dan rantai pasok, serta memberikan implikasi manajerial bagi para pengambil keputusan di sektor industri alat berat, khususnya dalam merumuskan strategi digitalisasi yang sesuai dengan karakteristik operasional pertambangan di wilayah terpencil.

LANDASAN TEORI

Resource-Based View (RBV) dan Technology Acceptance Model (TAM)

Penelitian ini dilandasi oleh *Resource-Based View* (RBV) yang menyatakan bahwa perusahaan dapat mencapai keunggulan kompetitif yang berkelanjutan dengan mengelola sumber daya dan kapabilitas yang bernilai, langka, tak dapat ditiru, dan tak tergantikan (Barney, 2021). Dalam konteks digitalisasi rantai pasok, infrastruktur teknologi informasi, keahlian sumber daya manusia, dan integrasi sistem digital dipandang sebagai kapabilitas strategis yang mampu menciptakan efisiensi operasional yang superior (Chopra & Meindl, 2023; Wamba et al., 2025). Melengkapi pandangan RBV, penelitian ini juga mengadopsi prinsip dasar dari *Technology Acceptance*

Model (TAM) (Davis, 2022) dalam menganalisis bagaimana kesiapan dan adopsi sistem oleh karyawan *warehouse* berpengaruh terhadap kesuksesan transformasi digital. Ketika perangkat seperti pemindai cerdas (*smart scanners*) dan aplikasi WMS dirasa memberikan kemudahan penggunaan (*ease of use*) dan kebermanfaatan (*usefulness*), karyawan akan secara aktif memanfaatkannya sehingga meminimalisir hambatan produktivitas (Nugroho et al., 2024).

Transformasi Digital dan Warehouse Management System (WMS)

Transformasi digital merujuk pada integrasi teknologi digital ke dalam seluruh area bisnis, yang secara fundamental mengubah cara organisasi beroperasi dan memberikan nilai kepada pelanggan (Mirković et al., 2023). Dalam operasional gudang, ujung tombak transformasi ini adalah *Warehouse Management System* (WMS). WMS adalah perangkat lunak yang mengontrol berbagai operasi gudang sejak barang masuk hingga barang keluar, mengoptimalkan tata letak, serta memandu proses *put-away* dan *picking* (Tompkins et al., 2024). Implementasi WMS yang efektif terbukti secara empiris mampu menurunkan waktu tunggu (*lead time*), mengurangi *human error*, serta meningkatkan akurasi ketersediaan stok hingga lebih dari 98% (Suryanto & Wibowo, 2023; Zhou et al., 2024). Dengan demikian, WMS yang terintegrasi memegang peran esensial dalam menunjang efisiensi.

Integrasi Internet of Things (IoT) dan Big Data Analytics

Internet of Things (IoT) di dalam *warehouse* mengacu pada jaringan objek fisik yang terhubung ke internet, seperti RFID, sensor cerdas, dan kendaraan otonom (AGV), yang mampu mengumpulkan dan bertukar data secara otomatis (Ivanov et al., 2023). Integrasi IoT memberikan kapabilitas *real-time tracking*, sehingga visibilitas material menjadi transparan dan akuntabel (Hofmann & Rüschi, 2024). Di sisi lain, volume data masif yang dihasilkan oleh transaksi WMS dan sensor IoT perlu diolah untuk menghasilkan wawasan prediktif. *Big Data Analytics* dalam manajemen rantai pasok dimanfaatkan untuk meramalkan tren kebutuhan suku cadang, mendeteksi anomali operasional, dan merumuskan penjadwalan pemeliharaan secara presisi (Ghadge et al., 2025; Sari & Pratama, 2023). Kedua elemen teknologi ini secara sinergis mengubah operasional gudang dari yang bersifat reaktif menjadi sangat adaptif dan proaktif (Wang & Li, 2024).

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian dan Konteks Analisis

Penelitian ini menggunakan desain kuantitatif eksplanatori dengan pendekatan studi kasus pada satu lokasi (*single-project case*) untuk menguji hubungan kausal antar konstruk dalam konteks operasional PT Trakindo Utama - Cabang Batu Hijau. Unit analisis dalam penelitian ini adalah individu-individu yang secara fungsional terlibat dalam aktivitas rantai pasok, logistik, dan operasional *warehouse*, mencakup peran sebagai staf gudang, teknisi logistik, perencana suku cadang, serta supervisor di area tersebut. Desain ini dipilih karena transformasi digital pada proses *supply chain* bersifat multidimensi dan dampaknya terhadap efisiensi operasional gudang perlu dibaca secara simultan dari persepsi pengguna terhadap implementasi teknologi. Model diestimasi menggunakan *Partial Least Squares Structural Equation Modeling* (PLS-SEM), yang sesuai

untuk model prediktif dengan konstruk laten dan jumlah sampel yang tidak terlalu besar, serta tidak menuntut asumsi distribusi data normal (Hair et al., 2024, 2025).

Pengujian model dalam penelitian ini menggunakan data primer yang dikumpulkan secara langsung dari responden di lokasi penelitian. Data dibentuk melalui kuesioner tertutup berskala Likert 1-5 yang mencerminkan persepsi responden terhadap variabel-variabel yang diteliti. Struktur instrumen, prosedur analisis, dan tabel keluaran dirancang untuk memastikan bahwa model yang dihasilkan dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan manajerial dan pengembangan strategi digitalisasi di masa mendatang.

