

PENERAPAN TEKNOLOGI INDUSTRI 4.0 DALAM *LEAN WAREHOUSING*: *LITERATURE REVIEW*

Nadia Angelina Putri Pangestu¹⁾, Joniarto Parung²⁾, Eric Wibisono³⁾

Program Studi Magister Teknik Industri Universitas Surabaya

e-mail: ¹⁾nadia.app29@gmail.com, ²⁾jparung@staff.ubaya.ac.id, ³⁾ewibisono@staff.ubaya.ac.id

ABSTRAK

Gudang memiliki peran krusial dalam *supply chain* dengan menghubungkan aliran material antara *supplier* dengan *customer* serta mencocokkan permintaan dengan ketersediaan produk. Gangguan operasional gudang dapat menurunkan kepuasan pelanggan, sehingga dibutuhkan operasional gudang yang efektif dan efisien. Ide *lean*, termasuk *lean warehousing*, seringkali digunakan untuk mencapai kebutuhan ini. Pada sisi yang lain, *supply chain* yang semakin kompleks membuat perusahaan rentan terhadap kesalahan, sehingga teknologi industri 4.0 semakin banyak diterapkan. Berbagai penelitian mulai menggunakan teknologi industri 4.0 dalam penerapan *lean warehousing*. Namun, *literature review* mengenai integrasi penerapan teknologi industri 4.0 dengan *lean* cenderung berfokus pada area manufaktur. Penelitian ini bertujuan untuk meninjau topik penelitian dalam konteks penerapan teknologi industri 4.0 dalam *lean warehousing* dengan melakukan *literature review*. Hasil *literature review* menyimpulkan bahwa pilar *autonomous robots*, *simulation*, *horizontal and vertical system integration*, serta *the industrial internet of things* dari industri 4.0 banyak diterapkan bersama metodologi dan tools dari *lean warehousing*. Sebagian besar penelitian menganalisis proses gudang secara keseluruhan dan sebagian lain berfokus pada proses tertentu dalam gudang. Secara keseluruhan, penerapan teknologi industri 4.0 dalam *lean warehousing* mampu menghasilkan dampak positif signifikan, termasuk peningkatan efisiensi dan produktivitas. Diperlukan studi lebih lanjut mengenai bagaimana *lean warehousing* dapat menjadi dasar penerapan teknologi industri 4.0 serta isu dan tantangan yang dihadapi dalam implementasinya.

Kata kunci: gudang, teknologi industri 4.0, *lean warehousing*, *literature review*

ABSTRACT

Warehouse plays a crucial role in the *supply chain* by linking material flows between suppliers and customers, and also matching demand with product availability. Operational disruptions in warehouse can lead to decreased customer satisfaction, necessitating effective and efficient warehouse operations. Lean principles, including *lean warehousing*, are often used to achieve this. Additionally, increasing *supply chain* complexity makes companies vulnerable to costly errors, leading to broader adoption of industry 4.0 technologies. Various studies have begun integrating industry 4.0 technologies into *lean warehousing* practices. However, *literature reviews* on integrating industry 4.0 with lean principles tend to focus on manufacturing area. This study aims to review researches on the application of industry 4.0 technologies in *lean warehousing* through a *literature review*. The findings of the *literature review* indicate that *autonomous robots*, *simulation*, *horizontal and vertical system integration*, and *the industrial internet of things* are industry 4.0 pillars that are widely applied alongside *lean warehousing* methodologies and tools. Most studies analyze overall warehouse processes, while others focus on specific processes within the warehouse. Overall, the use of industry 4.0 technologies in *lean warehousing* leads to significant positive impacts, including increased efficiency and productivity. Further studies are needed to understand how *lean warehousing* can serve as a foundation for implementing industry 4.0 technologies and to address the issues and challenges in their concurrent application.

Keywords: warehouse, industrial technology 4.0, *lean warehousing*, *literature review*

PENDAHULUAN

Gudang memiliki peran krusial dalam *supply chain* dengan bertindak sebagai simpul (*node*) yang menghubungkan aliran material antara *supplier* dan *customer* [1]. Tidak hanya sebagai tempat penyimpanan barang, gudang juga menjalankan fungsi penting dalam mencocokkan permintaan dengan ketersediaan produk di berbagai tingkat *supply chain* [2]. Oleh karena itu, aktivitas gudang perlu diperhatikan agar dapat berfungsi dengan baik [3].

Secara umum, aktivitas gudang terdiri dari *receiving, putaway, storing, order picking*, dan *shipping* [4]. Alur operasional gudang yang tidak lancar dapat menimbulkan berbagai masalah dan dampak negatif yang berujung pada penurunan kepuasan pelanggan. Sebagai contoh, aktivitas gudang yang terganggu dapat menghambat lantai produksi untuk menyediakan produk berkualitas tinggi dalam waktu singkat [5,6,7]. Oleh karena itu, operasional gudang yang efektif dan efisien penting untuk dimiliki perusahaan. Hal ini seringkali dicapai dengan menerapkan ide *lean* [8].

Lean mulanya diperkenalkan oleh Toyota Production System (TPS) bagi proses manufaktur (*lean manufacturing*) sebagai usaha Toyota Motor Company dalam memproduksi mobil dengan kualitas terbaik serta biaya dan *lead time* yang minimum. Hingga saat ini, prinsip *lean manufacturing* banyak digunakan karena efektivitas dan efisiensinya untuk mengurangi *waste*, menurunkan *lead time*, dan memperbaiki produktivitas [9]. Seiring waktu, *lean* tidak hanya diimplementasikan pada area manufaktur, tetapi juga pada area lain dari perusahaan, seperti *supply chain*, gudang, dan bahkan pada organisasi itu sendiri [10]. Kemampuan *lean* dalam mengidentifikasi dan mengeliminasi aktivitas-aktivitas yang tergolong sebagai *waste (non-value added)* [11] menyebabkan penerapan *lean* dalam sistem gudang (*lean warehousing*) menjadi penting untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi gudang secara keseluruhan. Suatu aktivitas dapat dikatakan sebagai *waste* apabila termasuk salah satu dari kategori-kategori pada Tabel 1.

