

Keunggulan Operasional Manufaktur Melalui Transformasi Digital, Otomasi dan Kecerdasan Buatan

Guntur Haludin

Program Studi Manajemen, Universitas Pembangunan Jaya, Indonesia

E-mail: guntur.haludin@upjc.ac.id

Article History:

Received: 06 Juli 2026

Revised: 26 Juli 2026

Accepted: 30 Juli 2026

Keywords: *Keunggulan operasional; Transformasi Digital; Otomasi; Kecerdasan Buatan; Manufaktur Indonesia*

Abstract: *Penelitian ini bertujuan mensintesis literatur mengenai kontribusi transformasi digital, otomasi, dan kecerdasan buatan terhadap keunggulan operasional manufaktur serta implikasinya bagi Indonesia. Metode yang digunakan adalah literature review terstruktur dengan 25 artikel ilmiah utama yang dikelompokkan ke dalam klaster keunggulan operasional, digital transformation, dan artificial intelligence/automation. Analisis dilakukan secara tematik melalui identifikasi, seleksi, ekstraksi, sintesis, dan perumusan implikasi. Hasil kajian menunjukkan bahwa keunggulan operasional tetap bertumpu pada Kaizen, TQM, TPM, Lean, Lean Six Sigma, dan OEE, tetapi diperkuat oleh transformasi digital yang meningkatkan konektivitas, visibilitas data, dan integrasi proses. Otomasi dan kecerdasan buatan berperan dalam standardisasi proses, otomasi tugas rutin, predictive maintenance, quality inspection, dan decision support. Keberhasilan implementasi tidak ditentukan oleh teknologi semata, melainkan oleh kesiapan teknologi, kepemimpinan, budaya perbaikan, talenta digital, tata kelola, dan dukungan lingkungan. Artikel ini menyimpulkan bahwa manufaktur Indonesia memerlukan model bertahap yang memadukan continuous improvement, digital capability, automation readiness, dan AI governance.*

PENDAHULUAN

Keunggulan operasional telah menjadi agenda strategis utama bagi perusahaan manufaktur karena persaingan global, tekanan efisiensi biaya, tuntutan kualitas, ketepatan pengiriman, serta kebutuhan fleksibilitas operasi semakin meningkat. Dalam literatur, keunggulan operasional pada awalnya banyak dibangun melalui praktik perbaikan berkelanjutan seperti Kaizen, *Total Quality Management (TQM)*, *Total Productive Maintenance (TPM)*, *Lean Manufacturing*, *Lean Six Sigma*, dan *Overall Equipment Effectiveness (OEE)*. Pendekatan tersebut terbukti relevan untuk meningkatkan produktivitas, kualitas, *delivery*, keandalan mesin, pengurangan waste, stabilitas proses, dan disiplin kerja operasional (Achibat et al., 2023; Al-Refaie, Lepkova, & Camlibel, 2022; Berhe, 2021; Jalundhwala & Londhe, 2022; Prawira, Ishak, & Anizar, 2024; Singh, Khamba, & Singh, 2020). Namun, perkembangan manufaktur kontemporer menunjukkan bahwa

keunggulan operasional tidak lagi cukup dijelaskan hanya melalui perangkat manajemen operasi tradisional. Perusahaan manufaktur kini beroperasi dalam lingkungan yang semakin kompleks, cepat berubah, dan berbasis data, sehingga kemampuan memperbaiki proses harus dilengkapi dengan kemampuan mengintegrasikan teknologi digital ke dalam sistem produksi dan pengambilan keputusan.

Transformasi digital telah mengubah cara data dihasilkan, diproses, dibagikan, dan digunakan dalam operasi manufaktur. Transformasi digital memperluas fondasi keunggulan operasional melalui konektivitas antar proses, integrasi sistem, visibilitas *real-time*, analitik data, dan kemampuan organisasi merespons perubahan pasar secara lebih *agile* (He & Su, 2022; C. Li, Luo, & Gong, 2025; Qi, Xu, & Wang, 2023; Xu, Zhang, Sun, Tang, & Li, 2024). Pada saat yang sama, otomasi dan kecerdasan buatan memperkuat operasi melalui pengurangan tugas rutin, standardisasi proses, *predictive capability*, pengendalian mutu berbasis data, serta dukungan keputusan yang lebih cepat dan akurat (Antonazzo, Stroud, & Weinel, 2023; Brzozowska, Kolasińska-Morawska, Sułkowski, & Morawski, 2023; Schiele & Torn, 2020; Verdicchio & Perin, 2022). Dengan demikian, teknologi tidak hanya berperan sebagai alat efisiensi, tetapi juga sebagai pengungkit bagi model operasi yang lebih cerdas, adaptif, dan terukur.