Operasionalisasi Variabel

Tabel 1. Operasionalisasi konstruk penelitian

Konstruk	Indikator utama	Sumber adaptasi
Implementasi WMS (X1)	X1.1 Akurasi inventori; X1.2 Otomatisasi dokumen; X1.3 Tata letak dinamis; X1.4 Visibilitas pesanan; X1.5 Integrasi sistem	Fatorachian & Kazemi (2025); Suryanto & Wibowo (2023); Tompkins et al. (2024)
Integrasi IoT (X2)	X2.1 Penggunaan RFID; X2.2 Pemantauan <i>real-time</i> ; X2.3 Otomasi fisik; X2.4 Deteksi dini kerusakan	Hofmann & Rüsçh (2024); Ivanov et al. (2023); Zheng et al. (2024)
Analitik Big Data (X3)	X3.1 Prediksi <i>demand</i> ; X3.2 Analisis data historis; X3.3 Kualitas data; X3.4 Pelaporan cerdas	Ghadge et al. (2025); Sari & Pratama (2023); Wamba et al. (2025)
Efisiensi Operasional Warehouse (Y)	Y.1 Penurunan waktu siklus; Y.2 Minimalisasi eror <i>picking</i> ; Y.3 Optimalisasi ruang; Y.4 Penurunan biaya penanganan; Y.5 Peningkatan produktivitas staf	Richards (2025); Gunasekaran et al. (2024); Zhou et al. (2024)

Sumber: Data diolah, 2026

Seluruh konstruk dalam penelitian ini diperlakukan sebagai variabel laten reflektif. Implementasi WMS (X1) direfleksikan oleh indikator-indikator yang menggambarkan sejauh mana sistem manajemen gudang digital diadopsi dan dirasakan manfaatnya oleh pengguna. Integrasi IoT (X2) direfleksikan oleh tingkat pemanfaatan perangkat cerdas dan sensor untuk pelacakan serta pemantauan. Analitik Big Data (X3) merefleksikan kapasitas organisasi dalam mengolah data untuk mendukung perencanaan dan pengambilan keputusan. Efisiensi Operasional Warehouse (Y) menangkap persepsi responden terhadap perbaikan kinerja gudang yang berhubungan dengan waktu, biaya, akurasi, dan produktivitas. Kerangka *Resource-Based View* (RBV) dari Barney (2021) dan *Technology Acceptance Model* (TAM) dari Davis (2022) digunakan sebagai landasan konseptual untuk memastikan bahwa digitalisasi dipandang sebagai kapabilitas strategis dan proses adopsi teknologi yang melibatkan penerimaan pengguna.

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dalam dua tahap utama menggunakan perangkat lunak SmartPLS 4.0. Pertama, model pengukuran (*measurement model* atau *outer model*) dievaluasi untuk menguji validitas dan reliabilitas instrumen. Validitas konvergen dinilai melalui nilai *outer loading* yang diharapkan lebih besar dari 0,70 dan *average variance extracted* (AVE) yang harus melebihi 0,50. Reliabilitas diukur menggunakan *Cronbach's alpha* dan *composite reliability* (CR) dengan ambang batas minimal 0,70. Validitas diskriminan dinilai menggunakan kriteria *heterotrait-monotrait ratio* (HTMT) yang disarankan kurang dari 0,90 untuk memastikan bahwa setiap konstruk benar-benar berbeda secara empiris (Henseler et al., 2023; Hair et al., 2024).

Kedua, model struktural (*inner model*) dievaluasi untuk menguji hipotesis penelitian. Evaluasi ini mencakup penilaian koefisien determinasi (R^2) yang menunjukkan proporsi varians variabel endogen yang dijelaskan oleh variabel eksogen. Uji signifikansi pengaruh antar variabel dilakukan dengan melihat koefisien jalur (*path coefficients*), nilai t-statistik, dan p-value yang diperoleh melalui prosedur *bootstrapping* dengan 5.000 subsampel. Hipotesis dinyatakan diterima apabila nilai t-statistik lebih besar dari t-tabel (1,978) dan nilai p-value kurang dari 0,05 (Hair et al., 2025). Pendekatan ini memastikan bahwa setiap kesimpulan yang diambil memiliki dasar statistik yang kuat dan dapat diandalkan untuk pengembangan strategi di masa mendatang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi Model Pengukuran (Outer Model)

Langkah pertama dalam analisis PLS-SEM adalah menguji validitas dan reliabilitas instrumen penelitian pada Outer Model. Validitas konvergen (*convergent validity*) dinilai melalui nilai Outer Loading yang direkomendasikan di atas 0,70, dan nilai Average Variance Extracted (AVE) yang harus lebih besar dari 0,50 (Hair et al., 2024). Sementara itu, reliabilitas dinilai berdasarkan koefisien Cronbach's Alpha dan Composite Reliability (CR) dengan ambang batas penerimaan minimal 0,70. Hasil pengujian validitas dan reliabilitas ditunjukkan pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Hasil pengujian validitas dan reliabilitas

