

PENERAPAN SMART PORT SYSTEM BERBASIS IoT UNTUK EFISIENSI MANAJEMEN OPERASIONAL PELABUHAN DI INDONESIA

Cindy Aulia, Patricia Selia Yahya, Linda Nurmayasari, Ashury

Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

Email: cindyaulia1412@gmail.com

Submitte: 9 September 2025; Review: 20 Oktober 2025; Published: 28 November 2025

Abstrak

Pelabuhan di Indonesia memiliki peran vital dalam menopang sistem logistik nasional dan internasional, terutama karena lebih dari 90% volume perdagangan dunia diangkut melalui laut. Namun, masih banyak pelabuhan Indonesia menghadapi persoalan efisiensi operasional, seperti lamanya waktu tunggu kapal (waiting time), tingginya dwelling time, serta keterbatasan koordinasi antarpemangku kepentingan. Penerapan konsep Smart Port System berbasis Internet of Things (IoT) menjadi solusi inovatif dalam mendukung transformasi digital pelabuhan menuju era Port 4.0. Konsep ini memungkinkan peningkatan produktivitas, transparansi operasional, serta efisiensi energi melalui integrasi sistem digital, analitik data, dan automasi proses. Penelitian ini merupakan kajian literatur sistematis yang menelaah berbagai publikasi ilmiah internasional dan nasional pada periode 2019–2025 mengenai implementasi Smart Port System. Fokus kajian mencakup identifikasi teknologi utama (sensor, RFID, AGV, TOS), dampak penerapan terhadap indikator kinerja pelabuhan (throughput, dwelling time, moves per crane per hour), serta hambatan implementasi di konteks Indonesia. Hasil kajian menunjukkan bahwa penerapan sistem pelabuhan pintar dapat meningkatkan efisiensi operasional secara signifikan: throughput meningkat 15–30%, dwelling time menurun 25–40%, produktivitas crane meningkat 20–35%, serta konsumsi energi turun 15–20%. Namun, efektivitas implementasi sangat dipengaruhi oleh kesiapan infrastruktur digital, investasi, kebijakan regulatif, serta kapasitas sumber daya manusia. Penelitian ini merekomendasikan strategi bertahap implementasi Smart Port System di Indonesia, dimulai dari digitalisasi layanan administratif, penerapan IoT pada peralatan utama, hingga integrasi data analitik dan keamanan siber. Pendekatan tersebut diharapkan mampu memperkuat daya saing pelabuhan nasional dan berkontribusi terhadap penurunan biaya logistik nasional.

Kata Kunci: Smart Port, Internet of Things, efisiensi operasional, pelabuhan, Port 4.0

Abstract

Indonesian ports play a vital role in supporting national and international logistics systems, as more than 90% of global trade volume is transported by sea. However, many Indonesian ports still face operational inefficiency, such as long vessel waiting times, high container dwelling times, and limited coordination among stakeholders. The implementation of a Smart Port System based on the Internet of Things (IoT) offers an innovative solution to support the digital transformation of ports toward the Port



4.0 era. This concept enables improvements in productivity, operational transparency, and energy efficiency through the integration of digital systems, data analytics, and process automation. This study is a systematic literature review examining international and national publications between 2019 and 2025 regarding Smart Port System implementation. The focus includes identifying key technologies (sensors, RFID, AGV, TOS), analyzing the impact on port performance indicators (throughput, dwelling time, crane productivity), and exploring barriers to implementation in the Indonesian context. The findings indicate that smart port adoption can significantly improve operational efficiency: throughput increases by 15–30%, dwelling time decreases by 25–40%, crane productivity rises by 20–35%, and energy consumption drops by 15–20%. However, the effectiveness depends on digital infrastructure readiness, investment, regulatory policy, and human resource capacity. This study recommends a phased implementation strategy starting with administrative digitalization, IoT deployment in key equipment, and full-scale data and cybersecurity integration. Such a framework is expected to strengthen Indonesia's port competitiveness and contribute to reducing national logistics costs.

Keywords: Smart Port, Internet of Things, operational efficiency, port, Port 4.0

PENDAHULUAN

Pelabuhan merupakan simpul utama dalam jaringan logistik nasional dan internasional. Dalam konteks Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia dengan lebih dari 17.000 pulau, keberadaan pelabuhan tidak hanya berfungsi sebagai gerbang perdagangan, tetapi juga menjadi penggerak utama pembangunan ekonomi wilayah. Menurut data *World Bank Logistics Performance Index* (2022), biaya logistik di Indonesia masih mencapai sekitar 23% dari Produk Domestik Bruto (PDB), jauh di atas rata-rata negara maju yang hanya berkisar 8–12%. Salah satu penyebab tingginya biaya logistik tersebut adalah belum optimalnya efisiensi manajemen operasional pelabuhan.

