Jurnal Ekonomi dan Pembangunan Indonesia
Volume. 4 Nomor. 2 Mei 2026
e-ISSN: 3031-3406; p-ISSN: 3031-3414, Hal 139-147
DOI: https://doi.org/10.61132/jepi.v4i2.2289
Tersedia: https://journal.areai.or.id/index.php/jepi

Digitalisasi, Transformasi, dan Peran Industri pada Era Revolusi Industri 4.0 dalam Meningkatkan Produktivitas dan Daya Saing

Salwa Alya Achmad[1*], Muhammad Yasin[2]
[1-2] Program Studi Ekonomi Pembangunan,Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Indonesia
Email: salwaalyaachmad346@gmail.com[1], yasin@untag-sby.ac.id[2]*

**Penulis Korespondensi: salwaalyaachmad346@gmail.com*

Abstract. *Digitalization and industrial transformation have become key drivers of economic and technological development in the era of industry 4.0. this paper examines the role of three major technologies-Internet of Things (IoT),Big Data,and Artificiall Intelligence (AI)-in supporting industri modernization and improving organizational performance. IoT enables real-time connectivity,data collection,and automation across production systems,while big data facilitates the processing ananalysis of large and complex datasets to support data-driven decision-making. AI complements these technologies by transforming data into intelligent insights, enabling automation, predictive analysis, and enhanced operational efficiency. The integration of these technologies contributes to increased productivity, reduced operational costs, improved product quality, and greater flexibility in manufacturing processes. Furthermore, digital transformation supports the development of smart factories, predictive maintenance systems, intelligent supply chains, and advanced customer services. The study also discusses the growing use of industrial robots and automation technologies to enhance manufacturing productivity and competitiveness. Despite the numerous benefits, challenges such as data security, privacy concerns, infrastructure requirements, and workforce adaptation remain significant issues. Overall, digitalization plays a crucial role in shaping sustainable industrial growth and strengthening competitiveness in the global economy.*

Keywords: *Artificial Intelligence;Big Data;Digitalization;Industrial Transformation; Internet of Things.*

Abstrak : Digitalisasi dan transformasi industri merupakan fenomena yang semakin berkembang seiring dengan kemajuan teknologi pada era Revolusi Industri 4.0. Teknologi seperti Internet of Things (IoT), Big Data, dan Artificial Intelligence (AI) menjadi pilar utama dalam mendorong perubahan di berbagai sektor, khususnya industri manufaktur. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji peran serta dampak penerapan teknologi digital terhadap peningkatan efisiensi, produktivitas, kualitas produk, dan daya saing industri. Metode yang digunakan adalah studi literatur dengan mengkaji berbagai sumber ilmiah yang relevan mengenai digitalisasi dan transformasi industri. Hasil kajian menunjukkan bahwa IoT memungkinkan pemantauan dan pengendalian proses produksi secara real-time, Big Data mendukung pengambilan keputusan berbasis data yang lebih akurat, sedangkan AI berperan dalam otomatisasi proses, analisis data, serta peningkatan kualitas layanan. Integrasi ketiga teknologi tersebut mampu menciptakan sistem produksi yang lebih fleksibel, efisien, dan adaptif terhadap perubahan kebutuhan pasar. Selain memberikan berbagai manfaat, digitalisasi juga menghadirkan tantangan berupa keamanan data, kebutuhan infrastruktur yang memadai, serta perubahan kebutuhan kompetensi tenaga kerja akibat meningkatnya penggunaan otomatisasi dan robotika. Oleh karena itu, diperlukan kesiapan sumber daya manusia, dukungan kebijakan, dan investasi teknologi agar transformasi digital dapat berjalan secara optimal dan berkelanjutan.

Kata kunci : *Artificial Intelligence;* Big Data; Digitalisasi;*Internet of Things*; Transformasi Industri.

