



Analisa Waktu Bongkar Muat Kapal Peti Kemas Pada Terminal III Pelabuhan Tanjung Priok Jakarta

Muhammad Kurniawan¹, Riki Wanda Putra², Fitra Yohandrey^{3*}

^{1, 2, 3} Program Studi Transportasi Laut, Politeknik Pelayaran Sumatera Barat, Indonesia

Article Info

Article history:

Received Jun 12th, 2025

Revised Aug 20th, 2025

Accepted Nov 26th, 2025

Keyword:

Dwelling time

Peti Kemas

Antrian M/M/c

Dermaga

Machine Learning

Computer Vision

Kecerdasan Buatan

ABSTRACT

Port of Tanjung Priok, Indonesia, faces excessive ship and container dwell times—particularly at Terminal III—driven by container traffic growth that outstrips the capacity of handling facilities. This study analyzes container ship handling time (dwell time), assesses the impact of adding ship-to-shore cranes, and estimates the required berth length and yard area based on projected container flows. Secondary data on container throughput for 2009–2013 were used and projected forward to 2014–2018. Queueing analysis was performed with an M/M/c model to obtain standard system performance metrics (L, L_q, W, W_q), which were then converted into dwell-time estimates; berth and yard requirements were calculated using berth-throughput approaches and standard space requirements per TEU. Results indicate that under the existing equipment level of 39 cranes, dwell time rose from about 6.92 days in 2009 to more than 14 days in 2012–2013, substantially exceeding operational standards. Simulations show that increasing the number of cranes to 51–55 units would reduce dwell time to approximately 5.85–6.82 days. Projected infrastructure needs for 2018 include an aggregate berth length of roughly 7,339 m and a stacking yard area of about 168.9 hectares. The findings underscore the urgent need for additional handling equipment and infrastructure development and point to opportunities for enhancing analysis and operational monitoring through the application of artificial intelligence for dwell-time prediction and real-time smart-port management.



© 2021 The Authors. Published by Politeknik Pelayaran Sumatera Barat. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>)

Corresponding Author:

Fitra Yohandrey

Politeknik Pelayaran Sumatera Barat

Email: fitrayohandrey1234@gmail.com

Pendahuluan

Indonesia dikenal sebagai negara kepulauan terbesar di dunia, dengan lebih dari 17.000 pulau dan sekitar dua pertiga wilayahnya berupa perairan. Kondisi geografis ini menjadikan transportasi laut dan pelabuhan sebagai tulang punggung sistem logistik nasional. Arus perdagangan barang antar-pulau maupun internasional sangat bergantung pada kinerja pelabuhan, khususnya pelabuhan-pelabuhan utama yang berfungsi sebagai pintu gerbang (gateway) perdagangan luar negeri. Dalam konteks tersebut, Pelabuhan Tanjung Priok di Jakarta memegang peranan strategis sebagai pelabuhan utama (main port) Indonesia dan menjadi simpul

utama distribusi peti kemas di kawasan barat Indonesia. Seiring dengan pertumbuhan ekonomi nasional dan peningkatan volume perdagangan global, arus peti kemas yang melalui Pelabuhan Tanjung Priok mengalami peningkatan yang signifikan dari tahun ke tahun. Peningkatan ini membawa implikasi positif berupa meningkatnya aktivitas ekspor-impor dan perputaran ekonomi, namun di sisi lain menimbulkan tekanan besar terhadap kapasitas infrastruktur dan fasilitas pelabuhan. Kondisi tersebut seringkali memunculkan permasalahan baru, seperti kemacetan di terminal, tingginya tingkat isian lapangan penumpukan (yard occupancy ratio), serta meningkatnya waktu tunggu kapal maupun barang.

Salah satu indikator kinerja pelabuhan yang sangat krusial dalam konteks efisiensi logistik adalah dwelling time, yaitu waktu sejak peti kemas dibongkar dari kapal hingga keluar dari kawasan pelabuhan. Dalam praktiknya, dwelling time tidak hanya dipengaruhi oleh kecepatan operasi bongkar muat di dermaga, tetapi juga oleh proses administratif (bea cukai, karantina, perizinan), ketersediaan truk, kelancaran sistem informasi, serta koordinasi antar pemangku kepentingan (operator pelabuhan, shipping line, freight forwarder, pemerintah, dan lain-lain). Dwelling time yang terlalu panjang berkonsekuensi pada meningkatnya biaya logistik, terganggunya reliabilitas jadwal, dan turunnya daya saing pelabuhan serta produk ekspor Indonesia di pasar internasional. Di Indonesia, isu dwelling time sempat menjadi sorotan nasional ketika ketimpangan antara standar yang ditetapkan pemerintah dan kondisi aktual di lapangan cukup lebar. Pemerintah menargetkan standar dwelling time sekitar tiga hari sebagai upaya menekan biaya logistik nasional, sedangkan kenyataan di lapangan, terutama di Pelabuhan Tanjung Priok pada periode tertentu, menunjukkan angka yang jauh lebih tinggi. Dalam beberapa laporan dan penelitian, dwelling time kontainer di Tanjung Priok pernah dilaporkan berada di kisaran 6–8 hari bahkan lebih, khususnya sebelum adanya berbagai kebijakan perbaikan proses dan percepatan layanan. Dwelling time yang tinggi ini menyebabkan banyak peti kemas tertahan di pelabuhan, mengurangi ruang efektif di lapangan penumpukan, serta memicu kemacetan di dalam maupun sekitar kawasan pelabuhan.

