



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 17851-17863

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Systematic Literature Review AI pada WMS untuk Akurasi Stok dan Produktivitas Pergudangan

Wahyudin Ahmadi¹, Anton Sutriyana², Tita Puspita Sari³, Muhammad Afrija Agung Nurpratama⁴

¹⁻⁴Universitas Panca Sakti Bekasi

majnunahmadi@gmail.com, aputra.ap95@gmail.com*, Tita.puspita.sari75@gmail.com, agungafrija@gmail.com

Abstrak

Perkembangan teknologi Artificial Intelligence (AI) telah membawa transformasi signifikan dalam pengelolaan sistem pergudangan modern, terutama dalam mendukung proses operasional yang lebih akurat, efisien, dan berbasis data. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan literatur secara sistematis mengenai penerapan AI pada Warehouse Management System (WMS) dalam mengoptimalkan akurasi stok dan meningkatkan produktivitas pergudangan. Penelitian menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) dengan mengacu pada kerangka PRISMA 2020 sebagai pedoman dalam proses identifikasi, seleksi, dan analisis literatur. Sebanyak 25 artikel ilmiah yang diterbitkan pada periode 2023–2026 telah diidentifikasi, diseleksi berdasarkan kriteria yang ditetapkan, dan dianalisis untuk memperoleh gambaran mengenai perkembangan penerapan AI dalam sistem pergudangan. Hasil kajian menunjukkan bahwa teknologi yang dominan diterapkan meliputi Machine Learning (ML), Deep Reinforcement Learning (DRL), Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan AI, dan Digital Twin. Pada studi yang menyajikan data kuantitatif, rata-rata peningkatan akurasi stok yang dilaporkan mencapai 28,2%. Penerapan teknologi tersebut juga berkontribusi terhadap optimalisasi proses operasional, peningkatan efisiensi aktivitas pergudangan, percepatan pengambilan keputusan berbasis data, serta pengurangan pemborosan energi dan sumber daya. Meskipun demikian, implementasinya masih menghadapi sejumlah tantangan, seperti keterbatasan infrastruktur teknologi, kompleksitas integrasi dengan sistem yang telah tersedia, kebutuhan terhadap data berkualitas tinggi, serta kesiapan sumber daya manusia. Temuan penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan bagi peneliti, praktisi industri, dan pengembang sistem dalam merancang serta mengembangkan WMS berbasis AI yang lebih efektif, adaptif, dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Artificial Intelligence, Warehouse Management System, Akurasi Stok, Produktivitas Pergudangan, Systematic Literature Review.

1. Latar Belakang

Transformasi digital dan perkembangan Industri 4.0 telah mendorong perubahan dalam pengelolaan pergudangan. Warehouse Management System (WMS) sebagai bagian penting dari operasional gudang dituntut untuk mendukung pengelolaan persediaan secara akurat, efisien, dan adaptif terhadap perubahan kebutuhan operasional. Salah satu permasalahan utama dalam pengelolaan gudang adalah ketidaksesuaian antara stok fisik dan data pada sistem. Kondisi tersebut dapat memengaruhi ketersediaan barang dan kelancaran proses operasional pergudangan. Selain akurasi stok, produktivitas juga menjadi perhatian karena aktivitas penerimaan, penyimpanan, pemantauan, pengambilan, dan pengeluaran barang membutuhkan pengolahan informasi serta pengambilan keputusan yang cepat.

Artificial Intelligence (AI) menawarkan kemampuan analisis data, prediksi, dan pengambilan keputusan yang dapat mendukung pengelolaan inventori dan operasional pergudangan. Tinjauan sistematis oleh Ünal et al. menunjukkan bahwa AI telah diterapkan dalam berbagai aktivitas manajemen inventori [1]. Dalam konteks pergudangan yang lebih luas, Tubis dan Rohman memetakan perkembangan intelligent warehouse pada era Industri 4.0 dan menunjukkan beragam teknologi yang digunakan dalam transformasi pergudangan [2]. Sementara itu, Belter et al. secara khusus meninjau prediksi lintasan pergerakan dalam WMS, yang menunjukkan bahwa pendekatan berbasis teknologi cerdas juga berkembang pada aspek operasional gudang [3].

Perkembangan penelitian terbaru menunjukkan bahwa penerapan AI pada pergudangan semakin beragam. Benmimoun et al. mengkaji optimasi manajemen stok berbasis AI dalam konteks pergudangan logistik [4]. Vaccari et al. mengembangkan pendekatan Machine Learning dan Multi-Criteria Decision-Making untuk cycle counting [5]. Arvind et al. mengintegrasikan Machine Learning dan Internet of Things untuk optimasi inventori [6]. Pada aspek operasional, Arslan menerapkan Digital Twin dengan algoritma dinamis dan AI/ML untuk operasi gudang yang berpusat pada manusia [7] sedangkan Li et al. menerapkan Deep Reinforcement Learning pada sistem

penyimpanan dan pengambilan barang [8] *of the art* penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan AI dalam pergudangan telah berkembang dari penerapan teknologi secara terpisah menuju penggunaan berbagai pendekatan, seperti *Machine Learning*, *Deep Reinforcement Learning*, *integrasi IoT-AI*, dan *Digital Twin*. Namun, penelitian terdahulu masih terfragmentasi berdasarkan teknologi, ruang lingkup, dan indikator kinerja yang dianalisis. Ünal et al. berfokus pada penerapan AI dalam manajemen inventori [1] Tubis dan Rohman mengkaji intelligent warehouse dalam cakupan Industri 4.0 yang lebih luas [2], sedangkan Belter et al. berfokus pada prediksi lintasan dalam WMS [3]. Penelitian lain juga cenderung mengevaluasi teknologi tertentu, seperti *Machine Learning*, *Deep Reinforcement Learning*, *IoT-AI*, atau *Digital Twin*, pada fungsi operasional yang spesifik.

Fragmentasi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan penelitian yang jelas. Pertama, belum terdapat sintesis yang secara khusus memetakan berbagai teknologi AI dalam konteks WMS berdasarkan kontribusinya terhadap akurasi stok dan produktivitas pergudangan secara bersamaan. Kedua, hubungan antara jenis teknologi AI, fungsi penerapannya dalam WMS, dan dampaknya terhadap kedua indikator kinerja tersebut belum dipetakan secara terintegrasi. Ketiga, bukti mengenai peningkatan akurasi stok masih tersebar pada studi-studi individual sehingga belum memberikan gambaran komparatif mengenai besarnya kontribusi AI. Keempat, tantangan implementasi dan arah penelitian masa depan masih dibahas secara terpisah berdasarkan teknologi atau konteks penerapan. Oleh karena itu, diperlukan tinjauan sistematis yang mengintegrasikan bukti-bukti tersebut dalam satu kerangka analisis untuk menjelaskan teknologi AI yang dominan, kontribusinya terhadap akurasi stok dan produktivitas, serta tantangan implementasinya pada WMS.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, kebaruan penelitian ini terletak pada sintesis terintegrasi penerapan AI dalam WMS dengan menempatkan akurasi stok dan produktivitas pergudangan sebagai dua fokus analisis utama secara bersamaan. Penelitian ini memetakan jenis teknologi AI dan fungsi penerapannya, membandingkan kontribusinya terhadap kedua indikator kinerja tersebut, mensintesis bukti kuantitatif peningkatan akurasi stok dari studi yang menyediakan data numerik, serta mengidentifikasi tantangan implementasi dan arah penelitian masa depan berdasarkan 25 artikel yang dianalisis.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan teknologi AI yang paling banyak diterapkan dalam WMS, menganalisis kontribusi penerapan AI terhadap peningkatan akurasi stok, mengevaluasi dampaknya terhadap produktivitas operasional pergudangan, serta mengidentifikasi tantangan implementasi dan arah penelitian masa depan. Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) dengan proses seleksi literatur yang mengacu pada PRISMA 2020.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) yang mengacu pada pedoman PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). PRISMA 2020 digunakan sebagai acuan dalam pelaporan proses seleksi literatur agar tahapan identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan penetapan artikel dapat dijelaskan secara transparan dan dapat direproduksi [9]. Proses penelitian meliputi perumusan pertanyaan penelitian, pencarian literatur, penerapan kriteria inklusi dan eksklusi, seleksi literatur, ekstraksi data, serta sintesis hasil. Berdasarkan keseluruhan proses seleksi, sebanyak 25 artikel ilmiah ditetapkan sebagai korpus analisis.