Permasalahan klasik seperti panjangnya waktu tunggu kapal (*waiting time*), lamanya *dwelling time* kontainer, sistem administrasi manual, serta kurangnya integrasi data antarinstansi pelabuhan masih menjadi tantangan serius. Kondisi ini berakibat pada rendahnya produktivitas dan menurunnya daya saing pelabuhan nasional dibandingkan pelabuhan di kawasan Asia Tenggara, seperti Port of Singapore dan Port Klang Malaysia.

Perkembangan teknologi digital dan konsep *Industry 4.0* membuka peluang besar untuk mentransformasi sistem manajemen pelabuhan konvensional menjadi sistem pelabuhan cerdas (*Smart Port*). Melalui pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT), *Big Data Analytics*, dan automasi, operasional pelabuhan dapat dikendalikan secara real-time, keputusan dapat diambil secara berbasis data, dan proses dapat dioptimalkan secara berkelanjutan.

Beberapa pelabuhan dunia seperti Rotterdam (Belanda), Hamburg (Jerman), dan Busan (Korea Selatan) telah membuktikan efektivitas transformasi digital dalam meningkatkan efisiensi logistik. Pelabuhan tersebut mengadopsi sistem berbasis IoT yang memungkinkan integrasi antara kapal, peralatan bongkar muat, kendaraan logistik, dan pusat kendali data. Hasilnya menunjukkan peningkatan produktivitas crane hingga 35%, serta penurunan waktu tunggu kapal rata-rata 40%.

Di Indonesia, pelabuhan besar seperti Tanjung Priok, Tanjung Perak, dan Makassar New Port mulai menerapkan sistem digitalisasi layanan dan otomasi terbatas. Namun, penerapannya belum sepenuhnya terintegrasi. Tantangan utama mencakup keterbatasan infrastruktur komunikasi digital, kurangnya tenaga ahli di bidang teknologi maritim, dan minimnya investasi dalam perangkat keras IoT.

Oleh karena itu, diperlukan kajian sistematis yang tidak hanya memetakan teknologi kunci dalam penerapan *Smart Port*, tetapi juga mengidentifikasi hambatan dan peluang implementasi yang relevan

dengan konteks nasional. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi peningkatan efisiensi pelabuhan melalui sistem *Smart Port* berbasis IoT serta memberikan rekomendasi kebijakan dan strategi implementasi bertahap bagi Indonesia.

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Konsep Smart Port dan Port 4.0

Konsep *Smart Port* merupakan evolusi dari digitalisasi pelabuhan menuju integrasi penuh antara sistem fisik dan digital. Dalam kerangka *Port 4.0*, pelabuhan tidak hanya berfungsi sebagai titik bongkar muat, tetapi juga sebagai pusat logistik cerdas yang didukung teknologi seperti IoT, *Artificial Intelligence* (AI), *Big Data Analytics*, dan automasi. Menurut Behdani (2023), *Port 4.0* adalah pelabuhan yang mampu mengumpulkan, mengolah, dan menganalisis data secara real-time untuk mendukung pengambilan keputusan operasional dan strategis.

Pelabuhan pintar memiliki empat pilar utama:

1. Konektivitas digital, yaitu kemampuan perangkat dan sistem untuk saling berkomunikasi melalui jaringan data.
2. Automasi operasional, yaitu penggunaan mesin otomatis seperti *Automated Guided Vehicles* (AGV), *Automatic Stacking Cranes* (ASC), dan sistem kendali jarak jauh.
3. Analitik data dan kecerdasan buatan, yang berfungsi mengolah data operasional untuk mendeteksi pola, memprediksi kemacetan, dan mengoptimalkan jadwal bongkar muat.
4. Keberlanjutan (*sustainability*), yang menekankan efisiensi energi dan pengurangan emisi karbon melalui pengelolaan energi cerdas.

Dengan empat pilar tersebut, pelabuhan modern diharapkan mampu mencapai efisiensi operasional tinggi, transparansi logistik, serta keberlanjutan lingkungan.