Penelitian yang menjadi dasar artikel ini berangkat dari fenomena tersebut, khususnya dengan fokus pada Terminal III Pelabuhan Tanjung Priok, yang merupakan salah satu terminal peti kemas penting dalam menangani arus kontainer domestik dan internasional. Penelitian terdahulu melakukan analisis terhadap waktu bongkar muat kapal peti kemas dengan pendekatan teori antrian (queuing theory) untuk menggambarkan hubungan antara arus peti kemas, kapasitas fasilitas bongkar muat (jumlah crane dan dermaga), serta nilai dwelling time yang dihasilkan. Dengan menggunakan model antrian M/M/c, penelitian tersebut menghitung berbagai parameter sistem seperti tingkat kedatangan, tingkat pelayanan, jumlah rata-rata kapal atau peti kemas yang menunggu, hingga waktu rata-rata yang dihabiskan dalam sistem. Hasil analisis konvensional tersebut secara umum menunjukkan bahwa dengan kapasitas alat bongkar muat yang terbatas (misalnya 39 crane untuk 13 dermaga), dwelling time yang terjadi cenderung tinggi dan jauh di atas standar ideal. Simulasi penambahan crane menunjukkan adanya penurunan dwelling time yang cukup signifikan, sehingga dapat disimpulkan bahwa peningkatan kapasitas fasilitas bongkar muat merupakan salah satu kunci untuk memperbaiki kinerja pelabuhan. Selain itu, perhitungan kebutuhan panjang dermaga dan luas lapangan penumpukan juga mengindikasikan bahwa pertumbuhan arus peti kemas harus diimbangi dengan perencanaan ekspansi infrastruktur yang matang, agar tidak terjadi bottleneck pada sisi laut maupun sisi darat terminal.

Namun, perkembangan teknologi dan tuntutan efisiensi di era Industri 4.0 menuntut adanya pendekatan yang lebih maju dan adaptif dalam pengelolaan pelabuhan. Di banyak pelabuhan dunia, digitalisasi dan penerapan kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) mulai diintegrasikan ke dalam berbagai aspek operasi pelabuhan, termasuk perencanaan tambat kapal (berth planning), penjadwalan crane, manajemen lapangan penumpukan, hingga prediksi dwell time dan waktu tinggal kapal di pelabuhan. Berbagai studi menunjukkan bahwa algoritma Machine Learning mampu memproses data historis dan real-time dalam jumlah besar untuk menghasilkan model prediksi yang lebih akurat dibandingkan pendekatan statistik tradisional. Sebagai contoh, beberapa penelitian internasional telah mengembangkan model Machine Learning untuk memprediksi dwell

time kapal maupun kontainer di terminal peti kemas. Yoon dkk. (2023) mengusulkan berbagai model ML untuk memperkirakan waktu tinggal kapal kontainer di terminal dengan memanfaatkan data riwayat jadwal tambat dan karakteristik kapal; hasilnya menunjukkan bahwa model-model tersebut mampu memberikan estimasi yang cukup presisi dan berguna bagi perencanaan operasi terminal. Penelitian lain di level operasional kontainer juga menunjukkan bahwa algoritma seperti Random Forest, Gradient Boosting, dan Neural Network dapat mengidentifikasi faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap dwell time, seperti asal dan tujuan kontainer, berat, moda lanjutan, dan pola kedatangan truk.

Dalam konteks Indonesia, pemanfaatan Machine Learning untuk prediksi durasi waktu tinggal kapal di pelabuhan mulai dikembangkan. Sebuah studi tahun 2025, misalnya, menerapkan beberapa algoritma Machine Learning (Linear Regression, Random Forest, KNN, dan SVM) untuk memprediksi lamanya kapal berada di pelabuhan, dengan fokus pada kapal peti kemas dan general cargo. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa model ML mampu memberikan akurasi yang cukup baik dan berpotensi digunakan sebagai alat bantu pengambilan keputusan dalam penjadwalan kapal dan alokasi sumber daya di pelabuhan. Temuan-temuan seperti ini memberikan indikasi kuat bahwa penggabungan antara pendekatan analitis konvensional (misalnya teori antrian) dan pendekatan prediktif berbasis AI dapat menghasilkan analisis kinerja pelabuhan yang lebih komprehensif dan adaptif. Di sisi lain, Computer Vision dan teknik pengolahan citra juga mulai banyak diterapkan di terminal peti kemas untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasi peralatan bongkar muat seperti quay crane, gantry crane, dan reach stacker. Lourakis dan Pateraki (2022) mengembangkan sistem berbasis computer vision untuk melacak posisi spreader crane secara tiga dimensi dan mendefinisikan threat volume di sekitar area kerja crane; sistem tersebut mampu memantau jarak pekerja dari zona berbahaya secara real-time, sehingga dapat meningkatkan keselamatan pekerjaan di area bongkar muat. Penelitian lain yang lebih mutakhir menunjukkan bahwa teknik computer vision juga dapat digunakan untuk mendukung operasi aman reach stacker di terminal dengan memanfaatkan model generatif seperti GAN dan diffusion model untuk menghasilkan data kedalaman (depth) tanpa perangkat stereo mahal.