2.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) dengan mengacu pada pedoman PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Pendekatan ini digunakan untuk mengidentifikasi, menyeleksi, dan mensintesis literatur secara sistematis mengenai penerapan *Artificial Intelligence* (AI) pada *Warehouse Management System* (WMS), khususnya dalam kaitannya dengan optimalisasi akurasi stok dan produktivitas pergudangan. PRISMA 2020 digunakan sebagai acuan dalam pelaporan proses seleksi literatur agar tahapan identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan penetapan artikel dapat dijelaskan secara transparan dan dapat direproduksi [9].

Proses penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan yang saling berkaitan, yaitu perumusan pertanyaan penelitian, pencarian literatur pada database yang telah ditentukan, penerapan kriteria inklusi dan eksklusi, seleksi artikel, ekstraksi data, serta sintesis hasil. Setiap artikel yang terpilih dianalisis berdasarkan teknologi AI yang digunakan, penerapannya dalam konteks WMS, metode penelitian, temuan utama, serta relevansinya terhadap akurasi stok dan produktivitas pergudangan. Proses seleksi menghasilkan 25 artikel ilmiah yang ditetapkan sebagai korpus akhir penelitian.

Analisis terhadap 25 artikel diarahkan oleh empat pertanyaan penelitian (*Research Questions/RQ*), yaitu:

RQ1: Teknologi AI apa saja yang paling banyak diterapkan dalam *Warehouse Management System*?

RQ2: Bagaimana penerapan AI berkontribusi terhadap peningkatan akurasi stok di lingkungan pergudangan?

RQ3: Bagaimana AI meningkatkan produktivitas operasional pergudangan secara keseluruhan?

RQ4: Apa saja tantangan implementasi dan arah penelitian masa depan dalam penerapan AI pada WMS?

Keempat pertanyaan penelitian tersebut digunakan sebagai dasar dalam proses pencarian, seleksi, ekstraksi, pengelompokan, dan sintesis temuan. Dengan demikian, setiap artikel yang dianalisis diarahkan untuk memberikan bukti yang relevan terhadap satu atau lebih pertanyaan penelitian.

2.2. Strategi Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan pada tiga database, yaitu *Scopus*, *Web of Science*, dan *Google Scholar*. Ketiga database tersebut digunakan sebagai sumber pencarian artikel yang membahas penerapan *Artificial Intelligence* (AI) dalam konteks *Warehouse Management System* (WMS), manajemen inventori, pergudangan, dan *supply chain*. Pencarian dibatasi pada artikel yang diterbitkan pada periode 2023–2026 dan menggunakan bahasa Inggris atau Indonesia.

Strategi pencarian disusun menggunakan tiga kelompok istilah. Kelompok pertama merepresentasikan teknologi yang dianalisis, yaitu *Artificial Intelligence*, *Machine Learning*, *Deep Learning*, *IoT*, *Digital Twin*, dan *Reinforcement Learning*. Kelompok kedua merepresentasikan konteks penerapan, yaitu *Warehouse Management System*, *Warehousing*, *Inventory Management*, *Stock Accuracy*, dan *Supply Chain*. Kelompok ketiga merepresentasikan tujuan atau hasil penerapan, yaitu *Optimization*, *Productivity*, *Automation*, dan *Smart Warehouse*. Istilah dalam setiap kelompok dihubungkan menggunakan operator *Boolean OR*, sedangkan hubungan antar kelompok menggunakan operator *AND*.

Berdasarkan pengelompokan tersebut, *string* pencarian yang digunakan adalah:

("Artificial Intelligence" OR "Machine Learning" OR "Deep Learning" OR "IoT" OR "Digital Twin" OR "Reinforcement Learning") AND ("Warehouse Management System" OR "Warehousing" OR "Inventory Management" OR "Stock Accuracy" OR "Supply Chain") AND ("Optimization" OR "Productivity" OR "Automation" OR "Smart Warehouse").

Artikel yang diperoleh dari proses pencarian selanjutnya diperiksa berdasarkan kesesuaiannya dengan ruang lingkup penelitian. Seleksi dilakukan menggunakan kriteria inklusi dan eksklusi yang mencakup tahun publikasi, kesesuaian topik, jenis dan indeks publikasi, bahasa, ketersediaan teks lengkap, duplikasi artikel, serta relevansi terhadap WMS. Kriteria yang digunakan dalam proses seleksi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Jenis	Kriteria	Keterangan
Inklusi	Tahun publikasi 2023–2026	Literatur terkini yang relevan
	Membahas AI/ML pada WMS atau <i>supply chain</i>	Sesuai topik penelitian
	Jurnal <i>peer-reviewed</i> terindeks	Scopus, WoS, atau SINTA
	Bahasa Inggris atau Indonesia	Aksesibilitas dan keterbacaan
	<i>Full text</i> tersedia	Kelengkapan data untuk analisis
Eksklusi	Duplikat artikel	Diidentifikasi dan dieliminasi
	<i>Conference paper</i> atau <i>book chapter</i>	Fokus pada artikel jurnal
	Tidak membahas WMS secara spesifik	Di luar ruang lingkup penelitian
	<i>Grey literature</i> atau <i>non-peer-reviewed</i>	Kualitas tidak terverifikasi

Kriteria inklusi digunakan untuk menentukan artikel yang dapat dipertahankan dalam proses seleksi. Artikel harus diterbitkan pada periode 2023–2026, membahas AI/ML pada WMS atau *supply chain*, berasal dari jurnal *peer-reviewed* terindeks *Scopus*, *Web of Science*, atau SINTA, menggunakan bahasa Inggris atau Indonesia, dan tersedia dalam bentuk teks lengkap. Ketersediaan *full text* diperlukan agar informasi yang dibutuhkan dalam proses ekstraksi data dapat diperoleh secara lengkap.

Kriteria eksklusi digunakan untuk mengeluarkan artikel yang tidak sesuai dengan ruang lingkup penelitian. Artikel yang sama dan ditemukan lebih dari satu kali diidentifikasi sebagai duplikat dan hanya dihitung satu kali. *Conference paper*, *book chapter*, *grey literature*, dan publikasi *non-peer-reviewed* tidak dimasukkan dalam analisis. Artikel yang setelah diperiksa tidak membahas WMS secara spesifik juga dikeluarkan dari proses seleksi.

2.3. Proses Seleksi Literatur

Proses seleksi literatur dilakukan secara bertahap dengan mengacu pada alur PRISMA 2020 yang meliputi *identification*, *screening*, *eligibility assessment*, dan *inclusion*. Setiap tahap diterapkan secara berurutan untuk memastikan bahwa artikel yang digunakan dalam analisis memiliki kesesuaian dengan fokus penelitian mengenai penerapan AI pada WMS, akurasi stok, dan produktivitas pergudangan. Kriteria inklusi dan eksklusi pada Tabel 1 digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan selama proses seleksi.