Tabel 1. Jenis *Waste* dalam Lingkungan Gudang

<i>Waste Type</i>	<i>Production</i>	<i>Warehouse</i>
<i>Waste of production (overproduction)</i>	<i>A waste of materials is caused by overproduction in manufacturing</i>	<i>Inventory excess is considered overproduction waste in warehousing</i>
<i>Waste of time (waiting and idle time)</i>	<i>Waste of time</i>	<i>The same as in production</i>
<i>Waste of transportation</i>	<i>Needless material and tools movement</i>	<i>In the process of handling materials, unneeded movements cause waste</i>
<i>Waste of inventory</i>	<i>Inventory waste happens when purchasing or storing excessive supplies, materials, and other resources</i>	<i>When stock-outs are frequent, poor inventory control causes waste</i>
<i>Waste of processing</i>	<i>This waste comes from unnecessary processing that does not add value to the item produced</i>	<i>When over-checking happens, it is considered as waste</i>
<i>Waste of motion</i>	<i>Needless movement of workers</i>	<i>When there is a search for items or tools that cannot be located, this causes waste in movement</i>
<i>Waste of defect</i>	<i>Items that are defective are a waste production resources</i>	<i>Errors result in waste</i>
<i>Waste of creativity</i>	<i>Workers' unused creative ideas are considered a waste of human resources</i>	<i>The same as in production</i>

Sumber: Ackerman (2007)

Keberhasilan penerapan *lean warehousing* dalam memperbaiki sistem gudang telah dibuktikan dalam berbagai penelitian. Aplikasi *lean* dalam aktivitas gudang dinilai mampu menghasilkan perbaikan substansial, seperti peningkatan efisiensi prosedur, pengurangan waktu pemrosesan dan waktu tunggu bagi pelanggan, serta mengontrol variasi *inventory* [13]. Bahkan, penelitian menunjukkan bahwa perbaikan pergudangan dengan konsep *lean* mampu mengurangi waktu pemrosesan pesanan sebesar 50% [14]. Studi lain juga menunjukkan berbagai macam dampak positif dari *lean warehousing*, seperti penghematan waktu hingga 36% dalam proses penerimaan, penyimpanan dan pengambilan [15], serta pengurangan waktu *return* sebesar 24% dan pengurangan waktu pencarian produk sebesar 20% pada proses *order picking* [16].

Proses-proses dalam *supply chain*, termasuk gudang, yang semakin kompleks membuat perusahaan rentan terhadap berbagai kesalahan yang merugikan. Itulah mengapa di era revolusi industri 4.0 ini pemanfaatan teknologi industri 4.0 dalam proses *supply chain* semakin luas, mulai dari *data collection, data storing*, hingga *data analysis*. Teknologi industri 4.0 mengacu pada *cyber-physical system (CPS)*, yang mana dunia fisik terhubung dengan dunia virtual [9], sedangkan industri 4.0 sendiri didefinisikan sebagai visi industri

yang memungkinkan orang dan benda terhubung kapan saja, di mana saja, dengan apa saja dan siapa saja, yang idealnya menggunakan jaringan dan layanan apapun [17]. Klasifikasi dari beberapa teknologi industri 4.0 ditunjukkan pada Tabel 2.

Penggunaan teknologi industri 4.0 dinilai mampu menghasilkan peningkatan keuntungan, peningkatan kualitas, pengurangan *lead time*, pengurangan risiko kehilangan atau kesalahan pencatatan, dan waktu pengambilan keputusan yang lebih cepat [19]. Terlebih lagi, saat ini teknologi industri 4.0 dipandang sebagai paradigma baru untuk menghubungkan manusia, mesin, dan proses pada kondisi kerangka operasional yang terus berubah dan sistem manajemen yang terdistribusi [9]. Sejalan dengan hal tersebut, para peneliti telah berupaya mengintegrasikan teknologi industri 4.0 dengan *lean* untuk memenuhi permintaan pelanggan secara efektif dan efisien. Beberapa penelitian telah menunjukkan kaitan positif antara teknologi 4.0 dengan prinsip *lean*, yang mana teknologi industri 4.0 mendukung penerapan *lean* [20,21,22,23,24].

Tabel 2. Klasifikasi Teknologi Industri 4.0

<i>Industry 4.0 Pillar</i>	<i>Technology or Characteristic</i>
<i>Autonomous Robots</i>	<i>Collaborative robots Automated guided vehicles (AGV) Smart machines</i>
<i>Simulation</i>	<i>Of product or of process Digital twin</i>
<i>Horizontal and Vertical System Integration</i>	<i>Interconnection between machines and MES/ERP Data sharing between suppliers, company and customers</i>
<i>The Industrial Internet of Things (IoT)</i>	<i>Radio frequency identification (RFID), sensors, tags, global positioning systems Real-time scanning through smartphone Smart bin</i>
<i>Cybersecurity</i>	<i>Encryption, cryptography, virus scanners, signature scanner, information and communication technology (ICT) anomaly detection/IDS</i>
<i>Cloud</i>	<i>Cloud systems for data sharing or for analytics application</i>
<i>Additive Manufacturing</i>	<i>3D Printing Smart materials</i>
<i>Augmented Reality (AR)</i>	<i>Augmented Reality Virtual Reality</i>
<i>Big Data e-Analytics</i>	<i>Descriptive (and diagnostic), predictive, prescriptive Artificial Intelligence</i>

Sumber: Ciano et al. (2021)

Literature review yang membahas integrasi teknologi industri 4.0 dengan prinsip *lean* cenderung berfokus pada area manufaktur atau produksi (*lean manufacturing*). *Literature review* yang membahas sinergi antara teknologi industri 4.0 dengan *lean* pada area gudang masih terbatas. Padahal, digitalisasi dan otomasi serta kompleksitas yang terus meningkat semakin mendorong kebutuhan akan penerapan teknologi industri 4.0 dan prinsip *lean*, tidak hanya pada proses manufaktur, tetapi juga pada proses gudang. Oleh karena itu, *paper* ini dibuat untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan melakukan *literature review* terhadap penelitian-penelitian yang menerapkan teknologi industri 4.0 dan *lean warehousing* secara simultan. Melalui *literature review*, *paper* ini bertujuan untuk memahami topik penelitian dalam konteks penerapan teknologi industri 4.0 dalam *lean warehousing* dengan menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut: 1) Apa saja teknologi industri 4.0 dan elemen *lean warehousing* yang dibahas?; 2) Aktivitas gudang apa saja yang dibahas dalam penggunaan teknologi industri 4.0 sekaligus penerapan *lean warehousing*?; 3) Bagaimana peran teknologi industri 4.0 yang digunakan dalam penerapan *lean warehousing*?

