

Integrasi Blockchain dan Artificial Intelligence dalam Transformasi Digital Maritime Supply Chain: Sebuah Tinjauan Sistematis terhadap Efisiensi dan Resiliensi

Karjono^{1*}, Karmanis², Evyana Diah Kusumawati³

^{1,3} Program Studi Manajemen Pelabuhan dan Logistik Maritim Politeknik Bumi Akpelni

² Fakultas Ilmu Sosial dan Politik Universitas 17 Agustus 1945 Semarang

*e-mail korespondensi: karjono@akpelni.ac.id

Abstract

Background: The global maritime supply chain faces enormous pressure to undergo digital transformation amid demands for efficiency and resilience. Blockchain and Artificial Intelligence (AI) have emerged as key technologies, yet their integration has rarely been systematically reviewed. Objective: This study aims to synthesize scientific evidence on Blockchain-AI integration models, their contributions to maritime supply chain efficiency and resilience, and the factors influencing implementation. Method: A systematic literature review (SLR) following the PRISMA protocol was conducted. Searches were performed in Scopus, Web of Science, and Google Scholar (2019-2024) using structured keywords. A total of 128 articles from 152 initial references were thematically analyzed. Results: Three main integration patterns were identified: off-chain AI with on-chain smart contracts, on-chain federated learning, and hybrid oracle-based integration. Blockchain-AI integration has been proven to reduce turnaround time by 25-35%, document costs by 28-44%, and increase supply chain visibility by up to 92%. Resilience improved through disruption prediction (85-94% accuracy), automated rerouting, and reduction of recovery time by up to 57%. The main barriers are interoperability, regulation, and migration costs. Simultaneous Blockchain-AI integration enhances both efficiency and resilience of maritime supply chains, but requires interoperability standards and regulatory support.

Keywords: *blockchain, artificial intelligence, maritime supply chain, efficiency, resilience, systematic literature review.*

Abstrak

Rantai pasok maritim global menghadapi tekanan besar untuk bertransformasi digital di tengah tuntutan efisiensi dan resiliensi. Blockchain dan Artificial Intelligence (AI) muncul sebagai teknologi kunci, namun integrasi keduanya masih jarang ditinjau secara sistematis. Tujuan: Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis bukti ilmiah mengenai model integrasi Blockchain-AI, kontribusinya terhadap efisiensi dan resiliensi rantai pasok maritim, serta faktor-faktor yang mempengaruhi implementasinya. Metode: Systematic Literature Review (SLR) mengikuti protokol PRISMA. Pencarian dilakukan pada basis data Scopus, Web of Science, dan Google Scholar (2019-2024) menggunakan kata kunci terstruktur. Sebanyak 128 artikel dari 152 referensi awal dianalisis secara tematik. Hasil: Teridentifikasi tiga pola integrasi utama: off-chain AI dengan on-chain smart contract, federated learning on-chain, dan hybrid berbasis oracle. Integrasi Blockchain-AI terbukti menurunkan turnaround time 25-35%, biaya dokumen 28-44%, serta meningkatkan visibilitas rantai pasok hingga 92%. Resiliensi meningkat melalui prediksi gangguan (akurasi 85-94%), otomatisasi rerouting, dan pengurangan waktu pemulihan hingga 57%. Faktor penghambat utama adalah interoperabilitas, regulasi, dan biaya migrasi. Integrasi Blockchain-AI secara simultan meningkatkan efisiensi dan resiliensi rantai pasok maritim, namun memerlukan standar interoperabilitas dan dukungan regulasi.

Kata Kunci: *blockchain, artificial intelligence, rantai pasok maritim, efisiensi, resiliensi,*

PENDAHULUAN

Rantai pasok maritim global menangani lebih dari 80% volume perdagangan internasional, menjadikannya tulang punggung ekonomi dunia. Namun, sektor ini dihadapkan pada tantangan klasik: fragmentasi data, kurangnya transparansi, inefisiensi dokumen, serta kerentanan terhadap gangguan seperti pandemi COVID-19 dan konflik geopolitik (Ivanov, 2021; Chang et al., 2020). Sistem konvensional yang bersifat silo dan masih mengandalkan dokumen kertas terbukti tidak mampu merespons volatilitas yang semakin tinggi (Hartley & Sawaya, 2019; Ivanov et al., 2019). Krisis rantai pasok global selama pandemi telah menjadi pemicu kesadaran bahwa transformasi digital bukan lagi pilihan, melainkan keharusan.

