



**Evaluasi Integrasi Teknologi Artificial Intelligence–Blockchain pada
Era Industri 4.0: Tinjauan Literatur Sistematis
(*Evaluation of Artificial Intelligence–Blockchain Technology Integration
in the Industry 4.0 Era: Systematic Literature Review*)**

Aripin Sidabukke

Universitas Mikroskil

Jonsen Wijaya

Universitas Mikroskil

Agata T.F.Br Tarigan

Universitas Mikroskil

Vandika

Universitas Mikroskil

Aldo Lotandes

Universitas Mikroskil

Joosten

Universitas Mikroskil

Alamat: Jl. M.H Thamrin No. 140, Pusat Ps., Medan Kota, Kota Medan, Sumatera Utara 20212

Korespondensi penulis: 221120002@students.mikroskil.ac.id

221120060@students.mikroskil.ac.id, 221120560@students.mikroskil.ac.id

221120877@students.mikroskil.ac.id 221122105@students.mikroskil.ac.id

joosten.ng@mikroskil.ac.id

Abstrak. *This study aims to analyze the integration of Artificial Intelligence (AI) and Blockchain technology to optimize processes within the Industry 4.0 framework. The background of this research is the increasing demand for operational transparency, data security, and autonomous decision-making in modern manufacturing and supply chains. While Industry 4.0 generates massive data (Big Data), it faces challenges in data integrity and intelligent automation. The research method used is a Systematic Literature Review (SLR) with a qualitative approach, analyzing academic publications from 2020 to 2025. Data were collected from databases such as IEEE Xplore, Scopus, and ScienceDirect, focusing on integration architecture and use cases. The results show that AI integration (specifically machine learning) on the Blockchain enables decentralized predictive maintenance, autonomous smart contracts, and secure data provenance for AI training. The synergy between AI's analytical power and Blockchain's immutability shows significant potential to increase efficiency, reduce fraud, and build trust among stakeholders. This indicates that the AI-Powered Blockchain model has a positive and significant effect on optimizing Industry 4.0 systems. Thus, this integration can be recommended as an innovative framework for building autonomous, transparent, and intelligent industrial systems.*

Keywords: *Blockchain, Artificial Intelligence, Industry 4.0, Smart Manufacturing, Supply Chain*

Abstrak. Studi ini bertujuan untuk menganalisis integrasi teknologi *Artificial Intelligence* (AI) dan *Blockchain* untuk mengoptimalkan proses dalam kerangka Industri 4.0. Latar belakang penelitian ini adalah meningkatnya tuntutan akan transparansi operasional, keamanan data, dan pengambilan keputusan otonom dalam manufaktur modern dan rantai pasok. Meskipun Industri 4.0 menghasilkan data masif (*Big Data*), ia menghadapi tantangan dalam integritas data dan otomatisasi cerdas. Metode penelitian yang digunakan adalah *Systematic Literature Review* (SLR) dengan pendekatan kualitatif, menganalisis publikasi akademis dari tahun 2020 hingga 2025. Data dikumpulkan dari database seperti IEEE Xplore, Scopus, dan ScienceDirect, dengan fokus pada arsitektur integrasi dan studi kasus. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi AI (khususnya machine learning) di atas *Blockchain* memungkinkan pemeliharaan prediktif terdesentralisasi, smart contract yang otonom, dan provenance data yang aman untuk pelatihan AI. Sinergi

antara kekuatan analitis AI dan kekekalan (immutability) *Blockchain* menunjukkan potensi signifikan untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi penipuan, dan membangun kepercayaan antar pemangku kepentingan. Hal ini menunjukkan bahwa model *Blockchain* bertenaga AI berpengaruh positif dan signifikan terhadap optimalisasi sistem Industri 4.0. Dengan demikian, integrasi ini dapat direkomendasikan sebagai kerangka kerja inovatif untuk membangun sistem industri yang otonom, transparan, dan cerdas.

Kata Kunci: *Blockchain, Kecerdasan Buatan, Industri 4.0, Manufaktur Cerdas, Rantai Pasok*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang sangat pesat pada era Industri 4.0 telah mendorong sektor industri untuk bertransformasi melalui integrasi berbagai komponen digital, seperti *Cyber-Physical Systems* (CPS), *Internet of Things* (IoT), dan *Big Data* (Peres et al., 2020). Transformasi ini berperan penting dalam meningkatkan efisiensi operasional, otonomi sistem, serta akurasi pengambilan keputusan di berbagai lini produksi dan rantai pasok. Dalam konteks tersebut, data menjadi sumber daya strategis yang memungkinkan pertukaran informasi secara cepat dan aman antar entitas industri.