1. LATAR BELAKANG

Transformasi perangkat digital pada saat masa Industri 4.0 telah mendorong perubahan dalam berbagai bidang kehidupan, mulai dari kegiatan ekonomi hingga pengelolaan sektor industri modern. Perubahan tersebut terlihat pada berbagai sektor, seperti industri, ekonomi, pendidikan, kesehatan, maupun pemerintahan, yang mulai mengadopsi teknologi digitalisasi untuk mendorong efektivitas, efisiensi, dan kualitas layanan (Prasetyo & Sutopo, 2018). Transformasi digital ditunjukkan oleh semakin luasnya penerapan teknologi seperti

Naskah Masuk: 27 Maret 2026; Revisi: 24 April 2026; Diterima: 29 Mei 2026; Terbit: 31 Mei 2026

Internet of Things (IoT), *Big Data*, dan *Artificial Intelligence (AI)* dalam berbagai aktivitas organisasi. Pemanfaatan teknologi tersebut memungkinkan terbentuknya sistem kerja yang lebih efektif, efisien, serta terotomatisasi sehingga mampu mendukung peningkatan kinerja operasional (Senthil, 2020). Penerapan secara terpadu dari ketiga teknologi tersebut menjadi faktor utama dalam mendorong peningkatan produktivitas sektor industri serta memperkuat kemampuan perusahaan untuk bersaing di tengah dinamika globalisasi yang terus berkembang (Huang, 2018)

Internet of Things (IoT) memungkinkan berbagai teknologi saling terintegrasi melalui koneksi internet sehingga proses pengawasan, pertukaran informasi, dan pengendalian sistem dapat dilakukan secara langsung dan berkesinambungan. Dengan konektivitas tersebut, pertukaran data dapat berlangsung secara cepat dan berkelanjutan untuk mendukung efektivitas operasional (Suharman & Murti, 2019). Teknologi tersebut berkontribusi dalam meningkatkan fleksibilitas proses produksi, mendukung penerapan predictive maintenance, serta memperkuat efektivitas pengelolaan rantai pasok industri. Dengan kemampuan tersebut, perusahaan dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya sekaligus meminimalkan potensi gangguan operasional (Resa Pramudita, 2026). Teknologi tersebut berkontribusi dalam meningkatkan fleksibilitas proses produksi, mendukung penerapan predictive maintenance, serta memperkuat efektivitas pengelolaan rantai pasok industri. Dengan kemampuan tersebut, perusahaan dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya sekaligus meminimalkan potensi gangguan operasional (Awaludin & Rehatalanit2, 2026). Di sisi lain, Artificial Intelligence (AI) memungkinkan penerapan otomatisasi proses, pengolahan dan analisis data, serta pengembangan sistem cerdas yang mampu mendukung berbagai kegiatan industri maupun layanan. Kemampuan tersebut membantu organisasi meningkatkan efisiensi operasional dan kualitas pengambilan keputusan.

Berbagai penelitian terdahulu menggambarkan bahwa implementasi digitalisasi memberikan pengaruh yang signifikan kepada pertumbuhan efisiensi operasional, penurunan biaya produksi, peningkatan mutu produk, serta produktivitas industri manufaktur. Dampak positif tersebut terutama didukung oleh penggunaan perangkat otomatisasi dan sistem robotik dalam proses produksi (Hadi & Murti, 2021). Penerapan robot industri dan sistem pengendalian otomatis memungkinkan proses produksi berlangsung lebih cepat, mengurangi potensi kesalahan yang disebabkan oleh faktor manusia, serta menciptakan produk dengan daya saing yang lebih konsisten. *Artificial Intelligence (AI)* turut berperan dalam meningkatkan kualitas layanan pelanggan, mendukung analisis data bisnis yang lebih akurat, serta mendorong terciptanya inovasi berbasis teknologi di berbagai sektor industri (Lasi, 2022).