Permasalahan utama yang melatarbelakangi penelitian ini adalah masih terfragmentasinya pembahasan tentang keunggulan operasional, transformasi digital, otomasi, dan kecerdasan buatan. Studi keunggulan operasional cenderung menekankan Lean, Kaizen, TPM, TQM, dan OEE sebagai fondasi peningkatan proses. Studi transformasi digital lebih banyak menyoroti kesiapan teknologi, kapabilitas organisasi, tekanan lingkungan, inovasi, *sustainability*, dan *agility*. Sementara itu, literatur AI dan otomasi sering berkembang pada jalur berbeda, terutama terkait otomasi tugas, tata kelola, *explainability*, *accountability*, *human oversight*, dan *reconfiguration* pekerjaan. Padahal, dalam praktik manufaktur, perusahaan tidak mengadopsi teknologi secara terpisah, melainkan mengintegrasikannya ke dalam produksi, pemeliharaan, kontrol mutu, rantai pasok, dan pengambilan keputusan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan mensintesis literatur mengenai bagaimana transformasi digital, otomasi, dan kecerdasan buatan memperkuat keunggulan operasional manufaktur. Penelitian ini juga mengidentifikasi faktor pendorong, manfaat, tantangan, serta implikasi konseptual dan praktis bagi Indonesia. Kontribusi utama penelitian ini adalah menyusun kerangka pemahaman terpadu bahwa keunggulan operasional pada era manufaktur digital merupakan hasil integrasi antara *continuous improvement*, *digital capability*, *automation readiness*, dan *AI governance*, bukan sekadar hasil pembelian teknologi baru.

LANDASAN TEORI

Keunggulan operasional dalam Manufaktur

Keunggulan operasional dalam manufaktur dapat dipahami sebagai kemampuan organisasi menjalankan proses operasi secara konsisten, efisien, berkualitas, aman, andal, dan adaptif terhadap kebutuhan pelanggan. Konsep ini tidak hanya berkaitan dengan pencapaian efisiensi biaya, tetapi juga dengan kemampuan perusahaan menjaga stabilitas proses, menekan variasi, meningkatkan produktivitas, memenuhi standar kualitas, dan memastikan ketepatan pengiriman. Literatur menunjukkan bahwa Kaizen, *Total Quality Management (TQM)*, *Total Productive Maintenance (TPM)*, *Lean Manufacturing*, *Lean Six Sigma*, *5S*, *Just in Time (JIT)*, *Value Stream Mapping*, *Plan-Do-Check-Act (PDCA)*, dan *Overall Equipment Effectiveness (OEE)* menjadi perangkat utama untuk membangun disiplin perbaikan proses dalam manufaktur (Berhe, Gebremichael, & Beyene, 2023; Demirtaş, Gultekin, & Uskup, 2022; Simanová & Sujová, 2022; Skorupińska, Hitka, & Sydor, 2024). OEE, misalnya, digunakan untuk menelusuri kehilangan

kinerja melalui tiga dimensi utama, yaitu *availability*, *performance*, dan *quality loss*. Sementara itu, Lean dan Kaizen membantu organisasi menghilangkan pemborosan, menstabilkan aliran kerja, mempercepat proses, serta memperkuat budaya *continuous improvement*. Dengan demikian, keunggulan operasional merupakan fondasi manajerial yang membuat proses manufaktur lebih disiplin, terukur, dan berorientasi pada perbaikan berkelanjutan.