Namun demikian, implementasi Industri 4.0 masih menghadapi berbagai kendala, seperti fragmentasi data, kurangnya transparansi, serta kerentanan terhadap ancaman siber dan manipulasi informasi (Ruoti et al., 2020). Ketergantungan terhadap sistem terpusat juga dapat mengurangi akurasi pengambilan keputusan serta menurunkan tingkat kepercayaan antar pemangku kepentingan dalam ekosistem industri.

Untuk mengatasi tantangan tersebut, dibutuhkan arsitektur teknologi yang mampu menggabungkan keamanan, transparansi, dan kecerdasan adaptif secara terpadu. *Blockchain* menawarkan solusi berbasis desentralisasi untuk menjaga integritas dan keaslian data (Casino et al., 2019), namun tidak memiliki kemampuan analisis yang dinamis. Sebaliknya, *Artificial Intelligence* (AI) memberikan kecerdasan analitik dan kemampuan prediktif yang tinggi (Zonta et al., 2020), tetapi masih bergantung pada sistem terpusat dan menghadapi tantangan auditabilitas. Integrasi keduanya melahirkan konsep *AI-Powered Blockchain*, yaitu pendekatan yang memanfaatkan kekuatan kriptografi *Blockchain* dan kemampuan analitik AI untuk menciptakan sistem industri yang lebih otonom, efisien, dan tepercaya (Bhumichai et al., 2024).

Meskipun potensi integrasi AI dan *Blockchain* telah banyak diakui, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada pengkajian keduanya secara terpisah dalam konteks Industri 4.0. Penelitian yang secara sistematis mengevaluasi sinergi keduanya, terutama dalam membangun arsitektur terintegrasi yang dapat meningkatkan efisiensi, keamanan data, dan otonomi sistem industri yang masih terbatas (Palwe & Sirsikir, 2021).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi integrasi teknologi *Artificial Intelligence* (AI) dan *Blockchain* dalam konteks Industri 4.0, dengan tujuan mengidentifikasi arsitektur, manfaat, serta tantangan implementasi berdasarkan hasil kajian literatur terkini.

KAJIAN TEORI

1. Industri 4.0 dan Transformasi Digital

Era Industri 4.0 merepresentasikan gelombang transformasi baru yang menggabungkan teknologi fisik dan digital melalui penerapan *Cyber-Physical Systems* (CPS), *Internet of Things* (IoT), *Big Data*, dan komputasi awan (Peres et al., 2020). Transformasi ini memungkinkan terciptanya proses produksi yang adaptif secara *real-time*, serta rantai nilai yang cerdas, efisien, dan berkelanjutan. Data tidak lagi dianggap sebagai produk sampingan proses manufaktur, melainkan aset strategis yang memungkinkan pertukaran informasi lintas mesin, perangkat, dan pemangku kepentingan secara cepat dan aman.

Meskipun memiliki potensi besar, penerapan Industri 4.0 masih menghadapi berbagai tantangan. Beberapa studi melaporkan bahwa fragmentasi data antar subsistem, keterbatasan interoperabilitas, kurangnya transparansi, dan ancaman terhadap keamanan siber menjadi hambatan utama dalam adopsinya (Ruoti et al., 2020). Ketergantungan pada arsitektur sistem terpusat juga meningkatkan risiko kesalahan pengambilan keputusan dan mengurangi kepercayaan antar pelaku industri. Oleh karena itu, dibutuhkan kerangka teknologi yang tidak hanya berorientasi pada otomatisasi, tetapi juga menjamin keamanan, transparansi, dan interoperabilitas antar komponen digital.

2. Artificial Intelligence (AI) dalam Industri 4.0

Artificial Intelligence (AI) menjadi fondasi penting bagi terwujudnya sistem industri yang cerdas dan adaptif. AI berperan dalam mengolah data skala besar untuk mendukung pengambilan keputusan otomatis serta prediksi kondisi operasional. Dalam konteks manufaktur, penerapan AI meliputi *predictive maintenance*, optimasi lini produksi, deteksi anomali, serta manajemen rantai pasok (Zonta et al., 2020). Melalui algoritma *machine learning* dan *deep learning*, sistem AI dapat memprediksi kerusakan mesin, meningkatkan efisiensi energi, serta mempercepat proses produksi. Namun, penerapan AI di lingkungan industri juga menimbulkan tantangan baru. Isu seperti *black-box problem*, keamanan data pelatihan, dan ketergantungan pada sistem terpusat menjadi faktor pembatas (Jagatheesaperumal et al., 2021). Selain itu, AI memerlukan mekanisme auditabilitas dan keandalan data yang lebih kuat agar dapat diintegrasikan secara aman dalam sistem industri yang kompleks.