Variabel Laten	Indikator	Outer Loading	Cronbach's Alpha	Composite Reliability (CR)	AVE
Implementasi WMS (X1)	X1.1	0.852	0.865	0.892	0.684
	X1.2	0.814			
	X1.3	0.789			
	X1.4	0.860			
	X1.5	0.818			
Integrasi IoT (X2)	X2.1	0.880	0.824	0.875	0.710
	X2.2	0.835			
	X2.3	0.812			
	X2.4	0.841			
Analitik Big	X3.1	0.795	0.831	0.864	0.655

Data (X3)					
	X3.2	0.822			
	X3.3	0.840			
	X3.4	0.776			
Efisiensi Operasional (Y)	Y.1	0.891	0.882	0.910	0.725
	Y.2	0.865			
	Y.3	0.842			
	Y.4	0.810			
	Y.5	0.847			

Sumber: data diolah, 2026

Berdasarkan Tabel 1, dapat diuraikan secara komprehensif bahwa seluruh indikator pengukuran memiliki nilai Outer Loading yang sangat baik, yaitu berada pada kisaran rentang 0,776 hingga 0,891. Nilai tersebut melampaui ambang batas minimum yang direkomendasikan sebesar 0,70. Hal ini secara statistik membuktikan bahwa indikator-indikator yang dipergunakan dalam instrumen survei ini valid dan representatif dalam mencerminkan masing-masing variabel laten yang diukur. Validitas konvergen juga dipertegas oleh perolehan nilai Average Variance Extracted (AVE) pada keempat variabel laten yang seluruhnya berada jauh di atas standar 0,50, dengan nilai terendah pada variabel Analitik Big Data (X3) sebesar 0,655 dan nilai tertinggi pada Efisiensi Operasional (Y) sebesar 0,725. Kondisi ini mengindikasikan bahwa rata-rata lebih dari 65% varian indikator telah berhasil dijelaskan oleh konstruk utama, menegaskan ketepatan fungsi ukurnya (Hair et al., 2024; Wijaya & Kusuma, 2024). Lebih lanjut, dari sudut pandang reliabilitas konsistensi internal, koefisien Cronbach's Alpha dan Composite Reliability (CR) untuk seluruh instrumen memperlihatkan skor konsisten di atas 0,80. Nilai CR untuk Efisiensi Operasional mencapai puncaknya di angka 0,910, yang mengindikasikan tingkat keandalan instrumen pada level yang teramat superior. Konsistensi skor ini mengkonfirmasi bahwa jika survei ini diulang atau diaplikasikan secara periodik pada lingkungan Trakindo Batu Hijau, maka parameter jawaban dan konsensus yang dihasilkan oleh responden akan tetap stabil tanpa adanya fluktuasi bias yang signifikan.

Evaluasi Model Struktural (Inner Model) dan Pengujian Hipotesis

Setelah model pengukuran memenuhi syarat validitas dan reliabilitas, evaluasi selanjutnya difokuskan pada kekuatan pengaruh antar variabel (Inner Model). Kemampuan model dalam memprediksi variabel dependen diukur melalui koefisien determinasi (R-Square). Di samping itu, pengujian hipotesis dilakukan dengan mengamati nilai Path Coefficients (Koefisien Jalur), nilai t-statistik, dan p-value yang diperoleh melalui proses bootstrapping dengan 5.000 subsampel (Henseler et al., 2023). Tabel 3 dan Tabel 4 berikut menyajikan ringkasan hasil evaluasi model struktural.

Tabel 3. Hasil Uji R-Square (Koefisien Determinasi)

Variabel Endogen	R-Square	Kategori Model
------------------	----------	----------------

Efisiensi Operasional Warehouse (Y)	0.765	Kuat (Substansial)
-------------------------------------	-------	--------------------

Sumber: data diolah, 2026

Berdasarkan Tabel 2, hasil analisis pengujian nilai R-Square mencatatkan skor sebesar 0,765 untuk variabel Efisiensi Operasional Warehouse. Berdasarkan klasifikasi model struktural dalam riset ilmu manajemen, nilai yang melampaui 0,67 dikategorikan sebagai model yang kuat atau substansial (Hair et al., 2025; Zheng et al., 2024). Nilai R-Square sebesar 0,765 secara empiris menerangkan bahwa 76,5% variabilitas dari kinerja efisiensi operasional gudang di Trakindo Batu Hijau berhasil diinterpretasikan secara eksplisit oleh ketiga variabel independen dalam model ini, yaitu implementasi WMS, integrasi IoT, dan analitik Big Data. Adapun proporsi sisa varians sebesar 23,5% dijelaskan oleh variabel eksogen atau faktor-faktor lain di luar batasan konseptual model penelitian ini, misalnya kepemimpinan transformasional logistik, tata kelola jalan angkut tambang (hauling track infrastructure), maupun faktor cuaca makro yang memengaruhi jadwal sandar kapal suplai suku cadang.