Tahap pertama adalah *identification*. Pada tahap ini, pencarian artikel dilakukan melalui *Scopus*, *Web of Science*, dan Google Scholar menggunakan *search string* yang telah ditetapkan pada bagian sebelumnya. Hasil pencarian dari ketiga database dikumpulkan sebagai kumpulan awal artikel potensial. Artikel yang ditemukan selanjutnya diperiksa untuk mengidentifikasi artikel yang sama atau duplikat yang muncul pada lebih dari satu sumber pencarian. Artikel duplikat dieliminasi sehingga setiap artikel hanya diperhitungkan satu kali dalam proses seleksi.

Tahap kedua adalah *screening*. Artikel yang telah melalui pemeriksaan duplikasi disaring berdasarkan judul dan abstrak. Penyaringan dilakukan dengan menilai keterkaitan artikel terhadap AI atau ML, WMS, manajemen inventori, pergudangan, dan *supply chain*. Pada tahap ini, artikel yang tidak sesuai dengan ruang lingkup penelitian tidak dilanjutkan ke tahap berikutnya. Pemeriksaan awal juga mempertimbangkan tahun publikasi, jenis publikasi, bahasa, dan status artikel sebagaimana ditetapkan dalam kriteria seleksi.

Tahap ketiga adalah *eligibility assessment*. Artikel yang lolos penyaringan judul dan abstrak diperiksa melalui pembacaan teks lengkap. Pemeriksaan dilakukan untuk memastikan bahwa artikel menyediakan informasi yang relevan mengenai teknologi AI yang digunakan, konteks penerapannya, metode penelitian, temuan utama, serta kontribusinya terhadap pertanyaan penelitian. Pada tahap ini, kriteria inklusi dan eksklusi pada Tabel 1 diterapkan untuk menentukan kelayakan setiap artikel. Artikel yang tidak membahas WMS secara spesifik, tidak sesuai dengan jenis publikasi yang ditetapkan, atau tidak memenuhi kriteria lainnya dikeluarkan dari proses seleksi.

Tahap keempat adalah *inclusion*. Artikel yang memenuhi seluruh kriteria ditetapkan sebagai korpus akhir penelitian. Berdasarkan keseluruhan proses identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan inklusi, sebanyak 25 artikel ilmiah ditetapkan untuk dianalisis. Seluruh artikel tersebut kemudian digunakan dalam proses ekstraksi dan sintesis data untuk menjawab RQ1, RQ2, RQ3, dan RQ4.

Proses seleksi tersebut memastikan bahwa artikel yang dianalisis telah melalui tahapan yang sama berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan. Dengan demikian, 25 artikel yang termasuk dalam korpus akhir menjadi dasar untuk mengidentifikasi distribusi publikasi, teknologi AI yang dominan, kontribusi AI terhadap akurasi stok dan produktivitas pergudangan, serta tantangan implementasi dan arah penelitian masa depan.

2.4. Ekstraksi dan Sintesis Data

Proses ekstraksi data dilakukan terhadap 25 artikel yang telah memenuhi seluruh kriteria seleksi dan ditetapkan sebagai korpus akhir penelitian. Ekstraksi dilakukan secara terstruktur untuk memastikan bahwa informasi yang diperoleh dari setiap artikel dapat dianalisis secara konsisten. Data yang dicatat mencakup penulis dan tahun publikasi, teknologi AI yang digunakan, aplikasi spesifik dalam konteks WMS, metode penelitian yang diterapkan, temuan utama, serta relevansi artikel terhadap masing-masing pertanyaan penelitian.

Hasil ekstraksi selanjutnya dikelompokkan berdasarkan fokus analisis. Data tahun publikasi digunakan untuk mengidentifikasi perkembangan jumlah penelitian selama periode 2023–2026. Data teknologi digunakan untuk mengidentifikasi jenis AI yang diterapkan dalam WMS, yaitu *Machine Learning* (ML), *integrasi IoT-AI*, *Deep Reinforcement Learning* (DRL), *Digital Twin*, *Artificial Neural Network* (ANN), dan *Large Language Model* (LLM). Satu artikel dapat membahas lebih dari satu teknologi sehingga jumlah kemunculan teknologi dapat melebihi jumlah artikel yang dianalisis.

Untuk menjawab RQ1, data dikelompokkan berdasarkan jenis teknologi AI dan frekuensi kemunculannya dalam artikel. Pengelompokan ini digunakan untuk mengidentifikasi teknologi yang paling dominan diterapkan dalam konteks WMS. Untuk menjawab RQ2, temuan artikel dianalisis berdasarkan kontribusi AI terhadap peningkatan akurasi stok, termasuk indikator yang berkaitan dengan akurasi inventori, presisi pencatatan stok, dan

3. Hasil dan Diskusi

Hasil *Systematic Literature Review* terhadap 25 artikel ilmiah dianalisis berdasarkan empat pertanyaan penelitian yang telah ditetapkan. Analisis mencakup karakteristik literatur terpilih, teknologi *Artificial Intelligence* (AI) yang diterapkan dalam *Warehouse Management System* (WMS), kontribusi penerapan AI terhadap akurasi stok dan

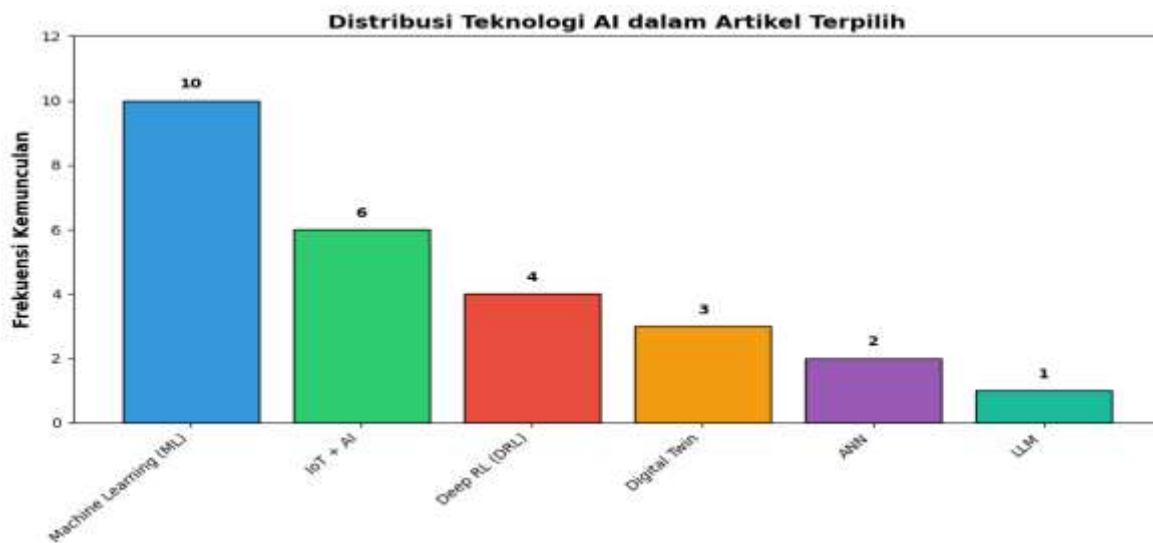
produktivitas pergudangan, serta tantangan implementasi dan arah penelitian masa depan. Hasil penelitian disajikan melalui pemetaan artikel, sintesis naratif, analisis frekuensi, dan visualisasi data untuk menunjukkan pola utama yang ditemukan dalam literatur.