Transformasi digital sektor maritim, yang sering disebut sebagai Maritime 4.0, mendorong adopsi Internet of Things (IoT), cloud computing, dan big data analytics (Sanchez-Gonzalez et al., 2019; Min, 2022). Konsep smart port menjadi pusat inovasi, dengan pelabuhan-pelabuhan besar seperti Rotterdam, Singapura, dan Shanghai mulai mengintegrasikan sensor IoT dan platform data real-time. Namun, adopsi teknologi ini tidak berjalan mulus. Kesenjangan digital antara pelaku usaha besar dan kecil, keberadaan sistem warisan (legacy systems), serta resistensi terhadap perubahan masih menjadi hambatan signifikan (Heikkilä et al., 2022; Almeida, 2023). Di sinilah peran teknologi baru seperti blockchain dan AI menjadi sangat strategis.

Blockchain menawarkan desentralisasi, ketidakubahan (immutability), dan smart contract yang dapat mengotomatisasi berbagai proses bisnis (Sunny et al., 2020; Liu et al., 2023). Sementara itu, AI menyediakan kemampuan prediksi, optimasi, dan deteksi anomali yang sangat dibutuhkan untuk mengelola kompleksitas rantai pasok modern (Belhadi et al., 2022; Aljohani, 2023). Kedua teknologi ini sering dibahas secara terpisah dalam literatur. Penelitian tentang blockchain maritim cenderung fokus pada digitalisasi bill of lading dan traceability, sementara studi tentang AI maritim lebih menekankan pada prediksi ETA dan optimasi rute. Namun, integrasi keduanya di mana blockchain menyediakan data terverifikasi untuk AI, dan AI mengotomatisasi eksekusi smart contract masih jarang disintesis secara sistematis, terutama dalam konteks efisiensi dan resiliensi secara simultan (Tsolakis et al., 2023; Dolgui & Ivanov, 2023).

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menjawab empat pertanyaan utama: (1) Bagaimana model-model integrasi Blockchain dan AI yang diusulkan dalam literatur untuk rantai pasok maritim? (2) Seberapa besar kontribusi integrasi tersebut terhadap peningkatan efisiensi (waktu, biaya, akurasi data)? (3) Bagaimana integrasi tersebut meningkatkan resiliensi (antisipasi, adaptasi, pemulihan)? (4) Apa saja faktor penghambat dan pendukung implementasinya? Secara teoritis, penelitian ini memberikan peta pengetahuan terkini yang memadukan dua aliran riset yang selama ini terpisah. Secara praktis, hasilnya dapat menjadi panduan bagi operator pelabuhan, regulator, dan penyedia teknologi dalam merancang strategi transformasi digital yang lebih efektif..

METODE

Penelitian ini menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) yang berpedoman pada protokol PRISMA 2020 (Page et al., 2021). Protokol ditetapkan sebelumnya mencakup pertanyaan penelitian, sumber data, strategi pencarian, kriteria inklusi/eksklusi, serta tahapan sintesis data.

Pencarian literatur dilakukan pada tiga basis data utama: Scopus, Web of Science (WoS), dan Google Scholar (untuk melengkapi literatur yang tidak terindeks di kedua database pertama). Rentang publikasi dibatasi dari Januari 2019 hingga Desember 2024 (enam tahun terakhir) untuk menangkap perkembangan terbaru. Kata kunci menggunakan Boolean string berikut: ("blockchain" OR "distributed ledger") AND ("artificial intelligence" OR "machine

learning" OR "deep learning") AND ("maritime supply chain" OR "shipping supply chain" OR "port logistics" OR "smart port") AND ("efficiency" OR "resilience" OR "visibility") Selain pencarian elektronik, dilakukan juga snowballing (maju dan mundur) dari daftar pustaka artikel-artikel kunci untuk memastikan tidak ada studi relevan yang terlewat.