Meskipun telah banyak dilakukan penelitian mengenai transformasi digital, sebagian besar kajian sebelumnya masih mengulas *Internet of Things (IoT)*, *Big Data*, *Artificial Intelligence (AI)*, maupun otomatisasi industri secara terpisah. Akibatnya, pembahasan yang mengintegrasikan seluruh teknologi tersebut dalam satu kerangka analisis masih relatif terbatas (Lee, 2021). Penelitian yang mengkaji integrasi Internet of Things (IoT), Big Data, Artificial Intelligence (AI), dan otomatisasi dalam kerangka transformasi industri modern masih tergolong terbatas. Di samping itu, sebagian besar studi terdahulu lebih berfokus pada manfaat perangkat pada pertumbuhan efisiensi operasional dan aktivitas produksi. Sementara itu, berbagai hambatan penerapan, yaitu, kesiapan sumber daya manusia, risiko pengangguran akibat perkembangan teknologi, keamanan data, serta kebutuhan peningkatan keterampilan tenaga kerja di era digital, masih belum banyak dibahas secara mendalam (Frank & dkk, 2024). Berpacu pada kondisi tersebut, riset ini menjadi penting untuk dijalankan untuk menghasilkan dampak pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai keterkaitan antara digitalisasi dan transformasi industri serta pengaruhnya terhadap tingkat produktivitas dan aspek ketenagakerjaan. Dengan demikian, riset ini dapat memperbanyak kajian mengenai dampak perkembangan teknologi dalam lingkungan industri modern (Yang & Gu, 2021).

Kebaruan dalam penelitian ini terletak pada pendekatan yang mengintegrasikan *Internet of Things (IoT)*, *Big Data*, *Artificial Intelligence (AI)*, dan teknologi robotik dalam satu kerangka pembahasan untuk mendukung transformasi industri secara komprehensif. Riset ini bukan hanya bertumpu pada kontribusi teknologi modern terhadap peningkatan efisiensi operasional dan produktivitas industri, tetapi juga mengevaluasi dampak sosial serta berbagai tantangan implementasi yang dihadapi tenaga kerja pada era Revolusi Industri 4.0. Oleh karenanya, hasil riset ini diharapkan dapat menghasilkan pemahaman yang lebih global terhadap pentingnya kesiapan sektor industri dan daya saing sumber daya manusia dalam menghadapi pertumbuhan perangkat modern yang semakin pesat.

Riset ini dilakukan guna menginformasikan kontribusi modernisasi dan transformasi industri melalui implementasi *Internet of Things (IoT)*, *Big Data*, *Artificial Intelligence (AI)*, serta teknologi otomatisasi dan robotika dalam pertumbuhan pemangkasan operasional, produktivitas, dan kualitas pada industri modern. Selain itu, penelitian ini juga berfokus pada pengkajian dampak perkembangan teknologi digital terhadap tenaga kerja serta berbagai tantangan yang muncul dalam penerapan industri berbasis perangkat pada era Revolusi Industri 4.0.

2. KAJIAN TEORITIS

Digitalisasi mampu dipahami sebagai proses pemanfaatan teknologi digital untuk mengubah pola kerja organisasi agar lebih adaptif terhadap perkembangan lingkungan bisnis. Dalam konteks industri, penerapan digitalisasi tidak hanya berfungsi untuk mempercepat proses operasional, tetapi juga mendukung integrasi informasi, peningkatan efisiensi, serta penciptaan nilai tambah bagi perusahaan melalui pemanfaatan data dan teknologi otomatisasi. Melalui transformasi digital, perusahaan memiliki peluang untuk meningkatkan daya saing dengan mengoptimalkan efisiensi operasional, menekan biaya, serta meningkatkan kualitas produk dan layanan yang diberikan.