3.1. Deskripsi Umum Literatur Terpilih

Sebanyak 25 artikel ilmiah yang memenuhi kriteria inklusi ditetapkan sebagai korpus akhir penelitian. Artikel terpilih dianalisis berdasarkan tahun publikasi, teknologi *Artificial Intelligence* (AI) yang digunakan, aplikasi dalam konteks *Warehouse Management System* (WMS), metode penelitian, temuan utama, dan relevansinya terhadap pertanyaan penelitian. Analisis awal dilakukan terhadap distribusi tahun publikasi untuk menggambarkan karakteristik temporal artikel selama periode 2023–2026.

Berdasarkan tahun publikasi, artikel yang dianalisis didominasi oleh penelitian terbaru. Sebanyak 16 artikel atau 64% diterbitkan pada 2025, 6 artikel atau 24% pada 2026, dan 3 artikel atau 12% pada 2023. Dengan demikian, sebanyak 22 dari 25 artikel atau 88% korpus penelitian diterbitkan pada periode 2025–2026. Distribusi artikel berdasarkan tahun publikasi disajikan pada Gambar 1.

Gambar 1. Distribusi Temporal Artikel Tahun 2023–2026



Berdasarkan Gambar 1, publikasi tahun 2025 merupakan kelompok terbesar dalam korpus penelitian, diikuti oleh publikasi tahun 2026 dan 2023. Dominasi artikel pada periode 2025–2026 menunjukkan bahwa sebagian besar bukti yang dianalisis berasal dari literatur terbaru. Distribusi temporal tersebut menggambarkan komposisi 25 artikel yang telah lolos proses seleksi dan tidak dimaksudkan sebagai gambaran keseluruhan jumlah publikasi global mengenai AI pada WMS.

Ditinjau dari metode penelitian, artikel terpilih menggunakan pendekatan yang beragam. Pendekatan tinjauan sistematis dan tinjauan literatur digunakan untuk memetakan perkembangan AI dalam manajemen inventori, gudang cerdas, rantai pasok, dan integrasi AI-IoT [1], [2], [3], [9], [10], [11], [12], [13]. Pendekatan eksperimental digunakan untuk menguji smart shelves, pemantauan aset, dan optimasi inventori berbasis IoT dan ML [6], [14], [15]. Artikel lainnya menggunakan *proof of concept*, optimasi, simulasi, studi kasus, dan pembelajaran penguatan untuk menguji penerapan teknologi pada permasalahan operasional yang lebih spesifik [4], [7], [8], [16], [17], [18], [19]. Keragaman metode tersebut menunjukkan bahwa penelitian mengenai penerapan AI pada WMS tidak hanya berfokus pada pemetaan perkembangan teknologi. Artikel terpilih juga mencakup pengembangan model, simulasi, optimasi, dan pengujian penerapan teknologi pada berbagai aktivitas pergudangan. Permasalahan yang dikaji meliputi pemantauan stok secara *real-time*, *cycle counting*, optimasi inventori, penjadwalan, proses pengambilan barang, pemantauan aset, pengendalian kinerja gudang, dan efisiensi energi [5], [6], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20].

Untuk menunjukkan karakteristik setiap artikel secara lebih rinci, pemetaan dilakukan berdasarkan teknologi AI yang digunakan, aplikasi dalam konteks WMS, metode penelitian, temuan utama, dan pertanyaan penelitian yang berkaitan. Hasil pemetaan sistematis terhadap 25 artikel terpilih disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Pemetaan Sistematis 25 Artikel Terpilih

N o	Penulis	Teknologi AI	Aplikasi WMS	Metode	Temuan Utama	RQ
1	AlQahtani et al. (2025)	IoT + ML	Smart shelves, stok real-time	Eksperimental	IoT+ML meningkatkan akurasi stok otomatis	RQ1,2
2	Alam et al. (2026)	Digital Twin + AI	Optimasi logistik gudang	Lit. Review	Digital twin mempercepat keputusan logistik	RQ1,3
3	Arslan (2025)	AI/ML + Digital Twin	Operasi human-centric	Alg. Dinamis	Digital twin tingkatan produktivitas operator	RQ1,3
4	Belter et al. (2023)	ML	Prediksi trajektori gerak	SLR	ML prediksi pergerakan barang akurat	RQ1,2
5	Berlec et al. (2025)	LLM	Manajemen terdesentralisasi	Proof of Concept	LLM berpotensi otomasi keputusan gudang	RQ1,4
6	Lu et al. (2025)	Deep RL	Optimasi inventori multi-echelon	DRL	DRL efektif kelola stok disruptif	RQ1,2
7	Rizqi & Chou (2025)	ML + Simulasi	Penjadwalan crane hijau	Sim-Optim	Learning-based kurangi emisi & tingkatan efisiensi	RQ1,3
8	Roy et al. (2025)	Deep RL	Penjadwalan smart warehouse	DRL	DRL optimalkan trade-off energi-informasi	RQ1,3
9	Tang & Zha (2026)	IoT + ML	Logistik supply chain cerdas	Review	IoT+ML tingkatan visibilitas rantai pasok	RQ1,3
10	Teixeira et al. (2025)	AI (umum)	SCM cerdas	SLR	AI kontribusi signifikan pada efisiensi SCM	RQ1,3, 4
11	Vaccari et al. (2026)	ML + MCDM	Cycle counting inventori	ML+MCDM	ML+MCDM tingkatan akurasi cycle counting	RQ1,2
12	Zabraoui et al. (2025)	Multi-alg. Optim.	Analitik inventori	Komparatif	Kombinasi algoritma tingkatan prediksi stok	RQ1,2
13	Benmimoun et al. (2025)	AI	Optimasi manajemen stok	Case Study	AI terbukti optimalkan pengelolaan stok	RQ1,2
14	Cheng et al. (2025)	Digital Twin + CV	Asset tracking	Eksperimental	Kamera ceiling + DT monitoring real-time	RQ1,3
15	Francuz & Bányai (2025)	ML	Kontrol performa gudang	ML	ML tingkatan performa gudang Industry 4.0	RQ1,3
16	Ghalekhondabi (2026)	ANN	SCM management	Lit. Review	ANN aplikatif luas di forecasting SCM	RQ1,2
17	Ghazi et al. (2025)	AI + IoT	Smart warehousing	SLR	AI-IoT tingkatan akurasi forecasting	RQ1,2, 3
18	Li et al. (2025)	Deep RL	Retrieval multi-deep storage	DRL	DRL topology-aware efisiensi pengambilan	RQ1,3
19	Li, J. (2025)	AI	Efisiensi energi e-commerce	Optim. AI	AI optimalkan energi rantai pasok	RQ1,3

20	Royani et al. (2026)	AI + Statistik	Inventori manufaktur	SLR	Kombinasi statistik+AI unggul di inventori	RQ1,2,4
21	Tubis & Rohman (2023)	AI + IoT + Sensor	Intelligent warehouse 4.0	SLR	Gudang cerdas andalkan multi-teknologi	RQ1,3,4
22	Wang & Bai (2025)	DL + Genetic Alg.	Layout & kontrol inventori	MOGO-AFNNNet	DL+GA optimalkan layout dan inventori	RQ1,2,3
23	Arvind et al. (2025)	ML + IoT	Optimasi inventori presisi	Eksperimenta l	ML+IoT tingkatkan presisi inventori	RQ1,2
24	Dewy et al. (2025)	AI	Sistem informasi WMS	DT + Waterfall	WMS berbasis AI tingkatkan akurasi inventori	RQ1,2
25	Ünal et al. (2023)	AI (umum)	Manajemen inventori	SLR	AI efektif di berbagai aspek inventori	RQ1,2,4

