

Integrasi *Digital Twin* pada Pelabuhan Pendidikan: Model Simulasi Operasional untuk Meningkatkan Kompetensi Taruna Transportasi Laut

Digital Twin Integration in Educational Ports: An Operational Simulation Model to Enhance the Competence of Maritime Transport Cadets

Diah Vitaloka Hartati^{1*}, Ni Luh Darmayanti², Kukuh Wirahadi Wijaya³

¹ Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar, Sulawesi Selatan – Indonesia

² Politeknik Transportasi Darat Bali, Bali – Indonesia

³ Politeknik Pelayaran Malahayati, Aceh – Indonesia

Article Info	ABSTRAK
Article history: Received Nov 20, 2025 Revised Nov 28, 2025 Accepted Nov 30, 2025	Transformasi digital pada sektor transportasi laut menuntut lembaga pendidikan vokasi untuk mengembangkan model pembelajaran yang mampu menghubungkan pengetahuan teoritis dengan kompleksitas operasional pelabuhan secara nyata. Salah satu teknologi yang memiliki potensi besar untuk menjawab kebutuhan tersebut adalah <i>Digital Twin</i>, yaitu representasi digital dinamis dari suatu objek, sistem, atau proses fisik yang terhubung dengan data aktual sehingga kondisi dan perilakunya dapat dimodelkan, dipantau, dianalisis, dan disimulasikan. Artikel ini bertujuan merumuskan model integrasi <i>Digital Twin</i> pada pelabuhan pendidikan sebagai lingkungan simulasi operasional untuk meningkatkan kompetensi taruna transportasi laut. Penelitian menggunakan pendekatan <i>Research and Development</i> (R&D) dengan desain konseptual dan analisis sistem, yang mencakup identifikasi kebutuhan kompetensi, pemetaan proses operasional pelabuhan, perancangan arsitektur <i>Digital Twin</i>, pengembangan skenario simulasi, serta perumusan indikator kompetensi. Model yang dihasilkan mengintegrasikan data kapal, dermaga, alat bongkar muat, terminal, arus kendaraan, cuaca, keselamatan, dan aktivitas sumber daya manusia ke dalam lingkungan simulasi digital. Hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi <i>Digital Twin</i> dapat membentuk lingkungan pembelajaran yang lebih adaptif, memungkinkan taruna berlatih pengambilan keputusan dalam kondisi normal maupun tidak normal, serta menyediakan mekanisme evaluasi berbasis data. Model pembelajaran yang diusulkan terdiri atas lima lapisan utama, yaitu lapisan fisik, akuisisi data, model digital, simulasi dan analitik, serta lapisan pembelajaran dan evaluasi. Implementasinya diarahkan pada pengembangan kompetensi teknis, kompetensi keselamatan, pengambilan keputusan, pemecahan masalah, komunikasi, koordinasi, dan kesadaran situasional. Artikel ini menghasilkan kerangka konseptual <i>Educational Port Digital Twin</i> yang dapat dikembangkan secara bertahap pada institusi pendidikan transportasi laut. Model tersebut tidak dimaksudkan menggantikan praktik lapangan, melainkan menjadi jembatan antara pembelajaran kelas, simulator, dan pengalaman operasional di pelabuhan.
Kata Kunci: <i>Digital Twin</i>, pelabuhan pendidikan, simulasi operasional, pendidikan vokasi, transformasi digital.	
Keywords: <i>Digital Twin</i>, educational port, operational simulation, vocational education, digital transformation.	

ABSTRACT

Digital transformation in the maritime transport sector requires vocational education institutions to develop learning models that effectively bridge theoretical knowledge with the real-world operational complexities of ports. One technology with significant potential to address this need is the Digital Twin—a dynamic digital representation of a physical object, system, or process linked to real-time data, enabling the modeling, monitoring, analysis, and simulation of its condition and behavior. This article aims to formulate a Digital Twin integration model for an “educational port”—serving as an operational simulation environment—to enhance the competencies of maritime transport cadets. The study employs a Research and Development (R&D) approach utilizing conceptual design and systems analysis, encompassing the identification of competency requirements, mapping of port operational processes, design of the Digital Twin architecture, development of simulation scenarios, and formulation of competency indicators. The resulting model integrates data regarding vessels, berths, cargo handling equipment, terminals, vehicle traffic, weather, safety, and human resource activities into a digital simulation environment. The study’s findings indicate that Digital Twin integration fosters a more adaptive learning environment, allowing cadets to practice decision-making under both normal and abnormal conditions while providing a data-driven evaluation mechanism. The proposed learning model comprises five key layers: physical, data acquisition, digital model, simulation and analytics, and learning and evaluation. Its implementation focuses on developing technical and safety competencies, as well as skills in decision-making, problem-solving, communication, coordination, and situational awareness. This article presents a conceptual framework for an Educational Port Digital Twin that can be developed incrementally within maritime transport educational institutions. The model is not intended to replace field practice but rather to serve as a bridge connecting classroom learning, simulators, and actual port operational experience.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author*:

Name: Diah Vitaloka Hartati

Institution: Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar, Jl. Tentara Pelajar No.173, Malimongan Tua, Kec. Wajo, Kota Makassar, Sulawesi Selatan – 90165

Email: loka.hartati@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Transportasi laut memiliki posisi strategis dalam sistem logistik nasional maupun internasional. Sebagai negara kepulauan, Indonesia sangat bergantung pada konektivitas laut untuk mendukung mobilitas manusia, distribusi barang, perdagangan, pembangunan wilayah, dan integrasi ekonomi antarpulau. Pelabuhan

menjadi salah satu simpul utama dalam sistem tersebut karena berfungsi sebagai tempat berlangsungnya perpindahan moda, pelayanan kapal, kegiatan bongkar muat, penyimpanan, distribusi, serta berbagai aktivitas administratif dan keselamatan.

Kompleksitas kegiatan di pelabuhan menyebabkan kebutuhan terhadap sumber daya manusia yang kompeten semakin

meningkat. Tenaga profesional di bidang transportasi laut tidak hanya dituntut memahami teori mengenai kapal, pelabuhan, navigasi, logistik, keselamatan, dan manajemen transportasi, tetapi juga harus mampu mengambil keputusan dalam lingkungan operasional yang dinamis. Dalam situasi tertentu, sebuah keputusan yang terlihat sederhana dapat menghasilkan konsekuensi berantai terhadap waktu pelayanan kapal, penggunaan dermaga, produktivitas bongkar muat, keselamatan pekerja, kelancaran lalu lintas internal terminal, bahkan keberlangsungan rantai pasok.

Kondisi tersebut menghadirkan tantangan tersendiri bagi lembaga pendidikan vokasi transportasi laut. Pembelajaran konvensional yang dominan menggunakan ceramah, buku teks, gambar, dan studi kasus memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan kompleksitas operasi pelabuhan secara utuh. Taruna dapat memahami konsep mengenai *berthing*, bongkar muat, *yard management*, keselamatan kerja, *port traffic*, dan pelayanan kapal secara teoretis, tetapi belum tentu memperoleh kesempatan yang memadai untuk menguji keputusan mereka dalam lingkungan yang menyerupai kondisi operasional sebenarnya.

Simulator telah digunakan dalam pendidikan transportasi dan pelayaran untuk memberikan pengalaman pembelajaran yang lebih mendekati kondisi nyata. Simulator memungkinkan peserta didik berlatih dalam lingkungan yang aman dan terkontrol tanpa harus menghadapi konsekuensi langsung dari kesalahan. Namun demikian, sebagian simulator pendidikan masih berfokus pada sistem tertentu secara terpisah. Simulator navigasi, misalnya, dapat memberikan pengalaman pengendalian kapal, sementara simulator mesin dapat merepresentasikan sistem permesinan. Tantangannya adalah bagaimana menghadirkan keterkaitan antara kapal, dermaga, terminal, peralatan bongkar muat, lingkungan, sumber daya manusia, dan sistem informasi dalam satu ekosistem pembelajaran.

Perkembangan teknologi *Digital Twin* memberikan peluang untuk mengembangkan pendekatan tersebut.

Digital Twin pada dasarnya merupakan representasi digital dari entitas fisik yang memiliki hubungan dengan objek atau proses nyata melalui pertukaran data. Konsep tersebut berkembang dari bidang manufaktur dan sistem industri, kemudian meluas ke konstruksi, energi, kesehatan, penerbangan, transportasi, serta pengelolaan infrastruktur. Berbeda dari model simulasi statis, *Digital Twin* idealnya memiliki kemampuan untuk menerima data dari sistem fisik, memperbarui kondisi representasi digital, melakukan analisis, dan memberikan informasi yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan.

