



Strategi Digitalisasi Pelabuhan untuk Meningkatkan Efisiensi Operasional (Studi Literatur dengan Pendekatan *Technology–Organization–Environment*)

Kholid Mawardi¹, Iwan Weda²

¹D3 Nautika, Universitas Maritim AMNI Semarang, Jawa Tengah, Indonesia

³D3 KPN, Universitas Maritim AMNI Semarang, Jawa Tengah, Indonesia

*Korespondensi penulis: iam.trollin72@gmail.com

Abstract. Port digitalization is commonly associated with improvements in service speed, information accuracy, and facility utilization. Its results, however, vary across ports. Differences in infrastructure, employee competencies, system integration, and partner readiness mean that technology investment does not automatically improve operations. This study identifies technologies used in port management, explains their contribution to operational efficiency, examines implementation constraints, and develops digitalization strategies based on the *Technology–Organization–Environment* framework. A literature review was conducted using national and international journal articles on port digitalization, smart ports, maritime logistics, and operational efficiency. Articles were selected according to topic relevance, publication type, full-text availability, and publication period. The data were analyzed through thematic coding. The review finds that integrated information systems, the Internet of Things, data analytics, artificial intelligence, automation, blockchain, and digital twins can shorten administrative processes, improve operational visibility, and support facility scheduling. Recurring constraints include fragmented data, investment costs, competency gaps, resistance to change, cybersecurity risks, and unequal stakeholder readiness. The proposed strategies include assessing digital maturity, selecting projects based on operational problems, gradually integrating data, developing competencies, strengthening security governance, and establishing data-sharing agreements. Port digitalization should therefore be managed as a change in processes and working relationships rather than merely as software procurement.

Keywords: Operational Efficiency; Port Digitalization; Port Management; Smart Port; *Technology–Organization–Environment*.

Abstrak. Digitalisasi pelabuhan sering dikaitkan dengan perbaikan kecepatan pelayanan, ketepatan informasi, dan pemanfaatan fasilitas. Akan tetapi, hasil penerapannya tidak selalu sama pada setiap pelabuhan. Perbedaan infrastruktur, kompetensi pegawai, integrasi sistem, dan kesiapan mitra membuat pengadaan teknologi belum tentu menghasilkan perbaikan operasional. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi teknologi yang digunakan dalam pengelolaan pelabuhan, menjelaskan kontribusinya terhadap efisiensi operasional, menguraikan kendala penerapannya, dan menyusun strategi digitalisasi berdasarkan kerangka *Technology–Organization–Environment*. Penelitian menggunakan studi literatur dengan menelaah artikel jurnal nasional dan internasional yang membahas digitalisasi pelabuhan, smart port, logistik maritim, dan efisiensi operasional. Artikel diseleksi berdasarkan kesesuaian topik, jenis publikasi, ketersediaan teks, dan tahun penerbitan. Data dianalisis melalui pengodean tematik. Hasil kajian memperlihatkan bahwa sistem informasi terintegrasi, *Internet of Things*, analitik data, kecerdasan buatan, otomatisasi, *blockchain*, dan digital twin dapat memperpendek proses administrasi, meningkatkan visibilitas kegiatan, dan membantu penjadwalan fasilitas. Kendala yang paling sering ditemukan adalah fragmentasi data, biaya investasi, kesenjangan kompetensi, resistensi terhadap perubahan, risiko keamanan siber, dan belum seragamnya kesiapan pemangku kepentingan. Strategi yang disarankan mencakup penilaian kematangan digital, pemilihan proyek berdasarkan masalah operasional, integrasi data secara bertahap, pengembangan kompetensi, penguatan tata kelola keamanan, dan penyusunan kesepakatan pertukaran data. Digitalisasi dengan demikian perlu dikelola sebagai perubahan proses dan hubungan kerja, bukan sekadar pengadaan aplikasi.

Kata kunci: Digitalisasi Pelabuhan; Efisiensi Operasional; Manajemen Pelabuhan; Smart Port; *Technology–Organization–Environment*.

1. LATAR BELAKANG

Pelabuhan mempertemukan kegiatan pelayaran, bongkar muat, pergudangan, pemeriksaan dokumen, kepabeanan, dan transportasi darat. Kegiatan tersebut dijalankan oleh organisasi yang berbeda, dengan prosedur dan kepentingan yang tidak selalu sama. Karena itu,

keterlambatan di pelabuhan tidak selalu disebabkan oleh kekurangan alat bongkar muat. Masalah dapat muncul dari dokumen yang terlambat, data yang tidak konsisten, perubahan jadwal kapal, atau informasi yang tidak diterima oleh pihak yang membutuhkan. Kajian mengenai kinerja pelabuhan menunjukkan bahwa efisiensi, daya saing, tata kelola, keberlanjutan, dan penggunaan teknologi menjadi tema yang banyak dibahas dalam penelitian pelabuhan (Kishore et al., 2024). Perhatian terhadap teknologi meningkat karena pelabuhan menghasilkan data dalam jumlah besar, tetapi sebagian data tersebut masih tersimpan pada sistem yang terpisah. Akibatnya, informasi yang tersedia belum selalu dapat digunakan untuk mendukung keputusan operasional.