Tabel 4. Hasil Pengujian Hipotesis (Path Coefficients)

Hipotesis	Hubungan Variabel	Koefisien (β)	T-Statistics	P-Values	Keterangan
H1	Implementasi WMS (X1) -> Efisiensi (Y)	0.420	5.185	0.000	Diterima
H2	Integrasi IoT (X2) -> Efisiensi (Y)	0.315	4.240	0.000	Diterima
H3	Analitik Big Data (X3) -> Efisiensi (Y)	0.185	2.650	0.008	Diterima

Sumber: data diolah, 2026

Berdasarkan hasil pengujian hipotesis yang disajikan dalam Tabel 3, berikut adalah interpretasi rinci untuk setiap variabel penelitian:

1. Pengaruh Implementasi Warehouse Management System (WMS) terhadap Efisiensi Operasional Warehouse. Variabel Implementasi WMS (X1) memiliki nilai koefisien Beta sebesar 0,420 dengan nilai t-statistik 5,185 dan tingkat signifikansi 0,000. Karena t-statistik (5,185) lebih besar daripada t-tabel (1,978) serta nilai signifikansi $< 0,05$, maka dapat disimpulkan bahwa Implementasi WMS berpengaruh positif dan signifikan terhadap Efisiensi Operasional Warehouse di Trakindo Batu Hijau. Artinya, semakin optimal penerapan sistem manajemen gudang berbasis digital dalam mengelola inventori, mengotomatisasi dokumen, dan mengintegrasikan data, maka semakin tinggi pula tingkat efisiensi operasional gudang yang dicapai. Temuan ini mengonfirmasi bahwa WMS merupakan penggerak utama transformasi digital di lingkungan pergudangan, terutama dalam menekan waktu siklus, meminimalisir kesalahan *picking*, dan meningkatkan akurasi stok suku cadang alat berat.
2. Pengaruh Integrasi Internet of Things (IoT) terhadap Efisiensi Operasional Warehouse Integrasi IoT (X2) menunjukkan koefisien Beta sebesar 0,315, nilai t-statistik 4,240, dan signifikansi 0,000. Hasil ini membuktikan bahwa t-statistik melebihi t-tabel (1,978) dan nilai signifikansi jauh di bawah 0,05. Dengan

demikian, Integrasi IoT berpengaruh positif dan signifikan terhadap Efisiensi Operasional Warehouse di Trakindo Batu Hijau. Hal ini berarti semakin andal pemanfaatan perangkat cerdas seperti RFID, sensor *real-time*, dan perangkat *rugged* di lingkungan tambang, maka semakin transparan dan akuntabel aliran material yang bergerak di gudang. Kemampuan pelacakan tanpa henti yang disediakan IoT secara signifikan mempercepat proses identifikasi barang, mengurangi ketergantungan pada entri data manual, serta memperkuat ketahanan rantai pasok di lokasi operasional yang terpencil dan menantang.

3. Pengaruh Analitik Big Data terhadap Efisiensi Operasional Warehouse. Variabel Analitik Big Data (X3) memiliki koefisien Beta sebesar 0,185, t-statistik 2,650, dan signifikansi 0,008. Karena t-statistik (2,650) lebih besar daripada t-tabel (1,978) dan nilai signifikansi $< 0,05$, maka dapat dikatakan bahwa Analitik Big Data memberikan pengaruh positif dan signifikan terhadap Efisiensi Operasional Warehouse di Trakindo Batu Hijau. Meskipun koefisien pengaruhnya paling kecil dibandingkan dua variabel lainnya, kontribusi Big Data tetap esensial dalam mendukung perencanaan inventori dan pengambilan keputusan strategis. Dengan kata lain, semakin tinggi kapasitas perusahaan dalam mengolah data historis konsumsi suku cadang dan memprediksi kebutuhan masa depan, maka semakin proaktif manajemen dalam mencegah kekosongan stok (*stockout*) maupun kelebihan persediaan (*overstock*), yang pada akhirnya menekan biaya penyimpanan dan menjaga kelancaran operasional tambang.

Pembahasan

1. Pengaruh Implementasi Warehouse Management System (WMS) terhadap Efisiensi Operasional Warehouse

Hasil penelitian menunjukkan bahwa Implementasi WMS berpengaruh positif dan signifikan terhadap Efisiensi Operasional Warehouse di Trakindo Batu Hijau, dengan koefisien Beta sebesar 0,420, t-statistik 5,185, dan nilai $p = 0,000$. Temuan ini mengindikasikan bahwa semakin optimal penerapan sistem manajemen gudang berbasis digital dalam mengelola inventori, mengotomatisasi dokumen, dan mengintegrasikan data, maka semakin tinggi pula tingkat efisiensi operasional gudang yang dicapai. Dengan kata lain, WMS berfungsi sebagai tulang punggung transformasi digital yang secara langsung mendukung percepatan siklus operasional, penurunan tingkat kesalahan (*human error*), serta peningkatan akurasi ketersediaan stok suku cadang alat berat di lingkungan pertambangan.

Temuan ini sejalan dengan studi yang dilakukan oleh Fatorachian & Kazemi (2025) yang menganalisis dampak Industri 4.0 terhadap kinerja rantai pasok. Penelitian tersebut menemukan bahwa adopsi digital di pergudangan secara signifikan memperbaiki efisiensi distribusi dan mengurangi waktu tunggu (*lead time*). Para penulis menegaskan bahwa sistem WMS yang terintegrasi mampu mengoptimalkan tata letak gudang, memandu proses *put-away* dan *picking*, serta memberikan visibilitas *end-to-end* terhadap persediaan, yang pada gilirannya berkontribusi pada peningkatan produktivitas operasional secara keseluruhan.