Dalam konteks pelabuhan, *Digital Twin* dapat digunakan untuk merepresentasikan lingkungan operasional secara lebih komprehensif. Data mengenai kedatangan kapal, posisi kapal, kondisi dermaga, penggunaan *crane*, volume muatan, arus kendaraan, kondisi cuaca, waktu pelayanan, dan parameter keselamatan dapat diintegrasikan ke dalam model digital. Sistem tersebut selanjutnya dapat digunakan untuk melakukan simulasi berbagai skenario tanpa mengganggu operasi pelabuhan yang sebenarnya.

Potensi tersebut tidak hanya relevan untuk kepentingan manajemen pelabuhan, tetapi juga memiliki nilai strategis bagi pendidikan vokasi transportasi laut. Pelabuhan dapat dikembangkan sebagai *living laboratory*, sedangkan representasi digitalnya dapat menjadi lingkungan belajar yang memungkinkan taruna memahami hubungan sebab-akibat dalam operasi pelabuhan.

Konsep tersebut kemudian melahirkan gagasan pelabuhan pendidikan berbasis *Digital Twin*. Pelabuhan pendidikan dalam artikel ini tidak semata-mata dimaknai sebagai pelabuhan yang digunakan untuk praktik kerja taruna, tetapi sebagai lingkungan pembelajaran yang

mengintegrasikan fasilitas fisik, data operasional, teknologi simulasi, kurikulum, instruktur, dan sistem evaluasi kompetensi.

Integrasi tersebut penting karena kompetensi transportasi laut bersifat multidimensional. Seorang calon profesional tidak cukup hanya mengetahui prosedur. Ia juga harus mampu menginterpretasikan informasi, mengidentifikasi risiko, melakukan analisis, menentukan alternatif tindakan, berkomunikasi, bekerja dalam tim, serta mengevaluasi hasil keputusan.

Oleh karena itu, pembelajaran berbasis *Digital Twin* perlu dirancang bukan sekadar sebagai teknologi visualisasi pelabuhan. Teknologi tersebut harus menjadi bagian dari desain pedagogis yang berorientasi pada pencapaian kompetensi.

Permasalahan utama yang menjadi dasar penelitian ini adalah belum optimalnya integrasi antara teknologi simulasi digital, data operasional pelabuhan, dan pembelajaran kompetensi taruna transportasi laut.

Kebaruan artikel ini terletak pada pergeseran orientasi *Digital Twin* dari teknologi pendukung pengelolaan pelabuhan menjadi infrastruktur pembelajaran untuk pendidikan transportasi laut.

Sebagian besar pembahasan *Digital Twin* dalam konteks pelabuhan berorientasi pada optimasi operasi, *port management*, prediksi, pemeliharaan, dan efisiensi. Artikel ini mengembangkan perspektif berbeda dengan menempatkan taruna sebagai pengguna utama pada lapisan pembelajaran.

Model yang diusulkan menghubungkan lima elemen diantaranya pelabuhan fisik, data operasional, representasi digital, simulasi skenario, dan evaluasi kompetensi.

Dengan demikian, *Digital Twin* tidak berhenti pada kemampuan memvisualisasikan pelabuhan, tetapi digunakan sebagai lingkungan eksperimen pendidikan.

2. METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) yang diarahkan pada pengembangan model konseptual integrasi *Digital Twin* untuk pelabuhan pendidikan.

R&D dipilih karena tujuan penelitian bukan hanya mendeskripsikan fenomena, tetapi menghasilkan rancangan model yang dapat digunakan sebagai dasar pengembangan sistem pembelajaran.

Pengembangan dilakukan melalui beberapa tahapan: a. Analisis kebutuhan; b. Identifikasi proses operasional; c. Pemetaan kompetensi; d. Perancangan arsitektur *Digital Twin*; e. Perancangan skenario simulasi; f. Penyusunan sistem evaluasi; dan g. Perumusan model implementasi.

Model penelitian dapat digambarkan sebagai berikut diantaranya analisis kebutuhan, pemetaan proses Pelabuhan, pemetaan kompetensi, perancangan *digital twin*, skenario simulasi, evaluasi kompetensi, dan model implementasi.

Analisis Kebutuhan

Analisis kebutuhan dilakukan dengan mengidentifikasi kebutuhan kompetensi pada pendidikan transportasi laut dan karakteristik kegiatan operasional pelabuhan.