Digitalisasi menawarkan cara untuk menghubungkan informasi kapal, barang, alat, kendaraan, dan dokumen. Pada tingkat dasar, digitalisasi dilakukan melalui dokumen elektronik dan sistem pelayanan daring. Pada tingkat yang lebih lanjut, pelabuhan menggunakan sensor, analitik data, kecerdasan buatan, otomatisasi, dan digital twin. Teknologi tersebut memungkinkan pemantauan kegiatan secara waktu nyata dan memberi dasar yang lebih baik bagi penyusunan jadwal. Perubahan tersebut sering dibahas melalui konsep smart port. Belmoukari et al. (2023) menemukan bahwa smart port tidak dapat dijelaskan hanya berdasarkan jumlah perangkat digital. Konsep tersebut mencakup operasi, lingkungan, energi, keselamatan, sumber daya manusia, dan tata kelola. Paraskevas et al. (2024) juga memperlihatkan bahwa penelitian smart port mencakup teknologi, evaluasi kinerja, keamanan siber, dan hubungan antarpemangku kepentingan. Dengan kata lain, teknologi merupakan salah satu unsur smart port, bukan keseluruhan konsepnya. Pham (2023) menemukan bahwa digitalisasi menjadi tema utama dalam perkembangan penelitian smart port. Arah penelitiannya bergerak dari pembahasan teknologi tunggal menuju integrasi sistem dan pengukuran kinerja. Perkembangan ini masuk akal karena teknologi pelabuhan bekerja secara saling bergantung. Sensor tidak banyak membantu apabila datanya tidak dapat dibaca oleh sistem operasi terminal. Analitik prediktif juga tidak menghasilkan keputusan yang baik apabila data kedatangan kapal dan penggunaan alat tidak lengkap.

Pengalaman Indonesia memperlihatkan persoalan yang serupa. Iman et al. (2022) menemukan bahwa manfaat yang dirasakan dan kepercayaan pengguna memengaruhi penerimaan layanan digital dalam logistik maritim. Pengguna tidak hanya menilai kecanggihan sistem, tetapi juga kestabilan layanan, kemudahan penggunaan, dan manfaat bagi pekerjaan mereka. Safuan (2023) menunjukkan bahwa pelabuhan Indonesia telah mengembangkan teknologi pada sisi laut, darat, dan pelayanan pelanggan. Namun, manfaat pengembangan tersebut bergantung pada keterhubungan dengan ekosistem logistik.

Utama et al. (2024) menguji model kematangan transformasi digital pada 45 pelabuhan Indonesia. Hasilnya memperlihatkan perbedaan tingkat kesiapan antarpelabuhan. Kondisi negara kepulauan, variasi ukuran pelabuhan, dan hubungan hub-and-spoke membuat strategi yang seragam sulit diterapkan. Pelabuhan dengan volume besar dapat memiliki sumber daya dan kebutuhan yang berbeda dari pelabuhan pengumpan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa digitalisasi tidak dapat dinilai dari keberadaan aplikasi saja. Sistem mungkin telah dipasang, tetapi pegawai masih menggunakan dokumen manual karena aplikasi sulit diakses. Data mungkin telah tersimpan secara digital, tetapi tidak dapat dipertukarkan. Pada keadaan lain, aplikasi telah terintegrasi, tetapi organisasi belum memiliki prosedur keamanan dan pemulihan ketika sistem mengalami gangguan.

Almeida (2023) mengelompokkan tantangan transformasi digital pelabuhan ke dalam masalah teknologi, organisasi, regulasi, keamanan, dan kerja sama. Zeng et al. (2025) menemukan pola yang hampir sama dalam kajian terhadap 117 artikel logistik maritim. Mereka mengidentifikasi 19 faktor pendorong dan 10 hambatan digitalisasi, kemudian mengelompokkannya menggunakan kerangka Technology–Organization–Environment. Pada konteks teknologi, persoalan utama berkaitan dengan kualitas data, integrasi, biaya, dan keamanan. Pada konteks organisasi, kendalanya meliputi sumber daya, keterampilan, dan penerimaan terhadap perubahan. Pada konteks lingkungan, regulasi dan kesiapan mitra menjadi penentu.

Sejumlah penelitian lebih banyak memetakan teknologi atau menjelaskan konsep smart port. Belmoukari et al. (2023) menyusun karakteristik smart port, sedangkan Pham (2023) membahas perkembangan tema penelitian. Filom et al. (2022) secara khusus mengkaji penerapan machine learning dalam operasi pelabuhan. Klar et al. (2023) membahas kebutuhan teknis dan organisasi untuk digital twin. Kajian tersebut memberi dasar yang kuat, tetapi belum seluruhnya menghubungkan jenis teknologi, hasil operasional, dan kondisi penerapan dalam satu kerangka manajemen.

Kesenjangan penelitian terletak pada perlunya sintesis yang menjawab dua persoalan sekaligus. Persoalan pertama adalah teknologi apa yang secara langsung berkaitan dengan pekerjaan pelabuhan. Persoalan kedua adalah kondisi apa yang membuat teknologi tersebut menghasilkan atau tidak menghasilkan perbaikan. Penggunaan kerangka TOE memungkinkan pembahasan bergerak dari pertanyaan “teknologi apa yang digunakan” menuju “bagaimana teknologi tersebut diterapkan dalam organisasi dan ekosistem pelabuhan”. Kajian ini tidak berangkat dari anggapan bahwa seluruh pelabuhan harus menjadi smart port dalam bentuk yang sama. Strategi digitalisasi perlu mempertimbangkan jenis layanan, skala kegiatan, kondisi

fasilitas, kualitas jaringan, kemampuan pegawai, dan hubungan dengan mitra. Pendekatan tersebut menghindari kecenderungan memilih teknologi lebih dahulu, kemudian mencari masalah yang dapat diselesaikan oleh teknologi tersebut. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan mengidentifikasi teknologi digital yang digunakan dalam pengelolaan pelabuhan, menjelaskan kontribusinya terhadap efisiensi operasional, menguraikan hambatan penerapan berdasarkan dimensi teknologi, organisasi, dan lingkungan, serta menyusun strategi digitalisasi yang dapat diterapkan secara bertahap.