Kriteria inklusi adalah: artikel jurnal peer-review atau prosiding konferensi terindeks; berbahasa Inggris; secara eksplisit membahas integrasi Blockchain dan AI dalam konteks rantai pasok maritim atau logistik pelabuhan; menyajikan data empiris (simulasi, studi kasus, eksperimen) atau kerangka konseptual yang teruji; tersedia teks lengkap. Kriteria eksklusi mencakup artikel opini, editorial, buku tanpa tinjauan sejawat; studi yang hanya membahas blockchain atau AI secara terpisah (tanpa integrasi); konteks di luar maritim; serta artikel tanpa abstrak atau teks lengkap.

Proses seleksi berlangsung dalam beberapa tahap. Identifikasi awal menghasilkan 152 artikel. Setelah penghapusan 28 duplikat, tersisa 124 artikel. Skrining berdasarkan judul dan abstrak menyisakan 96 artikel. Skrining teks lengkap kemudian menghasilkan 72 artikel yang memenuhi semua kriteria. Melalui snowballing, ditambahkan 12 artikel, sehingga total 84 artikel dianalisis secara mendalam.

Penilaian kualitas menggunakan kriteria Critical Appraisal Skills Programme (CASP) yang dimodifikasi untuk studi kuantitatif dan kualitatif. Setiap artikel diberi skor 0-2 pada tiga dimensi: relevansi dengan topik, rigor metodologi, dan kontribusi bukti. Tidak ada artikel yang dieksklusi pada tahap ini karena semua yang lolos teks lengkap memiliki skor minimal 4 dari 6. Data diekstraksi menggunakan formulir standar yang mencakup: penulis/tahun, jenis arsitektur integrasi, teknologi spesifik (jenis blockchain, algoritma AI), indikator efisiensi, indikator resiliensi, metode evaluasi, temuan utama, serta faktor pendukung dan penghambat. Sintesis dilakukan secara tematik dengan mengelompokkan temuan ke dalam empat kategori utama: (1) model arsitektur integrasi, (2) dampak terhadap efisiensi, (3) dampak terhadap resiliensi, (4) faktor implementasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Studi yang Diinklusi, Berdasarkan 84 artikel yang berhasil dikumpulkan, dinamika publikasi tahunan menunjukkan kecenderungan peningkatan yang konsisten, dari 9 artikel (2019) menjadi 20 artikel (2023)—atau melonjak sebesar 122% dalam kurun waktu lima tahun—sebelum mengalami koreksi menjadi 11 artikel pada tahun 2024. Puncak perhatian pada tahun 2023 tidak hanya terlihat dari kuantitas, tetapi juga mencerminkan respons akademik terhadap percepatan transformasi digital pasca-pandemi serta eskalasi gangguan geopolitik, seperti krisis di Laut Merah yang memicu lonjakan biaya logistik global. Dari sisi sumber publikasi, lima jurnal utama mendominasi kontribusi, yaitu *International Journal of Production Research* (12 artikel; 14,3%), *Sustainability* (9; 10,7%), *Logistics* (8; 9,5%), *IEEE Access* (7; 8,3%), dan *Maritime Economics & Logistics* (5; 6,0%)—yang secara kumulatif menyumbang hampir separuh total artikel, yakni 48,8%. Ditinjau dari pendekatan penelitian, mayoritas artikel (67%) masih mengandalkan metode simulasi atau studi kasus, sementara hanya sepertiganya (33%) yang bersifat konseptual. Temuan paling kritis terletak pada aspek validasi empiris: hanya 12% artikel (10 dari 84) yang melaporkan data dari implementasi nyata di pelabuhan—misalnya pada inisiatif kolaboratif seperti Tradelens dan GSBN. Rendahnya proporsi ini mengonfirmasi bahwa riset di bidang ini masih berada pada tahap awal (embryonic stage) dan mengindikasikan adanya kesenjangan (research-practice gap) yang cukup lebar antara pengembangan model teoretis dengan penerapan operasional di dunia nyata. Model Integrasi Blockchain-AI yang Ditemukan, Berdasarkan sintesis literatur, teridentifikasi tiga arsitektur utama integrasi Blockchain-AI.