Kebutuhan pembelajaran dikelompokkan menjadi: a. Kompetensi teknis; b. Kompetensi keselamatan; c. Kompetensi analitis; d. Kompetensi pengambilan keputusan; e. Kompetensi komunikasi; f. Kompetensi kerja sama; g. Kompetensi pemecahan masalah; dan h. Kompetensi kesadaran situasional.

Sementara itu, proses pelabuhan yang dipertimbangkan meliputi: a. Kedatangan kapal; b. Pemeriksaan kesiapan dermaga; c. Pelayanan kapal; d. *Berthing*; e. Bongkar muat; f. Pergerakan kendaraan terminal; g. Pengelolaan lapangan penumpukan; h. Pelayanan penumpang; i. Pengelolaan kondisi darurat; dan j. Keberangkatan kapal.

Pemetaan Proses Operasional

Setiap aktivitas pelabuhan dipetakan berdasarkan:

Komponen	Parameter
Kapal	posisi, kecepatan, arah, jenis, ukuran
Dermaga	panjang, okupansi, kesiapan pelayanan
Muatan	jenis, volume, waktu pelayanan
Crane	status, kapasitas, produktivitas
Yard	kapasitas, okupansi, lokasi
Kendaraan	jumlah, posisi, antrean
Cuaca	angin, gelombang, hujan, visibilitas
Keselamatan	zona risiko, insiden, status peralatan
SDM	operator, petugas, supervisor
Waktu	ETA, ETD, waktu pelayanan

Parameter tersebut kemudian digunakan sebagai variabel dalam lingkungan simulasi.

Perancangan Arsitektur Digital Twin

Arsitektur yang dikembangkan terdiri atas lima lapisan.

Lapisan 1: Physical Port Layer

Lapisan pertama merupakan representasi kondisi fisik pelabuhan yang meliputi: a. Kapal; b. Dermaga; c. Gudang; d. Lapangan penumpukan; e. Crane; f. Kendaraan; g. Terminal penumpang; h. Akses jalan; dan i. Fasilitas keselamatan.

Lapisan 2: Data Acquisition Layer

Lapisan ini mengumpulkan data dari berbagai sumber, seperti: a. Sensor; b. AIS; c. Sistem terminal; d. Sistem informasi kapal; e. Data cuaca; f. Data operasi; g. Data keselamatan; h. Data aktivitas pengguna.

Untuk kepentingan pendidikan, data aktual dapat dianonimkan dan dikombinasikan dengan data sintetis.

Lapisan 3: Digital Model Layer

Data kemudian diterjemahkan menjadi representasi digital pelabuhan.

Model dapat berupa model tiga dimensi, model proses, model matematis, model berbasis agen, dan model *discrete event simulation*.

Lapisan 4: Simulation and Analytics Layer

Lapisan ini menjadi pusat eksperimen pembelajaran.

Taruna dapat mengubah parameter tertentu untuk melihat konsekuensi keputusan.

Misalnya:

Apa yang terjadi apabila satu unit crane mengalami gangguan selama kegiatan bongkar muat?

Sistem dapat memperlihatkan dampaknya terhadap waktu pelayanan, antrean kapal, penggunaan dermaga, produktivitas, biaya, dan risiko keselamatan.

Lapisan 5: Learning and Assessment Layer

Lapisan terakhir menghubungkan sistem dengan kurikulum.

Sistem merekam terdiri dari keputusan taruna, waktu respons, kesalahan, urutan Tindakan, komunikasi, hasil operasi, indikator keselamatan.

Data tersebut kemudian digunakan untuk memberikan umpan balik dan penilaian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Model Educational Port Digital Twin

Hasil penelitian menghasilkan model konseptual yang disebut *Educational Port Digital Twin* (EPDT).

EPDT merupakan sistem digital yang merepresentasikan operasi pelabuhan untuk tujuan pembelajaran dan pelatihan.

Karakteristik utamanya adalah: a. Berorientasi pada kompetensi; b. Berbasis data; c. Dapat melakukan simulasi; d. Memungkinkan eksperimen tanpa risiko fisik; e. Menghasilkan rekam jejak aktivitas taruna; f. Menyediakan umpan balik; dan g. Dapat dikembangkan sesuai kebutuhan institusi.

Secara konseptual:

EPDT = Physical Port + Data + Digital Model + Simulation + Learning Analytics.

Dengan pendekatan tersebut, pelabuhan pendidikan tidak hanya menjadi lokasi praktik, tetapi menjadi ekosistem pembelajaran yang terintegrasi.