Selain untuk keselamatan, teknologi computer vision dikembangkan untuk berbagai aplikasi lain seperti real-time container tracking, pendekripsi kerusakan kontainer, hingga pengawasan pergerakan alat dan kendaraan di dalam terminal. Laporan industri terbaru menunjukkan bahwa sistem visual berbasis AI dapat mendekripsi upaya pencurian atau pengubahan isi kontainer, mengidentifikasi pelanggaran prosedur keamanan, dan memastikan kepatuhan terhadap standar lingkungan secara lebih efektif dibandingkan metode manual. Penerapan teknologi semacam ini memperlihatkan bagaimana AI dapat membantu mengurangi risiko operasional, sekaligus meningkatkan kecepatan dan ketepatan pengambilan keputusan di pelabuhan. Sejalan dengan itu, beberapa perusahaan konsultan pelabuhan internasional telah mengimplementasikan model AI untuk prediksi dwell time kontainer secara individual berdasarkan jutaan data historis. Misalnya, Hamburg Port Consulting mengembangkan model machine learning untuk memprediksi dwell time setiap kontainer dan moda lanjutan yang akan digunakan, kemudian memasukkan output model tersebut ke dalam sistem perencanaan lapangan (yard planning system). Dengan cara ini, operator terminal dapat mengoptimalkan penempatan kontainer di lapangan, meminimalkan perpindahan ulang (rehandling), dan mengurangi kemacetan di yard.

Berbagai contoh di atas menunjukkan bahwa di tingkat global, pelabuhan-pelabuhan besar telah bergerak menuju paradigma "smart port", di mana data besar (big data), Internet of Things (IoT), dan kecerdasan buatan digabungkan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan operasi pelabuhan. Dalam konteks ini, Pelabuhan Tanjung Priok sebagai pelabuhan utama Indonesia perlu mengembangkan pendekatan serupa agar dapat bersaing dengan pelabuhan-pelabuhan lain di kawasan Asia Tenggara maupun global. Salah satu area yang sangat potensial untuk dikembangkan adalah analisis dan manajemen waktu bongkar muat kapal peti kemas dengan memanfaatkan kombinasi pendekatan kuantitatif klasik dan teknologi AI. Penelitian dasar yang dianalisis dalam artikel ini mengambil fokus pada analisis waktu bongkar muat kapal peti

kemas di Terminal III Tanjung Priok dengan menggunakan model antrian untuk menggambarkan interaksi antara arus peti kemas dan kapasitas fasilitas. Hasil-hasil tersebut sangat berguna sebagai pijakan awal untuk memahami hubungan antara jumlah crane, panjang dermaga, luas lapangan penumpukan, serta nilai dwell time yang dihasilkan. Namun, melihat perkembangan teknologi dan kompleksitas sistem pelabuhan modern, penelitian semacam itu dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan dimensi baru berupa pemanfaatan AI untuk prediksi dan optimasi.

Dengan kata lain, pendekatan yang ditawarkan dalam artikel ini berupaya melakukan pengayaan (enrichment) terhadap studi terdahulu. Di satu sisi, tetap mempertahankan kerangka analitis klasik berupa teori pelabuhan, teori antrian, dan perhitungan kebutuhan fasilitas (dermaga dan lapangan penumpukan) untuk menggambarkan struktur dan kapasitas terminal secara makro. Di sisi lain, memperkenalkan dan mengkaji potensi penerapan kecerdasan buatan—baik dalam bentuk model Machine Learning untuk prediksi dwell time maupun Computer Vision untuk pemantauan proses bongkar muat—sebagai pendekatan komplementer yang dapat memperbaiki akurasi prediksi dan respons operasional secara real-time. Secara konseptual, integrasi kedua pendekatan tersebut memberikan beberapa keuntungan. Pertama, model antrian membantu memahami perilaku sistem secara agregat dan memberikan gambaran makro tentang dampak penambahan fasilitas terhadap antrian dan waktu tinggal. Kedua, model Machine Learning dapat menangkap pola non-linear dan kompleks dari berbagai variabel operasional yang sulit dimodelkan secara analitis, misalnya kombinasi jadwal kapal, karakteristik muatan, pola kedatangan truk, dan faktor cuaca. Ketiga, Computer Vision memungkinkan pengamatan langsung terhadap kondisi lapangan, seperti kepadatan yard, pergerakan alat, dan potensi risiko keselamatan, sehingga data yang dihasilkan dapat menjadi masukan tambahan bagi model prediktif dan pengambilan keputusan.