Transformasi Digital sebagai Enabler Operasi

Transformasi digital bukan sekadar penggunaan perangkat lunak, implementasi sistem informasi, atau otomasi mesin, melainkan perubahan strategis dan organisasional yang dimungkinkan oleh teknologi digital. Dalam konteks manufaktur, transformasi digital memungkinkan data produksi, kualitas, persediaan, pemeliharaan, dan pengiriman terhubung secara lebih cepat dan akurat. Dalam perspektif *technology-organization-environment*, keberhasilan transformasi digital dipengaruhi oleh kesiapan infrastruktur, *input* teknologi, kapabilitas inovasi, strategi digital, pengalaman manajemen, talenta digital, tekanan pasar, serta dukungan kebijakan (S. Li & Zhao, 2024; Miao & Zhao, 2023; Qi et al., 2023; Shao et al., 2024; Shi, Mou, Zhang, & Cui, 2025). Oleh karena itu, transformasi digital berfungsi sebagai platform yang menghubungkan data, proses, manusia, dan keputusan operasional. Melalui integrasi sistem, visibilitas proses, analitik data, dan pemantauan *real-time*, perusahaan dapat meningkatkan kecepatan respons, mengurangi keterlambatan informasi, dan memperkuat pengambilan keputusan berbasis data. Transformasi digital juga memperluas makna keunggulan operasional, dari sekadar efisiensi proses menjadi kemampuan organisasi untuk lebih adaptif, prediktif, dan terintegrasi.

Otomasi dan Kecerdasan Buatan

Otomasi berperan dalam memindahkan aktivitas berulang dari manusia ke sistem, meningkatkan stabilitas proses, mengurangi kesalahan manual, serta mempercepat aliran informasi. Dalam konteks Industry 4.0, *cyber-physical systems* dan *machine-to-machine communication* memungkinkan proses yang lebih otonom, termasuk *autonomous procurement* dan *self-adapting supply chain* (Schiele & Torn, 2020). Kecerdasan buatan memperluas peran otomasi karena mampu melakukan analisis prediktif, identifikasi pola, rekomendasi keputusan, inspeksi kualitas, dan standardisasi pengukuran. Dalam manufaktur, AI dapat digunakan untuk mendeteksi potensi kerusakan mesin, mengidentifikasi cacat produk, mengoptimalkan jadwal produksi, dan mendukung keputusan operasional secara lebih cepat. Namun, literatur juga menekankan perlunya *governance*, *explainability*, *transparency*, *accountability*, dan *human oversight* agar penggunaan AI tidak menciptakan risiko bias, ketidakadilan, atau keputusan yang tidak dapat dipertanggungjawabkan (Gans-Combe, 2022; Stypińska & Franke, 2023; Tsoukiàs, 2021; Verdicchio & Perin, 2022). Dengan demikian, otomasi dan AI sebaiknya dipahami bukan sebagai pengganti manusia sepenuhnya, tetapi sebagai penguat kapabilitas operasional yang tetap membutuhkan kendali, etika, dan pertimbangan manusia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *literature review* terstruktur untuk meninjau dan mensintesis hubungan antara keunggulan operasional, transformasi digital, otomasi, dan kecerdasan buatan dalam konteks manufaktur. Pendekatan ini dipilih karena topik penelitian berada pada persimpangan beberapa arus literatur yang berkembang secara paralel dan belum sepenuhnya terintegrasi. Tujuan penelitian ini bukan untuk menguji hipotesis melalui data primer, melainkan membangun sintesis konseptual dan tematik berdasarkan temuan-temuan akademik

yang tersedia.

Sumber data penelitian adalah 25 artikel ilmiah utama yang membahas salah satu atau beberapa konsep utama tersebut, baik dalam konteks manufaktur maupun konteks lintas sektor yang memiliki implikasi langsung bagi operasi manufaktur. Artikel yang digunakan terutama berasal dari publikasi tahun 2020-2025 agar sesuai dengan perkembangan mutakhir transformasi digital, otomasi, dan kecerdasan buatan. Penelusuran literatur dilakukan melalui Google Scholar serta beberapa laman penerbit ilmiah utama, antara lain ScienceDirect, Emerald, Springer, MDPI, PLOS, SAGE, dan Taylor & Francis.

Penelusuran dan pengelompokan literatur dilakukan dengan menggunakan kata kunci seperti keunggulan operasional, Kaizen, TQM, TPM, *Lean Manufacturing*, OEE, *digital transformation*, *manufacturing*, *automation*, *artificial intelligence*, *smart manufacturing*, *predictive maintenance*, dan *quality inspection*. Proses seleksi dilakukan dengan membaca judul, abstrak, kata kunci, dan isi artikel untuk memastikan relevansi dengan fokus penelitian. Artikel dipilih apabila memiliki kontribusi konseptual atau empiris terhadap pemahaman mengenai peningkatan operasi, transformasi digital, otomasi, atau AI.