METODE PENELITIAN

Metode dari studi ini adalah *literature review* untuk memberikan gambaran komprehensif terkait penelitian yang berhubungan dengan penerapan teknologi industri 4.0 dan *lean warehousing* secara simultan. Pencarian literatur dilakukan melalui Publish or Perish untuk *database* Scholar serta melalui Science Direct. Kombinasi utama dari kata kunci yang digunakan dalam pencarian literatur adalah “*industry 4.0 technology*” dan “*lean*

warehousing”. Pencarian juga dilakukan dengan mengubah kata kunci pertama dengan kata kunci yang lebih spesifik terkait jenis teknologi industri 4.0. Setiap kata kunci pertama dilakukan pencarian sebanyak dua kali, yaitu untuk “*lean warehousing*” dan “*lean warehouse*”. Kata kunci teknologi industri 4.0 yang digunakan adalah teknologi-teknologi yang juga diintegrasikan dengan penerapan *lean manufacturing*, sesuai dengan [9], yaitu “CPS”, “AGV”, “*simulation*”, “*internet of things*” (IoT), “RFID”, “ICT”, “*big data*”, “*cloud computing*”, “*sensor*”, dan “*augmented reality*”. Teknologi industri 4.0 lain yang biasa digunakan dalam gudang juga ditambahkan sebagai kata kunci pencarian, yaitu “*barcode*”, “*automated storage and retrieval systems*” (AS/RS), dan “*warehouse management system*” (WMS). Rentang tahun publikasi yang dipilih adalah mulai tahun 2014 hingga tahun 2024 untuk menjaga relevansi topik dengan penelitian-penelitian terbaru, yaitu dari sepuluh tahun terakhir. Literatur kemudian disaring berdasarkan kesesuaian judul dan abstrak dengan topik yang ingin dibahas. Literatur yang tidak berbahasa Inggris tidak dilibatkan dalam *paper* ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 3 merangkum 25 literatur yang membahas penggunaan teknologi industri 4.0 dan penerapan *lean warehousing* secara simultan.

Tabel 3. Rangkuman Literatur yang Diulas

Referensi	Tipe	Jenis Industri	Proses Gudang yang Menjadi Fokus	Tujuan Penelitian	Teknologi Industri 4.0 yang Digunakan/Dibahas	Metodologi/Tools Lean
[25]	Jurnal	Manufaktur	Proses gudang secara keseluruhan	Membangun dan mengelola <i>platform mobile robotic</i> di gudang sebagai alat utama dari <i>lean</i> .	<i>System integration</i> , AS/RS, <i>collaborative robots</i> , ICT	Heijunka, JIT, Kanban, TPM, 5S, SMED, dan Poka Yoke
[26]	Jurnal	Kabel otomotif	Logistik	Mengusulkan desain proses <i>downstream supply chain</i> baru dengan integrasi teknologi 4.0.	AS/RS, <i>robotic automation</i> , <i>barcodes</i> , AGV, RFID, <i>scanner</i> , WMS	VSM dan identifikasi <i>waste</i>
[27]	Jurnal	Otomotif	Proses gudang secara keseluruhan	Mempelajari penggunaan algoritma ARIZ-85C untuk menyelesaikan masalah kompleks.	Simulasi	DMAIC, diagram SIPOC, identifikasi <i>waste</i> , dan diagram Ishikawa
[28]	Konferensi	Pelat baja	<i>Loading</i>	Menyajikan penerapan <i>lean six sigma</i> pada operasional gudang produk jadi dengan pendekatan <i>discrete event simulation</i> untuk mengurangi <i>waste</i> pada proses <i>loading</i> .	Simulasi	DMAIC, diagram SIPOC, VSM, , identifikasi <i>waste</i> , diagram Ishikawa, dan 5S
[29]	Konferensi	Tekstil	<i>Supply dan storage</i>	Meningkatkan daya saing sektor tekstil di Peru yang didominasi oleh UKM.	Simulasi	<i>Procurement</i> -VSM dan matriks FMEA
[30]	Konferensi	F&B	Proses gudang secara keseluruhan	Meningkatkan efisiensi penyimpanan dan perputaran stok.	Simulasi	Kanban dan 5S
[31]	Konferensi	Farmasi	Proses gudang secara keseluruhan	Mengintegrasikan VSM sebagai metode penilaian efisiensi dengan <i>digital twin</i> untuk mengevaluasi kinerja gudang.	<i>Digital twin</i>	VSM
[32]	Konferensi	Farmasi	<i>Inventory handling</i>	Mengurangi akumulasi <i>lead time supply chain</i> .	<i>Digital twin</i> , AS/RS, RFID	VSM, Gemba, dan 5S
[33]	Jurnal	Percetakan	Aliran material	Memberi solusi <i>smart warehouse</i> untuk <i>machine vision</i> , <i>material tracking</i> , dan pengurangan <i>waste</i> .	IoT, QR code, <i>machine vision</i>	<i>Waste of time</i>
[34]	Jurnal	Minyak dan gas	Proses gudang secara keseluruhan	Mengoptimalkan operasional gudang dengan mempertimbangkan inovasi-inovasi yang ada agar efisien, efektif, dan produktif.	RFID, IoT	Metode A3, Gemba, VSM, diagram Ishikawa, dan 5S