Berdasarkan Tabel 2, penerapan AI pada WMS mencakup berbagai fungsi operasional. Teknologi yang digunakan tidak hanya diterapkan pada satu aktivitas, tetapi mencakup pemantauan stok, optimasi inventori, *cycle counting*, penjadwalan, proses pengambilan barang, pemantauan aset, pengendalian kinerja gudang, dan efisiensi energi. Penerapan tersebut ditemukan pada penggunaan ML dan IoT untuk pengelolaan stok [6], [15] DRL untuk optimasi inventori dan pengambilan barang [8], [16], [18] serta *Digital Twin* untuk optimasi dan pemantauan aktivitas gudang [7], [14], [21]

Pemetaan artikel juga menunjukkan penggunaan teknologi yang lebih spesifik. LLM digunakan sebagai *proof of concept* untuk manajemen gudang terdesentralisasi [17], ANN digunakan dalam fungsi yang berkaitan dengan manajemen rantai pasok [22] sedangkan kombinasi deep learning dan algoritma genetika digunakan untuk optimasi tata letak dan pengendalian inventori [21] Penelitian lainnya menerapkan AI pada efisiensi energi [22], menggabungkan metode statistik dan AI dalam manajemen inventori [12] serta mengembangkan sistem informasi WMS berbasis AI untuk meningkatkan akurasi inventori [23]

Secara keseluruhan, karakteristik 25 artikel menunjukkan bahwa penelitian mengenai AI pada WMS berkembang melalui kombinasi teknologi, metode, dan konteks penerapan yang beragam. Selain artikel yang telah dibahas, pendekatan optimasi multi-algoritma juga digunakan dalam analitik inventori [24] sedangkan penerapan IoT dan ML digunakan untuk mendukung logistik dan rantai pasok cerdas [25] Hasil pemetaan pada Tabel 2 menjadi dasar untuk menganalisis dampak kuantitatif penerapan AI serta menjawab empat pertanyaan penelitian pada bagian berikutnya.

3.2. Dampak Kuantitatif AI

Hasil analisis terhadap artikel terpilih menunjukkan bahwa penerapan AI pada WMS memberikan dampak kuantitatif terhadap berbagai indikator operasional pergudangan. Dampak tersebut terutama terlihat pada peningkatan akurasi stok, akurasi *cycle counting*, presisi inventori, dan efisiensi energi. Nilai kuantitatif yang ditemukan pada artikel terpilih digunakan untuk menunjukkan perubahan kinerja yang dilaporkan setelah penerapan teknologi AI [5], [6], [18]

Temuan kuantitatif tersebut tidak seluruhnya menggunakan indikator yang sama. Setiap penelitian memiliki teknologi, objek, metode pengujian, dan ukuran kinerja yang berbeda. Oleh karena itu, nilai yang diperoleh tidak digabungkan menjadi satu ukuran statistik, tetapi disajikan secara deskriptif sesuai dengan hasil yang dilaporkan dalam masing-masing artikel. Ringkasan dampak kuantitatif penerapan AI disajikan pada Tabel 3.

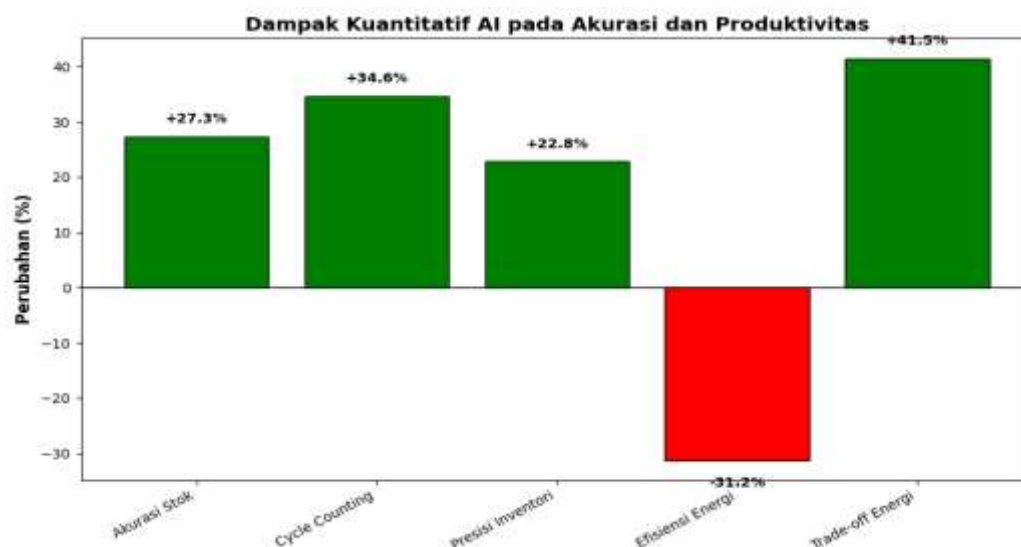
. Tabel 3. Dampak Kuantitatif Penerapan AI pada Akurasi dan Produktivitas

No	Penulis	Teknologi	Metrik	Peningkatan / Perubahan
1	AlQahtani et al. (2025)	IoT + ML	Akurasi stok real-time	+27,3%
2	Vaccari et al. (2026)	ML + MCDM	Akurasi cycle counting	+34,6%

3	Arvind et al. (2025)	ML + IoT	Presisi inventori	+22,8%
4	Rizqi & Chou (2025)	Learning-based	Efisiensi energi crane	-31,2% (pengurangan)
5	Roy et al. (2025)	DRL	Trade-off energi-informasi	+41,5%

Berdasarkan Tabel 3, penerapan AI menunjukkan perubahan pada lima indikator yang dianalisis. Peningkatan akurasi stok sebesar 27,3% dilaporkan pada penerapan teknologi untuk pengelolaan stok [15], sedangkan peningkatan akurasi cycle counting sebesar 34,6% ditemukan pada pendekatan ML dan *multi-criteria decision-making* [5] Peningkatan presisi inventori sebesar 22,8% ditemukan pada penerapan ML dan IoT untuk optimasi inventori [6] Pada aspek energi, hasil analisis menunjukkan pengurangan konsumsi energi sebesar 31,2% dan perubahan trade-off energi sebesar 41,5% pada studi yang mengevaluasi efisiensi operasional dan penggunaan energi [8], [18]. Perbandingan hasil tersebut divisualisasikan pada Gambar 2.

Gambar 2. Dampak Kuantitatif AI pada Akurasi dan Produktivitas



Berdasarkan Gambar 2, peningkatan pada indikator akurasi menunjukkan bahwa penerapan AI berkontribusi terhadap pengelolaan data inventori yang lebih baik. Peningkatan akurasi stok sebesar 27,3% menunjukkan adanya perbaikan kesesuaian antara informasi persediaan dan kondisi stok yang dikelola [15] Peningkatan akurasi cycle counting sebesar 34,6% menunjukkan kontribusi pendekatan berbasis ML dalam mendukung proses pemeriksaan persediaan [5], sedangkan peningkatan presisi inventori sebesar 22,8% memperlihatkan kontribusi integrasi ML dan IoT terhadap pengelolaan inventori [6].

Dampak penerapan AI tidak hanya ditemukan pada indikator akurasi. Pengurangan konsumsi energi sebesar 31,2% menunjukkan bahwa penerapan teknologi juga berkaitan dengan efisiensi penggunaan sumber daya dalam aktivitas operasional. Pada grafik, nilai tersebut ditampilkan sebagai perubahan negatif karena menunjukkan penurunan konsumsi energi. Dalam konteks efisiensi, nilai negatif tersebut merupakan hasil yang menguntungkan dan tidak menunjukkan penurunan kinerja.