Internet of Things (IoT) menggambarkan suatu ekosistem teknologi yang mampu menginformasikan pendapat satu sama lain melalui koneksi jaringan. Melalui teknologi ini, data dari berbagai perangkat dapat dikumpulkan dan diproses secara berkelanjutan sehingga mendukung pemantauan kondisi operasional dan pengambilan keputusan yang lebih responsif. Dalam implementasi Industri 4.0, IoT menjadi salah satu teknologi utama karena mampu mendukung proses pemantauan secara real-time, sistem pengendalian otomatis, serta pengambilan keputusan yang didasarkan pada data yang tersedia.

Big Data mengacu pada data berukuran besar dan kompleks yang dihasilkan dari berbagai aktivitas digital. Karakteristik data tersebut membuat metode pengolahan konvensional menjadi kurang memadai, sehingga diperlukan pendekatan analitik yang lebih canggih untuk menghasilkan informasi yang relevan bagi kebutuhan organisasi. Pemanfaatan Big Data memungkinkan organisasi memperoleh informasi yang bernilai dari data yang sebelumnya sulit diproses menggunakan pendekatan konvensional. Konsep ini dikenal melalui karakteristik 5V**,** yaitu *volume*, *velocity*, *variety*, *veracity*, dan *value*. Dalam praktiknya, Big Data membantu kolonialisasi mampu menguasai tingkah laku pembeli secara lebih fokus, menumbuhkan tingkat efisiensi produktivitas, serta mendorong pengambilan kebijakan efektif yang lebih tepat dan berbasis data.

Dalam industri modern, Big Data berperan sebagai sumber informasi yang sangat penting untuk mendukung analisis prediktif, penilaian kinerja, serta penyusunan strategi bisnis yang lebih tepat. Oleh sebabnya, pemanfaatan *Big Data* menjadi salah satu elemen pokok yang mendorong terwujudnya perubahan modernisasi di sektor industri.

Artificial Intelligence (AI) merupakan cabang teknologi yang berfokus pada pengembangan sistem komputer yang mampu meniru proses kognitif manusia, seperti mengenali pola, melakukan pembelajaran dari data, serta memberikan rekomendasi atau keputusan berdasarkan informasi yang tersedia. Sebagai salah satu teknologi utama dalam era

Revolusi Industri 4.0**,** AI mengalami perkembangan yang sangat pesat dan telah dimanfaatkan pada berbagai bidang, termasuk industri, pendidikan, kesehatan, serta layanan publik.

Penerapan teknologi otomatisasi dan robotika dalam sektor manufaktur mampu meningkatkan produktivitas dengan mengurangi tingkat kesalahan dalam proses produksi, mempercepat pelaksanaan pekerjaan, serta menghasilkan produk dengan kualitas yang lebih baik. Selain itu, penggunaan robot industri membantu perusahaan menghadapi persaingan pasar yang semakin ketat melalui efisiensi biaya produksi dan kemampuan menjaga konsistensi kualitas produk.

Berdasarkan berbagai teori dan hasil penelitian sebelumnya, digitalisasi industri dapat dipandang sebagai konsekuensi dari integrasi *Internet of Things (IoT)**, Big Data**, dan Artificial Intelligence (AI)*. Ketiga teknologi tersebut memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi operasional, menekan biaya produksi, meningkatkan kualitas produk, serta mendorong produktivitas industri. Secara konseptual, hubungan tersebut dapat direpresentasikan melalui *Internet of Things (X1)**, Big Data (X2)**, Artificial Intelligence (X3)* sebagai variabel yang memengaruhi Digitalisasi dan Transformasi Industri (Y)**,** yang selanjutnya berdampak pada Efisiensi, Produktivitas, dan Kualitas Produk**.**

3. METODE PENELITIAN

Riset ini mengimplementasikan pendekatan kuantitatif dengan menggunakan metode survei sebagai teknik pengumpulan data. Pendekatan kuantitatif digunakan sebab penelitian berfokus pada pengujian *pengaruh Internet of Things (IoT)**, Big Data**, dan Artificial Intelligence (AI)* terhadap perubahan industri. Data penelitian dikumpulkan melalui penyebaran kuesioner kepada responden yang terlibat dalam pemanfaatan teknologi digital pada sektor industri maupun organisasi yang telah mengimplementasikan transformasi digital. Riset ini termasuk dalam kategori riset *eksplanatori (explanatory research)* yang memiliki tujuan menggambarkan relevansi sebab-akibat antara variabel independen dan variabel dependen melalui proses pengujian hipotesis.