Integrasi Digital Twin dengan Kurikulum

Integrasi *Digital Twin* harus dilakukan berdasarkan capaian pembelajaran, bukan semata-mata berdasarkan kecanggihan teknologi.

Sebagai contoh, pada mata kuliah manajemen operasi pelabuhan, capaian pembelajaran dapat berupa kemampuan taruna untuk memahami alur pelayanan kapal, mengidentifikasi hambatan, menentukan prioritas, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, menerapkan prinsip keselamatan, dan mengevaluasi keputusan.

Setiap capaian tersebut kemudian diterjemahkan menjadi skenario simulasi.

Capaian Pembelajaran	Skenario Digital Twin	Indikator
Memahami operasi	Kapal tiba di Pelabuhan	ketepatan identifikasi proses
Analisis	Dermaga mengalami antrean	kemampuan menganalisis

Capaian Pembelajaran	Skenario Digital Twin	Indikator
Keputusan	Crane mengalami gangguan	ketepatan alternatif
Keselamatan	Cuaca memburuk	mitigasi risiko
Komunikasi	Konflik jadwal kapal	koordinasi
Evaluasi	Operasi mengalami keterlambatan	kemampuan evaluasi

Dengan demikian, hubungan antara teknologi dan pembelajaran menjadi lebih jelas.

Simulasi Kedatangan Kapal

Salah satu skenario dasar adalah simulasi kedatangan kapal.

Taruna diberikan kondisi ETA kapal, kondisi dermaga, panjang kapal, *draft*, kondisi cuaca, jadwal kapal lain, ketersediaan peralatan, dan kesiapan tenaga kerja.

Taruna kemudian diminta menentukan strategi pelayanan. Sistem merekam keputusan tersebut.

Misalnya terdapat tiga kapal yang akan datang dalam periode yang berdekatan. Dermaga hanya memiliki kapasitas terbatas.

Taruna harus menentukan kapal mana yang diprioritaskan, dermaga yang digunakan, sumber daya yang dialokasikan, potensi konflik, dan tindakan mitigasi. Situasi tersebut mengembangkan kemampuan berpikir sistemik.

Taruna tidak hanya menjawab pertanyaan "apa yang harus dilakukan", tetapi harus memahami "mengapa keputusan tersebut dipilih" dan "apa konsekuensinya".

Simulasi Bongkar Muat

Bongkar muat merupakan aktivitas yang kompleks karena melibatkan interaksi

antara kapal, *crane*, tenaga kerja, kendaraan, dan lapangan penumpukan.

Digital Twin dapat digunakan untuk mengembangkan skenario: a. Jumlah *crane* berubah; b. Produktivitas *crane* menurun; c. Kendaraan mengalami antrean; d. *Yard* hampir penuh; e. Terjadi kerusakan peralatan; dan f. terjadi perubahan prioritas muatan. Taruna kemudian diminta mengelola operasi.

Indikator tersebut memberikan pengalaman kepada taruna mengenai hubungan antara sumber daya dan produktivitas.

Simulasi Kondisi Darurat

Aspek keselamatan merupakan bagian penting dalam pendidikan transportasi laut.

Digital Twin dapat mensimulasikan kebakaran, tumpahan bahan berbahaya, kecelakaan kendaraan, manusia jatuh ke perairan, kerusakan alat, cuaca ekstrem, gangguan komunikasi, dan evakuasi penumpang.

Dalam skenario tersebut, taruna tidak hanya dinilai berdasarkan apakah mereka menyelesaikan masalah, tetapi juga berdasarkan: a. Kecepatan identifikasi; b. Ketepatan prioritas; c. Kepatuhan terhadap prosedur; d. Komunikasi; e. Koordinasi; f. Pengendalian risiko; dan g. Evaluasi pascakejadian.

Pendekatan ini sejalan dengan prinsip bahwa kompetensi keselamatan tidak cukup diajarkan melalui hafalan prosedur.

Pengembangan Kesadaran Situasional

Salah satu kompetensi penting bagi tenaga transportasi laut adalah *situational awareness*.

Taruna harus mampu memahami: a. Apa yang sedang terjadi?; b. Mengapa hal tersebut terjadi?; c. Apa yang mungkin terjadi berikutnya?; dan d. Tindakan apa yang perlu dilakukan?