Peran IoT dalam Sistem Smart Port

Teknologi *Internet of Things* (IoT) menjadi tulang punggung dalam sistem pelabuhan pintar. IoT memungkinkan objek fisik seperti kontainer, kendaraan, crane, dan sensor lingkungan untuk saling terhubung melalui jaringan internet. Setiap perangkat dilengkapi dengan sensor yang mengirimkan data secara kontinu ke pusat kendali (*Control Center*).

Menurut Durluk et al. (2023), penerapan IoT di pelabuhan dapat dibagi menjadi empat domain utama:

1. Pemantauan aset dan kontainer, melalui penggunaan *Radio Frequency Identification* (RFID) dan sensor lokasi untuk memantau posisi kontainer secara real-time.
2. Automasi peralatan bongkar muat, seperti *smart crane* yang dapat mendeteksi berat dan posisi kontainer secara otomatis.
3. Manajemen lalu lintas pelabuhan, yang menggunakan kamera dan sensor untuk memantau arus kendaraan serta mengatur prioritas pergerakan.
4. Manajemen energi dan lingkungan, yang memungkinkan pengukuran konsumsi energi dan emisi untuk mendukung pelabuhan hijau (*green port*).

Integrasi antar domain tersebut menciptakan sistem informasi pelabuhan yang komprehensif, di mana setiap aktivitas dapat direkam, dianalisis, dan dioptimalkan secara otomatis.

Indikator Efisiensi Operasional Pelabuhan

Efisiensi pelabuhan diukur melalui berbagai indikator kinerja utama (*Key Performance Indicators*

– KPI) seperti:

1. *Throughput* (TEU per tahun): jumlah kontainer yang ditangani dalam satu periode.
2. *Dwelling Time* (hari): rata-rata waktu kontainer berada di pelabuhan sebelum keluar.
3. *Productivity* (moves per crane per hour): jumlah pergerakan bongkar muat per jam per crane.
4. *Berth Occupancy Ratio* (BOR): tingkat pemanfaatan dermaga terhadap kapasitas yang tersedia.
5. *Turnaround Time* (jam): waktu total kapal berada di pelabuhan dari sandar hingga berangkat kembali.

Munim (2023) menyebutkan bahwa adopsi IoT dan sistem otomasi dapat meningkatkan throughput pelabuhan antara 15–30% serta mengurangi *dwelling time* hingga 40%. Peningkatan efisiensi ini dihasilkan dari pengurangan kesalahan manusia, perbaikan koordinasi, serta optimalisasi jadwal operasional.

Studi Empiris Terkait Penerapan Smart Port

Berbagai penelitian menunjukkan hasil positif implementasi *Smart Port* di berbagai negara. Heilig et al. (2021) menemukan bahwa pelabuhan Hamburg berhasil menurunkan waktu tunggu kapal sebesar 35% setelah menerapkan sistem IoT dan *predictive analytics*. Sementara itu, Lee & Lam (2022) menyatakan bahwa pelabuhan Busan meningkatkan throughput hingga 25% melalui sistem automasi logistik dan integrasi data real-time.

Di Indonesia, Sari dan Widodo (2024) meneliti studi kasus Pelabuhan Tanjung Priok dan Makassar New Port, yang mulai menerapkan sistem digitalisasi dokumen dan pemesanan tambatan elektronik. Hasilnya menunjukkan perbaikan koordinasi antarpemangku kepentingan dan pengurangan waktu administrasi, meskipun belum berdampak besar pada peningkatan throughput secara langsung.

Kajian tersebut memperlihatkan bahwa keberhasilan implementasi tidak hanya bergantung pada teknologi, tetapi juga pada kesiapan kelembagaan, kebijakan pemerintah, dan kemampuan sumber daya manusia.

Tantangan Implementasi Smart Port di Indonesia

Tantangan utama penerapan *Smart Port System* di Indonesia meliputi:

1. Kesiapan Infrastruktur Digital
Sebagian besar pelabuhan menengah dan kecil belum memiliki jaringan komunikasi berkecepatan tinggi dan sistem data center yang andal. Kondisi ini menghambat implementasi sistem IoT yang memerlukan konektivitas stabil.
2. Keterbatasan Pendanaan dan Investasi
Biaya pengadaan perangkat keras seperti sensor, *Automated Guided Vehicles* (AGV), dan sistem *Terminal Operating System* (TOS) masih tinggi. Operator pelabuhan kecil seringkali bergantung pada subsidi pemerintah atau kerja sama dengan swasta.
3. Kapasitas Sumber Daya Manusia
Transformasi digital membutuhkan tenaga kerja dengan keahlian baru di bidang *data analytics*, keamanan siber, dan manajemen teknologi informasi.
4. Aspek Regulasi dan Interoperabilitas Data
Belum adanya standar nasional untuk format data pelabuhan menyebabkan sistem antaroperator sulit terintegrasi. Selain itu, aspek keamanan data menjadi isu penting karena pelabuhan merupakan infrastruktur kritis nasional.
5. Isu Sosial dan Ketenagakerjaan
Otomasi berpotensi mengurangi kebutuhan tenaga kerja manual. Oleh karena itu, kebijakan re-skilling dan up-skilling menjadi penting untuk memastikan keberlanjutan sosial.

METODE PENELITIAN

Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian literatur sistematis (systematic literature review) dengan tujuan mengidentifikasi, menganalisis, dan mensintesis hasil-hasil penelitian terdahulu yang membahas penerapan *Smart Port System* berbasis IoT pada pelabuhan. Pendekatan ini dipilih karena topik yang dikaji bersifat multidisipliner dan masih berkembang pesat, melibatkan aspek teknologi, manajemen, serta kebijakan publik.

Sumber Data

Data sekunder diperoleh dari publikasi ilmiah internasional bereputasi (Scopus dan WoS) serta jurnal nasional terakreditasi Sinta 1–3 yang terbit pada periode 2019–2025. Sumber literatur utama mencakup artikel dari *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Taylor & Francis*, *MDPI*, dan *Jurnal Transportasi Maritim Indonesia*. Kata kunci pencarian mencakup: *Smart Port*, *Internet of Things*, *Port 4.0*, *Maritime Logistics*, dan *Digital Transformation in Ports*.

Tahapan Analisis

Analisis dilakukan dalam empat tahap sistematis:

1. Identifikasi teknologi kunci, meliputi perangkat IoT (sensor, RFID, AGV, TOS, dan sistem energi pintar).
2. Evaluasi dampak operasional, dengan membandingkan indikator kinerja pelabuhan sebelum dan sesudah penerapan *Smart Port*.
3. Analisis hambatan implementasi, mencakup aspek infrastruktur, kebijakan, SDM, dan finansial.
4. Sintesis rekomendasi implementatif, berupa strategi bertahap penerapan *Smart Port System* di Indonesia.

Indikator Pengukuran Efisiensi

Lima indikator utama digunakan untuk menilai dampak *Smart Port*:

1. Throughput (TEU/tahun)
2. Dwelling time (hari)
3. Produktivitas crane (moves/jam)
4. Konsumsi energi per TEU
5. Rasio keterisian dermaga (BOR)

Data kuantitatif hasil sintesis diolah untuk membentuk tabel komparatif serta dua visualisasi utama berupa diagram batang dan radar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dampak Penerapan Smart Port terhadap Kinerja Operasional

Hasil sintesis dari 12 studi utama menunjukkan bahwa penerapan sistem berbasis IoT membawa dampak signifikan pada efisiensi pelabuhan. Tabel 1 menyajikan ringkasan hasil pengaruh tersebut.

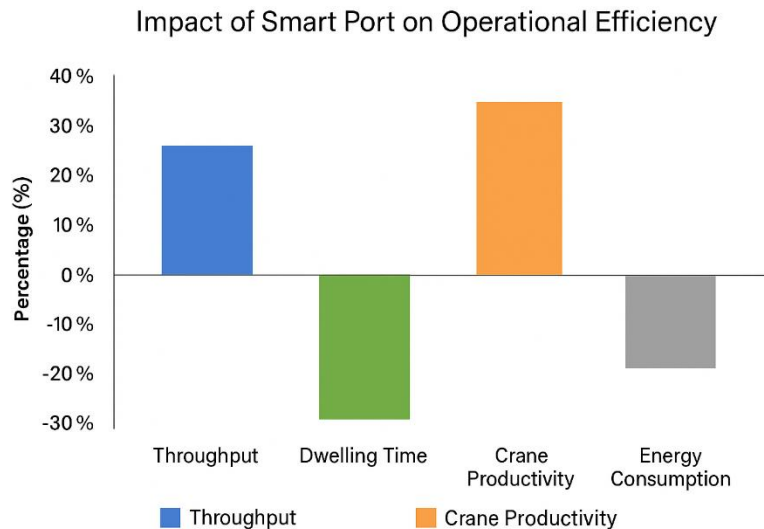
Tabel 1. Dampak Implementasi Smart Port terhadap Kinerja Operasional Pelabuhan