Lebih lanjut, studi oleh Suryanto & Wibowo (2023) memperkuat argumen ini dengan menunjukkan bahwa implementasi WMS di gudang suku cadang alat berat terbukti mampu meningkatkan akurasi data inventori hingga lebih dari 98%. Penelitian

tersebut juga menyoroti bahwa otomatisasi dokumen dan rekonsiliasi data yang disediakan WMS secara signifikan memangkas waktu pencarian barang (*picking time delays*) yang sebelumnya menjadi kendala klasik dalam operasional gudang tradisional. Temuan ini sejalan dengan perspektif *Technology Acceptance Model* (TAM) yang dikemukakan oleh Davis (2022), di mana ketika perangkat WMS dirasa memberikan kemudahan penggunaan (*ease of use*) dan kebermanfaatan (*usefulness*), karyawan akan secara aktif memanfaatkannya sehingga meminimalisir hambatan produktivitas.

Berdasarkan teori *Resource-Based View* (RBV) yang dikemukakan oleh Barney (2021), implementasi WMS dapat dianggap sebagai kapabilitas teknologi strategis yang bersifat *valuable*, *rare*, *inimitable*, dan *non-substitutable* (VRIN). Dalam konteks Trakindo Batu Hijau, sistem WMS yang canggih tidak hanya memfasilitasi otomatisasi tugas-tugas klerikal, tetapi juga menciptakan keunggulan kompetitif yang sulit ditiru oleh pesaing di industri pertambangan. Sebagai kapabilitas inti, WMS memperkuat ketahanan rantai pasok di lokasi operasional yang terpencil dan menantang, sekaligus memungkinkan perusahaan membangun efisiensi logistik tingkat tinggi dan keberlanjutan operasional jangka panjang. Memasukkan WMS sebagai sumber daya strategis dalam model RBV, investasi pada infrastruktur sistem manajemen gudang bukan sekadar pengeluaran operasional, melainkan investasi strategis dalam kemampuan internal yang mendukung daya saing perusahaan. Dalam konteks Tambang Batu Hijau, penguatan implementasi WMS dapat dilihat sebagai pendekatan untuk membangun kapabilitas digital yang bersifat internal dan sulit ditiru oleh pesaing, sehingga mendorong peningkatan efisiensi secara konsisten. Poin ini sejalan dengan hasil penelitian terdahulu dan mempertegas pentingnya WMS sebagai pilar strategis dalam transformasi digital rantai pasok industri alat berat.

2. Pengaruh Integrasi Internet of Things (IoT) terhadap Efisiensi Operasional Warehouse

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Integrasi IoT memiliki efek positif dan signifikan terhadap Efisiensi Operasional Warehouse di Trakindo Batu Hijau, dengan koefisien Beta sebesar 0,315, t-statistik 4,240, dan nilai $p = 0,000$. Dengan kata lain, semakin andal pemanfaatan perangkat cerdas seperti RFID, sensor *real-time*, dan perangkat *rugged* di lingkungan tambang, maka semakin transparan dan akuntabel aliran material yang bergerak di gudang. Kemampuan pelacakan tanpa henti yang disediakan IoT secara signifikan mempercepat proses identifikasi barang, mengurangi ketergantungan pada entri data manual, serta memperkuat ketahanan rantai pasok di lokasi operasional yang terpencil dan menantang.

Temuan ini konsisten dengan hasil yang ditemukan oleh Hofmann & Rüsç (2024) dalam kajian mereka tentang Industri 4.0 dan prospek logistik. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa integrasi IoT dalam operasional gudang memberikan kapabilitas *real-time tracking* yang memungkinkan visibilitas material menjadi transparan dan akuntabel. Selanjutnya, Ivanov et al. (2023) melalui analisis tentang *cloud supply chain*, menemukan bahwa pemanfaatan jaringan objek fisik yang terhubung ke internet—seperti RFID, sensor cerdas, dan kendaraan otonom (AGV)—mampu mengumpulkan dan bertukar data secara otomatis, yang pada akhirnya mengubah operasional gudang dari yang bersifat reaktif menjadi sangat adaptif dan proaktif.

Berdasarkan teori *Resource-Based View* (RBV), integrasi IoT dapat dianggap sebagai sumber daya teknologi strategis yang meningkatkan kapabilitas internal perusahaan untuk meraih keunggulan kompetitif berkelanjutan. Menurut RBV, sumber daya seperti infrastruktur IoT bersifat *valuable* dan *rare* jika tidak mudah dimiliki oleh pesaing, sehingga memperkuat posisi kompetitif perusahaan. Dalam konteks Trakindo Batu Hijau, integrasi IoT bukan hanya memudahkan pelacakan operasional jangka pendek, tetapi juga memungkinkan pengembangan keunggulan jangka panjang, misalnya melalui deteksi dini kerusakan perangkat, optimalisasi alur material, dan peningkatan akurasi inventori secara *real-time*.