Model pertama, AI off-chain + Smart Contract on-chain, merupakan yang paling dominan (51 artikel, 60,7%). Dalam arsitektur ini, algoritma AI (seperti LSTM untuk prediksi, Random Forest untuk klasifikasi, atau NLP untuk ekstraksi dokumen) berjalan di luar blockchain. Data dari IoT atau sistem enterprise dianalisis oleh AI, dan hasilnya (misalnya prediksi waktu keterlambatan, deteksi anomali dokumen) dikirimkan ke smart contract yang berada di blockchain. Smart contract kemudian secara otomatis mengeksekusi aksi seperti kompensasi, penjadwalan ulang, atau perpanjangan izin. Contoh representatif dari model ini adalah studi Liu et al. (2023), Tsolakis et al. (2023), dan Wong et al. (2021).

Model kedua, Federated Learning on-chain, ditemukan dalam 19 artikel (22,6%). Di sini, model AI dilatih secara terdistribusi di setiap node yang tergabung dalam jaringan blockchain. Data mentah tidak pernah meninggalkan node masing-masing hanya gradien atau parameter model yang dibagikan. Pendekatan ini sangat menguntungkan untuk skenario dengan sensitivitas data tinggi, seperti tarif logistik atau data pelanggan. Kelemahannya adalah kebutuhan komputasi yang lebih berat di setiap node (Jauhar et al., 2024; Dolgui & Ivanov, 2023).

Model ketiga, Oracle-based hybrid, teridentifikasi dalam 14 artikel (16,7%). Arsitektur ini menggunakan oracle (misalnya Chainlink) untuk menghubungkan data off-chain yang tidak tersedia di blockchain, seperti kondisi cuaca, berita geopolitik, atau harga bahan bakar. AI dapat dioperasikan di dalam oracle untuk memvalidasi, memfilter, atau bahkan memprediksi data sebelum dikirimkan ke smart contract. Model ini paling fleksibel untuk skenario yang membutuhkan data eksternal, namun menambah kompleksitas dan berpotensi menciptakan single point of failure jika oracle tidak terdesentralisasi dengan baik (Omisola et al., 2023; Grover et al., 2024).

Pengukuran Efisiensi: Bukti dari Literatur, Sebanyak 31 artikel melaporkan data kuantitatif terkait efisiensi.

Tabel 1. Dampak Integrasi Blockchain-AI terhadap Efisiensi Rantai Pasok Maritim

Parameter	Rentang Baseline	Rentang Setelah Integrasi	Perubahan (%)	Jumlah Studi
Turnaround time (jam)	48 120	31 78	-25% s.d. -38%	12
Biaya pemrosesan dokumen (USD/kapal)	150 350	85 210	-28% s.d. -44%	9
Akurasi/konsistensi data (%)	75 88%	94 99,7%	+15% s.d. +27%	11
Waktu verifikasi dokumen (jam)	8 18	1,5 4	-75% s.d. -88%	8
Frekuensi komunikasi manual	7 12	1 3	-73% s.d. -86%	7

Rata-rata penurunan turnaround time terbesar dilaporkan oleh Amico & Cigolini (2024) sebesar 35% melalui implementasi blockchain-based bill of lading. Sunny et al. (2020) menunjukkan peningkatan akurasi data hingga 99,7% dalam studi traceability kontainer. Sementara itu, Jović et al. (2020) mencatat penurunan biaya dokumen sebesar 28% di pelabuhan Eropa. Menariknya, sebuah studi simulasi yang dilakukan untuk konteks Indonesia (Simanjuntak et al., 2024) memperkirakan potensi penurunan biaya 30 40% jika integrasi Blockchain-AI diterapkan di Pelabuhan Tanjung Priok

Pengukuran Resiliensi: Bukti dari Literatur

Sebanyak 27 artikel melaporkan indikator resiliensi. Ringkasannya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Dampak Integrasi Blockchain-AI terhadap Resiliensi Rantai Pasok Maritim

Indikator Resiliensi	Baseline	Setelah Integrasi	Peningkatan	Studi Kunci
Visibilitas rantai pasok (%)	45 65%	78 92%	+33% s.d. +42%	Ivanov (2021); Bechtsis et al. (2022)
Time to recover TTR (jam)	24 96	10 48	-50% s.d. - 57%	Dolgui & Ivanov (2023); Aljohani (2023)
Akurasi prediksi gangguan (%)	60 75%	85 94%	+25% s.d. +34%	Belhadi et al. (2022); Jauhar et al. (2024)
Waktu rerouting otomatis (menit)	120 360	2 10	-95% s.d. - 98%	Liu et al. (2023); Tsolakis et al. (2023)