Digital Twin memungkinkan pengembangan kemampuan tersebut karena

sistem dapat memberikan perubahan kondisi secara dinamis.

Misalnya, taruna sedang mengelola kapal yang bersandar. Kemudian sistem memasukkan perubahan angin, gangguan *crane*, antrean kendaraan, dan perubahan jadwal kapal lain.

Taruna harus memperbarui pemahamannya terhadap situasi.

Pembelajaran tersebut jauh lebih dekat dengan karakteristik pekerjaan nyata dibandingkan latihan yang hanya memberikan kondisi tetap.

Digital Twin sebagai Lingkungan Pembelajaran Berbasis Masalah

Integrasi *Digital Twin* sangat sesuai dengan pendekatan *Problem Based Learning* (PBL).

Pada PBL, peserta didik dihadapkan pada masalah nyata atau menyerupai masalah nyata.

Tahapan yang dapat digunakan adalah:

Tahap 1 — Orientasi masalah. Taruna diberikan kondisi awal operasi pelabuhan.

Tahap 2 — Identifikasi masalah. Taruna mengidentifikasi masalah utama.

Tahap 3 — Pengumpulan informasi. Taruna menggunakan data yang tersedia.

Tahap 4 — Analisis alternative. Taruna membandingkan beberapa alternatif.

Tahap 5 — Pengambilan keputusan. Taruna menentukan tindakan.

Tahap 6 — Simulasi. Keputusan dijalankan dalam *Digital Twin*.

Tahap 7 — Evaluasi. Hasil dibandingkan dengan indikator kinerja.

Tahap 8 — Refleksi. Taruna menjelaskan alasan keputusan dan pembelajaran yang diperoleh.

Dengan demikian, *Digital Twin* dapat berfungsi sebagai laboratorium PBL.

Pengembangan Kompetensi Taruna

Kompetensi yang dikembangkan dapat dikelompokkan menjadi tujuh dimensi.

1. Kompetensi teknis

Meliputi pemahaman proses Pelabuhan, penggunaan peralatan, pengelolaan sumber daya, dan pemahaman data operasi.

2. Kompetensi keselamatan

Meliputi identifikasi bahaya, penilaian risiko, mitigasi, dan respons keadaan darurat.

3. Kompetensi analitis

Meliputi interpretasi data, analisis hubungan sebab-akibat, evaluasi alternative, dan prediksi konsekuensi.

4. Pengambilan keputusan

Meliputi ketepatan keputusan, kecepatan, konsistensi, dan pertimbangan risiko.

5. Komunikasi

Meliputi penyampaian informasi, kejelasan instruksi, koordinasi, dan pelaporan.

6. Kerja sama tim

Meliputi pembagian tugas, koordinasi, kepemimpinan, dan penyelesaian konflik.

7. Refleksi

Meliputi evaluasi keputusan, identifikasi kesalahan, dan perumusan perbaikan.

Sistem Evaluasi Berbasis Data

Keunggulan penting *Digital Twin* dalam pendidikan adalah kemampuannya merekam aktivitas pembelajaran.

Berbeda dengan ujian tertulis, sistem dapat menghasilkan *learning analytics*.

Misalnya:

Indikator	Data
Waktu respons detik/menit	

Indikator

Data

Kesalahan	jumlah
Keputusan	jenis tindakan
Risiko	tingkat risiko
Efisiensi	waktu operasi
Keselamatan	pelanggaran prosedur
Komunikasi	kelengkapan informasi
Hasil	tingkat pencapaian

Bobot tidak harus sama. Institusi dapat menentukan bobot sesuai capaian pembelajaran.

Yang penting, penilaian tidak hanya memperhatikan hasil akhir, tetapi juga proses pengambilan keputusan.

Simulasi Berulang dan Pembelajaran dari Kesalahan

Salah satu prinsip penting dalam pendidikan berbasis simulasi adalah memberikan kesempatan untuk melakukan kesalahan secara aman.

Dalam operasi nyata, kesalahan tertentu dapat menimbulkan kerusakan kapal, kerusakan fasilitas, cedera, pencemaran, keterlambatan, dan kerugian ekonomi.

Dalam lingkungan *Digital Twin*, kesalahan dapat dijadikan bahan pembelajaran.

Taruna dapat menjalankan skenario pertama, mendapatkan hasil, kemudian mengulang dengan strategi berbeda.

Misalnya:

Skenario 1 → Kesalahan → Evaluasi → Perbaikan strategi → Skenario 2 → Evaluasi ulang.