Populasi dalam riset ini mencakup seluruh tenaga kerja, manajer, maupun pelaku usaha yang terlibat dalam penerapan teknologi digital pada sektor industri. Mengingat jumlah populasi tidak dapat ditentukan secara pasti, teknik purposive sampling digunakan dalam proses penentuan sampel. Teknik ini dilakukan dengan memilih responden berdasarkan kriteria tertentu, seperti memiliki pemahaman mengenai teknologi digital dalam organisasi, terlibat dalam penggunaan *Internet of Things (IoT)**, Big Data, dan Artificial Intelligence (AI)***,** serta bersedia berpartisipasi sebagai responden penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pertumbuhan perangkat digitalisasi telah membantu peningkatan terjadinya transformasi industri yang signifikan pada era transformasi Industri 4.0 (Kagermann & Wahlster, 2023). Transformasi industri tersebut ditandai oleh semakin luasnya pemanfaatan teknologi digital, seperti *Internet of Things (IoT), Big Data, dan Artificial Intelligence (AI),* dalam berbagai proses dan aktivitas industri. Berdasarkan hasil kajian literatur, ketiga teknologi tersebut saling mendukung dalam meningkatkan efisiensi operasional, produktivitas, kualitas produk, serta memperkuat daya saing perusahaan di tengah lingkungan bisnis global yang semakin kompetitif.

Internet of Things (IoT) berperan dalam menghubungkan berbagai perangkat, mesin, dan sistem melalui hubungan internet sehingga mampu melakukan pertukaran data secara real-time (Radziwill, 2020) . Implementasi *Internet of Things (IoT)* pada sektor industri memberikan banyak dampak positif, seperti peningkatan fleksibilitas proses produksi, pemantauan kondisi mesin secara berkelanjutan, serta penerapan predictive maintenance untuk meminimalkan risiko kerusakan peralatan dan mengurangi downtime produksi. Selain itu, IoT mendukung pengembangan konsep smart factory yang memungkinkan proses produksi berlangsung secara lebih otomatis, efisien, dan adaptif terhadap perubahan kebutuhan pasar. Kemampuan IoT dalam mengintegrasikan data dari berbagai tahapan produksi juga membantu perusahaan meningkatkan efektivitas pengelolaan rantai pasok serta pemanfaatan sumber daya.

Di sisi lain, Big Data berperan sebagai teknologi yang mampu mengelola serta menganalisis data terbanyak yang berasal dari berbagai aktivitas industri. Pemanfaatan perangkat ini memungkinkan perusahaan mendapatkan gambaran yang lebih tepat dan pasti mengenai perilaku konsumen, perkembangan tren pasar, dan kinerja operasional organisasi. Informasi yang dihasilkan kemudian menjadi landasan dalam proses pengambilan keputusan strategis yang lebih cepat dan tepat. Selain meningkatkan efisiensi operasional, Big Data juga mendukung pengembangan inovasi produk dan layanan dengan memanfaatkan data sebagai sumber keunggulan kompetitif perusahaan (Lu, 2022).

Artificial Intelligence (AI) menjadi salah satu perangkat yang mempunyai peran pokok dalam perubahan industri karena mampu mengolah data serta menghasilkan keputusan secara otomatis. Teknologi ini banyak dimanfaatkan untuk mendukung otomatisasi proses produksi, analisis data, pelayanan pelanggan, dan pengendalian mutu produk. Dalam sektor manufaktur, integrasi AI dengan teknologi robotik memungkinkan proses produksi berlangsung dengan tingkat presisi yang lebih tinggi, meminimalkan kesalahan manusia, serta meningkatkan produktivitas perusahaan. Selain itu, AI juga berperan dalam pengembangan

sistem prediktif yang membantu perusahaan mengidentifikasi risiko operasional dan memperkirakan kebutuhan pasar secara lebih akurat.