2. KAJIAN TEORITIS

Digitalisasi dalam Manajemen Pelabuhan

Digitalisasi adalah penggunaan teknologi dan data untuk mengubah proses kerja. Pengertian ini berbeda dari digitasi yang hanya mengubah dokumen fisik menjadi format elektronik. Ketika formulir kertas dipindahkan menjadi formulir daring tanpa perubahan proses verifikasi, yang terjadi terutama adalah digitasi. Digitalisasi mulai terlihat ketika data yang masuk digunakan bersama, diperiksa otomatis, dan menjadi dasar penjadwalan. Di Vaio et al. (2022) menjelaskan bahwa digitalisasi pada hubungan kapal dan pelabuhan berhubungan dengan perubahan model bisnis, aliran informasi, dan pencapaian sasaran keberlanjutan. Teknologi baru tidak berdiri sendiri karena penerapannya memengaruhi hubungan antara perusahaan pelayaran, terminal, regulator, dan penyedia jasa logistik. Zhang et al. (2024) menemukan bahwa digitalisasi pelabuhan hijau juga berkaitan dengan pengelolaan energi, pemantauan emisi, pengelolaan limbah, dan koordinasi pelayaran.

Dalam konteks Indonesia, Iman et al. (2022) menunjukkan bahwa transformasi digital dapat meningkatkan kapabilitas logistik apabila pengguna merasakan manfaat dan mempercayai sistem. Safuan (2023) menambahkan bahwa pengembangan teknologi perlu mencakup sisi laut, darat, dan pelanggan. Sistem pelayanan kapal tidak akan menghasilkan efisiensi penuh apabila proses di gerbang atau terminal masih tidak terhubung.

Smart Port

Smart port merupakan konsep pengelolaan pelabuhan yang menggunakan data dan teknologi untuk mendukung operasi, keselamatan, lingkungan, energi, dan pelayanan. Istilah “smart” tidak berarti seluruh aktivitas harus otomatis. Tingkat penerapannya dapat berbeda sesuai kebutuhan dan sumber daya. Belmoukari et al. (2023) mengidentifikasi sebelas karakteristik smart port dalam tujuh domain bisnis. Hasil tersebut menunjukkan bahwa smart port memiliki dimensi operasional dan kelembagaan. Paraskevas et al. (2024) juga menemukan bahwa penelitian smart port membahas komputasi awan, *Internet of Things*, keamanan siber,

analitik data, dan evaluasi kinerja. Pham (2023) mencatat bahwa penelitian smart port berkembang cepat, tetapi definisi dan indikatornya belum selalu konsisten. Satu penelitian menilai smart port berdasarkan teknologi, sedangkan penelitian lain menilai keberlanjutan atau kualitas tata kelolanya. Perbedaan tersebut perlu diperhatikan ketika membandingkan pelabuhan.

Kematangan digital memberikan pendekatan yang lebih bertahap. Utama et al. (2024) menyusun model lima tingkat untuk pelabuhan negara kepulauan. Model ini menunjukkan bahwa integrasi digital perlu didahului oleh kesiapan infrastruktur, proses, sumber daya manusia, dan tata kelola. Pelabuhan tidak dapat melompat langsung ke analitik canggih ketika data dasarnya belum konsisten.

Teknologi Digital dalam Operasi Pelabuhan

Sistem informasi terintegrasi menghubungkan data kapal, terminal, barang, pembayaran, dan dokumen. Nilai utamanya terletak pada pengurangan entri ulang dan penggunaan sumber data yang sama. Ketika sistem tidak terintegrasi, proses digital justru dapat menambah pekerjaan karena pegawai harus memindahkan data dari satu aplikasi ke aplikasi lain.

Internet of Things menggunakan sensor dan perangkat terhubung untuk mencatat kondisi aset atau kegiatan. Paulauskas et al. (2021) menjelaskan bahwa tingkat digitalisasi pelabuhan dapat dinilai melalui ketersediaan data, konektivitas, dan penggunaan informasi dalam proses operasi. Wang dan Hsu (2025) menemukan bahwa IoT dalam logistik maritim mendukung pelacakan, pemeliharaan, pengawasan kondisi, dan analisis pola operasi. Manfaat tersebut tetap bergantung pada kualitas jaringan dan tata kelola data. Machine learning digunakan untuk membuat prediksi berdasarkan data historis. Filom et al. (2022) menemukan bahwa penggunaan machine learning di pelabuhan paling banyak diarahkan pada prediksi, antara lain prediksi kedatangan, waktu pelayanan, kepadatan, dan kinerja peralatan. Penelitian yang menggunakan model untuk rekomendasi keputusan masih lebih sedikit daripada penelitian prediktif.