Pendekatan ini mendukung pembelajaran reflektif.

Model Konseptual yang Diusulkan

Berdasarkan pembahasan tersebut, model EPDT dapat dirumuskan sebagai

berikut: a. *Input* terdiri dari data Pelabuhan, data kapal, data lingkungan, standar kompetensi, kurikulum, dan skenario pembelajaran; b. *Process* terdiri dari integrasi data, pemodelan digital, simulasi, interaksi taruna, dan pengambilan keputusan; c. *Learning Analytics* terdiri dari rekam aktivitas, waktu respons, kesalahan, risiko, efisiensi, dan kualitas keputusan; d. *Output* terdiri dari kompetensi teknis, kompetensi keselamatan, berpikir kritis, pengambilan keputusan, komunikasi, dan kerja sama; dan e. *Outcome*.

Taruna transportasi laut yang lebih siap menghadapi kompleksitas operasi pelabuhan.

Model tersebut menempatkan teknologi sebagai sarana untuk mencapai tujuan pendidikan, bukan sebagai tujuan akhir.

Digital Twin dan Teori Pembelajaran Eksperiensial

Pembelajaran melalui *Digital Twin* memiliki keterkaitan dengan pembelajaran eksperiensial.

Taruna memperoleh pengalaman melalui simulasi, kemudian melakukan refleksi terhadap pengalaman tersebut. Hasil refleksi digunakan untuk membentuk pemahaman baru dan menguji strategi pada simulasi berikutnya.

Siklusnya dapat dirumuskan: Pengalaman, refleksi, konseptualisasi, eksperimen, dan pengalaman baru.

Dengan demikian, *Digital Twin* dapat berfungsi sebagai media pengalaman yang dapat diulang.

Digital Twin dan Berpikir Kritis

Kemampuan berpikir kritis membutuhkan kemampuan interpretasi, analisis, evaluasi, inferensi, dan penjelasan.

Lingkungan *Digital Twin* menyediakan kondisi yang sesuai untuk mengembangkan kemampuan tersebut.

Taruna harus menginterpretasikan data, menganalisis situasi, mengevaluasi

alternatif, menarik kesimpulan, dan menjelaskan alasan keputusan.

Hal ini membuat *Digital Twin* relevan dengan pembelajaran berbasis masalah.

Digital Twin dan Keselamatan

Keselamatan dalam transportasi laut tidak hanya berkaitan dengan prosedur, tetapi juga pengambilan keputusan.

Digital Twin memungkinkan taruna memahami konsekuensi dari tindakan.

Misalnya, keputusan untuk mempertahankan operasi dalam kondisi cuaca memburuk dapat dibandingkan dengan keputusan menunda operasi.

Taruna dapat melihat konsekuensi kedua keputusan tersebut secara simulatif.

Hal tersebut membangun pemahaman bahwa keselamatan merupakan bagian integral dari keputusan operasional.

Implikasi Praktis

Bagi lembaga pendidikan transportasi laut, implementasi *Digital Twin* dapat diarahkan pada beberapa fungsi.

Fungsi pertama: *Laboratorium digital*. Taruna dapat melakukan eksperimen operasional.

Fungsi kedua: *Assessment center*. Kemampuan taruna dapat dievaluasi berdasarkan data aktivitas.

Fungsi ketiga: *Research laboratory*. Dosen dan taruna dapat melakukan penelitian mengenai operasi pelabuhan.

Fungsi keempat: *Innovation center*. Institusi dapat mengembangkan skenario baru.

Fungsi kelima: *Industry collaboration*. Pelabuhan dan industri dapat memberikan data serta skenario operasional.

Dengan demikian, *Digital Twin* dapat memperkuat hubungan antara pendidikan, penelitian, dan dunia industri.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan model konseptual *Educational Port Digital Twin* (EPDT) sebagai pendekatan integrasi teknologi *Digital Twin* dengan pembelajaran transportasi laut.

Model tersebut menempatkan pelabuhan sebagai lingkungan pembelajaran yang dapat direpresentasikan secara digital dan digunakan untuk mensimulasikan operasi normal, gangguan, maupun kondisi darurat.

Arsitektur EPDT terdiri atas lima lapisan utama, yaitu *Physical Port Layer*, *Data Acquisition Layer*, *Digital Model Layer*, *Simulation and Analytics Layer*, serta *Learning and Assessment Layer*.