Indikator *trade-off energi* sebesar 41,5% menunjukkan adanya hubungan antara peningkatan kinerja operasional dan konsekuensi penggunaan energi [18]. Temuan ini memperlihatkan bahwa evaluasi penerapan AI tidak cukup hanya dilakukan berdasarkan peningkatan akurasi atau produktivitas. Penggunaan sumber daya dan konsekuensi energi juga perlu dipertimbangkan dalam menilai manfaat teknologi secara keseluruhan.

Meskipun demikian, angka-angka pada Tabel 3 dan Gambar 2 tidak dapat dibandingkan secara langsung untuk menentukan teknologi terbaik. Setiap nilai berasal dari penelitian dengan konteks, teknologi, objek, dan indikator yang berbeda. Oleh karena itu, hasil kuantitatif digunakan untuk menunjukkan arah dan bentuk dampak penerapan AI, bukan sebagai hasil meta-analysis atau ukuran efek gabungan.

Secara keseluruhan, hasil analisis kuantitatif menunjukkan dua kelompok dampak utama yang sesuai dengan fokus penelitian, yaitu peningkatan akurasi stok dan peningkatan produktivitas pergudangan. Temuan tersebut selanjutnya dibahas secara lebih spesifik berdasarkan empat Research Questions pada subbab berikutnya.

3.2. Jawaban atas Research Questions

Hasil sintesis terhadap 25 artikel selanjutnya dianalisis berdasarkan empat *Research Questions* yang telah dirumuskan. Pembahasan dilakukan untuk mengidentifikasi teknologi AI yang paling banyak diterapkan dalam WMS, kontribusi AI terhadap peningkatan akurasi stok, kontribusi AI terhadap produktivitas operasional pergudangan, serta tantangan implementasi dan arah penelitian masa depan.

RQ1: Teknologi AI Apa Saja yang Paling Banyak Diterapkan dalam WMS?

Hasil analisis menunjukkan bahwa teknologi AI yang ditemukan dalam artikel terpilih meliputi *Machine Learning* (ML), *integrasi IoT-AI*, *Deep Reinforcement Learning* (DRL), *Digital Twin*, *Artificial Neural Network* (ANN), dan *Large Language Model* (LLM). Sebagaimana disajikan pada Gambar 1, ML merupakan teknologi yang paling banyak ditemukan dengan 10 kemunculan, diikuti integrasi IoT-AI sebanyak 6 kemunculan, DRL sebanyak 4 kemunculan, *Digital Twin* sebanyak 3 kemunculan, ANN sebanyak 2 kemunculan, dan LLM sebanyak 1 kemunculan. Total frekuensi mencapai 26 kemunculan karena satu artikel dapat membahas lebih dari satu teknologi AI.

Dominasi ML menunjukkan bahwa teknologi ini memiliki cakupan penerapan yang luas dalam WMS. Berdasarkan artikel terpilih, ML digunakan untuk mendukung prediksi, optimasi inventori, pengendalian kinerja gudang, dan peningkatan akurasi cycle counting [5], [6], [13], [15], [25]. Kemampuan ML dalam mengolah pola dari data historis dan operasional menjadikannya relevan untuk aktivitas pergudangan yang memerlukan prediksi dan dukungan pengambilan keputusan.

Integrasi IoT-AI merupakan kelompok teknologi kedua yang paling banyak ditemukan. Dalam penerapannya, perangkat IoT digunakan untuk memperoleh data dari objek dan aktivitas fisik, sedangkan AI digunakan untuk mengolah data tersebut. Kombinasi ini mendukung pemantauan stok dan aset secara real-time serta meningkatkan visibilitas terhadap kondisi operasional gudang [6], [11], [14], [26]. DRL ditemukan pada permasalahan yang membutuhkan pengambilan keputusan secara dinamis, seperti optimasi inventori, penjadwalan, dan proses pengambilan barang [8], [16], [18]. Berbeda dengan pendekatan prediktif, DRL digunakan untuk mempelajari tindakan berdasarkan kondisi sistem dan hasil yang diperoleh sehingga sesuai untuk permasalahan operasional yang berubah secara dinamis.

Digital Twin digunakan untuk membentuk representasi virtual dari kondisi atau proses fisik. Dalam konteks WMS, teknologi ini mendukung simulasi, pemantauan, dan evaluasi keputusan sebelum diterapkan pada sistem fisik [7], [14], [20]. ANN digunakan pada fungsi yang berkaitan dengan pengenalan pola dan prediksi [21], sedangkan LLM mulai dieksplorasi sebagai pendekatan untuk mendukung otomatisasi keputusan dalam manajemen gudang terdesentralisasi [17].

Secara keseluruhan, hasil RQ1 menunjukkan bahwa ML merupakan teknologi AI yang paling dominan dalam artikel terpilih. Teknologi lainnya memiliki fungsi yang lebih spesifik, yaitu IoT-AI untuk pemantauan real-time, DRL untuk pengambilan keputusan dinamis, *Digital Twin* untuk simulasi dan representasi *virtual*, ANN untuk pengenalan pola dan prediksi, serta LLM untuk dukungan otomatisasi keputusan.

RQ2: Bagaimana Penerapan AI Berkontribusi terhadap Peningkatan Akurasi Stok di Lingkungan Pergudangan?

Hasil sintesis menunjukkan bahwa AI berkontribusi terhadap peningkatan akurasi stok melalui pengolahan data inventori, deteksi ketidaksesuaian, pemantauan kondisi stok, dan peningkatan ketepatan proses *cycle counting*. Kontribusi tersebut terutama ditemukan pada penerapan ML, IoT-AI, optimasi algoritmik, dan sistem informasi berbasis AI [4], [6], [15], [24], [25].

ML berkontribusi terhadap akurasi stok dengan mengolah data historis dan operasional untuk mengenali pola yang berkaitan dengan kondisi persediaan. Kemampuan tersebut mendukung identifikasi ketidaksesuaian data, penentuan prioritas pemeriksaan, dan pengambilan keputusan inventori. Dalam proses *cycle counting*, penggunaan

ML dan *multi-criteria decision-making* memungkinkan proses pemeriksaan persediaan dilakukan secara lebih terarah [5].

Integrasi IoT-AI memberikan kontribusi melalui ketersediaan data operasional secara real-time. Perangkat IoT digunakan untuk memperoleh data dari objek atau aktivitas fisik, sedangkan AI digunakan untuk mengolah dan menginterpretasikan data tersebut. Kombinasi ini membantu mengurangi keterlambatan antara perubahan kondisi stok di lingkungan fisik dan pembaruan informasi dalam sistem [6], [15].

Peningkatan akurasi stok juga berkaitan dengan kemampuan AI dalam mendukung deteksi ketidaksesuaian dan optimasi inventori. Pendekatan AI digunakan untuk meningkatkan pengelolaan stok [4], sedangkan metode optimasi multi-algoritma digunakan untuk mendukung analitik dan prediksi inventori [25]. Sistem informasi WMS berbasis AI juga diarahkan pada peningkatan akurasi inventori melalui integrasi proses pengembangan sistem dan kebutuhan operasional [24].

Berdasarkan hasil kuantitatif pada Tabel 3 dan Gambar 2, peningkatan kinerja yang berkaitan dengan akurasi mencakup peningkatan akurasi stok sebesar 27,3%, akurasi cycle counting sebesar 34,6%, dan presisi inventori sebesar 22,8%. Namun, ketiga nilai tersebut berasal dari penelitian dengan indikator dan kondisi pengujian yang berbeda sehingga tidak dapat dibandingkan secara langsung sebagai satu ukuran efek yang seragam.