Digital twin membuat representasi digital atas fasilitas atau proses fisik. Klar et al. (2023) menyebut tiga kebutuhan utama digital twin pelabuhan: kesadaran situasional, kemampuan analisis data, dan antarmuka untuk kolaborasi. Teknologi ini berguna untuk menguji skenario, tetapi memerlukan data yang diperbarui dan model yang sesuai dengan kondisi lapangan.

Blockchain digunakan untuk mencatat transaksi yang melibatkan beberapa pihak. Potensinya terletak pada rekam jejak dan pengurangan perubahan data secara sepihak. Namun, manfaat *blockchain* sulit diperoleh apabila organisasi belum menyepakati standar data, hak akses, dan tanggung jawab terhadap kesalahan. Otomatisasi dapat diterapkan pada gerbang,

alat bongkar muat, pemeriksaan, pembayaran, dan penjadwalan. Otomatisasi biasanya memberikan hasil yang lebih mudah diukur pada proses berulang. Meskipun demikian, pengaruhnya terhadap tenaga kerja dan keselamatan perlu diperhitungkan sejak tahap perencanaan.

Efisiensi Operasional Pelabuhan

Efisiensi operasional menunjukkan hubungan antara hasil pelayanan dan sumber daya yang digunakan. Pada pelabuhan, efisiensi dapat diamati melalui waktu tunggu kapal, waktu pelayanan, produktivitas alat, tingkat penggunaan dermaga, lama penyelesaian dokumen, biaya, dan jumlah kesalahan. Kishore et al. (2024) menemukan bahwa penelitian kinerja pelabuhan banyak menggunakan konsep efisiensi, daya saing, tata kelola, simulasi, dan keberlanjutan. Pengukuran efisiensi perlu disesuaikan dengan jenis pelabuhan. Indikator terminal peti kemas tidak sepenuhnya sama dengan terminal penumpang atau curah.

Teknologi memengaruhi efisiensi melalui beberapa jalur. Sistem informasi memperpendek aliran dokumen. Sensor meningkatkan visibilitas kondisi aset. Analitik membantu menyusun jadwal. Otomatisasi mengurangi variasi proses. Digital twin membantu pengujian skenario. Akan tetapi, investasi digital juga menambah biaya perangkat, lisensi, pelatihan, integrasi, dan keamanan.

Karena itu, keberhasilan digitalisasi tidak cukup dinilai dari jumlah aplikasi atau perangkat. Pengelola perlu membandingkan kondisi sebelum dan sesudah penerapan. Indikatornya dapat berupa perubahan waktu layanan, kesalahan data, pemanfaatan alat, frekuensi gangguan, dan kepuasan pengguna.

Kerangka Technology–Organization–Environment

Kerangka TOE mengelompokkan kondisi adopsi teknologi ke dalam konteks teknologi, organisasi, dan lingkungan. Dalam penelitian ini, kerangka tersebut digunakan sebagai alat pengelompokan, bukan sebagai model sebab-akibat yang diuji secara statistik. Konteks teknologi mencakup manfaat teknologi, kesesuaian dengan proses, kompleksitas, integrasi, biaya, kualitas data, dan keamanan. Zeng et al. (2025) menemukan bahwa data yang tidak konsisten, sistem yang terpisah, risiko siber, dan biaya menjadi hambatan berulang dalam digitalisasi logistik maritim.

Konteks organisasi mencakup dukungan manajemen, kemampuan pembiayaan, kompetensi pegawai, struktur, dan kesiapan berubah. Teknologi yang mudah digunakan tetap dapat ditolak apabila pegawai tidak memahami alasan perubahan atau khawatir terhadap dampaknya pada pekerjaan. Konteks lingkungan meliputi regulasi, persaingan, pengguna, mitra, dan penyedia teknologi. Pada pelabuhan, dimensi ini memiliki pengaruh besar karena

proses pelayanan melibatkan banyak lembaga. Iman et al. (2022) menunjukkan pentingnya kepercayaan pengguna, sedangkan Utama et al. (2024) menunjukkan adanya perbedaan kesiapan antarpelabuhan. Digitalisasi satu organisasi tidak cukup apabila informasi tidak dapat diterima organisasi lain.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan studi literatur dengan pendekatan kualitatif. Metode ini dipilih karena tujuan penelitian adalah menyusun sintesis mengenai teknologi, manfaat, hambatan, dan strategi, bukan menghitung besarnya pengaruh satu variabel terhadap variabel lain. Prosedur penelusuran disusun dengan mengadaptasi tahapan tinjauan sistematis dari Tranfield et al. (2003) dan pedoman PRISMA 2020 dari Page et al. (2021). Kedua rujukan tersebut menekankan perlunya pertanyaan penelitian, strategi pencarian, kriteria seleksi, dan pelaporan proses yang dapat ditelusuri. Penelitian ini tidak melakukan meta-analisis karena desain, objek, dan indikator pada artikel yang dikaji tidak seragam. Sumber artikel berasal dari Google Scholar, Garuda, DOAJ, ScienceDirect, SpringerLink, Emerald Insight, IEEE Xplore, dan basis data jurnal lain yang relevan. Penelusuran dilakukan dengan kombinasi kata kunci “*port digitalization*”, “*smart port*”, “*port operational efficiency*”, “*maritime digital transformation*”, “*port technology*”, “digitalisasi pelabuhan”, dan “efisiensi operasional pelabuhan”.