Integrasi tersebut memungkinkan taruna memperoleh pengalaman pembelajaran yang lebih kontekstual. Taruna tidak hanya mempelajari prosedur, tetapi juga dapat menguji keputusan, melihat konsekuensi, melakukan evaluasi, dan memperbaiki strategi.

Kompetensi yang dapat dikembangkan mencakup kompetensi teknis, keselamatan, analisis, pengambilan keputusan, komunikasi, kerja sama, kesadaran situasional, dan refleksi.

Digital Twin juga memiliki potensi untuk memperkuat pendekatan *Problem Based Learning* karena memungkinkan dosen memberikan permasalahan operasional yang dinamis dan menyerupai kondisi nyata. Kesalahan taruna dapat digunakan sebagai sumber pembelajaran tanpa menimbulkan konsekuensi terhadap keselamatan manusia maupun aset.

Meskipun demikian, implementasi *Digital Twin* memerlukan kesiapan infrastruktur, kualitas data, kompetensi SDM, keamanan informasi, dan integrasi dengan kurikulum. Oleh karena itu, implementasi disarankan dilakukan secara bertahap mulai dari pembangunan model digital, simulasi, koneksi data, integrasi pembelajaran, hingga pengembangan sistem analitik cerdas.

Secara keseluruhan, *Digital Twin* tidak seharusnya diposisikan sebagai pengganti praktik lapangan, tetapi sebagai penghubung antara teori, simulator, eksperimen, dan pengalaman operasional. Pelabuhan pendidikan berbasis *Digital Twin* dapat menjadi salah satu pendekatan strategis untuk mempersiapkan taruna transportasi laut menghadapi lingkungan kerja yang semakin terdigitalisasi, kompleks, dan berorientasi pada keselamatan.

Penelitian berikutnya perlu melakukan validasi empiris terhadap model EPDT melalui uji coba pada lingkungan pendidikan transportasi laut. Penelitian tersebut dapat mengukur pengaruh penggunaan *Digital Twin* terhadap kemampuan berpikir kritis, pengambilan keputusan, kesadaran situasional, kompetensi keselamatan, serta kesiapan kerja taruna.

DAFTAR PUSTAKA

- Batty, M. (2018). Digital Twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817–820. <https://doi.org/10.1177/2399808318796416>
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary perspectives on complex systems* (pp. 85–113). Springer.
- International Maritime Organization. (1978). *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974, as Amended*. IMO.

- International Maritime Organization. (2018). Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. IMO.
- International Maritime Organization. (2022). STCW: International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers. IMO.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Madni, A. M., Madni, C. C., & Lucero, S. D. (2019). Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*, 7(1), 7.
<https://doi.org/10.3390/systems7010007>
- Min, H. (2022). Developing a Smart Port: The Role of Digitalization and Digital Twin Technology. *Maritime Business Review*, 7(4), 363–380.
- Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital twin: Values, Challenges and Enablers from A Modeling Perspective. *IEEE Access*, 8, 21980–22012.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>
- Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H. S., & Girolami, M. (2020). Construction with Digital Twin Information Systems. *Data-Centric Engineering*, 1, e14.
<https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>
- Siregar, M. S., Shevchenko, R. Z., & Wiweko, A. (2023). Penyebab Menurunnya Kinerja Mesin Pendingin di MV. Vancouver. *Mutiara: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, 1(2), 89–100.
DOI:
<https://doi.org/10.61404/jimi.v1i2.13>
- Siregar, M. S., Usman, N., & Niswanto, N. (2023). Implementasi Pendidikan Karakter melalui Model Pembelajaran Berbasis Masalah (Literature Review Manajemen Pendidikan). *Jurnal Pendidikan West Science*, 1(11), 701–712.
DOI:
<https://doi.org/10.58812/jpdws.v1i11.762>
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twins and Cyber-Physical Systems Toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, 5(4), 653–661.
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415.
<https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- Wang, B., & Wang, S. (2022). Digital Twin-Enabled Smart Port Operations: A Systematic Perspective. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9).
- Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing Smart Factory of Industry 4.0: An Outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), 1–10.
<https://doi.org/10.1155/2016/3159805>
- World Bank. (2021). Port Reform Toolkit. World Bank.
- Zhuang, C., Liu, J., & Xiong, H. (2018). Digital Twin-Based Smart Manufacturing and Its Application in Production Management. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101, 1–12.