3. Blockchain sebagai Teknologi Pendukung Keamanan dan Transparansi

Teknologi *Blockchain* merupakan *distributed ledger technology* (DLT) yang memungkinkan pencatatan transaksi secara terdesentralisasi, transparan, dan tahan terhadap manipulasi data (Casino et al., 2019). Dalam konteks industri, *blockchain* berfungsi menjaga integritas data produksi, mengoptimalkan rantai pasok, serta mengurangi kebutuhan pihak ketiga dalam verifikasi transaksi (Javaid, 2021).

Meski menjanjikan, *blockchain* menghadapi tantangan seperti keterbatasan skalabilitas, waktu pemrosesan yang lambat, serta konsumsi energi yang tinggi (Kumari, 2023). Selain itu, interoperabilitas antara berbagai platform *blockchain* dan sistem industri lama (*legacy systems*) masih menjadi masalah utama (Alazab & Alhyari, 2024). Penelitian menunjukkan bahwa keberhasilan penerapan *blockchain* dalam Industri 4.0 memerlukan pendekatan *hybrid architecture* yang mampu

menggabungkan keunggulan sistem terdistribusi dengan efisiensi sistem terpusat (Kumari, 2023).

4. Integrasi AI dan Blockchain

Integrasi antara AI dan *blockchain* menjadi arah inovasi penting dalam Industri 4.0 karena mampu menggabungkan kecerdasan analitik AI dengan keandalan dan transparansi *blockchain* (Wang et al., 2022). AI dapat meningkatkan efisiensi mekanisme konsensus dan melakukan analisis data pada jaringan *blockchain*, sedangkan *blockchain* dapat menjamin keaslian dan integritas data yang digunakan dalam pelatihan model AI (Soori et al., 2024). Kombinasi ini menghasilkan sistem industri yang lebih tepercaya, efisien, dan otonom.

Sebagai contoh, AI dapat digunakan untuk mengoptimalkan *smart contracts* dalam jaringan *blockchain*, sementara *blockchain* dapat menciptakan *data provenance* yang dapat diaudit untuk melatih model AI secara etis dan aman (Polas et al., 2022). Namun, penelitian terkini juga mencatat berbagai tantangan, seperti privasi data, keterbatasan daya komputasi, serta kebutuhan standar interoperabilitas antar platform (Tathavadekar & Mahankale, 2025).

5. Manfaat, Tantangan, dan Arsitektur Implementasi

Integrasi AI dan *blockchain* membawa sejumlah manfaat utama bagi sektor industri, termasuk efisiensi proses produksi, transparansi rantai pasok, serta peningkatan keamanan dan kepercayaan data (Bhumichai et al., 2024). Dalam implementasinya, beberapa arsitektur disarankan, seperti model *three-layer architecture* yang terdiri atas: (1) *data layer* untuk akuisisi dan validasi data, (2) *AI layer* untuk analisis dan pengambilan keputusan, dan (3) *blockchain layer* untuk pencatatan dan verifikasi transaksi (Kumari, 2023).

Meski potensinya besar, terdapat tantangan teknis yang harus diatasi, di antaranya efisiensi energi, latensi jaringan, kebutuhan penyimpanan besar, serta kesulitan integrasi antara algoritma AI yang dinamis dan struktur *blockchain* yang statis (Alazab & Alhyari, 2024). Selain itu, aspek hukum dan etika seperti perlindungan privasi dan kepemilikan data juga menjadi perhatian penting dalam penerapannya (Tathavadekar & Mahankale, 2025).