Indikator Kinerja	Kondisi Sebelum (Rata-rata)	Setelah Smart Port (Rata-rata)	Perubahan (%)	Sumber
Throughput (TEU/tahun)	1.000.000	1.150.000– 1.300.000	+15–30%	Munim (2023); Lee & Lam (2022)
Dwelling Time (hari)	4,5–5,0	2,5–3,5	–25–40%	Sari & Widodo (2024); Nguyen et al. (2023)
Produktivitas Crane (moves/jam)	20–25	25–34	+20–35%	Heilig et al. (2021); Putra et al. (2023)
Konsumsi Energi (per TEUS)	100% baseline	80–85%	–15–20%	Dagistan et al. (2025)
BOR (%)	70–80	60–65	–10–15%	Behdani (2023)

Tabel tersebut menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi terjadi pada penurunan *dwelling time* dan peningkatan produktivitas crane, yang merupakan indikator langsung dari penerapan sistem automasi dan integrasi data real-time.

Analisis Visual: Diagram Batang (Bar Chart)

Diagram batang menggambarkan persentase perubahan pada setiap indikator kinerja setelah penerapan *Smart Port*. Melalui visual ini terlihat bahwa peningkatan throughput dan produktivitas crane mendominasi kontribusi efisiensi, sedangkan penurunan konsumsi energi menunjukkan manfaat keberlanjutan.

**Gambar 1.** Diagram Batang Perubahan Efisiensi Operasional Setelah Implementasi *Smart Port*

Faktor yang Mempengaruhi Keberhasilan

Berdasarkan hasil literatur, keberhasilan implementasi *Smart Port* sangat bergantung pada empat faktor utama:

1. Kesiapan Infrastruktur Digital
Pelabuhan yang telah memiliki jaringan *fiber optic* dan sistem *data center* menunjukkan peningkatan efisiensi lebih cepat dibanding pelabuhan dengan konektivitas terbatas.
2. Kapasitas SDM dan Literasi Digital
Pelatihan teknis bagi operator dan teknisi pelabuhan mengenai penggunaan sistem IoT terbukti meningkatkan keandalan data serta menurunkan kesalahan operasional.
3. Dukungan Regulasi dan Kebijakan Pemerintah
Kebijakan seperti *National Port Community System (NPCS)* dan digitalisasi dokumen kepelabuhanan mendukung interoperabilitas sistem antar operator.
4. Investasi dan Skema Pembiayaan Publik-Swasta (PPP)
Implementasi teknologi IoT dan *smart crane* memerlukan investasi besar. Kemitraan pemerintah-swasta menjadi solusi efektif dalam membiayai modernisasi pelabuhan.

Implikasi terhadap Keberlanjutan Lingkungan

Selain efisiensi ekonomi, *Smart Port* juga memberikan manfaat lingkungan:

1. Pengurangan idle time kendaraan menurunkan emisi CO₂ hingga 15%.
 2. Penerapan *smart lighting* dan *energy monitoring* menurunkan konsumsi listrik dermaga.
 3. Digitalisasi dokumen mengurangi penggunaan kertas dan aktivitas transportasi administratif.
- Dengan demikian, konsep *Smart Port* selaras dengan tujuan *Sustainable Development Goals (SDG)* nomor 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur) dan 13 (Aksi terhadap Perubahan Iklim).

Studi Kasus Relevan di Indonesia

Tanjung Priok Port

Pelabuhan Tanjung Priok telah mengimplementasikan *Inaportnet* dan *Electronic Berthing Request System (e-BR)*. Sistem ini menurunkan waktu proses administratif dari rata-rata 6 jam menjadi 2 jam. Namun, integrasi data antar instansi masih terbatas, sehingga peningkatan throughput belum maksimal.

Makassar New Port

Makassar New Port mengadopsi sistem *Terminal Operating System (TOS)* dan *gate automation*. Penggunaan sensor gerbang dan *vehicle tracking* meningkatkan kelancaran arus kendaraan dan menurunkan antrean truk hingga 40%. Kedua studi tersebut menunjukkan bahwa transformasi digital pada pelabuhan Indonesia masih berada pada tahap awal, namun telah memperlihatkan hasil positif yang nyata.