Dalam konteks kebijakan, hasil penelitian ini dan pengembangan berbasis AI yang diusulkan diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi upaya pemerintah dan operator pelabuhan dalam menurunkan biaya logistik nasional. Dwelling time yang lebih pendek tidak hanya mengurangi biaya langsung seperti biaya demurrage dan storage, tetapi juga meningkatkan reliabilitas supply chain, memperbaiki ketepatan waktu pengiriman barang, dan pada akhirnya meningkatkan daya saing produk Indonesia di pasar global. Dalam jangka panjang, peningkatan kinerja pelabuhan akan mendukung pengembangan kawasan industri di sekitar pelabuhan (hinterland), memperkuat koneksi antar moda, serta mewujudkan ekosistem logistik nasional yang lebih efisien, modern, dan berkelanjutan. Dengan demikian, pendahuluan ini menempatkan penelitian yang dilakukan bukan hanya sebagai kajian teknis terhadap waktu bongkar muat kapal peti kemas di Terminal III Tanjung Priok, tetapi juga sebagai bagian dari wacana yang lebih luas tentang transformasi pelabuhan menuju smart port yang berbasis data dan kecerdasan buatan. Pada bagian selanjutnya, artikel ini akan menguraikan material dan metode yang digunakan, menyajikan hasil perhitungan dan analisis, mendiskusikan implikasi temuan dalam kerangka pengembangan pelabuhan, serta memberikan simpulan dan rekomendasi yang relevan untuk pengembangan penelitian dan kebijakan di masa mendatang

Metode

Sumber data utama penelitian ini adalah statistik arus peti kemas di Terminal III Tanjung Priok periode 2009–2013 (dalam satuan peti kemas atau TEU). Data tersebut diolah untuk memperoleh proyeksi arus peti kemas 2014–2018. Berdasarkan data historis, dilakukan peramalan linier untuk mengestimasi arus peti kemas di tahun-tahun mendatang. Selanjutnya, analisis antrian diterapkan untuk menghitung waktu layanan dan waktu tinggal kapal. Model antrian yang digunakan adalah model M/M/c (antrian eksponensial dengan c server), yang diasumsikan sebagai representasi mekanisme pelayanan crane di dermaga. Parameter laju kedatangan (λ) diukur dari arus peti kemas masuk per satuan waktu, sedangkan laju pelayanan per crane (μ) dihitung berdasarkan produktivitas crane. Sebagai ilustrasi, untuk skenario 39 crane (13 dermaga \times 3 crane), diperoleh $\lambda \approx 5,793$ peti kemas per jam dan $\mu \approx 0,0966$ peti kemas per

jam per crane. Perhitungan antrian dilakukan menggunakan perangkat lunak analisis antrian (Queueing Analysis), dan hasilnya berupa rata-rata jumlah antrian (L_q), waktu tunggu (W_q), dan waktu sistem (W). Nilai-nilai tersebut kemudian digunakan untuk menghitung dwelling time kapal (waktu tinggal kapal) sesuai metode yang diadopsi.

Untuk menentukan kebutuhan fasilitas terminal, digunakan rumus standar. Panjang dermaga (L_p) dihitung berdasarkan rumus $L_p = ABB / BTP$, di mana ABB (arus bongkar muat) adalah jumlah peti kemas yang diproses per tahun, dan BTP (Berth Throughput) adalah kapasitas throughput dermaga per unit panjang. Nilai BTP untuk dermaga peti kemas Tanjung Priok diasumsikan sebesar 700 TEU per meter per tahun. Sedangkan luas lapangan penumpukan (A) dihitung dengan rumus:

$$A = \frac{T \times DT \times A_{TEU}}{365 \times (1 - BS)}$$

di mana T adalah arus peti kemas per tahun (dalam TEU), DT adalah dwelling time rata-rata (hari), A_{TEU} adalah luas kebutuhan per TEU berdasarkan sistem penanganan peti kemas (diasumsikan 15 m²/TEU), dan BS adalah broken stowage (area terbuang, diasumsikan 25%). Perhitungan ini mengikuti metodologi backlog terminal peti kemas. Semua perhitungan di atas dijabarkan dalam perangkat lunak dan tabel perhitungan yang tersedia.

Hasil dan Pembahasan

Hasil observasi awal terhadap Terminal III Pelabuhan Tanjung Priok menunjukkan bahwa kegiatan bongkar muat peti kemas ditangani dengan pola operasi yang cukup intensif. Sistem antrian yang digunakan pada dasarnya mengikuti prinsip first in first out / first come first served, di mana kapal yang datang terlebih dahulu akan dilayani lebih dulu untuk kegiatan bongkar muat di dermaga. Dalam praktiknya, setiap dermaga dilayani oleh tiga unit crane yang difungsikan sebagai peralatan utama bongkar muat peti kemas dari dan ke kapal. Pola ini cukup lazim digunakan di berbagai terminal peti kemas modern karena dianggap mampu menyeimbangkan produktivitas dan fleksibilitas operasi.

Namun demikian, sekalipun pola operasi tersebut sudah sesuai dengan praktik umum, data menunjukkan bahwa pertumbuhan arus peti kemas di Pelabuhan Tanjung Priok jauh lebih cepat dibandingkan peningkatan kapasitas fasilitas yang tersedia. Berdasarkan data arus peti kemas tahun 2009–2013, tercatat bahwa volume peti kemas yang ditangani terus meningkat, baik untuk arus domestik maupun luar negeri. Pada kondisi ini, jumlah kapal yang menunggu giliran bersandar dan melakukan kegiatan bongkar muat cenderung bertambah, sehingga sistem antrian menjadi semakin padat. Hal ini tercermin dari meningkatnya nilai indikator kinerja seperti rata-rata jumlah pelanggan (kapal/peti kemas) dalam sistem (L), rata-rata jumlah dalam antrian (L_q), dan waktu rata-rata di dalam sistem (W). Dalam konteks teori pelabuhan, kondisi tersebut sejalan dengan pandangan Jinca (2011) dan Triatmojo (2010) yang menegaskan bahwa apabila peningkatan arus barang tidak diimbangi dengan penyediaan fasilitas yang memadai, maka pelabuhan akan mengalami penurunan kinerja berupa kemacetan, penumpukan muatan, dan meningkatnya waktu tinggal kapal. Hasil analisis empiris di Terminal III memperlihatkan pola yang serupa: peningkatan arus peti kemas yang cukup signifikan berhadapan dengan kapasitas peralatan yang relatif stagnan, sehingga sistem masuk dalam kondisi “nyaris jenuh” (utilitas mendekati 100%).