Lanjutan Tabel 3. Rangkuman Literatur yang Diulas

Referensi	Tipe	Jenis Industri	Proses Gudang yang Menjadi Fokus	Tujuan Penelitian	Teknologi Industri 4.0 yang Digunakan/Dibahas	Metodologi/Tools Lean
[35]	Konferensi	F&B	<i>Order picking</i> dan <i>shipping</i>	Melengkapi temuan-temuan dari penelitian sebelumnya melalui studi empiris terkait manfaat penerapan prinsip <i>lean</i> pada operasional gudang.	<i>Barcode</i>	VSM
[36]	Tesis dan disertasi	Garmen	Proses gudang secara keseluruhan	Memperbaiki proses-proses gudang untuk mengurangi <i>waste</i> waktu dan aktivitas NVA.	RFID	DMAIC, diagram SIPOC, VSM, dan diagram Ishikawa
[37]	Jurnal	Elektronik	<i>Order picking</i>	Menganalisis penggunaan QR code pada platform seluler untuk memperbaiki proses <i>order picking</i> .	QR code	<i>Waste of transportation</i> dan <i>waste of time</i>
[38]	Jurnal	Cat	Proses gudang secara keseluruhan	Memperluas penggunaan VSM untuk seluruh jenis <i>warehousing waste</i> .	<i>Barcode</i> dan <i>centralized system</i>	VSM, identifikasi <i>waste</i> , analisis Pareto, <i>visual indicators</i>
[39]	Jurnal	Manufaktur logistik	Proses gudang secara keseluruhan	Memperbaiki proses gudang.	WMS, <i>picking technology</i> , <i>integrated system</i> , RFID, <i>barcode</i>	JIT
[40]	Konferensi	<i>Spare part</i>	Pemenuhan pesanan	Mengembangkan rancangan manajemen sistem gudang menggunakan metode Kanban <i>barcode</i> untuk memudahkan operator dalam merekap data keluar masuknya barang pesanan.	WMS dan <i>barcode</i>	JIT dan Kanban
[41]	Jurnal	Manufaktur	Logistik	Mengusulkan model algoritma kontrol berbasis bukti untuk membantu mengurangi rata-rata waktu eksekusi pesanan dari AS/RS.	AS/RS	<i>Waste of transportation</i> dan <i>waste of time</i>
[42]	Jurnal	Manufaktur	Proses gudang secara keseluruhan	Mengetahui pengaruh praktik <i>lean warehousing</i> terhadap kinerja perusahaan manufaktur besar di Kenya.	AS/RS dan <i>system integration</i>	<i>Waste of time</i> dan <i>waste of defect</i>
[43]	Jurnal	Sepatu	<i>Item allocation</i> dan <i>order picking</i>	Mengurangi jumlah dan durasi proses <i>picking</i> .	AS/RS	5S dan <i>waste of time</i>
[44]	Jurnal	F&B	Logistik	Meningkatkan efisiensi gudang, mengoptimalkan proses pencarian, proses inventaris, dan mekanisasi logistik internal	AS/RS dan <i>collaborative robots</i>	<i>Continuous improvement</i>
[45]	Jurnal	Desain interior	Proses gudang secara keseluruhan	Mengusulkan pendekatan baru untuk mengurangi inefisiensi gudang produksi.	WMS	VSM dan Gemba
[46]	Jurnal	<i>Retail</i>	Aliran material	Mengevaluasi tingkat kinerja dan meningkatkan produktivitas gudang.	WMS, RFID, <i>picking technology</i>	VSM
[47]	Jurnal	Manufaktur	Proses gudang secara keseluruhan	Memvalidasi pendekatan optimasi multi-metode untuk mengidentifikasi dan mengurangi <i>waste</i> di gudang distribusi.	WMS	VSM, Gemba, dan identifikasi <i>waste</i>
[48]	Konferensi	F&B	Proses gudang secara keseluruhan	Mengurangi <i>food waste</i> yang dihasilkan dari operasi gudang	GPS	<i>Continuous improvement</i> dan Kanban
[49]	Jurnal	Peralatan medis	Aliran material	Mendesain dan mengimplementasikan WMS untuk mengelola ketelusuran material.	WMS	DMAIC dan <i>waste of time</i>

Teknologi Industri 4.0 dan Elemen *Lean Warehousing* yang Dibahas

Hasil *literature review* menunjukkan bahwa penggunaan teknologi industri 4.0 dalam penerapan *lean warehousing* terus berkembang di berbagai industri, mulai dari industri otomotif, tekstil, *food and beverage* (F&B), elektronik, hingga farmasi. Hal ini ditunjukkan dari beragam teknologi industri 4.0 yang diterapkan bersama *lean warehousing*, termasuk pilar *autonomous robots*, *simulation*, *horizontal and vertical system integration*, serta *the industrial IoT*, seperti yang terlihat pada Tabel 3. Bahkan, beberapa penelitian membahas penggunaan lebih dari satu pilar industri 4.0. Contohnya [46] yang membahas penggunaan WMS, RFID, dan sistem *put-to-light* untuk meningkatkan produktivitas gudang. [26] mengusulkan implementasi *stacker cranes* dan *robotic automation* pada proses *pickup*, *loading*, dan *unloading*, *barcode* pada proses *sorting*, RFID dan *scan* pada proses verifikasi, serta AGV pada proses pemindahan barang untuk modernisasi perusahaan. [32] juga mengusulkan penggunaan RFID, melakukan pengaturan AS/RS, dan memanfaatkan simulasi *digital twin* untuk memvisualisasikan dan memantau proses secara statistik. Pilar *augmented reality* (AR) masih jarang dibahas, meskipun sudah mulai banyak digunakan dalam berbagai gudang seperti pada [50].