6. Penelitian Terdahulu dan Kesenjangan (Research Gap)

Kajian terdahulu menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian masih membahas AI dan *blockchain* secara terpisah dalam konteks Industri 4.0 (Alazab & Alhyari, 2024; Javaid, 2021). Hanya sedikit studi yang menganalisis sinergi keduanya secara sistematis dan terfokus pada penerapan di bidang manufaktur cerdas, logistik, dan manajemen rantai pasok (Soori et al., 2024; Wang et al., 2022). Dengan demikian, masih terdapat kesenjangan penelitian dalam mengidentifikasi arsitektur, model integrasi, serta dampak operasional integrasi AI–Blockchain terhadap efisiensi dan keberlanjutan industri modern.

Penelitian ini bertujuan untuk menjawab kesenjangan tersebut melalui pendekatan *systematic literature review*, dengan menelaah tren, tantangan, dan peluang integrasi

AI–Blockchain dalam mendukung transformasi digital Industri 4.0 secara menyeluruh.

METODE PENELITIAN

1. Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) yang bertujuan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil-hasil penelitian terdahulu terkait integrasi *Artificial Intelligence* (AI) dan *Blockchain* dalam konteks Industri 4.0. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan pemahaman yang menyeluruh terhadap tren penelitian, kesenjangan (*research gap*), serta arah pengembangan teknologi di masa mendatang.

Metode SLR dianggap relevan karena memungkinkan analisis mendalam terhadap publikasi ilmiah yang terseleksi secara sistematis, dibandingkan dengan studi naratif yang bersifat deskriptif dan subjektif (Kitchenham & Charters, 2007).

2. Tahapan Penelitian

Proses penelitian ini dilakukan dalam empat tahapan utama, sebagaimana diilustrasikan dalam kerangka SLR berikut:

1. Identifikasi topik dan pertanyaan penelitian (Research Questions).

Tahap ini berfokus pada perumusan pertanyaan utama: “Bagaimana integrasi antara *Artificial Intelligence* dan *Blockchain* diterapkan dalam konteks Industri 4.0, serta apa saja manfaat, tantangan, dan arsitektur yang digunakan?”

2. Strategi pencarian literatur.

Pencarian dilakukan pada basis data ilmiah internasional terindeks seperti Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect, dan SpringerLink. Kata kunci yang digunakan menggabungkan istilah utama berikut:

- a. “Artificial Intelligence” OR “AI”
 - b. “Blockchain”
 - c. “Industry 4.0” OR “Industrial Revolution 4.0”
- Kombinasi kata kunci dilakukan menggunakan operator Boolean: (“Artificial Intelligence” AND “Blockchain” AND “Industry 4.0”).

3. Seleksi literatur (Inclusion & Exclusion Criteria).

Kriteria inklusi:

- a. Artikel jurnal atau konferensi bereputasi (Scopus Q1–Q3) terbit antara tahun 2019–2025;
- b. Membahas integrasi AI–*Blockchain* dalam konteks industri, manufaktur, atau sistem cerdas;
- c. Ditulis dalam bahasa Inggris dan tersedia dalam teks penuh (*full-text*).

Kriteria eksklusi:

- a. Artikel non-akademik, *review* populer, atau laporan teknis yang tidak melalui *peer review*;
- b. Publikasi yang hanya membahas AI atau *Blockchain* secara terpisah;
- c. Studi yang tidak menyediakan hasil atau metodologi yang jelas.

3. Proses Seleksi Artikel

Dari hasil pencarian awal, diperoleh sebanyak 312 publikasi terkait AI dan *Blockchain*. Setelah penyaringan duplikasi dan seleksi berdasarkan kriteria inklusi, hanya 42 artikel yang memenuhi syarat untuk dianalisis lebih lanjut. Proses seleksi dilakukan secara manual menggunakan panduan PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Diagram PRISMA menggambarkan jumlah artikel pada setiap tahap seleksi yang dimulai dari identifikasi, penyaringan, kelayakan, hingga inklusi akhir. Proses seleksi literatur divisualisasikan menggunakan metode PRISMA sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tahap	Detail	Jumlah Catatan
Identifikasi	Catatan diidentifikasi melalui pencarian di basis data (Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink)	312
	Catatan yang tersisa setelah duplikasi dihapus	278
Penyaringan (Screening)	Artikel yang dinilai berdasarkan judul dan abstrak	278
	Artikel yang dipertahankan setelah pemeriksaan relevansi	120
Kelayakan (Eligibility)	Artikel teks lengkap yang dinilai untuk kelayakan	58
	Studi yang dikecualikan, dengan alasan (catatan: jumlah tidak disediakan, diasumsikan $58 - 42 = 16$)	(16)
Termasuk (Included)	Studi yang dimasukkan dalam sintesis kualitatif akhir	42

Tabel 1

4. Teknik Analisis Data

Analisis dilakukan secara kualitatif dengan pendekatan *content analysis* dan *thematic coding*. Artikel yang terpilih dibaca secara menyeluruh untuk mengekstraksi data terkait tujuan penelitian, metode, hasil, dan kontribusi utama. Selanjutnya, peneliti mengelompokkan data ke dalam tema-tema besar yang relevan dengan pertanyaan penelitian.