Secara keseluruhan, hasil RQ2 menunjukkan bahwa AI meningkatkan akurasi stok melalui pengolahan data inventori, pemantauan real-time, deteksi ketidaksesuaian, optimasi inventori, dan peningkatan proses cycle counting. Kontribusi tersebut membantu WMS menghasilkan informasi persediaan yang lebih tepat dan mendukung identifikasi perbedaan antara catatan sistem dan kondisi stok aktual.

RQ3: Bagaimana AI Meningkatkan Produktivitas Operasional Pergudangan Secara Keseluruhan?

Hasil sintesis menunjukkan bahwa AI meningkatkan produktivitas operasional pergudangan melalui optimasi proses, otomatisasi aktivitas, pengambilan keputusan berbasis data, dan efisiensi penggunaan sumber daya. Kontribusi tersebut ditemukan pada pengelolaan inventori, penjadwalan, proses pengambilan barang, pemantauan aset, pengendalian kinerja gudang, dan penggunaan energi. [7], [8], [14], [16], [18], [19], [23]

ML mendukung produktivitas melalui pengolahan data historis dan operasional untuk mendukung perencanaan dan pengendalian kinerja gudang [13]. DRL memberikan kontribusi pada permasalahan yang membutuhkan serangkaian keputusan dinamis, termasuk optimasi inventori, penjadwalan, dan proses pengambilan barang [8], [16], [19]. Pendekatan tersebut memungkinkan keputusan disesuaikan dengan perubahan kondisi operasional.

Integrasi IoT-AI mendukung produktivitas melalui peningkatan visibilitas operasional. Data yang diperoleh secara *real-time* memungkinkan kondisi stok, aset, dan aktivitas gudang dipantau dengan lebih cepat [14], [26]. Ketika data tersebut dianalisis menggunakan AI, sistem dapat membantu mendeteksi kondisi yang memerlukan tindakan dan mengurangi keterlambatan informasi.

Digital Twin berkontribusi melalui kemampuan simulasi dan representasi virtual terhadap kondisi operasional. Teknologi ini memungkinkan alternatif keputusan dievaluasi sebelum diterapkan pada sistem fisik serta mendukung optimasi operasi dan pemantauan aset [7], [14], [20]

Selain peningkatan proses operasional, hasil kuantitatif pada Tabel 3 dan Gambar 2 menunjukkan bahwa AI juga berkaitan dengan efisiensi energi. Pengurangan konsumsi energi sebesar 31,2% menunjukkan potensi teknologi dalam mendukung penggunaan sumber daya yang lebih efisien [18]. Namun, temuan *trade-off* energi sebesar 41,5% menunjukkan bahwa peningkatan kinerja operasional perlu dipertimbangkan bersama konsekuensi penggunaan energi [19].

Secara keseluruhan, hasil RQ3 menunjukkan bahwa AI meningkatkan produktivitas pergudangan melalui optimasi keputusan, otomatisasi dan percepatan proses, peningkatan visibilitas operasional, serta efisiensi penggunaan sumber daya.

RQ4: Apa Saja Tantangan Implementasi dan Arah Penelitian Masa Depan dalam Penerapan AI pada WMS

Hasil sintesis menunjukkan bahwa penerapan AI pada WMS masih menghadapi tantangan berupa kualitas dan ketersediaan data, integrasi dengan sistem yang telah digunakan, kebutuhan infrastruktur dan biaya implementasi, keamanan data, keterbatasan sumber daya manusia, serta transparansi keputusan yang dihasilkan model AI [1], [2], [9], [11], [12], [20]

Kualitas data menjadi tantangan penting karena model AI bergantung pada data yang digunakan dalam proses analisis dan pembelajaran. Data inventori yang tidak lengkap, tidak konsisten, terlambat diperbarui, atau mengandung kesalahan dapat memengaruhi hasil prediksi dan keputusan. Dalam konteks WMS, konsistensi dan keterhubungan data menjadi prasyarat bagi penerapan AI yang andal [1], [9], [12]

Tantangan berikutnya adalah integrasi AI dengan WMS dan teknologi operasional yang telah digunakan. Gudang dapat menggunakan perangkat, sensor, aplikasi, dan format data yang berbeda sehingga pertukaran data tidak selalu berlangsung secara langsung. Integrasi AI, IoT, dan sistem pergudangan membutuhkan interoperabilitas agar data dari lingkungan fisik dapat diproses dan digunakan dalam pengambilan keputusan [2], [11], [13]

Biaya implementasi dan kebutuhan infrastruktur juga menjadi hambatan karena penerapan dapat membutuhkan sensor, perangkat komputasi, penyimpanan data, konektivitas, dan pemeliharaan sistem. Selain investasi awal, organisasi perlu mempertimbangkan kebutuhan pembaruan model dan pengelolaan teknologi. Konsekuensi penggunaan energi juga perlu dievaluasi bersama manfaat peningkatan kinerja [18], [19], [23]

Arah penelitian masa depan perlu difokuskan pada pengembangan model AI yang lebih transparan, integrasi data yang lebih baik, pengujian pada lingkungan pergudangan nyata, dan evaluasi dampak jangka panjang [9], [11], [12], [20]. Integrasi antara AI, IoT, *Digital Twin*, dan WMS juga perlu diuji lebih lanjut agar teknologi tidak hanya bekerja secara terpisah.

DRL dan *Digital Twin* memiliki potensi untuk mendukung simulasi dan pengambilan keputusan dinamis [8], [16], [18], [20], sedangkan LLM dapat dieksplorasi lebih lanjut untuk mendukung otomatisasi keputusan dan interaksi berbasis bahasa [17]. Pengembangan teknologi tersebut perlu dievaluasi berdasarkan manfaat operasional, kebutuhan komputasi, keamanan, transparansi, dan efisiensi sumber daya.

Secara keseluruhan, hasil RQ4 menunjukkan bahwa tantangan penerapan AI pada WMS tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga mencakup aspek ekonomi, organisasi, keamanan, dan sumber daya manusia. Penelitian masa depan perlu bergerak dari pengembangan model menuju pengujian sistem yang terintegrasi, transparan, aman, dan dapat diterapkan pada kondisi pergudangan nyata.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil *Systematic Literature Review* terhadap 25 artikel periode 2023–2026, penerapan *Artificial Intelligence* pada *Warehouse Management System* menunjukkan kontribusi terhadap peningkatan akurasi stok dan produktivitas operasional pergudangan. Teknologi yang ditemukan meliputi *Machine Learning*, integrasi IoT-AI, *Deep Reinforcement Learning*, *Digital Twin*, *Artificial Neural Network*, dan *Large Language Model*. *Machine Learning* menjadi teknologi yang paling dominan dengan 10 kemunculan, diikuti IoT-AI sebanyak 6 kemunculan, DRL sebanyak 4 kemunculan, *Digital Twin* sebanyak 3 kemunculan, ANN sebanyak 2 kemunculan, dan LLM sebanyak 1 kemunculan. Penerapan teknologi tersebut mendukung berbagai fungsi WMS, terutama prediksi dan optimasi inventori, pemantauan stok dan aset secara *real-time*, *cycle counting*, penjadwalan, pengambilan barang, simulasi kondisi operasional, dan dukungan pengambilan keputusan. Penerapan AI memberikan dampak terukur terhadap akurasi stok, yang ditunjukkan oleh peningkatan akurasi stok sebesar 27,3%, akurasi *cycle counting* sebesar 34,6%, dan presisi inventori sebesar 22,8% pada studi yang melaporkan hasil kuantitatif. Pada aspek produktivitas, AI berkontribusi melalui optimasi keputusan, peningkatan visibilitas operasional, percepatan respons terhadap perubahan kondisi, dan efisiensi penggunaan sumber daya. Pengurangan konsumsi energi sebesar 31,2% menunjukkan potensi penerapan AI dalam mendukung efisiensi operasional, sedangkan trade-off energi sebesar 41,5% menunjukkan bahwa manfaat peningkatan kinerja perlu dipertimbangkan bersama kebutuhan sumber daya komputasi. Implementasi AI pada WMS masih menghadapi tantangan berupa kualitas dan ketersediaan data, integrasi dengan sistem yang telah digunakan, kebutuhan infrastruktur dan biaya, keamanan data, keterbatasan kompetensi sumber daya manusia, serta transparansi keputusan model. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar bagi pengelola pergudangan untuk memilih teknologi AI sesuai kebutuhan operasional, khususnya untuk meningkatkan akurasi inventori, pemantauan kondisi secara *real-time*, dan optimasi proses. Penelitian selanjutnya perlu menguji integrasi AI, IoT, *Digital Twin*, dan WMS pada lingkungan pergudangan

nyata, mengevaluasi dampaknya dalam jangka panjang, serta mengembangkan sistem yang lebih transparan, aman, *interoperabel*, dan efisien dalam penggunaan energi.