Bersamaan dengan penggunaan teknologi industri 4.0, konsep *lean warehousing* diterapkan melalui berbagai macam cara seperti yang tercantum pada Tabel 3. Dari *literature review* diperoleh bahwa dari 8 jenis *waste* untuk lingkungan gudang, *waste of time* [27,28,33,37,49], *transportation* [27,37], dan *defect* [27,28] merupakan 3 jenis *waste* yang sering dibahas. Tidak hanya berfokus pada *waste*, berbagai penelitian mengimplementasikan pilar JIT termasuk Heijunka, SMED, dan Kanban [25,30,39,40,48] serta pondasi dari *house of lean* seperti *continuous improvement*, 5S, dan *total productive maintenance* (TPM) [25,28,30,32,34,43,44,48]. Metodologi perbaikan proses dari *lean six sigma*, yaitu *define-measure-analyze-improve-control* (DMAIC), bersamaan dengan penggunaan diagram *suppliers, inputs, process, output, and customers* (SIPOC) dan diagram Ishikawa, yang seringkali diterapkan dalam konteks manufaktur, juga diaplikasikan dalam konteks operasional gudang [27,28,36,49]. *Value stream mapping* (VSM) juga merupakan *lean tools* yang secara signifikan digunakan untuk menyajikan visualisasi proses dan mengidentifikasi proses di mana aktivitas *waste* atau *non-value added* (NVA) terjadi [26,28,29,31,32,34,35, 36,38,45,46,47]. Dalam integrasinya dengan penerapan teknologi industri 4.0, *lean tools* yang dikembangkan mulai digunakan dalam penelitian terkait. Salah satunya adalah [26] yang menggunakan VSM 4.0 tidak hanya untuk mengidentifikasi *waste* klasik, tetapi juga *information waste*.

Aktivitas Gudang yang Dibahas dalam Penggunaan Teknologi Industri 4.0 Sekaligus Penerapan *Lean Warehousing*

Teknologi industri 4.0 yang diterapkan bersamaan dengan *lean warehousing* sebagian besar digunakan untuk menganalisis dan memperbaiki proses gudang secara keseluruhan. Dalam penelitian-penelitian tersebut, jenis teknologi yang banyak digunakan adalah *centralized* atau *integrated system* [25,38,42], termasuk *warehouse management system* (WMS) [39,45,47] atau IoT [34]. Selain itu, teknologi simulasi [27,30], termasuk *digital twin* [31], juga dimanfaatkan untuk menggambarkan proses gudang secara keseluruhan dan menganalisis tindakan sebelum diimplementasikan. Elemen *lean warehousing* yang digunakan dalam penelitian-penelitian tersebut adalah konsep yang juga mampu menggambarkan dan menganalisis keseluruhan proses gudang, seperti DMAIC, *continuous improvement*, dan VSM.

Penelitian yang lain cenderung memusatkan analisis pada satu proses tertentu dalam gudang dengan berbagai macam pertimbangan. [28] berfokus pada proses *loading* karena kompleksitas permasalahan pada proses *sorting* dan *reshuffle* dinilai sebagai hal yang

menarik untuk diperbaiki dan diteliti. [32] menilai bahwa akumulasi *lead time* yang diakibatkan oleh *inventory handling* gudang mempersulit pemenuhan pesanan dan peningkatan efisiensinya sangat penting untuk menghindari *bottleneck*. Pada [37], proses *order picking* dijadikan fokus penelitian karena merupakan proses yang memakan biaya dan waktu terbanyak. Beberapa penelitian menganalisis lebih dari satu jenis aktivitas gudang. [43] menganalisis proses *item allocation* sekaligus *order picking* pada gudang dengan sistem AS/RS sebagai aktivitas yang berhubungan. [35] juga menganalisis proses *order picking* yang diikuti oleh *shipping* sebagai proses yang berurutan. [29] berfokus pada proses *supply material*, sebagai tahap yang menghasilkan ketidaksesuaian pesanan dan keterlambatan, sekaligus proses *storage* untuk memastikan kualitas barang selama disimpan. Dalam [29], VSM diadaptasi untuk memetakan proses yang lebih spesifik, yaitu *procurement*, yang kemudian disebut sebagai *Procurement-VSM (P-VSM)*. Secara keseluruhan diperoleh bahwa teknologi industri 4.0 yang diterapkan secara simultan dengan *lean warehousing* mampu memberikan dampak positif yang signifikan pada berbagai macam proses gudang, mulai dari proses *loading*, logistik, aliran material, *storage*, *order picking*, hingga *shipping*.

Peran Teknologi Industri 4.0 dalam Penerapan *Lean Warehousing*

Berdasarkan *literature review*, penelitian-penelitian yang menerapkan teknologi industri 4.0 dan *lean warehousing* secara bersamaan menunjukkan berbagai macam hasil positif yang signifikan. Sebagian besar penelitian menghasilkan pengurangan waktu, baik itu *lead time*, *cycle time*, *travel time*, waktu NVA, *loading*, *order picking*, eksekusi pesanan, hingga pencarian produk/material. Salah satu hasil yang cukup berbeda dari penerapan *lean warehousing* saja adalah penurunan *error* atau peningkatan akurasi yang tidak hanya dicapai melalui *visual management* atau 5S, melainkan akibat adanya penggunaan teknologi industri 4.0 yang memiliki fitur sistem terintegrasi, otomatisasi pencatatan data secara *real-time*, dan standardisasi informasi. Salah satu yang dilakukan pada [40] adalah menggabungkan konsep Kanban dengan penggunaan *barcode* untuk melakukan pencatatan data transaksi yang *just-in-time* secara otomatis dan cepat. Penggunaan *barcode* memungkinkan setiap produk untuk diidentifikasi secara unik dan dipindai dengan akurasi tinggi, sehingga mengurangi *human error* dalam pencatatan data. Selain itu, data-data produk yang tercatat dalam WMS dapat diperbarui secara *real-time* setiap kali *barcode* dipindai saat terjadi transaksi, memastikan bahwa informasi *inventory* selalu akurat dan terbaru. Integrasi penerapan teknologi industri 4.0 dan *lean warehousing* juga menghasilkan pengurangan biaya. Beberapa di antaranya adalah pengurangan biaya tenaga kerja yang dicapai akibat pengurangan jarak (*waste of transportation*) dan waktu (*waste of time*) *order picking* dari penggunaan QR code pada platform seluler [37], serta pengurangan biaya *maintenance* produk jadi akibat *human error* dari digitalisasi gudang yang dipertahankan dengan *continuous improvement* [44]. Secara keseluruhan hasil dari penelitian-penelitian ini mengindikasikan adanya peningkatan efisiensi dan produktivitas.