Kriteria inklusi meliputi artikel ilmiah yang memiliki struktur akademik jelas, membahas konsep yang relevan dengan kinerja organisasi atau operasi manufaktur, serta menjelaskan faktor pendorong, mekanisme implementasi, manfaat, tantangan, atau implikasi strategis. Artikel lintas sektor tetap dimasukkan apabila menawarkan konsep yang dapat ditransfer ke manufaktur, seperti *AI governance*, *human oversight*, *trust*, *explainability*, dan *decision support*. Sebaliknya, artikel dikeluarkan apabila hanya membahas teknologi secara umum tanpa kaitan operasional, bersifat duplikatif secara substansi, atau terlalu jauh dari konteks manufaktur.

Analisis dilakukan melalui lima tahap, yaitu identifikasi literatur, seleksi artikel, ekstraksi data tematik, sintesis temuan, dan perumusan implikasi bagi Indonesia. Kategori ekstraksi meliputi fokus kajian, konteks industri, metode, faktor pendorong, manfaat operasional, tantangan implementasi, dan implikasi strategis. Prosedur ini dirancang agar proses kajian lebih sistematis, transparan, dan dapat direplikasi oleh peneliti lain.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil kajian menunjukkan bahwa literatur yang ditinjau dapat dikelompokkan ke dalam lima tema utama. Tema pertama adalah keunggulan operasional sebagai sasaran utama manufaktur. Tema kedua adalah transformasi digital sebagai platform keunggulan operasi modern. Tema ketiga adalah otomasi sebagai pendorong efisiensi dan stabilitas proses. Tema keempat adalah kecerdasan buatan sebagai *enabler* operasi prediktif dan cerdas. Tema kelima adalah integrasi lintas tema yang menjelaskan bagaimana pendekatan manajerial dan teknologi digital saling memperkuat.

Tabel 1. Sintesis Tema Hasil *Literature Review*

Tema Hasil	Temuan Utama	Implikasi Operasional
Keunggulan Operasional	Kaizen, TQM, TPM, Lean, Lean Six Sigma, 5S, JIT, VSM, PDCA, dan OEE tetap menjadi fondasi peningkatan kinerja.	Meningkatkan produktivitas, kualitas, <i>delivery</i> , <i>reliability</i> , OEE, pengurangan <i>waste</i> , dan budaya perbaikan.
Trasnformasi Digital	Kesiapan teknologi, strategi digital, infrastruktur data, <i>organizational capability</i> , <i>policy support</i> , dan <i>market pressure</i> membentuk jalur transformasi.	Meningkatkan visibilitas data, integrasi proses, <i>agility</i> , <i>innovation performance</i> , dan <i>sustainability</i> .
Otomasi	Otomasi tugas rutin, <i>machine-to-machine communication</i> , <i>cyber-physical systems</i> , dan standarisasi proses memperkuat stabilitas operasi.	Mengurangi variabilitas proses, mempercepat aliran informasi, dan menggeser peran manusia ke pengawasan serta koordinasi.
Kecerdasan Buatan	AI mendukung <i>predictive capability</i> , <i>decision support</i> , <i>measurement standardization</i> , <i>quality inspection</i> , dan <i>human augmentation</i> .	Meningkatkan akurasi keputusan, <i>predictive maintenance</i> , kontrol mutu, dan respons berbasis data.
Integrasi lintas tema	Keunggulan operasional modern terbentuk melalui integrasi <i>continuous improvement</i> , digital platform, <i>automation mechanism</i> , dan <i>analytical intelligence</i> .	Membutuhkan <i>leadership</i> , budaya <i>improvement</i> , talenta digital, tata kelola, dan pendekatan implementasi bertahap.