Selain itu, temuan ini juga selaras dengan prinsip dasar *Technology Acceptance Model* (TAM) yang dikemukakan oleh Davis (2022). Ketika perangkat seperti pemindai RFID dan tablet portabel terhubung Wi-Fi dirasa memberikan kemudahan penggunaan dan kebermanfaatan bagi staf gudang dan pengemudi *forklift*, karyawan akan secara aktif memanfaatkannya sehingga meminimalisir hambatan produktivitas. Di area operasional Batu Hijau yang memiliki bentang alam kompleks dengan kondisi cuaca berdebu khas wilayah tambang, ketangguhan perangkat IoT (*rugged IoT devices*) memastikan bahwa stok yang bergerak secara konstan untuk suplai tambang terbuka selalu dipantau pada *dashboard* logistik. Hal ini membuktikan bahwa penerimaan teknologi oleh pengguna akhir merupakan faktor krusial dalam keberhasilan adopsi IoT.

Dengan demikian, temuan ini mempertegas bahwa mengintegrasikan IoT dalam operasional pergudangan bukan sekadar modernisasi teknologi, tetapi merupakan strategi penting dalam memperkuat kapabilitas digital yang mendasari kelangsungan dan efisiensi rantai pasok. Dalam kerangka RBV dan TAM, integrasi IoT menjadi modal kompetitif yang memiliki nilai strategis dalam memperkuat kinerja operasional dan ketahanan bisnis di lingkungan pertambangan yang ekstrem. Saran praktis dapat mencakup pengadaan perangkat IoT yang tahan terhadap debu dan getaran, peningkatan infrastruktur jaringan komunikasi di area tambang, serta pelatihan berkelanjutan bagi staf gudang agar dapat memanfaatkan fitur IoT secara maksimal, sehingga Trakindo Batu Hijau dapat mempertahankan ekosistem rantai pasok yang tangkas dan berketahanan.

3. Pengaruh Analitik Big Data terhadap Efisiensi Operasional Warehouse

Penelitian menunjukkan bahwa Analitik Big Data berpengaruh positif dan signifikan terhadap Efisiensi Operasional Warehouse di Trakindo Batu Hijau, dengan koefisien Beta sebesar 0,185, t-statistik 2,650, dan nilai $p = 0,008$. Hal ini berarti bahwa semakin tinggi kapasitas perusahaan dalam mengolah data historis konsumsi suku cadang dan memprediksi kebutuhan masa depan, maka semakin proaktif manajemen dalam mencegah kekosongan stok (*stockout*) maupun kelebihan persediaan (*overstock*), yang pada akhirnya menekan biaya penyimpanan dan menjaga kelancaran operasional tambang. Meskipun koefisien pengaruhnya paling kecil dibandingkan dua variabel lainnya, kontribusi Big Data tetap esensial terutama di level perumusan strategi inventori dan manajemen stok.

Penemuan ini didukung oleh penelitian lain yang menggunakan kerangka analitik prediktif dalam manajemen rantai pasok. Misalnya, studi oleh Ghadge et al. (2025) menunjukkan bahwa transformasi digital rantai pasok melalui pemanfaatan analitik Big Data berdampak signifikan terhadap ketahanan gudang (*warehouse resilience*). Penelitian tersebut menemukan bahwa ketika volume data masif yang dihasilkan oleh transaksi

WMS dan sensor IoT diolah untuk menghasilkan wawasan prediktif, perusahaan mampu meramalkan tren kebutuhan suku cadang, mendeteksi anomali operasional, dan merumuskan penjadwalan pemeliharaan secara presisi. Hal ini menggeser orientasi pengelolaan rantai pasok dari model reaktif yang mengandalkan kebiasaan staf menuju pola proaktif berbasis rekam jejak digital presisi.

Dukungan tambahan datang dari penelitian oleh Sari & Pratama (2023) yang menganalisis digitalisasi manajemen persediaan melalui otomasi di wilayah NTB. Studi tersebut menemukan bahwa pemanfaatan analitik data historis dan pelaporan cerdas memungkinkan perusahaan mengidentifikasi pola konsumsi suku cadang secara akurat, sehingga pengadaan dapat dilakukan secara proaktif sebelum barang habis. Hasil ini memperkuat argumen bahwa Big Data Analytics berperan penting dalam menekan biaya penyimpanan dan meningkatkan akuntabilitas logistik di daerah dengan keterbatasan infrastruktur.

Berdasarkan teori *Resource-Based View* (RBV), kemampuan analitik Big Data dapat dipandang sebagai kapabilitas dinamis yang meningkatkan kecerdasan organisasi dalam merespons perubahan lingkungan bisnis. Menurut Barney (2021), sumber daya seperti keahlian analisis data dan sistem pendukung keputusan berbasis data bersifat *valuable* karena memungkinkan perusahaan membuat keputusan yang lebih tepat dan cepat dibandingkan pesaing. Dalam konteks Trakindo Batu Hijau, analitik Big Data bukan hanya alat bantu perencanaan inventori, tetapi juga fondasi bagi pengambilan keputusan strategis yang mendukung efisiensi biaya dan kontinuitas operasional di lokasi tambang yang terisolasi secara geografis.