Hasil sintesis tematik digunakan untuk mengidentifikasi pola dan tren integrasi AI–*Blockchain*, termasuk pendekatan arsitektur yang dominan, bidang aplikasi, serta tantangan yang dihadapi. Pendekatan ini diadaptasi dari metode *content synthesis* oleh Petticrew dan Roberts (2006), yang banyak digunakan dalam penelitian SLR teknologi informasi.

5. Validitas dan Reliabilitas

Untuk menjaga objektivitas dan keandalan, proses seleksi artikel dilakukan oleh dua peneliti secara independen. Perbedaan hasil seleksi diselesaikan melalui diskusi dan

kesepakatan bersama (*inter-rater agreement*). Validitas isi dijaga melalui triangulasi sumber, yaitu dengan membandingkan temuan dari beberapa basis data dan publikasi utama.

6. Batasan Penelitian

Penelitian ini hanya mencakup artikel berbahasa Inggris yang tersedia secara daring dan diterbitkan dalam rentang 2019–2025. Studi yang bersifat teknis mendalam seperti algoritma spesifik atau simulasi eksperimental tidak dianalisis secara detail. Oleh karena itu, hasil kajian lebih menekankan pada aspek konseptual, arsitektural, dan manajerial dari integrasi AI–Blockchain di lingkungan Industri 4.0.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Seleksi Studi

Proses seleksi literatur dilakukan berdasarkan panduan PRISMA, dimulai dengan 312 artikel yang diperoleh dari empat basis data utama: Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect, dan SpringerLink. Setelah proses penghapusan duplikasi, jumlah artikel yang tersisa adalah 278 publikasi.

Selanjutnya, melalui tahap penyaringan judul dan abstrak, sebanyak 158 artikel dieliminasi karena tidak relevan dengan topik integrasi *Artificial Intelligence* (AI) dan *Blockchain* dalam konteks Industri 4.0. Hasilnya, 120 artikel dinilai layak untuk evaluasi lebih lanjut.

Tahap evaluasi teks penuh (*full-text eligibility assessment*) kemudian dilakukan untuk menilai kesesuaian dengan kriteria inklusi dan eksklusi. Dari tahap ini, 58 artikel memenuhi kriteria kelayakan. Setelah analisis mendalam terhadap metodologi, ruang lingkup, dan kontribusi penelitian, akhirnya 42 artikel dipilih sebagai sampel akhir untuk proses sintesis tematik.

Hasil seleksi studi ini menggambarkan bahwa penelitian mengenai integrasi AI dan *Blockchain* dalam konteks Industri 4.0 masih tergolong baru dan berkembang pesat. Mayoritas publikasi terbit antara 2020–2024, menunjukkan peningkatan signifikan dalam perhatian akademik terhadap topik ini seiring berkembangnya penerapan Industri 4.0 di berbagai sektor.

2. Hasil Sintesis Tematik

Berdasarkan hasil telaah sistematis terhadap 42 artikel terpilih, ditemukan bahwa penelitian mengenai integrasi *Artificial Intelligence* (AI) dan *Blockchain* dalam konteks Industri 4.0 dapat dikelompokkan ke dalam empat tema utama, yaitu: (1) pengembangan arsitektur sistem terintegrasi, (2) peningkatan efisiensi dan keamanan data, (3) penerapan dalam sektor industri, dan (4) tantangan teknis serta non-teknis yang dihadapi.

Pertama, sebagian besar penelitian menyoroti pentingnya arsitektur terintegrasi yang menggabungkan *machine learning*, *smart contracts*, dan *distributed ledgers* untuk membangun sistem produksi cerdas yang otonom. Bhumichai et al. (2024) dan Soori et al. (2024) menegaskan bahwa model berbasis *three-layer architecture*, yang terdiri dari lapisan data, kecerdasan, dan verifikasi yang merupakan desain paling efektif dalam mewujudkan sistem yang adaptif dan aman.