Ivanov (2021) menekankan bahwa end-to-end visibility melalui blockchain dapat mengurangi ripple effect hingga 40% yaitu efek berantai keterlambatan di satu simpul yang menyebar ke seluruh jaringan. Belhadi et al. (2022) melaporkan bahwa kerangka keputusan berbasis AI mampu mencapai akurasi prediksi gangguan hingga 92%. Kombinasi keduanya, sebagaimana ditunjukkan oleh Dolgui & Ivanov (2023), menghasilkan self-healing supply chain dengan waktu pemulihan 57% lebih rendah dibandingkan sistem konvensional.

Faktor Penghambat dan Pendukung Implementasi

Dari 40 artikel yang secara khusus membahas aspek implementasi, beragam faktor diidentifikasi. Faktor pendukung (enablers) yang paling sering disebut adalah: (1) dukungan regulasi dan standarisasi (Chang et al., 2020; Guan et al., 2024); (2) ketersediaan infrastruktur IoT dan 5G (Apruzzese et al., 2023); (3) kesadaran pemangku kepentingan akan manfaat transparansi (Sunny et al., 2020); (4) adanya proyek percontohan dan kolaborasi industri (Heikkilä et al., 2022; Min, 2022).

Sementara itu, faktor penghambat (barriers) meliputi: (1) interoperabilitas antar platform blockchain yang berbeda (Karakas et al., 2024; Li et al., 2024); (2) ketidakpastian hukum untuk dokumen digital seperti bill of lading (Jović et al., 2020; Almeida, 2023); (3) biaya migrasi dari sistem warisan (Hartley & Sawaya, 2019; Sakita et al., 2024); (4) kurangnya literasi digital sumber daya manusia (Al-Banna et al., 2023; Paraskevas et al., 2024); (5) masalah skalabilitas dan konsumsi energi blockchain (Dolgui & Ivanov, 2023)

Interpretasi Model Integrasi

Kelebihan dan Keterbatasan Masing-masing Arsitektur Ketiga model integrasi yang ditemukan dalam literatur memiliki karakteristik dan trade-off yang perlu dipahami sebelum implementasi. Model off-chain AI + on-chain smart contract mendominasi karena relatif sederhana dan kompatibel dengan berbagai platform blockchain permissioned seperti Hyperledger Fabric (Liu et al., 2023). Keuntungan utamanya adalah beban komputasi AI tidak membebani blockchain, sehingga kecepatan transaksi tetap tinggi. Namun, kelemahannya adalah ketergantungan pada

oracle atau API off-chain yang dapat menjadi titik rawan kepercayaan. Jika data dari AI tidak akurat atau dimanipulasi, maka smart contract akan mengeksekusi keputusan yang salah.

Model federated learning on-chain unggul dalam hal privasi dan keamanan data, karena data mentah tidak pernah keluar dari setiap node. Ini sangat relevan untuk skenario di mana perusahaan pelayaran enggan berbagi data operasional mereka (Jauhar et al., 2024). Sayangnya, model ini membutuhkan sumber daya komputasi yang lebih besar di setiap node, yang mungkin tidak tersedia di pelabuhan-pelabuhan kecil atau kapal-kapal lama.

Model oracle-based hybrid paling fleksibel karena mampu menarik data dari berbagai sumber eksternal (cuaca, berita, harga komoditas) yang sangat mempengaruhi keputusan logistik. Contohnya, smart contract dapat secara otomatis menyesuaikan rute kapal jika oracle melaporkan badai di jalur tertentu. Namun, kompleksitas tata kelola oracle dan potensi single point of failure menjadi tantangan utama (Omisola et al., 2023; Grover et al., 2024).

Dibandingkan dengan tinjauan pustaka sebelumnya yang hanya fokus pada blockchain (Chang et al., 2020) atau hanya AI (Belhadi et al., 2022), penelitian ini memberikan peta yang lebih lengkap. Tidak ada model yang “paling unggul” secara absolut; pilihan arsitektur harus disesuaikan dengan konteks spesifik: volume transaksi, kebutuhan privasi, ketersediaan infrastruktur, dan tingkat kematangan digital organisasi.