Keunggulan operasional sebagai Fondasi

Literatur menunjukkan bahwa keunggulan operasional tetap menjadi sasaran utama perusahaan manufaktur. Kaizen, TQM, TPM, *Lean*, *Lean Six Sigma*, dan OEE secara konsisten dikaitkan dengan peningkatan produktivitas, kualitas, *delivery*, keandalan, kepatuhan 5S, dan *waste reduction*. TPM dan TQM memberikan kontribusi terhadap kinerja manufaktur, sedangkan OEE menjadi indikator utama untuk mengukur kehilangan akibat *availability*, *performance*, dan *quality*. Dengan demikian, keunggulan operasional tidak dimulai dari teknologi, tetapi dari disiplin proses, budaya kualitas, dan kemampuan organisasi mempertahankan perbaikan berkelanjutan (Al-Refaie et al., 2022; Berhe, 2021; Jalundhwala & Londhe, 2022; Oroye, Sylvester, & Farayibi, 2022; Singh et al., 2020).

Transformasi Digital sebagai Platform

Transformasi digital memperkuat keunggulan operasional dengan menyediakan konektivitas, integrasi data, visibilitas proses, dan kemampuan pengambilan keputusan berbasis informasi. Berbagai studi menunjukkan bahwa transformasi digital berhasil ketika didukung kombinasi faktor teknologi, organisasi, dan lingkungan. Faktor teknologi meliputi *digital infrastructure*, *IT tools*, dan *data availability*. Faktor organisasi mencakup *leadership*, *strategic alignment*, *organizational resilience*, dan *digital talent*. Faktor lingkungan mencakup *policy support*, tekanan persaingan, dan perubahan pasar. Pola ini menunjukkan bahwa transformasi digital bersifat konfigurasional, sehingga tidak ada satu resep tunggal yang selalu berlaku untuk semua perusahaan (C. Li et al., 2025; Miao & Zhao, 2023; Qi et al., 2023; Shao et al., 2024; Shi et al., 2025).

Otomasi sebagai Penguat Stabilitas Proses

Otomasi berperan sebagai mekanisme eksekusi yang menghubungkan sistem digital dengan aktivitas operasi sehari-hari. Otomasi membantu mengurangi pekerjaan berulang, meningkatkan konsistensi proses, mempercepat aliran informasi, dan meminimalkan kesalahan manual. Dalam penerapan *smart manufacturing* di industri baja, otomasi tidak hanya menggantikan pekerjaan rutin, tetapi juga mengubah komposisi pekerjaan manusia ke arah pengawasan, koordinasi, *problem solving*, dan keterampilan yang lebih tinggi (Antonazzo et al., 2023). Pada konteks Industry 4.0, *machine-to-machine communication* memperluas kemungkinan operasi yang lebih otonom, termasuk *procurement*, *demand identification*, dan *supply chain adaptation* (Schiele & Torn, 2020).

Kecerdasan Buatan sebagai Enabler Operasi Prediktif

AI memperkuat keunggulan operasional melalui kemampuan prediktif dan analitis. Dalam berbagai studi, AI dikaitkan dengan *decision support*, *measurement standardization*, *real-time guidance*, *predictive maintenance*, *quality inspection*, dan peningkatan akurasi proses. Pada sektor kesehatan, AI membantu standarisasi pengukuran dan mempercepat analisis citra, sementara pada sektor publik, hukum, dan layanan, AI memunculkan isu bias, *fairness*, *accountability*, dan *explainability* (Lanzafame et al., 2023; Pettersen, 2025; Stypińska & Franke, 2023; Tsoukiàs, 2021). Walaupun beberapa konteks tersebut bukan manufaktur murni, prinsipnya tetap relevan karena manufaktur juga membutuhkan keputusan berbasis data yang cepat, akurat, dan dapat dipertanggungjawabkan.

Integrasi untuk Konteks Manufaktur Indonesia

Sintesis lintas tema menunjukkan bahwa hubungan antara transformasi digital, otomasi, AI, dan keunggulan operasional bersifat bertingkat. Keunggulan operasional menyediakan fondasi disiplin proses. Transformasi digital menyediakan platform data dan konektivitas. Otomasi menyediakan mekanisme eksekusi yang lebih stabil dan konsisten. AI menyediakan kecerdasan analitis untuk prediksi, rekomendasi, dan dukungan keputusan. Dengan demikian, teknologi tidak menggantikan keunggulan operasional, melainkan memperluas dan memperkuatnya. Manufaktur Indonesia perlu membaca temuan ini secara hati-hati karena tingkat kesiapan perusahaan sangat beragam. Sebagian perusahaan besar telah memiliki sistem digital yang relatif matang, tetapi banyak perusahaan lain masih menghadapi proses semi-manual, sistem terfragmentasi, keterbatasan talenta digital, dan investasi teknologi yang terbatas.