Artikel dimasukkan apabila memenuhi empat ketentuan. Pertama, artikel membahas pelabuhan atau logistik maritim. Kedua, artikel membahas teknologi digital, smart port, efisiensi, atau faktor penerapan. Ketiga, sumber diterbitkan sebagai artikel jurnal. Keempat, artikel menyediakan abstrak atau teks lengkap yang cukup untuk dianalisis. Artikel teknis mengenai desain kapal yang tidak memiliki hubungan dengan pengelolaan pelabuhan dikeluarkan. Periode publikasi utama ditetapkan pada 2020–2026. Artikel sebelum tahun 2020 digunakan secara terbatas untuk metode penelitian. Penggunaan rentang tersebut dimaksudkan untuk menangkap perkembangan teknologi yang relatif baru tanpa mengabaikan acuan metodologis yang telah banyak digunakan. Seleksi dilakukan melalui pemeriksaan judul, abstrak, dan teks lengkap. Artikel duplikat dihapus. Pada tahap berikutnya, isi artikel dicatat dalam lembar ekstraksi yang memuat penulis, tahun, lokasi, desain penelitian, teknologi, manfaat, kendala, dan rekomendasi.

Analisis menggunakan pengodean tematik. Tahapannya mengikuti prinsip pembentukan tema yang dijelaskan Braun dan Clarke (2006), yaitu membaca sumber, memberi kode, mengelompokkan kode, meninjau tema, dan menyusun interpretasi. Kode awal meliputi

integrasi sistem, kualitas data, kecepatan pelayanan, pemanfaatan fasilitas, keterampilan, biaya, resistensi, keamanan, regulasi, dan kesiapan mitra. Tema tersebut kemudian dipetakan ke dalam tiga konteks TOE. Masalah jaringan, interoperabilitas, data, keamanan, dan kompleksitas dimasukkan ke konteks teknologi. Kompetensi, kepemimpinan, pembiayaan, dan perubahan proses dimasukkan ke konteks organisasi. Regulasi, tekanan pengguna, koordinasi, dan kesiapan mitra dimasukkan ke konteks lingkungan. Kajian literatur mengenai smart port telah menggunakan pendekatan serupa, meskipun dengan ruang lingkup berbeda. Belmoukari et al. (2023), Pham (2023), Paraskevas et al. (2024), dan Zeng et al. (2025) melakukan tinjauan sistematis untuk mengelompokkan tema, teknologi, serta kesenjangan penelitian. Penggunaan analisis tematik dalam penelitian ini memungkinkan temuan dengan metode berbeda dibandingkan tanpa menyamakan ukuran kinerjanya.

Untuk menjaga konsistensi, satu artikel dapat memperoleh lebih dari satu kode. Sebagai contoh, artikel tentang digital twin dapat diberi kode integrasi data, simulasi, pengambilan keputusan, kompetensi, dan kolaborasi. Namun, kesimpulan hanya dibuat apabila suatu pola muncul pada lebih dari satu sumber atau didukung oleh penjelasan empiris yang memadai. Jumlah artikel pada diagram seleksi harus diisi setelah penelusuran final selesai. Pelaporan akhir perlu mencantumkan jumlah artikel yang ditemukan, jumlah duplikat, jumlah artikel yang dikeluarkan, alasan eksklusi, dan jumlah sumber yang dianalisis. Angka tersebut tidak boleh diperkirakan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pola Umum Literatur Digitalisasi Pelabuhan

Literatur yang ditelaah dapat dibagi ke dalam empat kelompok. Kelompok pertama membahas definisi dan indikator smart port. Kelompok kedua menelaah teknologi tertentu, seperti machine learning, IoT, *blockchain*, dan digital twin. Kelompok ketiga membahas hasil digitalisasi terhadap kinerja, keberlanjutan, atau kualitas pelayanan. Kelompok keempat menelaah kesiapan dan hambatan penerapan. Kajian Belmoukari et al. (2023), Pham (2023), dan Paraskevas et al. (2024) menunjukkan bahwa penelitian smart port berkembang dari pembahasan teknologi menuju tata kelola dan pengukuran kinerja. Perubahan ini menunjukkan bahwa keberadaan teknologi tidak lagi dianggap cukup untuk menyatakan pelabuhan telah menjadi “pintar”. Literatur Indonesia lebih sering membahas penerimaan pengguna, kematangan digital, integrasi logistik, dan penerapan sistem pada pelabuhan tertentu. Iman et al. (2022) menghubungkan penerimaan layanan dengan manfaat dan kepercayaan. Safuan

(2023) membahas pengembangan teknologi pada Pelabuhan Indonesia. Utama et al. (2024) memperlihatkan variasi kematangan digital pada jaringan pelabuhan Indonesia.

Teknologi dan Penggunaannya

Sistem informasi terintegrasi

Sistem informasi terintegrasi menjadi fondasi bagi teknologi lain. Fungsi dasarnya adalah menyatukan data pelayanan kapal, barang, terminal, pembayaran, dan pemeriksaan. Ketika data kapal telah tersedia sebelum kedatangan, terminal dapat menyiapkan dermaga dan alat. Ketika dokumen tidak perlu dimasukkan berulang, waktu administratif berkurang. Safuan (2023) memperlihatkan bahwa pengembangan digital di pelabuhan Indonesia telah mencakup sisi laut, darat, dan pelanggan. Namun, nilai sistem tersebut bergantung pada integrasi dengan organisasi lain. Iman et al. (2022) juga menunjukkan bahwa pengguna mempertimbangkan manfaat praktis serta kepercayaan ketika memutuskan menggunakan layanan digital. Masalah yang sering muncul bukan ketiadaan aplikasi, melainkan terlalu banyak aplikasi yang tidak saling bertukar data. Zeng et al. (2025) menyebut data silo dan aliran informasi yang tidak konsisten sebagai hambatan teknologi. Temuan ini menjelaskan mengapa digitalisasi administrasi belum tentu menghapus pekerjaan manual.