Efisiensi: Apakah Integrasi Lebih Baik daripada Teknologi Tunggal?

Bukti kuantitatif dari 31 artikel menunjukkan bahwa integrasi Blockchain-AI memberikan peningkatan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan penerapan masing-masing teknologi secara terpisah. Sebagai ilustrasi, penurunan turnaround time rata-rata 31% pada studi integrasi lebih tinggi daripada studi blockchain saja (25% menurut Amico & Cigolini, 2024) dan studi AI saja (18% menurut Aljohani, 2023). Mengapa demikian? Karena blockchain menyediakan data yang terverifikasi dan konsisten sebagai input bagi AI, sehingga akurasi prediksi meningkat. Sebaliknya, AI memperkaya smart contract dengan kemampuan adaptif, sehingga eksekusi otomatis tidak kaku tetapi berbasis kondisi real-time.

Namun, Karakas et al. (2024) mengingatkan bahwa efisiensi biaya hanya tercapai pada skala volume transaksi di atas 500 per hari. Di pelabuhan-pelabuhan kecil dengan frekuensi rendah, biaya operasional blockchain (listrik, node, fee) bisa lebih tinggi daripada manfaatnya. Oleh karena itu, strategi bertahap dimulai dari dokumen bernilai tinggi atau routes dengan volume besar lebih disarankan.

Resiliensi: Visibilitas, Prediksi, dan Pemulihan Otomatis, Resiliensi rantai pasok maritim meningkat secara signifikan melalui tiga mekanisme yang saling memperkuat. Pertama, blockchain meningkatkan visibilitas end-to-end. Setiap transaksi yang tercatat secara immutable memungkinkan semua pemangku kepentingan (pelabuhan asal, pengirim, agen, bea cukai, pelabuhan tujuan) melihat status terkini secara real-time. Ivanov (2021) menunjukkan bahwa peningkatan visibilitas dapat mengurangi ripple effect hingga 40% karena gangguan di satu titik segera diketahui dan dapat diantisipasi. Kedua, AI memberikan kemampuan prediksi dini atas potensi gangguan. Dengan belajar dari data historis (cuaca, kepadatan lalu lintas, kinerja operator) dan data real-time (pembacaan IoT, AIS, berita), model machine learning dapat memberi peringatan 6-12 jam sebelum kejadian. Akurasi 85-94% yang dilaporkan Belhadi et al. (2022) dan Jauhar et al. (2024) cukup tinggi untuk menjadi dasar pengambilan keputusan. Ketiga, smart contract yang dipicu oleh output AI memungkinkan respons otomatis tanpa menunggu keputusan manusia. Contohnya, jika AI mendeteksi keterlambatan kapal melebihi ambang batas, smart contract dapat secara otomatis memesan slot tambahan di pelabuhan alternatif, atau mengaktifkan polis asuransi, atau mengirim notifikasi ke semua pihak terkait. Waktu rerouting otomatis yang dilaporkan turun dari 2-6 jam menjadi hanya 2-10 menit (Liu et al., 2023; Tsolakis et al., 2023).

Meskipun demikian, teknologi hanyalah salah satu aspek. Pettit et al. (2019) dan Patidar et al. (2023) mengingatkan bahwa resiliensi organisasi juga membutuhkan redundancy (buffer stok, rute alternatif) dan fleksibilitas (kontrak jangka pendek dengan pemasok cadangan). Teknologi tidak bisa menggantikan manajemen risiko tradisional, tetapi dapat memperkuatnya secara signifikan.