Hasil lain yang diperoleh dari penerapan teknologi industri 4.0 dalam *lean warehousing* yaitu peningkatan *item tracking* [26] yang mampu mengurangi *waste*, seperti *waste of time* akibat waktu pencarian *item* yang lama [33]. Selain itu diperoleh pengurangan jumlah *defect* [42,48], penurunan tingkat kecelakaan [26], dan pengurangan jarak *order picking* (*waste of transportation*) [37]. [26] juga menyinggung peningkatan kerja lingkungan. Hal ini diperoleh dari pengurangan konsumsi energi dengan mengoptimasi perpindahan dalam gudang dan beralih ke *handling* otomatis elektrik yang menggantikan *handling* tradisional berbasis bahan bakar.

Secara keseluruhan, dari *literature review* yang dilakukan, peran teknologi industri 4.0 dalam penerapan *lean warehousing* dapat terbagi menjadi dua kategori. Terdapat 22 literatur yang termasuk dalam kategori pertama, yang mana teknologi industri 4.0 mendukung atau

meningkatkan efektivitas dari penerapan *lean warehousing*. Sebagai contoh, pada [38], *barcode scanners* dan *centralized system (software CRM)* digunakan dengan tujuan meminimasi NVA atau *waste* yang telah diidentifikasi dalam proses gudang berdasarkan VSM dan analisis Pareto. Kategori kedua, yaitu penerapan teknologi industri 4.0 dan *lean warehousing* yang saling melengkapi, dapat ditunjukkan pada 3 literatur. Salah satunya adalah [31] yang mengintegrasikan VSM sebagai metode penilaian efisiensi ke dalam konsep *digital twin* untuk mengevaluasi kinerja gudang dengan mempertimbangkan strukturnya yang dinamis dan kompleks. Literatur yang termasuk pada setiap kategori dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Klasifikasi Literatur Berdasarkan Peran Teknologi Industri 4.0 dalam Penerapan *Lean Warehousing*

Klasifikasi	Literatur Terkait
Teknologi industri 4.0 mendukung atau meningkatkan efektivitas dari penerapan <i>lean warehousing</i>	[25, 26, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49]
Penerapan teknologi industri 4.0 dan <i>lean warehousing</i> saling melengkapi	[27, 31, 40]

Penelitian yang menerapkan teknologi industri 4.0 dan *lean warehousing* secara simultan masih sangat berfokus pada peran teknologi industri 4.0 yang mendukung penerapan *lean warehousing*. Masih sedikit literatur yang membahas bagaimana *lean warehousing* bisa menjadi dasar dalam menerapkan teknologi industri 4.0. Padahal, perlu adanya evaluasi terhadap penerapan teknologi industri 4.0 yang tidak menambah kompleksitas proses gudang. Selain itu, isu dan tantangan dalam menerapkan teknologi industri 4.0 bersamaan dengan *lean warehousing* juga masih belum banyak dibahas.

KESIMPULAN

Studi ini bertujuan untuk memahami topik penelitian yang membahas penerapan teknologi industri 4.0 dan *lean warehousing* secara simultan. Berbagai macam teknologi industri 4.0 telah digunakan dalam penelitian, terutama yang termasuk dalam pilar *autonomous robots, simulation, horizontal and vertical system integration*, serta *the industrial IoT*. Pilar AR masih belum banyak dibahas, meskipun penggunaannya sudah mulai meningkat dalam berbagai gudang. Spektrum *lean warehousing* yang diterapkan juga cukup luas, mulai dari konsep *waste, JIT*, hingga pondasi-pondasi dari *house of lean*, seperti *continuous improvement, 5S*, dan *TPM*. Metodologi *DMAIC* dan *tool VSM* juga signifikan digunakan dalam berbagai literatur.

Sebagian besar penelitian membahas proses gudang secara keseluruhan dan menggunakan teknologi industri 4.0 serta elemen *lean warehousing* yang memiliki cakupan efek yang luas, seperti *centralized* atau *integrated system, WMS, IoT, dan DMAIC, continuous improvement, VSM*. Penelitian lainnya ada yang berfokus pada satu proses tertentu dalam gudang, seperti proses *loading, inventory handling, dan order picking*. Terdapat juga penelitian yang berfokus pada lebih dari satu proses yang berhubungan atau berurutan, seperti *item allocation* dan *order picking* atau *order picking* dan *shipping*. Secara keseluruhan, diperoleh hasil yang positif secara signifikan dari penerapan teknologi industri 4.0 dalam *lean warehousing*. Beberapa di antaranya yaitu pengurangan *waste of time, transportation, dan defect*. Selain itu juga diperoleh pengurangan biaya operasional, peningkatan *product tracking*, hingga penurunan tingkat kecelakaan. Penggunaan teknologi industri 4.0 dalam penerapan *lean warehousing* dapat diklasifikasikan dalam 2 kategori, yaitu teknologi industri 4.0 yang mendukung atau meningkatkan efektivitas penerapan *lean warehousing* dan penerapan teknologi industri 4.0 dan *lean warehousing* yang saling melengkapi. Diperlukan studi lebih lanjut mengenai bagaimana *lean warehousing* bisa