Sinergi antara IoT, Big Data, dan AI menghasilkan sistem industri yang lebih cerdas serta dapat menempatkan diri dengan efektoif pada transformasi kebutuhan dan kondisi pasar. Pemanfaatan ketiga teknologi tersebut terbukti dapat meningkatkan efisiensi proses produksi, menekan biaya operasional, mempercepat aktivitas bisnis, serta memperbaiki kualitas produk dan layanan yang dihasilkan. Selain itu, transformasi digital memberikan kesempatan bagi perusahaan untuk menjangkau pasar global, meningkatkan tingkat kepuasan pembeli, dan menumbuhkan serta mendorong kekuatan posisi kompetitif di pasar domestik maupun global.

Namun demikian, penerapan digitalisasi tidak terlepas dari berbagai kendala dan tantangan. Keamanan serta perlindungan privasi data menjadi isu yang semakin penting karena meningkatnya jumlah data yang dikelola dalam sistem digital. Selain itu, kebutuhan modal yang cukup besar untuk membangun infrastruktur teknologi sering kali menjadi hambatan dalam proses transformasi digital. Tantangan lainnya adalah kesiapan tenaga kerja dalam menghadapi transformasi perangkat yang berlangsung cepat. Implementasi otomatisasi dan robotika dapat mengurangi kebutuhan sumber daya manusia pada pekerjaan yang bersifat repetitif, sehingga diperlukan pengembangan keterampilan dan kompetensi digital agar sumber daya manusia dapat beradaptasi secara optimal dengan kebutuhan industri modern.

Secara umum, hasil riset menghasilkan bahwa digitalisasi menghasilkan kontribusi yang sangat penting dalam meningkatkan transformasi industri pada era *Revolusi Industri 4.**0**. Implementasi Internet of Things (IoT)**,** Big Data, dan Artificial Intelligence (AI)* terbukti memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan efisiensi operasional, produktivitas, kualitas produk, serta daya saing industri. Oleh Sebabnya, diperlukan dukungan infrastruktur teknologi yang memadai, penguatan sistem keamanan data, dan peningkatan kualitas sumber daya manusia agar proses transformasi digital dapat berlangsung secara maksimal dan berjangka panjang

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil penelitian menggambarkan bahwa implementasi perangkat modern melalui *IoT, Big Data, dan AI* memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan kinerja industri, terutama dalam aspek efisiensi, produktivitas, serta kemampuan perusahaan untuk bersaing. Pemanfaatan ketiga teknologi tersebut terbukti mampu meningkatkan efisiensi operasional, produktivitas, kualitas produk, serta daya saing perusahaan melalui penggunaan data secara *real-time*, otomatisasi berbagai proses kerja, dan pengambilan keputusan yang lebih tepat.

Selain itu, integrasi *IoT, Big Data, dan AI* turut mendukung terbentuknya sistem industri yang lebih cerdas, fleksibel, serta mampu beradaptasi terhadap perubahan kebutuhan pasar (Achmad Fajar Hendarman, 2021). Meskipun memberikan berbagai manfaat, implementasi digitalisasi masih dihadapkan pada sejumlah tantangan. Beberapa di antaranya meliputi aspek keamanan data, kebutuhan investasi yang cukup besar untuk pengembangan teknologi, serta perlunya peningkatan kompetensi sumber daya manusia agar mampu mengikuti dan menempatkan diri dengan peningkatan kualitas perangkat yang berlangsung efisien (Estin Roso, 2025).