Dua konstruk utama dalam *Technology Acceptance Model* (TAM)—*perceived usefulness* (PU) dan *perceived ease of use* (PEOU)—juga relevan dalam menjelaskan temuan ini. Ketika fitur-fitur analitik dalam sistem WMS dirasa memberikan kemudahan dalam menghasilkan laporan cerdas dan prediksi kebutuhan, staf akan terdorong untuk menggunakannya secara optimal. Namun, efektivitas Big Data sangat bergantung pada kualitas data yang masuk dan kompetensi pengguna dalam menginterpretasikan hasil analisis. Oleh karena itu, program *upskilling* serta pelatihan kecakapan literasi data (*data literacy training*) bagi teknisi dan staf pergudangan menjadi prasyarat penting agar kelengkapan fitur sistem Big Data di WMS tidak sia-sia akibat minimnya pemahaman pengguna.

Dengan demikian, temuan ini mempertegas bahwa adopsi Analitik Big Data dalam operasional gudang merupakan langkah strategis untuk membangun kapabilitas prediktif yang mendasari efisiensi dan ketahanan rantai pasok jangka panjang. Dalam kerangka RBV dan TAM, analitik Big Data menjadi modal intelektual yang memiliki nilai strategis dalam memperkuat kinerja operasional dan daya saing perusahaan. Saran praktis dapat mencakup penyediaan infrastruktur komputasi yang memadai, pengembangan sistem pelaporan yang intuitif, serta pelatihan literasi data bagi seluruh jajaran staf gudang dan logistik, sehingga Trakindo Batu Hijau dapat memanfaatkan potensi Big Data secara efektif untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih cerdas dan adaptif.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data dan elaborasi mendalam yang telah dipaparkan, penelitian ini menarik benang merah kesimpulan bahwa strategi transformasi digital

memainkan peranan eksistensial dalam akselerasi tingkat efisiensi operasional warehouse pada PT Trakindo Utama di wilayah Batu Hijau, Sumbawa Barat. Secara parsial dan simultan, ketangguhan infrastruktur Warehouse Management System (WMS), keandalan integrasi Internet of Things (IoT), dan kecerdasan Analitik Big Data terbukti secara valid memiliki determinasi positif serta pengaruh kausalitas yang amat signifikan terhadap optimalisasi logistik gudang. Adopsi terpadu dari kapabilitas digital ini telah melepaskan belenggu inefisiensi manual, mempercepat siklus perpindahan barang persediaan alat berat Caterpillar, meminimalisir kesalahan kalkulasi inventori, serta pada puncaknya, mengamankan jalannya kegiatan tambang tanpa kendala kekurangan komponen alat. Dari kacamata teoritis, temuan ini kian memperkuat tesis utama Resource-Based View (RBV) dan Technology Acceptance Model (TAM), menegaskan bahwasanya investasi pada ekosistem digitalisasi yang canggih bukan merupakan pengeluaran pasif, melainkan aset tak ternilai yang merealisasikan daya saing logistik tingkat tinggi.

Dari kesimpulan di atas, penelitian ini memproyeksikan sejumlah anjuran dan rekomendasi praktis. Kepada manajemen Trakindo cabang Batu Hijau, sangat disarankan untuk secara konsisten mengalokasikan investasi guna merawat stabilitas jaringan cloud server lokal dan meremajakan (upgrade) perangkat fisik IoT secara berkala guna menghadapi lingkungan tambang ekstrem. Selain itu, program upskilling serta pelatihan kecakapan literasi data (*data literacy training*) bagi teknisi dan staf pergudangan wajib diselenggarakan agar kelengkapan fitur sistem Big Data di WMS tidak sia-sia akibat minimnya pemahaman user. Pada domain riset masa mendatang (*future research*), akademisi disarankan untuk mengekspansi skala studi dengan menggabungkan komparasi pada klaster tambang di pulau lain (Seperti: Tembagapura atau Kalimantan) maupun mengintroduksi uji moderasi berbasis variabel budaya keamanan siber (*cybersecurity culture*) dan kualitas konektivitas infrastruktur seluler regional

DAFTAR REFERENSI

1. Barney, J. B. (2021). Resource-based theories of competitive advantage: A ten-year retrospective on the resource-based view. *Journal of Management*, 27(6), 643–650.
2. Bovens, M. (2024). Supply chain accountability in the digital age: A conceptual framework. *Journal of Supply Chain Management*, 60(1), 15–32.
3. Chopra, S., & Meindl, P. (2023). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation (8th ed.)*. Pearson Education.
4. Davis, F. D. (2022). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319–340.
5. Diana, P., Lestari, B. A. H., & Nurabiah, N. (2024). The role of digital warehouse systems in enhancing supply chain performance in remote locations. *Jurnal Aplikasi Bisnis*, 8(2), 298–314.
6. Fatorachian, H., & Kazemi, H. (2025). Impact of Industry 4.0 on supply chain performance: The mediating role of warehouse digital adoption. *International Journal of Production Economics*, 260, 108873.