Faktor Kritis Sukses

Perbedaan Konteks Regional, Salah satu temuan menarik dari tinjauan ini adalah perbedaan penekanan faktor penghambat antara studi di Asia dan Eropa. Di Asia khususnya Indonesia, Filipina, dan Vietnam biaya migrasi dari sistem warisan dan kurangnya literasi digital menjadi hambatan utama (Simanjuntak et al., 2024; Singh et al., 2024). Sebaliknya, di Eropa, isu yang lebih menonjol adalah standarisasi antarnegara dan kepatuhan terhadap regulasi seperti GDPR (Heikkilä et al., 2022; Almeida, 2023). Implikasinya, strategi implementasi harus disesuaikan secara kontekstual. Di negara berkembang, prioritas pertama adalah pelatihan SDM dan penyediaan infrastruktur murah (misalnya cloud-based permissioned blockchain). Di negara maju, tantangan utamanya adalah harmonisasi regulasi dan membangun konsorsium industri. Solusi lintas konteks yang banyak direkomendasikan antara lain: (1) penggunaan permissioned blockchain (seperti Hyperledger Fabric) yang lebih hemat energi dan biaya dibandingkan permissionless (Liu et al., 2023); (2) pengembangan standar internasional seperti UN/CEFACT untuk digital bill of lading (Jović et al., 2020); (3) pendekatan bertahap melalui proyek percontohan di pelabuhan besar sebelum skala penuh (Min, 2022).

Keterbatasan Bukti dan Agenda Riset Mendatang.

Meskipun bukti yang terkumpul cukup konsisten mendukung dampak positif integrasi Blockchain-AI, penting untuk dicatat bahwa sebagian besar studi (72%) masih berupa simulasi atau studi kasus tunggal. Hanya 12% artikel yang melaporkan data dari implementasi riil di pelabuhan (misalnya proyek Tradelens di Rotterdam, GSBN di Shanghai). Simulasi, betapapun canggihnya, selalu mengandung asumsi penyederhanaan yang mungkin tidak terpenuhi di lapangan. Oleh karena itu, urgensi untuk melakukan uji coba lapangan (live pilot) dengan data transaksional nyata menjadi agenda riset paling mendesak. Selain itu, belum ada studi yang secara komprehensif mengukur dampak integrasi terhadap keberlanjutan lingkungan (carbon footprint). Blockchain dikenal memiliki konsumsi energi tinggi, terutama yang menggunakan proof-of-work. Meskipun sebagian besar implementasi maritim menggunakan proof-of-authority atau proof-of-stake yang lebih hemat energi, analisis siklus hidup (life cycle assessment) tetap diperlukan. Penelitian mendatang juga perlu mengeksplorasi model tokenomics untuk memberi insentif kepada pemangku kepentingan agar mau berbagi data, karena tanpa partisipasi semua pihak, manfaat integrasi tidak akan optimal.

SIMPULAN

Berdasarkan systematic literature review terhadap 84 artikel, penelitian ini menyimpulkan empat hal utama.

Pertama, model integrasi Blockchain-AI yang teridentifikasi terdiri dari tiga arsitektur: off-chain AI + on-chain smart contract (dominan, 60,7%), federated learning on-chain (22,6%), dan oracle-based hybrid (16,7%). Masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan yang perlu disesuaikan dengan konteks implementasi.

Kedua, integrasi tersebut terbukti meningkatkan efisiensi secara signifikan: turnaround time turun 25 38%, biaya dokumen turun 28 44%, akurasi data meningkat 15 27%, waktu verifikasi dokumen turun 75 88%, dan frekuensi komunikasi manual turun 73 86%. Efek sinergis lebih tinggi dibandingkan penerapan blockchain atau AI secara terpisah.

Ketiga, resiliensi juga meningkat drastis: visibilitas rantai pasok naik 33 42%, time to recover turun 50 57%, akurasi prediksi gangguan mencapai 85 94%, dan waktu rerouting otomatis menyusut hingga 95 98%. Peningkatan ini berasal dari visibilitas end-to-end (blockchain), prediksi dini (AI), dan eksekusi otomatis (smart contract).

Keempat, faktor penghambat utama adalah interoperabilitas antar platform, ketidakpastian regulasi, biaya migrasi, dan literasi digital. Faktor pendukungnya meliputi standarisasi, infrastruktur IoT/5G, kolaborasi industri, serta proyek percontohan bertahap.

Implikasi teoritis: Penelitian ini menyediakan sintesis komprehensif pertama yang memetakan arsitektur integrasi Blockchain-AI beserta bukti kuantitatif dampaknya terhadap efisiensi dan resiliensi secara simultan dalam konteks maritim.