Oleh karena itu, perusahaan perlu meningkatkan investasi dan implementasi perangkat modernisasi untuk mendorong efektivitas proses bisnis dan mendorong daya saing (Raptis, Passarella, & &, 2025). Pemerintah diharapkan dapat memberikan dukungan melalui penyediaan infrastruktur digital yang memadai, regulasi yang mendukung transformasi digital, serta program pengembangan sumber daya manusia. (Prasetyo & Sutopo, 2023). Selain itu, lembaga pendidikan perlu memperkuat kurikulum dan pelatihan yang berorientasi pada keterampilan digital agar lulusan memiliki kualitas daya saing yang relevan dengan kebutuhan industri modern (Qin, 2020). Dengan sinergi antara pemerintah, dunia usaha, dan institusi pendidikan, transformasi digital di sektor industri dapat berjalan secara optimal, berjangka panjang, dan memberikan manfaat yang lebih luas bagi pertumbuhan ekonomi (Djatmika, 2019)

DAFTAR REFERENSI

Achmad Fajar Hendarman, d. (2021). Transformasi Digital di Industri Manufaktur: Dampak pada Efisiensi Operasional. *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro*, 16.

Awaludin, M., & Rehatalanit2, Y. L. (2026). Optimizing YOLOv8 Architecture and Augmentation for Efficient License Plate Detection . *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, 1-7.

Djatmika, G. H. (2019). Peran Transformasi Digital dalam Meningkatkan Efisiensi Operasional pada Industri Manufaktur di Indonesia. *Tartib: Journal of Educational Management*, 18.

Estin Roso, d. (2025). Transformasi Digital di Industri Manufaktur: Dampak pada Efisiensi Operasional. *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro*, 15.

Frank, A., & dkk. (2024). Industry 4.0 Technologies: Implementation Patterns in Manufacturing Companies. *International Journal of Production Economics*, 15.

Hadi, S., & Murti, H. W. (2021). Kajian Industri 4.0 untuk Penerapannya di Indonesia . *Jurnal Manajemen Industri dan Logistik*, 1-26.

Huang, J. (2018). Digital Engineering Transformation with Trustworthy AI towards Industry 4.0: Emerging Paradigm Shifts. *J Huang / Digital engineering transformation with trustworthy AI towards Industry 4.0: emerging paradigm shifts* , 1-23.

Kagermann, H., & Wahlster, W. (2023). Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0. *Final Report*, 11.

Lasi, H. (2022). Industri 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 13.

Lee, J. (2021). A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, 3.

Lu, Y. (2022). Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 20.

Prasetyo, H., & Sutopo, W. (2018). INDUSTRI 4.0: TELAAH KLASIFIKASI ASPEK DAN ARAH PERKEMBANGAN RISET. *Jurnal Teknik Industri, Vol. 13, No. 1,*, 17-26.

Prasetyo, H., & Sutopo, W. (2023). Industri 4.0: Telaah Klasifikasi Aspek dan Arah Perkembangan Riset. *J@TI Undip: Jurnal Teknik Industri*, 17.

Qin, j. (2020). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP*, 19.

Radziwill, N. (2020). Quality 4.0: Let's Get Digital. *Quality 4.0: Let's Get Digital*, 17.

Raptis, T., Passarella, A., & &. (2025). Data Management in Industry 4.0 State of the Art and Open Challenges. *Future Generation Computer Systems*, 16.

Resa Pramudita, d. (2026). Student Behavior Detection Using YOLOv10 for Classroom Engagement Analysis. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi* , 1-8.

Senthil, d. (2020). The Duo of Artificial Intelligence and Big Data for Industry 4.0: Review of Applications, Techniques Challenges, and Future Research Directions. *IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL*, 1-33.

Suharman, & Murti, H. W. (2019). KAJIAN INDUSTRI 4.0 UNTUK PENERAPANNYA DI INDONESIA. *Jurnal Manajemen Industri dan Logistik*, 13.

Yang, F., & Gu, S. (2021). Industry 4.0, a Revolution that Requires Technology and National Strategies. *Complex & Intelligent Systems*, 10.