menjadi dasar dalam menerapkan teknologi industri 4.0, serta pembahasan isu dan tantangan dalam menerapkan teknologi industri 4.0 dan *lean warehousing* secara bersamaan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Ramaa, K.N. Subramanya, and T.M. Rangaswamy, “Impact of warehouse management system in a supply chain,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 54, no. 1, pp. 14–20, 2012.
- [2] Y.A. Nugroho and K.P.A. Pranata, “Penataan layout gudang penyimpanan consumer goods menggunakan metode shared storage,” *Jurnal Cakrawala Ilmiah*, vol. 1, no. 4, pp. 597–604, 2021.
- [3] N.B. Puspitasari and A.Y. Ardila, “Implementation of lean warehouse to minimize wastes in finished goods warehouse of PT Charoen Pokphand Indonesia Semarang,” *ComTech: Computer, Mathematics and Engineering Applications*, vol. 7, no. 1, pp. 1–9, 2016, doi: 10.21512/comtech.v7i1.2185.
- [4] E.H. Frazelle, *World-Class Warehousing and Material Handling*, McGraw-Hill Education, 2016.
- [5] S.W.Y. Cheng, K.L. Choy, and H.Y. Lam, “A workflow decision support system for achieving customer satisfaction in warehouses serving machinery industry,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 1714–1719, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.333.
- [6] T. Phupattarakit and P. Chutima, “Warehouse management improvement for a textile manufacturer,” *2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, pp. 235–239, 2019, doi: 10.1109/IEA.2019.8714853.
- [7] Y. Prasetyawan, A.K. Simanjuntak, N. Rifqy, and L. Auliya, “Implementation of lean warehousing to improve warehouse performance of plastic packaging company,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 852, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/852/1/012101.
- [8] K.A. Bonilla-Ramirez, P. Marcos-Palacios, J.C. Quiroz-Flores, E.D. Ramos-Palomino, and J.C. Alvarez-Merino, “Implementation of lean warehousing to reduce the level of returns in a distribution company,” *2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, pp. 886–890, 2019, doi: 10.1109/IEEM44572.2019.8978755.
- [9] M.M. Hossain and G. Purdy, “Integration of industry 4.0 into lean production systems: a systematic literature review,” *Manufacturing Letters*, vol. 35, pp. 1347–1357, 2023, doi: 10.1016/j.mfglet.2023.08.098.
- [10] Y. Prasetyawan and N.G. Ibrahim, “Warehouse improvement evaluation using lean warehousing approach and linear programming,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 847, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/847/1/012033.
- [11] V. Gaspersz and A. Fontana, *Lean Six Sigma for Manufacturing and Service Industries*, Bogor: Vinchristo Publication, 2011.
- [12] K.B. Ackerman, *Lean Warehousing*, Ackerman Publications, USA, 2007.
- [13] R. Martins, M.T. Pereira, L.P. Ferreira, J.C. Sá, and F.J.G. Silva, “Warehouse operations logistics improvement in a cork stopper factory,” *Procedia Manuf.*, vol. 51, pp. 1723–1729, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.240.
- [14] M. Mamad, N. Mouyouth, and J. Aboulhaoua, “Warehousing process improvement through implementation of lean: a case studies of optimizing and reorganizing two warehouses in Morocco,” *Revue Marocaine de Management, Logistique et Transp.*, vol. 2, no. 2, pp. 73–90, 2017.
- [15] A.C. Cagliano, S. Grimaldi, and M. Schenone, “Proposing a new framework for lean warehousing: First experimental validations,” *Proceedings of the XXIII Summer School “Francesco Turco”–Industrial Systems Engineering*, pp. 156–163, 2018.

- [16] M. Perez-Morante, T. Donoso-Muñoz, E. Altamirano, and C. Del Carpio, “Model focused on increasing picking efficiency through lean and cycle counting,” *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial and Business Engineering*, pp. 32–37, 2021, doi: 10.1145/3494583.3494589.
- [17] T. Wagner, C. Herrmann, and S. Thiede, “Industry 4.0 impacts on lean production systems,” *Procedia CIRP*, vol. 63, pp. 125–131, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2017.02.041.
- [18] M.P. Ciano, P. Dallasega, G. Orzes, and T. Rossi, “One-to-one relationships between industry 4.0 technologies and lean production techniques: a multiple case study,” *International Journal of Production Research*, vol. 59, no. 5, pp. 1386–1410, 2021, doi: 10.1080/00207543.2020.1821119.
- [19] L.N. Tikwayo and T.N.D. Mathaba, “Applications of industry 4.0 technologies in warehouse management: a systematic literature review,” *Logistics*, vol. 7, no. 2, pp. 1–19, 2023, doi: 10.3390/logistics7020024.
- [20] D. Kolberg and D. Zühlke, “Lean automation enabled by industry 4.0 technologies,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 1870-1875, 2015.
- [21] D. Powell, D. Romero, P. Gaiardelli, C. Cimini, and S. Cavalieri, “Towards digital lean cyber-physical production systems: industry 4.0 technologies as enablers of leaner production,” *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.*, vol. 536, pp. 353–362, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-99707-0_44.
- [22] T. Ito, M.S. Abd Rahman, E. Mohamad, A.A. Abd Rahman, and M.R. Salleh, “Internet of things and simulation approach for decision support system in lean manufacturing,” *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 14, no. 2, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1299/jamdsm.2020jamdsm0027.
- [23] V. Taghavi and Y. Beauregard, “The relationship between lean and industry 4.0: literature review,” *Proceedings of the 5th North American Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, pp. 808–820, 2020.
- [24] M. Mahdavisarif, A.C. Cagliano, and C. Rafele, “Investigating the integration of industry 4.0 and lean principles on supply chain: a multi-perspective systematic literature review,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 2, 2022, doi: 10.3390/app12020586.
- [25] I. Nevliudov, V. Yevsieiev, O. Klymenko, N. Demska, and M. Vzhesnievskyi, “Evolutions of group management development of mobile robotic platforms in warehousing 4.0,” *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, vol. 4, no. 4 (18), pp. 57–64, 2021, doi: 10.30837/itssi.2021.18.057.
- [26] Y.E. Kihel, A.E. Kihel, S. Embarki, "Optimization of the sustainable distribution supply chain using the lean value stream mapping 4.0 tool: a case study of the automotive wiring industry," *Processes*, vol. 10, no. 9, 2022.
- [27] F.Z. Ben Moussa, R. De Guio, S. Dubois, I. Rasovska, and R. Benmoussa, “Study of an innovative method based on complementarity between ARIZ, lean management and discrete event simulation for solving warehousing problems,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 132, pp. 124–140, 2019, doi: 10.1016/j.cie.2019.04.024.
- [28] H. Suciadi and D. Ishak, "Analysis of loading time improvement on finished product warehouse using lean six sigma and discrete event simulation," *Proceedings of the 4th Asia Pacific Conference on Research in Industrial and Systems Engineering*, pp. 207–214, 2021, doi: 10.1145/3468013.3468333.
- [29] J. Coronel-Vasquez, D. Huamani-Lara, A. Flores-Perez, M. Collao-Diaz, and J. Quiroz-Flores, “Logistics management model to reduce non-conforming orders through lean warehouse and JIT: a case of study in textile SMEs in Peru,” *Proceedings of the 2022 9th International Conference on Industrial Engineering and Applications*, pp. 19–24, 2022, doi: 10.1145/3523132.3523136.
- [30] S.C. Espino-Sanchez, A.X. Vasquez-Ortiz, and J.C. Quiroz-Flores, “Increased