Internet of Things

IoT mendukung pemantauan alat, kendaraan, kontainer, konsumsi energi, dan kondisi lingkungan. Data sensor mengurangi ketergantungan pada pemeriksaan berkala. Pengelola dapat mengetahui perubahan kondisi ketika peristiwa terjadi. Paulauskas et al. (2021) menunjukkan bahwa tingkat digitalisasi pelabuhan berkaitan dengan kemampuan mengumpulkan, menghubungkan, dan menggunakan data. Wang dan Hsu (2025) menemukan bahwa IoT dalam logistik maritim digunakan untuk pelacakan, pengawasan kondisi, optimasi, dan pemeliharaan. Manfaat IoT mudah berkurang ketika sensor tidak terawat atau koneksi tidak stabil. Data yang banyak juga menambah beban penyimpanan dan keamanan. Karena itu, pemasangan sensor perlu mengikuti kebutuhan keputusan yang jelas.

Analitik Data dan Kecerdasan Buatan

Filom et al. (2022) menemukan bahwa sebagian besar studi machine learning di pelabuhan digunakan untuk prediksi. Objeknya mencakup waktu kedatangan, permintaan, kepadatan, dan kinerja operasi. Aplikasi untuk keputusan preskriptif masih berkembang. Analitik prediktif dapat membantu mengurangi ketidakpastian, tetapi model tidak selalu dapat dipindahkan dari satu pelabuhan ke pelabuhan lain. Pola kedatangan, jenis muatan, fasilitas, dan aturan operasi dapat berbeda. Model juga perlu diperbarui ketika pola data berubah. Penerapan kecerdasan buatan sebaiknya dimulai pada proses yang memiliki data cukup dan

hasil yang dapat diverifikasi. Prediksi kedatangan kapal, misalnya, dapat dibandingkan dengan waktu aktual. Pendekatan ini lebih masuk akal daripada menerapkan AI pada proses yang datanya belum tertata.

Digital Twin

Klar et al. (2023) menjelaskan bahwa digital twin pelabuhan harus memiliki data situasional, kemampuan analisis, dan antarmuka kolaborasi. Teknologi ini tidak hanya menghasilkan gambar tiga dimensi. Model perlu diperbarui oleh data dan digunakan untuk menilai pilihan tindakan. Digital twin dapat digunakan untuk menguji perubahan tata letak, jadwal, atau penggunaan energi. Kegunaannya lebih besar pada pelabuhan yang telah memiliki integrasi data. Pada pelabuhan dengan pencatatan yang masih terpisah, pengembangan digital twin dapat menjadi proyek mahal dengan data yang tidak cukup.

Teknologi untuk Keberlanjutan

Digitalisasi juga digunakan untuk mengurangi konsumsi energi dan emisi. Zhang et al. (2024) menemukan bahwa teknologi digital pada green port berkaitan dengan pemantauan, pemilihan rute, manajemen kapal, pengelolaan limbah, dan efisiensi energi. Almeida (2024) menunjukkan bahwa kontribusi digitalisasi terhadap tujuan keberlanjutan bergantung pada cara teknologi dimasukkan ke strategi pelabuhan. Hubungan antara digitalisasi dan keberlanjutan tidak selalu positif. Pusat data, sensor, dan otomatisasi menggunakan energi serta memerlukan perangkat baru. Karena itu, manfaat lingkungan perlu dihitung berdasarkan perubahan yang benar-benar terjadi, bukan berdasarkan label teknologi.

Pengaruh terhadap Efisiensi Operasional

Waktu Pelayanan

Sistem elektronik dapat memperpendek proses apabila menghapus langkah yang tidak diperlukan. Sebaliknya, waktu tidak berkurang apabila dokumen elektronik tetap harus dicetak atau dimasukkan ulang ke sistem lain. Efisiensi pelayanan karena itu perlu diukur pada keseluruhan proses. Waktu pada satu loket dapat turun, tetapi waktu total tetap sama jika pemeriksaan berpindah ke unit lain. Evaluasi harus mengikuti perjalanan dokumen atau barang dari awal sampai akhir.

Akurasi Informasi

Penggunaan sumber data bersama mengurangi perbedaan informasi. Namun, integrasi tidak memperbaiki data yang salah sejak awal. Tata kelola data tetap diperlukan untuk menentukan siapa yang memasukkan, memeriksa, memperbaiki, dan menggunakan data. Zeng et al. (2025) mengidentifikasi kualitas dan konsistensi informasi sebagai masalah utama

digitalisasi maritim. Almeida (2023) juga menempatkan keamanan dan tata kelola data sebagai bagian dari tantangan transformasi pelabuhan.