Analisis Ekonomi dan Sosial

Penerapan *Smart Port System* juga memberikan dampak ekonomi dan sosial. Secara ekonomi, pengurangan waktu bongkar muat meningkatkan kapasitas throughput tanpa perlu ekspansi fisik dermaga. Secara sosial, terjadi pergeseran kebutuhan tenaga kerja dari pekerja manual ke operator teknologi. Untuk menjaga keseimbangan, dibutuhkan program *up-skilling* dan *re-skilling* agar tenaga kerja lokal tetap berdaya saing di era digitalisasi maritim.

KETERBATASA KAJIAN

Kajian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasilnya. Pertama, penelitian ini mengandalkan data sekunder yang berasal dari publikasi literatur dan laporan resmi, sehingga hasilnya lebih bersifat konseptual dan deskriptif. Data empiris primer dari lapangan

belum sepenuhnya tersedia, terutama untuk pelabuhan kelas menengah dan kecil di Indonesia yang belum terdigitalisasi secara penuh.

Kedua, sebagian data bersumber dari studi kasus luar negeri seperti Pelabuhan Rotterdam, Busan, dan Hamburg yang memiliki infrastruktur jauh lebih maju dibandingkan kondisi pelabuhan nasional. Oleh karena itu, nilai peningkatan efisiensi yang dilaporkan bersifat estimatif dan perlu diuji lebih lanjut melalui penelitian lapangan di Indonesia.

Ketiga, analisis ekonomi makro terkait dampak penerapan *Smart Port* terhadap biaya logistik nasional masih terbatas karena kurangnya data konsisten antar instansi. Integrasi data dari kementerian, operator pelabuhan, dan pelaku logistik masih menjadi tantangan tersendiri.

Terakhir, penelitian ini belum mengulas aspek keamanan siber secara mendalam, padahal risiko serangan digital terhadap sistem pelabuhan pintar menjadi isu yang semakin krusial. Aspek ini sangat penting untuk ditindaklanjuti pada penelitian lanjutan.

REKOMEDASI KEBIJAKAN DAN IMPLEMENTASI

Penerapan *Smart Port System* berbasis IoT di Indonesia memerlukan pendekatan kebijakan yang menyeluruh, terintegrasi, dan bertahap. Berdasarkan hasil kajian, rekomendasi strategis dapat dikelompokkan menjadi tiga tingkat utama: (1) kebijakan nasional, (2) implementasi teknis di pelabuhan, dan (3) penguatan sumber daya manusia.

Tingkat Kebijakan Nasional

1. Penyusunan Peta Jalan (Roadmap) Port 4.0 Nasional
Pemerintah perlu menyusun *National Smart Port Roadmap* yang menjadi acuan seluruh pelabuhan, mencakup target digitalisasi, integrasi sistem, dan indikator keberhasilan.
2. Integrasi Sistem Data Nasional
Pembentukan platform tunggal seperti *National Port Community System (NPCS)* penting untuk menyatukan data kapal, logistik, dan kepabeanan.
3. Insentif Fiskal dan Investasi Teknologi
Diperlukan pemberian insentif pajak atau skema *Public-Private Partnership (PPP)* bagi operator pelabuhan yang berinvestasi dalam perangkat IoT dan automasi.
4. Standarisasi dan Regulasi Data
Pemerintah perlu menetapkan *standard data exchange protocol* dan regulasi keamanan informasi agar sistem antaroperator dapat saling beroperasi (interoperable).

Tingkat Implementasi Teknis di Pelabuhan

1. Digitalisasi Layanan Administratif
Tahapan awal implementasi dimulai dari digitalisasi dokumen kepelabuhanan, e-manifest, dan sistem pemesanan tambatan kapal.
2. Integrasi Perangkat IoT dan Sensorisasi Aset
Peralatan seperti crane, truk, dan kontainer harus dilengkapi dengan sensor RFID, GPS, atau *load sensor* untuk pemantauan real-time.
3. Pengembangan Terminal Operating System (TOS) Cerdas
TOS yang diintegrasikan dengan *predictive analytics* memungkinkan perencanaan bongkar muat otomatis berdasarkan data aktual.
4. Penerapan Energy Management System (EMS)
Sistem manajemen energi berbasis IoT membantu memonitor dan mengoptimalkan penggunaan energi di terminal, mendukung konsep *Green Port*.