- inventory turnover through a lean warehousing management model in SMEs suppliers to the food industry,” *8th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)*, pp. 25–31, 2022, doi: 10.1109/IESTEC54539.2022.00013.
- [31] S. Abdoli, “Digital twin and value stream mapping of warehousing in era of industry 4.0,” *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics*, pp. 823–832, 2023, doi: 10.15488/13501.
- [32] A.Z. Abideen, “An integration of lean and digital twin simulation modelling for warehouse material handling and optimization,” *14th Annual International Conference of Industrial Engineering and Operations Management*, 2024, doi: 10.46254/AN14.20240651.
- [33] A. Vukićević, M. Mladineo, N. Banduka, and I. Mačuzić, “A smart warehouse 4.0 approach for the pallet management using machine vision and Internet of things (IoT): a real industrial case study,” *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 16, no. 3, pp. 297–306, 2021, doi: 10.14743/apem2021.3.401.
- [34] L. Ruales and D.A. Silitonga, "Optimizing logistic and warehousing - Maersk Drilling Norge AS," Master's thesis, University of Stavanger, Norway, 2019.
- [35] H. Bashir, S. Haridy, M. Shamsuzzaman, and I. Alsyof, "Lean warehousing: a case study in a retail hypermarket," *IEOM Society International*, pp. 1599-1607, 2020.
- [36] P. Rungruengkultorn, “Warehouse processes improvement using lean six sigma and RFID technology,” Master's Thesis, Chulalongkorn University, 2021.
- [37] A. Pipatprapa, "QR code on mobile platform for improving order picking process of lean factory warehouse," *International Journal of Innovation, Management and Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 56–60, 2019.
- [38] P.G. Abhishek and M. Pratap, "Achieving lean warehousing through value stream mapping," *South Asian Journal of Business and Management Cases*, vol. 9, no. 3, pp. 387–401, 2020.
- [39] D. Perkumienė, K. Ratautaitė, and R. Pranskūnienė, “Innovative solutions and challenges for the improvement of storage processes,” *Sustain.*, vol. 14, no. 17, 2022, doi: 10.3390/su141710616.
- [40] D.S. Arief, I. Rasyid, A. Susilawati, Herisiswanto, and A.K. Junaidi, “Spare part warehouse system management at Jaya Utama Muda store using a computer based with Kanban barcode method,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 3053, no. 1, 2024.
- [41] D. Hrušecká, R. Adla, S. Krayem, and M. Pivnička, “Event-B model for increasing the efficiency of warehouse management,” *Polish J. Manag. Stud.*, vol. 17, no. 2, pp. 63–74, 2018, doi: 10.17512/pjms.2018.17.2.06.
- [42] M. Mutua, P. Ngugi, and R. Odhiambo, “Influence of lean warehousing practices on performance of large manufacturing firms in Kenya,” *Journal of International Business, Innovation and Strategic Management*, vol. 1, no. 8, pp. 41–57, 2018.
- [43] M. Bevilacqua, F.E. Ciarapica, and S. Antomarioni, “Lean principles for organizing items in an automated storage and retrieval system: an association rule mining – based approach,” *Management and Production Engineering Review.*, vol. 10, no. 1, pp. 29–36, 2019, doi: 10.24425/mper.2019.128241.
- [44] O. Voronova, “Improvement of warehouse logistics based on the introduction of lean manufacturing principles,” *Transportation Research Procedia*, vol. 63, pp. 919–928, 2022, doi: 10.1016/j.trpro.2022.06.090.
- [45] M. Dotoli, N. Epicoco, M. Falagario, N. Costantino, and B. Turchiano, “An integrated approach for warehouse analysis and optimization: a case study,” *Comput. Ind.*, vol. 70, pp. 56–69, 2015, doi: 10.1016/j.compind.2014.12.004.
- [46] N. Goyal and M.A. Sharma, "Impact of warehouse management system in a supply chain," *International Journal of Development Studies*, vol. 8, pp. 38–45, 2016.

- [47] D.A. de Jesus Pacheco, D. Møller Clausen, and J. Bumann, "A multi-method approach for reducing operational wastes in distribution warehouses," *International Journal of Production Economics*, vol. 256, 2023, doi: 10.1016/j.ijpe.2022.108705.
- [48] E. Chumpitaz-Martínez, A. Sanchez-Sotelo, and C. León-Chavarri, "Implementation of engineering techniques for reducing waste in Warehousing: A case study in a Peruvian food company," *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, pp. 1–8, 2022, doi: 10.18687/LEIRD2022.1.1.214.
- [49] D. León-Vélez and D. Lynette, "Design and implementation of a warehouse management system," *Manufacturing Competitiveness*, 2023.
- [50] D. Mourtzis, V. Samothrakis, V. Zogopoulos, and E. Vlachou, "Warehouse design and operation using augmented reality technology: a papermaking industry case study," *Procedia CIRP*, vol. 79, pp. 574–579, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.02.097.