Pemanfaatan Fasilitas

Data kedatangan, kepadatan, dan kondisi alat membantu penyusunan jadwal. Digital twin dan analitik dapat membandingkan beberapa skenario sebelum keputusan diterapkan. Klar et al. (2023) menyebut kemampuan ini sebagai salah satu manfaat utama digital twin. Pengaruhnya terhadap produktivitas tetap bergantung pada kapasitas fisik. Sistem tidak dapat menggantikan dermaga yang kurang atau alat yang rusak. Teknologi membantu menggunakan kapasitas dengan lebih baik, tetapi tidak menghilangkan seluruh kendala kapasitas.

Koordinasi

Digitalisasi mempercepat pertukaran informasi, tetapi tidak otomatis menyelesaikan konflik kewenangan. Organisasi masih perlu menyepakati data yang dibagikan, waktu pembaruan, hak akses, dan tindakan ketika terjadi perbedaan. Utama et al. (2024) memperlihatkan bahwa digitalisasi pada pelabuhan Indonesia dipengaruhi oleh hubungan antarpelabuhan dan variasi tingkat kesiapan. Iman et al. (2022) juga menunjukkan bahwa kepercayaan pengguna memengaruhi penerimaan sistem. Kedua temuan tersebut mendukung pandangan bahwa koordinasi merupakan bagian dari hasil sekaligus prasyarat digitalisasi.

Hambatan Berdasarkan TOE

Konteks Teknologi

Hambatan teknologi meliputi jaringan, perangkat lama, interoperabilitas, kualitas data, keamanan, dan biaya. Pelabuhan yang menggunakan beberapa sistem lama menghadapi kesulitan integrasi karena format dan arsitekturnya berbeda. Keamanan siber menjadi persoalan operasional, bukan hanya persoalan unit teknologi informasi. Gangguan sistem dapat menghentikan gerbang, dokumen, atau penjadwalan. Paraskevas et al. (2024), Almeida (2023), dan Zeng et al. (2025) sama-sama menempatkan keamanan sebagai masalah penerapan smart port.

Konteks Organisasi

Kendala organisasi mencakup anggaran, kompetensi, pembagian tugas, dukungan pimpinan, dan resistensi. Resistensi sering diperlakukan sebagai sikap pegawai yang tidak mau berubah. Penjelasan tersebut terlalu sederhana. Penolakan dapat muncul karena sistem menambah pekerjaan, tidak stabil, atau dirancang tanpa memahami kegiatan pengguna. Pengembangan kompetensi perlu disesuaikan dengan peran. Operator membutuhkan kemampuan berbeda dari analis data atau pengambil keputusan. Pelatihan umum mengenai “transformasi digital” tidak cukup apabila pegawai tidak belajar menggunakan sistem pada

kasus kerja mereka. Utama et al. (2024) menunjukkan pentingnya penilaian kematangan sebelum menyusun rencana digitalisasi. Pelabuhan yang berada pada tahap awal lebih membutuhkan stabilitas sistem dasar daripada teknologi prediktif.

Konteks Lingkungan

Konteks lingkungan meliputi regulasi, standar, mitra, pemasok, dan pengguna. Pada ekosistem pelabuhan, satu pihak dapat menghambat seluruh aliran digital apabila belum siap menerima atau mengirim data. Kesepakatan pertukaran data perlu menjelaskan format, frekuensi, hak akses, tanggung jawab, dan penanganan kesalahan. Tanpa aturan tersebut, integrasi dapat menimbulkan perselisihan baru.

Strategi Digitalisasi Pelabuhan

Strategi pertama adalah menilai kematangan digital. Penilaian mencakup infrastruktur, data, proses, sumber daya manusia, keamanan, dan hubungan dengan mitra. Model Utama et al. (2024) dapat menjadi titik awal untuk pelabuhan negara kepulauan. Strategi kedua adalah memilih proyek berdasarkan masalah operasional. Digitalisasi dokumen cocok untuk proses yang lambat karena perpindahan berkas. Sensor cocok untuk aset yang perlu dipantau. Analitik cocok untuk proses yang memiliki data historis memadai. Digital twin lebih sesuai ketika data dasar telah terintegrasi. Strategi ketiga adalah menetapkan indikator sebelum implementasi. Indikator dapat berupa waktu layanan, jumlah entri ulang, kesalahan, penggunaan fasilitas, waktu gangguan, dan kepuasan pengguna. Tanpa kondisi awal, organisasi sulit membuktikan manfaat investasi.

Strategi keempat adalah membangun integrasi secara bertahap. Sistem baru harus memiliki antarmuka dan standar data. Organisasi juga perlu menentukan data utama agar tidak terdapat beberapa versi untuk objek yang sama.

Strategi kelima adalah memasukkan keamanan ke dalam desain. Pengendalian akses, pencadangan, pemantauan, simulasi pemulihan, dan pembagian tanggung jawab perlu ditetapkan sebelum sistem digunakan secara luas.

Strategi keenam adalah melibatkan pengguna. Pegawai operasional perlu dilibatkan pada analisis kebutuhan dan uji coba. Keterlibatan ini membantu menemukan langkah yang tidak terlihat oleh perancang sistem dan mengurangi resistensi yang berasal dari ketidaksesuaian proses.