Perhitungan peramalan arus peti kemas dilakukan menggunakan data historis tahun 2009–2013. Data tersebut menunjukkan bahwa arus peti kemas (dalam box maupun TEU) mengalami tren naik dari tahun ke tahun. Sebagai ilustrasi, total arus peti kemas tahun 2009 berada pada kisaran 1,27 juta box, kemudian meningkat menjadi lebih dari 2,48 juta box pada tahun 2013. Dengan menggunakan metode peramalan linier sederhana, didapatkan prediksi bahwa untuk periode 2014–2018, arus peti kemas di Terminal III dapat mencapai angka kumulatif sekitar 19,96

juta box, atau jika dikonversi ke TEU menjadi lebih dari 33 juta TEU. Secara operasional, angka ini menggambarkan beban kerja yang sangat besar bagi sebuah terminal yang kapasitas fasilitasnya berkembang relatif lebih lambat dibanding kenaikan permintaan layanan. Temuan ini sejalan dengan bahasan Bhakty dan Nuraina (2007) mengenai pelabuhan Soekarno-Hatta Makassar, di mana peningkatan arus peti kemas yang pesat menuntut peninjauan kembali terhadap desain kapasitas terminal dan strategi pengembangannya. Dengan demikian, Terminal III Tanjung Priok juga menghadapi tantangan serupa, yaitu bagaimana mengakomodasi pertumbuhan arus peti kemas tanpa mengorbankan kinerja pelayanan dan efisiensi.

Peramalan arus ini menjadi landasan penting dalam analisis lebih lanjut, karena seluruh perhitungan antrian, dwelling time, dan kebutuhan fasilitas bergantung pada estimasi beban layanan di masa mendatang. Jika peramalan menunjukkan kenaikan signifikan, maka jelas bahwa kapasitas fasilitas eksisting berpotensi tidak lagi mencukupi. Konsekuensinya, operator pelabuhan perlu merencanakan penambahan peralatan, perpanjangan dermaga, serta perluasan lapangan penumpukan. Analisis antrian dilakukan untuk beberapa skenario jumlah crane yang melayani kegiatan bongkar muat, mulai dari kondisi eksisting (39 crane) hingga skenario peningkatan menjadi 51, 52, 53, 54, dan 55 crane. Setiap skenario dianalisis menggunakan model antrian M/M/c dengan parameter dasar laju kedatangan (λ) dan laju pelayanan per server (μ) yang diperoleh dari data operasional.

Pada skenario 39 crane (13 dermaga \times 3 crane), diperoleh tingkat pemanfaatan sistem yang sangat tinggi, yaitu sekitar 94–95%. Nilai rata-rata jumlah pelanggan dalam sistem (L) mencapai lebih dari 111 unit, dengan rata-rata jumlah pelanggan dalam antrian (Lq) sekitar 74 unit. Waktu rata-rata pelanggan (kapal/peti kemas) di dalam sistem (W) mendekati 20 jam, sedangkan waktu rata-rata dalam antrian (Wq) lebih dari 10 jam. Angka-angka ini menunjukkan bahwa sistem bekerja pada kondisi nyaris jenuh, sehingga sedikit peningkatan kedatangan kapal atau penurunan produktivitas crane dapat menyebabkan lonjakan panjang antrian dan bertambahnya waktu tunggu. Temuan ini konsisten dengan analisis Haryanto (2005) yang menunjukkan bahwa pada sistem pelayanan bongkar muat, tingginya utilisasi ($> 90\%$) berkorelasi kuat dengan peningkatan waktu tunggu. Pada skenario dengan penambahan crane, misalnya 52 crane, nilai pemanfaatan sistem menurun menjadi sekitar 90,5%. Rata-rata jumlah pelanggan dalam sistem (L) turun menjadi sekitar 78 unit, sedangkan Lq berkurang menjadi sekitar 31 unit. W juga menurun menjadi sekitar 13 jam dan Wq menjadi sekitar 4 jam. Perubahan ini mengindikasikan bahwa penambahan kapasitas server (crane) secara langsung menurunkan tingkat kemacetan di sistem dan mengurangi waktu tunggu. Dalam bahasa teori antrian, peningkatan jumlah server menyebabkan peningkatan laju pelayanan total ($c \times \mu$), sehingga sistem memiliki kemampuan lebih besar untuk menyerap kedatangan tanpa menyebabkan antrian yang terlalu panjang.