Gambar 2. Model Konseptual Keunggulan Operasional Modern

Implikasi pertama bagi Indonesia adalah bahwa agenda digitalisasi manufaktur harus dimulai dari fondasi keunggulan operasional yang jelas. Perusahaan perlu memastikan bahwa proses dasar telah distandardisasi, indikator kinerja telah tersedia, dan budaya *continuous improvement* telah berjalan sebelum melakukan otomasi atau penerapan AI skala besar. Implikasi kedua adalah bahwa otomasi dan AI sebaiknya diposisikan sebagai *decision-support* dan *process-enhancement technologies*, bukan sekadar alat substitusi tenaga kerja. Implikasi ketiga adalah perlunya tata kelola AI dan data yang menekankan akuntabilitas, transparansi, keamanan data, kualitas data, dan *human oversight*. Implikasi keempat adalah perlunya dukungan kebijakan dan ekosistem industri, termasuk pengembangan talenta digital, infrastruktur, insentif investasi, dan kolaborasi antara industri, perguruan tinggi, serta pemerintah.

Temuan ini juga menunjukkan bahwa pendekatan terbaik bagi manufaktur Indonesia adalah implementasi bertahap. Tahap awal dapat diarahkan pada penguatan Lean, TPM, TQM, OEE, dan standardisasi proses. Tahap berikutnya adalah digitalisasi data operasi, integrasi sistem, *dashboard* kinerja, dan *real-time monitoring*. Setelah itu, perusahaan dapat bergerak ke otomasi proses inti, *predictive maintenance*, *quality analytics*, dan *AI-based decision support*. Dengan pendekatan bertahap, transformasi digital tidak menjadi proyek teknologi yang terputus dari realitas operasi, tetapi menjadi kelanjutan logis dari agenda keunggulan operasional.

Tabel 2. Tahapan Implementasi bagi Manufaktur Indonesia

Tahap	Fokus Utama	Contoh Implementasi
Tahap 1	Fondasi keunggulan operasional	5S, Lean, TPM, TQM, OEE, standardisasi proses, dan <i>budaya improvement</i> .
Tahap 2	Digitalisasi data operasi	Dashboard kinerja, ERP/MES sederhana, data produksi, data kualitas, dan data <i>maintenance</i> .
Tahap 3	Otomasi proses	Sensor, <i>barcode</i> /RFID, <i>machine monitoring</i> , <i>workflow automation</i> , dan integrasi data mesin.
Tahap 4	AI dan analitik prediktif	<i>Predictive maintenance</i> , <i>quality analytics</i> , <i>demand forecasting</i> , dan <i>AI-based decision support</i> .
Tahap 5	<i>Governance</i> dan <i>sustainment</i>	<i>Data governance</i> , <i>AI governance</i> , <i>human oversight</i> , <i>cybersecurity</i> , dan pengembangan talenta digital.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa keunggulan operasional dalam manufaktur tidak lagi dapat dipahami hanya melalui pendekatan perbaikan operasional tradisional secara terpisah. Keunggulan operasional modern semakin ditentukan oleh integrasi antara *continuous improvement*, transformasi digital, otomasi, dan kecerdasan buatan. Fondasi Kaizen, TQM, TPM, *Lean*, *Lean Six Sigma*, dan OEE tetap penting karena memberikan disiplin proses dan budaya perbaikan. Namun, transformasi digital memperluas fondasi tersebut melalui konektivitas, visibilitas data, dan integrasi proses. Otomasi memperkuat standardisasi dan stabilitas proses,

sedangkan AI meningkatkan kemampuan prediktif, *quality control*, dan *decision support*.

Penelitian ini juga menegaskan bahwa investasi teknologi tidak otomatis menghasilkan keunggulan operasional. Keberhasilan implementasi bergantung pada kombinasi kesiapan teknologi, kepemimpinan, *strategic alignment*, *organizational resilience*, talenta digital, budaya *improvement*, *governance*, dan dukungan lingkungan eksternal. Bagi Indonesia, hasil kajian ini mengarah pada rekomendasi bahwa transformasi manufaktur harus dilakukan secara bertahap, dimulai dari penguatan keunggulan operasional, dilanjutkan dengan digitalisasi data dan integrasi sistem, kemudian otomatisasi proses inti, dan akhirnya penggunaan AI untuk operasi prediktif dan cerdas.