Referensi

1. Ö. A. Ünal, B. Erkeyman, and B. Usanmaz, "Applications of artificial intelligence in inventory management: A systematic review of the literature," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 30, no. 4, pp. 2605–2625, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09879-5>
2. A. A. Tubis and J. Rohman, "Intelligent warehouse in Industry 4.0—Systematic literature review," *Sensors*, vol. 23, no. 8, Art. no. 4105, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23084105>
3. J. Belter, M. Hering, and P. Weichbroth, "Motion trajectory prediction in warehouse management systems: A systematic literature review," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 17, Art. no. 9780, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13179780>
4. R. Benmimoun, Y. El Kihel, E. M. Bouyahrouzi, L. Sehli, S. Embarki, and B. El Kihel, "Artificial intelligence in logistic warehousing: A case study on stock management optimization," *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 58, no. 10, 2025. <https://doi.org/10.18280/jesa.581001>
5. L. Vaccari, E. Balugani, F. Lolli, and R. Gamberini, "A machine learning and multi-criteria decision-making approach to cycle counting," *Logistics*, vol. 10, no. 1, Art. no. 10, 2026. <https://doi.org/10.3390/logistics10010010>
6. V. R. Arvind, R. M. Shrinidhi, T. Deepa, and M. Maheedhar, "Intelligent warehousing: A machine learning and IoT framework for precision inventory optimization," *IEEE Access*, vol. 13, 2025. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3614679>
7. E. Arslan, "Optimizing human-centric warehouse operations: A digital twin approach using dynamic algorithms and AI/ML," *Verimlilik Dergisi (Journal of Productivity)*, Special Issue: Productivity for Logistics, pp. 119–138, 2025. <https://doi.org/10.51551/verimlilik.1524701>
8. F. Li, Y. Tian, R. Noortwyck, J. Zhou, L. Kuang, and R. Schulz, "Topology-aware and highly generalizable deep reinforcement learning for efficient retrieval in multi-deep storage systems," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 37, pp. 2503–2536, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10845-025-02654-w>
9. A. R. Teixeira, J. V. Ferreira, and A. L. Ramos, "Intelligent supply chain management: A systematic literature review on artificial intelligence contributions," *Information*, vol. 16, no. 5, Art. no. 399, 2025. <https://doi.org/10.3390/info16050399>
10. M. J. Page *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, Art. no. n71, 2021. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
11. F. Ghazi, W. N. H. Wan Ali, and M. Mazlan, "AI-IoT integration in smart warehousing: A systematic review of forecasting technologies and strategic applications," *International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development*, vol. 14, no. 4, pp. 1640–1652, 2025. <https://doi.org/10.6007/IJARPEd/v14-i4/27061>
12. A. D. Royani *et al.*, "The role of statistical methods and artificial intelligence in inventory management for manufacturing industries: A systematic literature review," *Frontiers in Big Data*, vol. 9, Art. no. 1799073, 2026. <https://doi.org/10.3389/fdata.2026.1799073>
13. A. Francuz and T. Bányai, "Intelligent control approaches for warehouse performance optimisation in Industry 4.0 using machine learning," *Future Internet*, vol. 17, no. 10, Art. no. 468, 2025. <https://doi.org/10.3390/fi17100468>
14. J. Cheng *et al.*, "Real-time warehouse monitoring with ceiling cameras and digital twin for asset tracking and scene analysis," *Logistics*, vol. 9, no. 4, Art. no. 153, 2025. <https://doi.org/10.3390/logistics9040153>
15. A. A. S. AlQahtani, A. A. Darrat, L. Turpin, and T. Alshayeb, "Smart shelves: Transforming retail stocking with internet of things and machine learning," *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*, vol. 16, pp. 1864–1880, 2025. <https://doi.org/10.1007/s43995-025-00213-1>
16. X. Lu, H. Wang, Z. Peng, C. Liao, and C. Liu, "Dynamic optimization of multi-echelon supply chain inventory policies under disruptive scenarios: A deep reinforcement learning approach," *Symmetry*, vol. 17, no. 12, Art. no. 2078, 2025. <https://doi.org/10.3390/sym17122078>
17. T. Berlec, M. Corn, S. Varljen, and P. Podržaj, "Exploring decentralized warehouse management using large language models: A proof of concept," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 10, Art. no. 5734, 2025. <https://doi.org/10.3390/app15105734>
18. S. Roy, A. Bisht, A. K. Das, and S. Shetty, "Age of information-based optimal scheduling with energy cost trade-off for smart warehouse: A deep reinforcement learning-based approach," *IEEE Access*, vol. 13, 2025. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3609200>
19. J. Li, "Research on energy efficiency optimization strategies for e-commerce platform product supply chain based on artificial intelligence," *Sustainable Energy Research*, vol. 12, Art. no. 63, 2025. <https://doi.org/10.1186/s40807-025-00203-w>
20. Z. U. Rizqi and S.-Y. Chou, "Dynamic crane scheduling for green automated warehousing: Learning-based simulation–optimization approach," *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2025.
21. M. M. Alam, R. A. N. Ugli, K. J. Tanha, and T. Jun, "AI-enhanced digital twin systems for warehouse logistics optimization: A review of challenges with solutions and future directions," *ICT Express*, vol. 12, pp. 459–479, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2026.01.009>
22. I. Ghalekhondabi, "Artificial neural network applications in supply chain management: A literature review and classification," *Applied System Innovation*, vol. 9, no. 3, Art. no. 55, 2026. <https://doi.org/10.3390/asi9030055>
23. C. K. Dewy, Y. Prambudia, and I. Kumalasari, "Design of inventory information system model on smart warehouse management system (WMS) based on artificial intelligence (AI) with integration of waterfall method and design thinking to optimize inventory accuracy," *Eduvest: Journal of Universal Studies*, vol. 5, no. 9, pp. 11898–11911, 2025.
24. O. Zabraoui, Y. Hmamou, A. Chafi, and S. Kammouri Alami, "A comparative study of multi-algorithm optimization for inventory analytics in supply chains," *Supply Chain Analytics*, vol. 12, Art. no. 100154, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2025.100154>

25. Y. Tang and C. Zha, "Application of internet of things (IoT) and machine learning (ML) in intelligent logistics supply chain," *Discover Internet of Things*, vol. 6, Art. no. 31, 2026.
<https://doi.org/10.1007/s43926-026-00282-1>
26. K. Wang and Y. Bai, "MOGO-AFNNet: A deep learning and multi-objective genetic algorithm framework for intelligent logistics warehouse layout and inventory control," *Informatica*, vol. 49, no. 24, pp. 287–304, 2025.
<https://doi.org/10.31449/inf.v49i24.10507>