Skenario lanjutan dengan 53, 54, dan 55 crane menunjukkan tren yang relatif sama, yaitu penurunan L, Lq, W, dan Wq secara bertahap. Walaupun penurunan tidak selalu linier—karena dipengaruhi kombinasi konfigurasi parameter dan pola kedatangan—secara umum dapat disimpulkan bahwa semakin banyak crane yang tersedia, semakin rendah tingkat kemacetan sistem. Dari sudut pandang perencanaan, hal ini menunjukkan bahwa investasi dalam penambahan peralatan bongkar muat memiliki dampak langsung terhadap peningkatan kualitas pelayanan dan penurunan waktu tunggu. Hasil peramalan menunjukkan bahwa total arus peti kemas di Terminal III Tanjung Priok meningkat tajam. Untuk periode 2009–2013, jumlah peti kemas yang ditangani tercatat sebesar 9.895.841 box. Prediksi untuk periode 2014–2018 memperkirakan total sekitar 19.961.178 box (turun-naik tahunan mengikuti tren). Kondisi peningkatan arus ini mempertegas kesimpulan penelitian sebelumnya bahwa beban pelayanan terminal terus membengkak.

Berdasarkan analisis antrian, diperoleh hasil dwelling time kapal untuk kondisi peralatan terpasang (39 crane, 13 dermaga). Untuk tahun 2009–2013, waktu tinggal kapal bertambah dari 6,92 hari (2009) menjadi 14,08 hari (2012) dan sedikit menurun menjadi 14,08 hari (2013). Nilai ini jauh melampaui standar 3–6 hari; misalnya tahun 2009 masih di sekitar 6–7 hari, namun pada

2012-2013 menyentuh 14 hari (lihat Tabel 3). Hasil serupa tercermin di abstrak penelitian ini. Dwelling time sebesar itu diakibatkan oleh pemanfaatan sistem yang hampir penuh (utilization $\approx 94\text{--}95\%$). Selanjutnya dilakukan simulasi penambahan crane untuk menekan dwelling time. Dengan menambah jumlah crane menjadi 51–55 unit (melalui penambahan 1–2 crane per dermaga), diperoleh waktu tinggal kapal yang jauh lebih pendek. Tabel perhitungan menunjukkan bahwa pada 2014, dengan 51 crane, dwelling time dapat ditekan menjadi 6,27 hari; 2015 (52 crane) menjadi 6,07 hari; 2016 (55 crane) 5,85 hari; 2017–2018 (55 crane) masing-masing 6,37 dan 6,82 hari. Secara keseluruhan, penambahan peralatan ini mampu menekan dwelling time mendekati target ~ 6 hari (rata-rata 2014–2018 $\approx 6,3$ hari). Pencapaian waktu tinggal tersebut tergolong signifikan dibandingkan kondisi awal di atas 11 hari. Dengan demikian, peningkatan jumlah crane efektif untuk mengurangi kemacetan dan mempercepat turnover kapal.

Hasil perhitungan kebutuhan fasilitas selengkapnya ditunjukkan pada Tabel berikut. Panjang dermaga yang diperlukan meningkat seiring meningkatnya arus peti kemas. Berdasarkan metode arus bocoran (Arus Bongkar Muat), dibutuhkan panjang dermaga kumulatif sekitar 1.809 m pada 2009, meningkat menjadi 3.542 m pada 2013. Prediksi kebutuhan dermaga tahun 2014–2018 terus naik, mencapai 4.249 m pada 2014 hingga 7.339 m pada 2018. Dengan kata lain, studi ini memprediksi bahwa panjang dermaga eksisting belum mencukupi jika arus peti kemas terus bertambah. Demikian pula luas lapangan penumpukan yang diperlukan sangat besar. Perhitungan menunjukkan bahwa luas lapangan yang optimal adalah sekitar 97,8 ha pada 2014, lalu meningkat hingga 168,9 ha pada 2018, asalkan dwelling time berhasil dikendalikan di 6 hari. Angka-angka ini jauh melampaui luas yang tersedia saat ini, sehingga mengindikasikan perlunya perluasan areal kontainer.

Temuan di atas mempertegas pentingnya penambahan fasilitas bongkar muat untuk menekan dwell time kapal. Penambahan crane terbukti mengurangi waktu tinggal, namun di sisi lain peningkatan arus kontainer memerlukan perluasan infrastruktur dermaga dan lapangan penumpukan. Dalam konteks ini, pendekatan berbasis kecerdasan buatan (AI) dapat dijadikan pelengkap bagi analisis konvensional. Misalnya, Yoon et al. (2023) menggunakan beberapa model Machine Learning untuk memprediksi dwell time kapal kontainer. Mereka mengembangkan model regresi ML (seperti CatBoost) yang dilatih dengan data historis jadwal tambat kapal, dan memperoleh error prediksi rendah (MAE ≈ 248 menit). Demikian pula di industri, Hamburg Port Consulting (HPC) mengembangkan model ML untuk memprediksi dwelling time individu setiap kontainer berdasarkan jutaan catatan data. Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa ML dapat mengidentifikasi pola tersembunyi dalam data pelabuhan yang sulit ditangkap oleh metode tradisional.