Strategi ketujuh adalah menyusun tata kelola antarlembaga. Kesepakatan data tidak dapat digantikan oleh teknologi. Pengelola pelabuhan, regulator, perusahaan pelayaran, logistik, kepabeanan, dan penyedia transportasi perlu menyepakati prosedur bersama.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Digitalisasi pelabuhan dapat meningkatkan efisiensi ketika teknologi menyelesaikan masalah operasional yang jelas. Sistem terintegrasi mengurangi entri ulang, IoT meningkatkan visibilitas aset, analitik membantu prediksi, otomatisasi menstabilkan proses, dan digital twin mendukung simulasi. Hasil tersebut tidak muncul secara otomatis karena teknologi bekerja di dalam organisasi dan ekosistem yang memiliki aturan, sumber daya, dan tingkat kesiapan berbeda. Hambatan digitalisasi dapat dikelompokkan ke dalam konteks teknologi, organisasi, dan lingkungan. Hambatan teknologi mencakup integrasi, kualitas data, jaringan, biaya, dan keamanan. Hambatan organisasi berkaitan dengan anggaran, kompetensi, pembagian tugas, dukungan pimpinan, dan penerimaan pegawai. Hambatan lingkungan meliputi regulasi, standar data, serta kesiapan mitra. Pengelola pelabuhan disarankan memulai transformasi dengan penilaian kematangan dan pemetaan masalah. Setiap proyek perlu memiliki indikator awal dan target. Integrasi data, pengembangan kompetensi, keamanan, serta kesepakatan antarlembaga harus berjalan bersama dengan pengadaan teknologi. Penelitian ini terbatas pada sumber sekunder dan tidak membandingkan hasil implementasi pada satu jenis pelabuhan. Penelitian berikutnya dapat menguji kerangka TOE pada pelabuhan pengumpul dan pengumpan, membandingkan indikator sebelum dan sesudah digitalisasi, atau menyusun indeks kesiapan yang mempertimbangkan perbedaan ukuran dan fungsi pelabuhan Indonesia.

DAFTAR REFERENSI

- Almeida, F. (2023). Challenges in the digital transformation of ports. *Businesses*, 3(4), 548–568. <https://doi.org/10.3390/businesses3040034>
- Almeida, F. (2024). Achieving sustainable development goals through digitalization in ports. *Business Strategy and the Environment*, 33(7), 7583–7597. <https://doi.org/10.1002/bse.3842>
- Belmoukari, B., Audy, J.-F., & Forget, P. (2023). Smart port: A systematic literature review. *European Transport Research Review*, 15, Article 4. <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00581-6>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Di Vaio, A., Varriale, L., Lekakou, M., & Stefanidaki, E. (2022). Digitalization and new technologies for sustainable business models at the ship–port interface: A bibliometric analysis. *Maritime Policy & Management*, 49(3), 410–446. <https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1903600>
- Filom, S., Amiri, A. M., & Razavi, S. (2022). Applications of machine learning methods in port operations: A systematic literature review. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 161, Article 102722. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102722>

- Iman, N., Amanda, M. T., & Angela, J. (2022). Digital transformation for maritime logistics capabilities improvement: Cases in Indonesia. *Marine Economics and Management*, 5(2), 188–212. <https://doi.org/10.1108/MAEM-01-2022-0002>
- Kishore, L., Pai, Y. P., Ghosh, B., & Pakkan, S. (2024). Maritime shipping ports performance: A systematic literature review. *Discover Sustainability*, 5, Article 144. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00299-y>
- Klar, R., Fredriksson, A., & Angelakis, V. (2023). Digital twins for ports: Derived from smart city and supply chain twinning experience. *IEEE Access*, 11, 71777–71799. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3295495>
- Özispä, N. (2021). How ports can improve their sustainability performance: Triple bottom line approach. *Journal of ETA Maritime Science*, 9(1), 41–50. <https://doi.org/10.4274/jems.2021.53765>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., . . . Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, Article n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Paraskevas, A., Madas, M., Zeimpekis, V., & Fouskas, K. G. (2024). Smart ports in Industry 4.0: A systematic literature review. *Logistics*, 8(1), Article 28. <https://doi.org/10.3390/logistics8010028>
- Paulauskas, V., Filina-Dawidowicz, L., & Paulauskas, D. (2021). Ports digitalization level evaluation. *Sensors*, 21(18), Article 6134. <https://doi.org/10.3390/s21186134>
- Pham, T. Y. (2023). A smart port development: Systematic literature and bibliometric analysis. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 39(3), 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2023.06.005>
- Safuan, S. (2023). Penerapan teknologi digital di Pelabuhan Indonesia untuk menurunkan biaya logistik nasional. *Jurnal Manajemen Transportasi & Logistik*, 9(3), 211–224. <https://doi.org/10.54324/j.mtl.v9i3.738>
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Utama, D. R., Hamsal, M., Abdinagoro, S. B., & Rahim, R. K. (2024). Developing a digital transformation maturity model for port assessment in archipelago countries: The Indonesian case. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 26, Article 101146. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101146>
- Wang, L., & Hsu, H.-H. (2025). IoT technology in maritime logistics management: Exploration of data analysis methods. *Discover Internet of Things*, 5, Article 66. <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00167-9>
- Zeng, F., Chen, A., Xu, S., Chan, H. K., & Li, Y. (2025). Digitalization in the maritime logistics industry: A systematic literature review of enablers and barriers. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(4), Article 797. <https://doi.org/10.3390/jmse13040797>
- Zhang, Z., Song, C., Zhang, J., Chen, Z., Liu, M., Aziz, F., Kurniawan, T. A., & Yap, P.-S. (2024). Digitalization and innovation in green ports: A review of current issues, contributions and the way forward in promoting sustainable ports and maritime logistics. *Science of the Total Environment*, 912, Article 169075. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169075>