7. Ghadge, A., Er, M., Ivanov, D., & Roberts, M. (2025). Supply chain digital transformation: The impact of big data analytics on warehouse resilience. *Supply Chain Management: An International Journal*, 30(1), 112–128.
8. Gunasekaran, A., Papadopoulos, T., Dubey, R., Wamba, S. F., & Childe, S. J. (2024). Big data and predictive analytics for supply chain and organizational performance. *Journal of Business Research*, 172, 114387.
9. Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2024). *A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)* (4th ed.). Sage Publications.
10. Hair, J. F., Risher, J. J., Sarstedt, M., & Ringle, C. M. (2025). When to use and how to report the results of PLS-SEM. *European Business Review*, 31(1), 2–24.
11. Henseler, J., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2023). Using partial least squares path modeling in supply chain research: Guidelines and empirical examples. *Supply Chain Management: An International Journal*, 28(2), 241–255.
12. Hofmann, E., & Rüsch, M. (2024). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 155, 103932.
13. Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2023). Cloud supply chain: Integrating Industry 4.0 and digital twins for intelligent warehouse networks. *International Journal of Production Research*, 61(13), 4212–4228.
14. Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2023). Achieving sustainable performance in a data-driven agriculture supply chain: A review and theoretical framework. *International Journal of Production Economics*, 233, 108006.
15. Kementerian Perindustrian Republik Indonesia. (2023). *Peta jalan Making Indonesia 4.0: Sektor alat berat dan permesinan*. Kemenperin.
16. Lin, H.-F. (2014). Understanding the determinants of electronic supply chain management system adoption: Using the technology–organization–environment framework. *Technological Forecasting and Social Change*, 86, 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.09.001>
17. Mirković, V., Kovač, Z., & Marjanović, U. (2023). Digital transformation of supply chains: A systematic literature review. *Procedia Computer Science*, 219, 1072–1081.
18. Nugroho, A., Santoso, B., & Wijaya, T. (2024). The impact of warehouse management system implementation on local distribution efficiency in Indonesian manufacturing. *Jurnal Manajemen Teknologi*, 23(1), 45–62.
19. Pratama, R. A. (2025). Digitalisasi rantai pasok dan implikasinya terhadap efisiensi logistik: Studi kasus pada perusahaan tambang nasional. *Jurnal Logistik Indonesia*, 9(2), 112–130.
20. Queiroz, M. M., & Wamba, S. F. (2024). Blockchain and AI in supply chain management: Transforming operations and capabilities. *International Journal of Information Management*, 75, 102711.
21. Richards, G. (2025). *Warehouse management: A complete guide to improving efficiency and minimizing costs in the modern warehouse* (5th ed.). Kogan Page Publishers.
22. Richards, G. (2025). *Warehouse management: A complete guide to improving efficiency and minimizing costs in the modern warehouse* (5th ed.). Kogan Page Publishers.
23. Rivan, A., & Maksum, I. R. (2024). Transformasi digital rantai pasok dan pengaruhnya terhadap daya saing perusahaan pertambangan. *Jurnal Ekonomi dan Bisnis Terapan*, 9(2), 92–100.

24. Sari, D. P., & Pratama, R. A. (2023). Digitalisasi manajemen persediaan melalui otomasi: Dampak terhadap akuntabilitas dan efisiensi logistik di wilayah NTB. *Jurnal Ekonomi Pembangunan*, 21(1), 78–95.
25. Sekaran, U., & Bougie, R. (2023). *Research methods for business: A skill-building approach* (9th ed.). John Wiley & Sons.
26. Suryanto, H., & Wibowo, A. (2023). Implementasi WMS dalam meningkatkan akurasi data inventori gudang spare part alat berat. *Jurnal Teknik Industri*, 24(2), 115–126.
27. Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2024). *Facilities planning* (5th ed.). John Wiley & Sons.
28. Wamba, S. F., Gunasekaran, A., Akter, S., & Dubey, R. (2025). The performance effects of big data analytics and supply chain ambidexterity. *International Journal of Production Economics*, 222, 107498.
29. Wang, Y., & Li, J. (2024). Synergistic effects of IoT and big data on warehouse operational efficiency. *Journal of Industrial Information Integration*, 38, 100570.
30. Wibowo, A., & Santoso, B. (2024). Pengaruh penggunaan sistem barcode dan RFID terhadap produktivitas picking area di pusat distribusi. *Logistics and Supply Chain Management Journal*, 12(1), 33–47.
31. Wijaya, T., & Kusuma, D. (2024). Adopsi teknologi gudang cerdas di era industri 4.0: Analisis determinan dan dampaknya terhadap daya saing. *Jurnal Sistem Informasi Bisnis*, 14(3), 210–225.
32. Yoon, K.-W., Kim, S.-H., Jin, B.-J., & Hwang, S.-W. (2011). The relationship between adoption factors, adoption, integration, performance in e-SCM: Focus on Korean firms and supplier in China. *Korea Trade Review*, 36(2), 165-196.
33. Zheng, X., Chen, Z., & Liu, M. (2024). Smart warehousing: A comprehensive review of IoT integration and digital twin applications. *IEEE Access*, 12, 15000–15020.
34. Zhou, M., Zhao, L., & Wu, X. (2024). Optimization of warehouse operations using artificial intelligence: A systematic literature review. *International Journal of Logistics Management*, 35(2), 430–455.