Di sisi lain, teknologi Computer Vision mulai diimplementasikan untuk pemantauan operasional terminal. Misalnya, ABB menyatakan bahwa sistem Optical Character Recognition (OCR) berbasis AI mampu meningkatkan akurasi pembacaan nomor kontainer secara otomatis. Teknik vision real-time juga dapat digunakan untuk deteksi visual lainnya; AllRead Technologies (2025) misalnya, telah mengembangkan sistem yang menganalisis citra kontainer saat melewati terminal secara real-time, mendeteksi kerusakan atau ketidaksesuaian pada kontainer tanpa campur tangan manual. Konsep serupa dapat diadaptasi untuk monitoring proses crane, misalnya deteksi kemacetan aktivitas pengangkatan atau pendekripsi objek di sekitar crane untuk keselamatan. Integrasi AI dan data visual tersebut memberikan dimensi baru dalam pengukuran kinerja pelabuhan secara akurat dan waktu nyata. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini konsisten dengan temuan sebelumnya bahwa peningkatan fasilitas bongkar muat dapat menekan dwelling time kapal. Analisis menunjukkan bahwa tanpa penambahan crane, dwelling time akan terus jauh di atas target, sementara penambahan perangkat dapat membawa dwelling time ke kisaran ideal. Namun, perlu dicatat bahwa solusi peningkatan jumlah crane harus diimbangi dengan perluasan dermaga dan lapangan penumpukan agar terminal dapat menangani arus kontainer yang semakin padat. Pendekatan baru berbasis AI menawarkan peluang untuk lebih mengoptimalkan pengelolaan terminal: algoritma ML dapat meningkatkan akurasi prediksi waktu tinggal dan perlunya resources, sedangkan sistem Computer Vision dapat memantau proses

operasional secara otomatis. Pemanfaatan kedua teknologi ini dapat menjadi topik penelitian lanjutan untuk mendukung efisiensi penanganan peti kemas di masa mendatang.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan, analisis, dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa simpulan utama. Pertama, kondisi eksisting Terminal III Pelabuhan Tanjung Priok pada periode 2009–2013 menunjukkan bahwa arus peti kemas mengalami peningkatan yang cukup tinggi, sementara kapasitas fasilitas, khususnya jumlah crane dan panjang dermaga, tidak meningkat secara proporsional. Akibatnya, sistem bongkar muat memasuki kondisi utilisasi yang sangat tinggi (mendekati 95%), yang secara langsung meningkatkan panjang antrian dan waktu tunggu kapal. Hal ini tercermin dari nilai dwelling time yang meningkat dari sekitar 6,92 hari pada 2009 menjadi lebih dari 14 hari pada 2012–2013, jauh di atas standar yang diharapkan. Kedua, hasil analisis antrian dengan model M/M/c menegaskan bahwa keterbatasan peralatan bongkar muat merupakan faktor kunci yang menyebabkan lamanya dwelling time. Dengan hanya 39 crane yang melayani 13 dermaga, rata-rata jumlah pelanggan dalam sistem dan antrian sangat tinggi, sementara waktu rata-rata dalam sistem (W) dan dalam antrian (W_q) juga berada pada tingkat yang tidak efisien. Simulasi penambahan crane secara bertahap menjadi 51–55 unit menunjukkan penurunan signifikan pada nilai L , L_q , W , dan W_q , yang kemudian tercermin pada penurunan dwelling time menuju kisaran 6–7 hari. Hal ini menegaskan bahwa peningkatan kapasitas peralatan merupakan langkah strategis untuk memperbaiki kinerja terminal. Ketiga, perhitungan kebutuhan panjang dermaga dan luas lapangan penumpukan memperlihatkan bahwa pertumbuhan arus peti kemas harus diimbangi dengan pengembangan infrastruktur secara fisik. Kebutuhan panjang dermaga diperkirakan mencapai sekitar 7.339 meter pada 2018, sementara luas lapangan penumpukan yang diperlukan dapat mencapai hampir 170 hektar dengan asumsi dwelling time sekitar 6 hari. Tanpa upaya perpanjangan dermaga dan perluasan yard, peningkatan jumlah crane sekalipun dapat menimbulkan bottleneck baru di sisi lain sistem, terutama di lapangan penumpukan. Karena itu, perencanaan pelabuhan harus holistik, mencakup peralatan, dermaga, dan yard secara terpadu. Keempat, dari sudut pandang kebijakan dan manajemen, penelitian ini menegaskan bahwa penurunan dwelling time tidak bisa hanya mengandalkan perbaikan proses administratif, tetapi juga memerlukan investasi nyata dalam peralatan dan infrastruktur. Upaya pemerintah untuk menargetkan dwelling time tiga hari hanya dapat dicapai jika operator pelabuhan memiliki kapasitas yang cukup untuk memproses arus peti kemas secara cepat, baik di sisi laut (dermaga dan crane) maupun di sisi darat (yard dan gate). Di saat yang sama, simplifikasi prosedur dan digitalisasi dokumen tetap penting untuk mengurangi keterlambatan non-teknis. Kelima, dalam konteks perkembangan teknologi, hasil penelitian ini membuka peluang pengembangan lebih lanjut melalui integrasi pendekatan kecerdasan buatan (AI). Model antrian dan perhitungan kebutuhan fasilitas yang dihasilkan dapat dijadikan basis untuk membangun model Machine Learning yang memprediksi dwelling time dan kebutuhan kapasitas secara lebih dinamis, dengan memasukkan variabel-variabel tambahan seperti karakteristik kapal, pola kedatangan truk, dan kondisi cuaca. Di samping itu, penerapan Computer Vision pada sistem CCTV pelabuhan dapat menyediakan data visual real-time tentang kepadatan yard, pergerakan alat, dan potensi risiko keselamatan. Integrasi data numerik dan visual ini akan memperkaya kemampuan analisis dan pengambilan keputusan di terminal.