Keterbatasan penelitian ini adalah belum dilakukannya pengujian empiris terhadap model integratif yang diusulkan. Oleh karena itu, penelitian mendatang disarankan melakukan studi empiris pada perusahaan manufaktur Indonesia untuk menguji model ini pada berbagai sub sektor, seperti makanan dan minuman, otomotif, tekstil, farmasi, elektronik, dan alat berat.

DAFTAR REFERENSI

- Achibat, F. E., Lebkiti, A., Aouane, M., Lougraimzi, H., Berrid, N., & Maqboul, A. (2023). Analysis of the Impact of Six Sigma and Lean Manufacturing on the Performance of Companies. *Management Systems in Production Engineering*, 31(2), 191–196. <https://doi.org/10.2478/mspe-2023-0020>
- Al-Refaie, A., Lepkova, N., & Camlibel, M. E. (2022). The Relationships Between the Pillars of TPM and TQM and Manufacturing Performance Using Structural Equation Modeling. *Sustainability*, 14(3), 1497. <https://doi.org/10.3390/su14031497>
- Antonazzo, L., Stroud, D., & Weinel, M. (2023). Smart Manufacturing and Tasks Automation in the Steel Industry: Reflecting on Routine Work and Skills in Industry 4.0. *Economic and Industrial Democracy*, 45(3), 914–936. <https://doi.org/10.1177/0143831x231201002>
- Berhe, H. (2021). Application of Kaizen Philosophy for Enhancing Manufacturing Industries' Performance: Exploratory Study of Ethiopian Chemical Industries. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 39(1), 204–235. <https://doi.org/10.1108/ijqrm-09-2020-0328>
- Berhe, H., Gebremichael, H. S., & Beyene, K. T. (2023). Development, Validation and Verification of Innovative Integrated Kaizen Philosophy (CI) Framework and Its Implementation Procedure for Enhancing Manufacturing Industries Sustainable Competitiveness. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 40(10), 2463–2518. <https://doi.org/10.1108/ijqrm-08-2022-0258>
- Brzozowska, M., Kolasińska-Morawska, K., Sułkowski, Ł., & Morawski, P. (2023). Artificial-Intelligence-Powered Customer Service Management in the Logistics Industry. *Entrepreneurial Business and Economics Review*, 11(4), 109–121. <https://doi.org/10.15678/eber.2023.110407>
- Demirtaş, E., Gultekin, O. S., & Uskup, C. (2022). A Case Study for Surgical Mask Production During the COVID-19 Pandemic: Continuous Improvement With Kaizen and 5S Applications. *International Journal of Lean Six Sigma*, 14(3), 679–703. <https://doi.org/10.1108/ijlss-02-2022-0025>
- Gans-Combe, C. (2022). *Automated Justice: Issues, Benefits and Risks in the Use of Artificial Intelligence and Its Algorithms in Access to Justice and Law Enforcement*. 175–194. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15746-2_14
- He, J., & Su, H. (2022). Digital Transformation and Green Innovation of Chinese Firms: The