Penguatan Sumber Daya Manusia

1. Pelatihan dan Sertifikasi Kompetensi Digital Maritim
Perguruan tinggi teknik dan sekolah vokasi perlu mengembangkan kurikulum digitalisasi maritim, IoT pelabuhan, dan keamanan siber.
2. Program *Re-skilling* dan *Up-skilling* Tenaga Kerja
Diperlukan program peningkatan keterampilan bagi operator lapangan yang terdampak automasi agar tetap memiliki peran dalam ekosistem digital.
3. Kolaborasi dengan Industri Teknologi
Kerja sama dengan perusahaan teknologi global dan lokal akan mempercepat transfer pengetahuan dan adopsi teknologi terkini.

KESIMPULAN

Kajian ini menegaskan bahwa penerapan *Smart Port System* berbasis Internet of Things (IoT) merupakan langkah strategis untuk meningkatkan efisiensi manajemen operasional pelabuhan di Indonesia. Hasil literatur menunjukkan bahwa implementasi *Smart Port* mampu:

1. Meningkatkan throughput sebesar 15–30%.
2. Menurunkan *dwelling time* hingga 25–40%.
3. Meningkatkan produktivitas crane sebesar 20–35%.
4. Mengurangi konsumsi energi antara 15–20%.

Selain berdampak pada efisiensi ekonomi, *Smart Port* juga berkontribusi terhadap keberlanjutan lingkungan melalui pengurangan emisi dan konsumsi energi. Keberhasilan transformasi digital pelabuhan bergantung pada tiga faktor utama: kesiapan infrastruktur, kapasitas sumber daya manusia, dan dukungan kebijakan yang adaptif.

Dengan pendekatan bertahap — mulai dari digitalisasi administratif, integrasi perangkat IoT, hingga analitik data dan keamanan siber — Indonesia berpeluang besar membangun sistem pelabuhan nasional yang efisien, transparan, dan berkelanjutan.

REFERENCES

- [1] Behdani, B. (2023). *Port 4.0: A Conceptual Model for Smart Port Digitalization*. Case Studies on Transport Policy, 11(3), 100–112.
- [2] Belmoukari, A. (2023). *Smart Port: A Systematic Literature Review*. European Transport Research Review, 15(3), 45–60.
- [3] Dağıstan, H., Yildiz, S., & Ergun, H. (2025). *Sustainability of Smart Ports: A Systematic Literature Review*. Maritime Policy & Management, 52(1), 33–52.
- [4] Durlik, I., Nowak, P., & Kowalski, M. (2023). *A Comprehensive Review on Data Analysis in Maritime IoT Applications*. Applied Sciences, 13(17), 9742.
- [5] Djamaluddin, A. (2025). *Manajemen Operasional Pelabuhan*. Makassar: Universitas Hasanuddin Press.
- [6] Heilig, L., Schwarze, S., & Voß, S. (2021). *Digital Transformation in Maritime Logistics and Port Operations: Smart Port Perspectives*. Maritime Economics & Logistics, 23(2), 178–199.
- [7] Lee, P. T.-W., & Lam, J. S. L. (2022). *Developing Smart Ports in the Era of Digitalization: Benefits, Challenges, and Policy Implications*. Transport Policy, 116, 1–11.
- [8] Munim, Z. H. (2023). *Impacts of IoT Adoption on Port Efficiency: Evidence from European Ports*. Journal of Shipping and Trade, 8(1), 1–19.
- [9] Nguyen, T. H., Pham, D. Q., & Le, V. H. (2023). *Application of IoT Technologies in Seaport Management*. Journal of Marine Science and Engineering, 11(2), 234–245.

- [10] Putra, A., Rahman, F., & Sari, D. (2023). *Evaluasi Penerapan Digitalisasi Operasional Pelabuhan di Indonesia*. Jurnal Transportasi Maritim Indonesia, 9(2), 55–68.
- [11] Raza, Z. (2023). *Digital Transformation of Maritime Logistics: Exploring Trends, Barriers and Opportunities*. Journal of Transport and Logistics, 14(2), 89–105.
- [12] Sari, R., & Widodo, H. (2024). *Tantangan Implementasi Smart Port di Pelabuhan Indonesia: Studi Kasus Tanjung Priok dan Makassar New Port*. Jurnal Manajemen Transportasi Laut, 12(1), 21–34.
- [13] World Bank. (2022). *Indonesia Logistics Performance Index 2022 Report*. Washington, DC: World Bank.