Kedua, penelitian menunjukkan bahwa integrasi AI–Blockchain mampu meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem industri melalui analisis data yang cepat dan penyimpanan data yang tidak dapat dimanipulasi. AI berperan dalam menganalisis data sensor dan proses produksi secara *real-time*, sedangkan *blockchain* menjamin integritas hasil analisis tersebut agar tidak diubah oleh pihak tidak berwenang (Polas et al., 2022; Wang et al., 2022).

Ketiga, penerapan integrasi ini sudah mulai tampak di sektor manufaktur, logistik, dan manajemen rantai pasok. Javaid (2021) mencatat bahwa integrasi AI–Blockchain digunakan untuk memantau rantai pasok global dan memprediksi risiko keterlambatan pengiriman secara otomatis, sedangkan Kumari (2023) menyoroti penerapannya pada sistem kontrol produksi untuk mengurangi kesalahan manusia (*human error*).

Terakhir, dari sisi tantangan, sebagian besar studi menyebutkan hambatan utama berupa keterbatasan sumber daya komputasi, interoperabilitas antar platform, serta privasi data (Alazab & Alhyari, 2024). Tantangan non-teknis meliputi regulasi dan kesiapan sumber daya manusia yang belum merata di berbagai sektor industri.

3. Manfaat Integrasi AI-Blockchain

Integrasi kedua teknologi ini menghasilkan berbagai manfaat utama, antara lain peningkatan keamanan data, efisiensi operasional, dan transparansi lintas rantai pasok. *Blockchain* menjamin keaslian dan ketertelusuran data melalui mekanisme *distributed ledger*, sedangkan AI memanfaatkan data tersebut untuk menganalisis, memprediksi, dan mengoptimalkan proses produksi (Casino et al., 2019; Zonta et al., 2020).

Penerapan ini telah terbukti mendukung konsep *predictive maintenance* dalam industri manufaktur, membantu mendeteksi anomali sistem secara dini, dan meningkatkan efisiensi rantai pasok (Soori et al., 2024). Dengan demikian, AI dan *Blockchain* berperan sebagai fondasi penting dalam membangun *smart ecosystem* industri yang adaptif, efisien, dan tepercaya.

4. Tantangan dan Keterbatasan Implementasi

Tantangan utama yang diidentifikasi dari hasil kajian meliputi:

1. Keterbatasan sumber daya komputasi dan energi, di mana *blockchain* memerlukan kapasitas penyimpanan besar dan konsumsi daya tinggi (Kumari, 2023);
2. Masalah privasi dan keamanan data, karena sistem yang transparan dapat membuka potensi kebocoran informasi sensitif (Tathavadekar & Mahankale, 2025);
3. Kesiapan regulasi dan infrastruktur, karena belum semua industri dan negara memiliki kerangka hukum yang mendukung penerapan teknologi ini secara menyeluruh (Alazab & Alhyari, 2024).

Selain itu, terdapat kebutuhan mendesak akan *governance framework* yang mengatur interaksi antara sistem AI dan *Blockchain*, agar pengambilan keputusan otonom tetap memenuhi prinsip etika dan tanggung jawab sosial.

5. Arah Penelitian

Dari perspektif akademik, hasil studi ini menunjukkan bahwa integrasi AI–Blockchain berpotensi membentuk paradigma baru dalam kajian *industrial intelligence* dan *digital*

trust. Arah penelitian masa depan perlu difokuskan pada pengembangan model integrasi hemat energi, *privacy-preserving AI*, dan pendekatan *federated learning* yang dapat diterapkan di lingkungan industri terdistribusi.

Secara teoretis, penelitian ini memperkaya literatur mengenai kolaborasi lintas teknologi dalam konteks Industri 4.0, terutama dalam memahami hubungan antara kecerdasan analitik AI dan keandalan data *Blockchain*. Sementara secara praktis, hasil ini memberikan panduan bagi industri dan pembuat kebijakan untuk merancang strategi digitalisasi yang berkelanjutan dan berorientasi pada kepercayaan data.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah melakukan tinjauan sistematis terhadap 42 publikasi ilmiah yang membahas integrasi *Artificial Intelligence* (AI) dan *Blockchain* dalam konteks Industri 4.0. Hasil telaah menunjukkan bahwa sinergi antara kedua teknologi tersebut memiliki potensi besar dalam mewujudkan sistem industri yang cerdas, aman, dan transparan. Integrasi AI–Blockchain tidak hanya memperkuat efisiensi proses produksi melalui otomatisasi berbasis analitik, tetapi juga menjamin keaslian dan keandalan data melalui sistem desentralisasi yang tahan manipulasi.