-
- Moderating Role of Regulatory Pressure and International Opportunities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), 13321. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013321>
- Jalundhwala, F., & Londhe, V. (2022). A Systematic Review on Implementing Operational Excellence as a Strategy to Ensure Regulatory Compliance: A Roadmap for Indian Pharmaceutical Industry. *International Journal of Lean Six Sigma*, 14(4), 730–758. <https://doi.org/10.1108/ijlss-04-2022-0078>
- Lanzafame, L. R. M., Bucolo, G. M., Muscogiuri, G., Sironi, S., Gaeta, M., Ascenti, G., ... D'Angelo, T. (2023). Artificial Intelligence in Cardiovascular CT and MR Imaging. *Life*, 13(2), 507. <https://doi.org/10.3390/life13020507>
- Li, C., Luo, J., & Gong, J. (2025). Study of the Impact of Digital Transformation Policies on the Innovative Performance of Manufacturing Firms. *Sage Open*, 15(3). <https://doi.org/10.1177/21582440251360515>
- Li, S., & Zhao, F. (2024). Research on Technology Innovation Path of Intelligent Manufacturing Enterprises—Based on Qualitative Comparative Analysis of Fuzzy Sets Under TOE Framework. *Plos One*, 19(10), e0309784. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0309784>
- Miao, Z., & Zhao, G. (2023). Configurational Paths to the Green Transformation of Chinese Manufacturing Enterprises: A TOE Framework Based on the fsQCA and NCA Approaches. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46454-9>
- Oroye, O. A., Sylvester, B. O., & Farayibi, P. K. (2022). Total Productive Maintenance and Companies Performance: A Case Study of Fast Moving Consumer Goods Companies. *Jurnal Sistem Dan Manajemen Industri*, 6(1), 23–32. <https://doi.org/10.30656/jsmi.v6i1.4185>
- Pettersen, H. (2025). Real-Time Deep Learning-Based Image Guiding and Automated Left Ventricular Measurements to Reduce Test-Retest Variability. *Open Heart*, 12(2), e003783. <https://doi.org/10.1136/openhrt-2025-003783>
- Prawira, Y., Ishak, A., & Anizar, A. (2024). A Review of Literature on Lean Manufacturing Tools and Implementation Based on Case Studies. *Jurnal Sistem Teknik Industri*, 26(1), 11–21. <https://doi.org/10.32734/jsti.v26i1.11489>
- Qi, P., Xu, C., & Wang, Q. (2023). What Determines the Digital Transformation of SRDI Enterprises?—A Study of the TOE Framework-Based Configuration. *Sustainability*, 15(18), 13607. <https://doi.org/10.3390/su151813607>
- Schiele, H., & Torn, R. J. (2020). Cyber-Physical Systems With Autonomous Machine-to-Machine Communication: Industry 4.0 and Its Particular Potential for Purchasing and Supply Management. *International Journal of Procurement Management*, 13(4), 507. <https://doi.org/10.1504/ijpm.2020.108617>
- Shao, Q., Jiang, C., Liou, J. J., Su, P., Yuan, Y., & Zhu, D. (2024). Exploring the Influencing Factors of Digital Transformation: Empirical Results From SMEs in China. *Managerial and Decision Economics*, 46(4), 2364–2380. <https://doi.org/10.1002/mde.4463>
- Shi, B., Mou, C., Zhang, Y., & Cui, T. (2025). Different Paths, Same Destination, Yet Diverse Effects: Antecedent Configurations and Performance Implications of Digital Transformation in Pharmaceutical Manufacturing Enterprises—Evidence From Chinese Listed Companies. *Plos One*, 20(5), e0323130. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323130>
- Simanová, Ľ., & Sujová, A. (2022). The Impact of Continuous Improvement Concepts on the Performance of Furniture Production Processes. *Central European Business Review*, 11(1), 111–137. <https://doi.org/10.18267/j.cebr.298>
-

- Singh, S., Khamba, J. S., & Singh, D. (2020). Analysis and Directions of OEE and Its Integration With Different Strategic Tools. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering*, 235(2), 594–605. <https://doi.org/10.1177/0954408920952624>
- Skorupińska, E., Hitka, M., & Sydor, M. (2024). Surveying Quality Management Methodologies in Wooden Furniture Production. *Systems*, 12(2), 51. <https://doi.org/10.3390/systems12020051>
- Stypińska, J., & Franke, A. (2023). AI Revolution in Healthcare and Medicine and the (Re-)Emergence of Inequalities and Disadvantages for Ageing Population. *Frontiers in Sociology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsoc.2022.1038854>
- Tsoukiàs, A. (2021). *Social Responsibility of Algorithms: An Overview*. 153–166. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70377-6_9
- Verdicchio, M., & Perin, A. (2022). When Doctors and AI Interact: On Human Responsibility for Artificial Risks. *Philosophy & Technology*, 35(1). <https://doi.org/10.1007/s13347-022-00506-6>
- Xu, M., Zhang, Y., Sun, H., Tang, Y., & Li, J. (2024). How Digital Transformation Enhances Corporate Innovation Performance: The Mediating Roles of Big Data Capabilities and Organizational Agility. *Heliyon*, 10(14), e34905. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34905>
-