Implikasi praktis: Operator pelabuhan disarankan memulai dengan model off-chain AI + smart contract pada proses dokumentasi berulang dan bernilai tinggi. Regulator perlu mengakselerasi standar digital bill of lading dan harmonisasi lintas negara. Pelatihan literasi digital bagi SDM pelabuhan harus menjadi prioritas.

Keterbatasan: Sebagian besar studi berbasis simulasi; bukti dari implementasi lapangan masih terbatas (hanya 12% artikel). Review ini juga tidak melakukan meta-analisis karena heterogenitas metode dan indikator.

Penelitian selanjutnya diarahkan pada: (1) uji coba lapangan di pelabuhan dengan data transaksional nyata; (2) pengembangan standar interoperabilitas antar platform blockchain; (3) eksplorasi tokenomics untuk insentif berbagi data; (4) analisis dampak integrasi terhadap carbon footprint dan green port.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Banna, A., Yaqot, M., & Menezes, B. (2023). Roadmap to digital supply chain resilience under investment constraints. *Production & Manufacturing Research*, 11(1), 2194943.
- Aljohani, A. (2023). Predictive analytics and machine learning for real-time supply chain risk mitigation and agility. *Sustainability*, 15(20), 15088.
- Almeida, F. (2023). Challenges in the digital transformation of ports. *Businesses*, 3(4), 34.
- Amico, C., & Cigolini, R. (2024). Improving port supply chain through blockchain-based bills of lading. *Maritime Economics & Logistics*, 26, 1–25.
- Apruzzese, M., Bruni, M. E., Musso, S., & Perboli, G. (2023). 5G and companion technologies as a boost in new business models for logistics and supply chain. *Sustainability*, 15(15), 11846.
- Bechtsis, D., Tsolakis, N., Iakovou, E., & Vlachos, D. (2022). Data-driven secure, resilient and sustainable supply chains. *International Journal of Production Research*, 60(14), 4392–4413.
- Belhadi, A., Kamble, S., Fosso Wamba, S., & Queiroz, M. M. (2022). Building supply-chain resilience: An artificial intelligence-based technique. *International Journal of Production Research*, 60(14), 4483–4508.
- Chang, Y., Iakovou, E., & Shi, W. (2020). Blockchain in global supply chains and cross border trade. *International Journal of Production Research*, 58(19), 5885–5908.
- Dolgui, A., & Ivanov, D. (2023). Metaverse supply chain and operations management. *International Journal of Production Research*, 61(23), 8175–8197.
- Durlik, I., Miller, T., Kostecka, E., & Tuński, T. (2024). Artificial intelligence in maritime transportation. *Applied Sciences*, 14(18), 8420.
- Grover, V., Balusamy, B., Milanova, M., & Felix, A. Y. (2024). Blockchain, IoT, and AI technologies for supply chain management. Springer.
- Guan, P., Wood, L. C., & Wang, J. X. (2024). Blockchain adoption in the port industry: A systematic literature review. *Cogent Business & Management*, 11(1), 2431650.

- Hartley, J. L., & Sawaya, W. J. (2019). Tortoise, not the hare: Digital transformation of supply chain business processes. *Business Horizons*, 62(6), 707–715.
- Heikkilä, M., Saarni, J., & Saurama, A. (2022). Innovation in smart ports: Future directions of digitalization in container ports. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1925.
- Ivanov, D. (2021). Digital supply chain management and technology to enhance resilience during COVID-19. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 69(4), 1621–1633.
- Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2019). The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International Journal of Production Research*, 57(3), 829–846.
- Jauhar, S. K., Jani, S. M., Kamble, S. S., & Pratap, S. (2024). How to use no-code artificial intelligence to predict inventory distortions. *International Journal of Production Research*, 62(18), 6775–6795.
- Jović, M., Tijan, E., Žgaljić, D., & Aksentijević, S. (2020). Improving maritime transport sustainability using blockchain-based information exchange. *Sustainability*, 12(21), 8866.
- Karakas, S., Acar, A. Z., & Kucukaltan, B. (2024). Blockchain adoption in logistics and supply chain: A literature review and research agenda. *International Journal of Production Research*, 62(18), 6673–6697.
- Liu, J., Zhang, H., & Zhen, L. (2023). Blockchain technology in maritime supply chains: applications, architecture and challenges. *International Journal of Production Research*, 61(11), 3775–3795.