Secara konseptual, penelitian ini menemukan empat tema utama dalam perkembangan riset AI–Blockchain: pengembangan arsitektur terintegrasi, efisiensi dan keamanan data, penerapan industri, serta tantangan implementasi. Model *three-layer architecture* yang menggabungkan lapisan data, kecerdasan, dan verifikasi dianggap paling relevan untuk mendukung interoperabilitas sistem cerdas dalam ekosistem industri modern.

Namun demikian, adopsi integrasi AI–Blockchain masih menghadapi sejumlah kendala seperti keterbatasan infrastruktur teknologi, privasi data, serta ketiadaan standar regulasi yang seragam. Oleh sebab itu, dibutuhkan upaya kolaboratif antara akademisi, industri, dan pembuat kebijakan untuk mengembangkan strategi penerapan yang berkelanjutan serta memenuhi prinsip keamanan, efisiensi, dan etika digital.

DAFTAR PUSTAKA

- Alazab, M., & Alhyari, S. (2024). *Industry 4.0 innovation: A systematic literature review on the role of blockchain technology in creating smart and sustainable manufacturing facilities*. *Information*, 15(2), 7. <https://doi.org/10.3390/info15020078>
- Bhumichai, D., Smiliotopoulos, C., Benton, R., Kambourakis, G., & Damopoulos, D. (2024). *The convergence of artificial intelligence and blockchain: The state of play and the road ahead*. *Information*, 15(5), 268. <https://doi.org/10.3390/info15050268>
- Casino, F., Dasaklis, T. K., & Patsakis, C. (2019). *A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues*. *Telematics and Informatics*, 36, 55–81. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006>
- Jagatheesaperumal, S., Sundaresan, R., & Senthil Kumar, R. (2021). *Artificial intelligence and machine learning in smart manufacturing: A review*. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 14(4), 124–139.

- <https://doi.org/10.22266/ijies2021.0831.12>
- Javaid, M. (2021). *Blockchain technology applications for Industry 4.0. Computers & Industrial Engineering*, 157, 107432. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107432>
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. EBSE Technical Report*, EBSE-2007-01.
- Kumari, P. (2023). *Blockchain challenges and opportunities in industrial automation systems. Journal of Industrial Information Integration*, 29, 100375. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100375>
- Palwe, S., & Sirsikar, S. (2021). *Integrating artificial intelligence and blockchain for secure industrial automation: A conceptual framework. International Journal of Advanced Computer Science*, 12(9), 52–63.
- Peres, R. S., Jia, X., Lee, J., Sun, K., Colombo, A. W., & Barata, J. (2020). *Industrial artificial intelligence in Industry 4.0 – Systematic review, challenges, and outlook. IEEE Access*, 8, 220121–220139. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3042874>
- Petticrew, M., & Roberts, H. (2006). *Systematic reviews in the social sciences: A practical guide*. Malden, MA: Blackwell Publishing.
- Polas, M., Ahmed, R., & Hoque, M. R. (2022). *Integrating AI and blockchain for sustainable industrial operations: Challenges and future prospects. Sustainability*, 14(12), 7442. <https://doi.org/10.3390/su14127442>
- Ruoti, S., Kaiser, B., Yerukhimovich, A., Clark, J., & Cunningham, R. (2020). *Blockchain technology: What is it good for? Communications of the ACM*, 63(1), 46–53. <https://doi.org/10.1145/3369752>
- Soori, M., Dastres, R., & Arezoo, B. (2024). *AI-powered blockchain technology in Industry 4.0: A review. Journal of Economy and Technology*, 1(1), 222–241. <https://doi.org/10.1016/j.ject.2024.01.001>
- Tathavadekar, R., & Mahankale, S. (2025). *Leveraging blockchain and AI integration in smart industry ecosystems. Procedia Computer Science*, 218, 340–351. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.12.034>
- Wang, Y., Li, M., & Yang, J. (2022). *A comprehensive review of AI–blockchain integration in digital business systems. IEEE Transactions on Engineering Management*. <https://doi.org/10.1109/TEM.2022.3167421>
- Zonta, T., Costa, C. A. D., Righi, R. R., Lima, M. J. D., Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). *Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. Computers & Industrial Engineering*, 150, 106889. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>