Keenam, secara akademik, penelitian ini berkontribusi pada literatur mengenai analisis kinerja terminal peti kemas di Indonesia, khususnya yang berkaitan dengan dwelling time dan perencanaan fasilitas. Dengan menunjukkan hubungan yang jelas antara jumlah crane, panjang dermaga, luas yard, dan dwelling time, penelitian ini memberikan contoh konkret bagaimana pendekatan teoritis (teori pelabuhan dan teori antrian) dapat diterapkan pada studi kasus nyata di pelabuhan nasional. Hal ini sejalan dengan pemikiran Jinca (2011) dan Triatmojo (2010) mengenai pentingnya perencanaan pelabuhan yang berbasis analisis kuantitatif. Ketujuh, dari sisi praktis, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan bagi operator pelabuhan dan pemerintah dalam merumuskan kebijakan pengembangan Terminal III Tanjung Priok maupun terminal lain yang memiliki karakteristik serupa. Rekomendasi yang dapat ditarik antara lain: (1) melakukan penambahan jumlah crane secara bertahap sesuai proyeksi arus peti kemas, (2)

merencanakan perpanjangan dermaga dan perluasan yard dalam kerangka masterplan jangka menengah–panjang, serta (3) mengintegrasikan sistem informasi operasional dengan teknologi AI untuk meningkatkan kemampuan prediksi dan pemantauan kinerja. Kedelapan, penelitian ini memiliki keterbatasan yang perlu diakui dan dapat menjadi agenda penelitian lanjutan. Di antaranya, model antrian yang digunakan masih mengasumsikan pola kedatangan dan pelayanan yang bersifat Poisson dan eksponensial (M/M/c), padahal dalam kenyataan, distribusi kedatangan kapal dan produktivitas crane bisa lebih kompleks dan dipengaruhi banyak faktor. Selain itu, penelitian ini belum mengimplementasikan model Machine Learning dan Computer Vision secara langsung, melainkan baru mengusulkannya sebagai pengembangan konsep. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk: (1) Menguji penggunaan model antrian yang lebih kompleks atau simulasi berbasis kejadian diskrit (discrete-event simulation); (2) Mengembangkan dan menguji model Machine Learning nyata untuk prediksi dwelling time menggunakan data operasional pelabuhan; (3) membangun prototipe sistem Computer Vision untuk memantau area kritis di terminal (dermaga, yard, dan gate). Secara keseluruhan, simpulan yang dapat dipegang adalah bahwa peningkatan kapasitas fisik dan operasional Terminal III Pelabuhan Tanjung Priok, jika dikombinasikan dengan pemanfaatan teknologi AI, berpotensi besar untuk menurunkan dwelling time, meningkatkan efisiensi bongkar muat, serta memperkuat daya saing logistik nasional. Penelitian ini menjadi langkah awal yang menggabungkan analisis klasik dengan gagasan penguatan digital berbasis kecerdasan buatan, yang diharapkan dapat berkembang menjadi kerangka pengelolaan pelabuhan yang lebih cerdas dan berkelanjutan di masa mendatang.

Daftar Pustaka

- ABB Marine & Ports. (2020). *AI accelerates productivity and safety in the world of ports*. ABB News Center.
- AllRead Technologies S.L. (2025). *How computer vision is making port container inspections safer*. AllRead Blog.
- Artakusuma, A. (2020). *Analisis dwelling time import container di Pelabuhan Peti Kemas Jakarta International Container Terminal (JICT) Tanjung Priok* (Skripsi). Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan.
- Bhakty, E. T., & Nuraina, N. (2007). *Analisa pengembangan terminal peti kemas Pelabuhan Soekarno-Hatta Makassar* (Skripsi). Jurusan Teknik Sipil, Universitas Janabadra.
- Hamburg Port Consulting. (2020). *AI-based container dwell time prediction* [Project highlight]. Retrieved from www.hamburgportconsulting.com
- Haryanto. (2005). *Analisa sistem pelayanan bongkar muat peti kemas dengan model antrian* (Skripsi). Jurusan Teknik Sipil, Universitas Diponegoro.
- Jinca, M. Y. (2011). *Transportasi Laut Indonesia: Analisis Sistem & Studi Kasus*. Surabaya: Brilian Internasional.
- Merckx, F. (2005). *The issue of dwell time charges to optimize container terminal capacity*. Transport and Regional Economics, University of Antwerp.
- RumahKsporlmpor. (n.d.). Retrieved from <http://rumaheksporimpor.blogspot.com>
- Triatmojo, B. (2010). *Perencanaan Pelabuhan*. Yogyakarta: Beta Offset.

Yoon, J.-H., Kim, S.-W., Jo, J.-S., & Park, J.-M. (2023). A comparative study of machine learning models for predicting vessel dwell time estimation at a terminal in the Busan New Port. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), 1846. <https://doi.org/10.3390/jmse11101846>