



PAPER – OPEN ACCESS

Model Investasi Infrastruktur Pelabuhan dalam Menjawab Pertumbuhan Volume Petikemas Nasional Dengan Pendekatan Sistem Dinamis

Author : Imam Patria Ranggis, et al
DOI : 10.32734/ee.v9i2.2789
Electronic ISSN : 2654-704X
Print ISSN : 2654-7031

Volume 9 Issue 2 – 2026 TALENTA Conference Series: Energy & Engineering (EE)



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/).

Published under licence by TALENTA Publisher, Universitas Sumatera Utara



Model Investasi Infrastruktur Pelabuhan dalam Menjawab Pertumbuhan Volume Petikemas Nasional Dengan Pendekatan Sistem Dinamis

Imam Patria Ranggis, Armand Omar Moeis, Andre Febrinal

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, Depok 16424, Indonesia
Imam.patria@ui.ac.id, armand.omar@ui.ac.id, andre.febrinal@ui.ac.id

Abstrak

Pertumbuhan volume peti kemas nasional Indonesia yang mencapai lebih dari 17 juta TEUs pada tahun 2023 dengan tren kenaikan 5–7% per tahun menciptakan tekanan struktural yang signifikan terhadap infrastruktur pelabuhan yang ada. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model *System Dynamics* (SD) untuk mengevaluasi efektivitas berbagai skenario kebijakan investasi infrastruktur pelabuhan dalam mengakomodasi pertumbuhan tersebut secara berkelanjutan. Model dibangun melalui *Causal Loop Diagram* (CLD) dan *Stock and Flow Diagram* (SFD) yang mengintegrasikan tiga sektor utama: permintaan, kapasitas operasional, dan finansial. Validasi model menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) menghasilkan nilai 17%, yang diklasifikasikan sebagai *good forecasting* berdasarkan kriteria Lewis (1982). Simulasi dijalankan selama horizon 25 tahun (2025–2050) pada tiga skenario: *Business as Usual* (BAU), Agresif, dan Bertahap. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Skenario Agresif menghasilkan akumulasi *Container Demand* tertinggi sebesar 25 juta TEU dan *Container Throughput* mendekati 23 juta TEU pada 2050, dengan *Berth Competitiveness* yang secara konsisten dipertahankan di atas skor 0,6.

Kata Kunci: *System Dynamics*; investasi infrastruktur pelabuhan; peti kemas; *terminal block size*; *berth competitiveness*

Abstract

The growth of Indonesia's national container volume, which exceeded 17 million TEUs in 2023 with an average annual increase of 5–7%, has imposed significant structural pressure on existing port infrastructure. This study aims to develop a *System Dynamics* (SD) model to evaluate the effectiveness of various port infrastructure investment policy scenarios in sustainably accommodating this growth. The model was constructed through a *Causal Loop Diagram* (CLD) and *Stock and Flow Diagram* (SFD) integrating three core sectors: demand, operational capacity, and financial constraints. Model validation using *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) yielded a value of 17%, classified as *good forecasting* according to Lewis (1982) criteria. Simulations were executed over a 25-year horizon (2025–2050) across three scenarios: *Business as Usual* (BAU), Aggressive, and Incremental. Results demonstrate that the Aggressive Scenario produces the highest *Container Demand* accumulation of 25 million TEUs and *Container Throughput* approximately almost 24 million TEUs on 2050, with the *Berth Competitiveness* consistently above 0.6.

Keywords: *System Dynamics*; port infrastructure investment; container; *terminal block size*; *berth competitiveness*

1. Pendahuluan

Perdagangan internasional modern bertumpu sangat erat pada sistem angkutan laut, di mana lebih dari 90% volume perdagangan dunia diangkut melalui jalur maritim (UNCTAD). Bagi Indonesia sebagai negara kepulauan dengan lebih dari 17.000 pulau, pelabuhan mengemban fungsi ganda: menopang distribusi domestik sekaligus menjadi gerbang utama ekspor-impor. Data Badan Pusat Statistik (BPS, 2024) mencatat *throughput* peti kemas nasional melampaui 17 juta *twenty-foot equivalent units* (TEUs) pada tahun 2023 dengan tren kenaikan rata-rata 5–7% per tahun. Momentum ini diperkuat laporan PT. Pelindo [1], yang mengungkapkan pertumbuhan arus peti kemas internasional sebesar 13,64% pada semester pertama 2025, dari 1,8 juta menjadi

2,1 juta TEUs. Pada tataran global, 858 juta TEUs ditangani seluruh pelabuhan dunia sepanjang 2023, menandai pertumbuhan satu dekade sebesar 33% (Data Hub Maritime and Other Transport, 2023). Lonjakan ini menegaskan bahwa tekanan terhadap infrastruktur pelabuhan bukan lagi fenomena siklikal, melainkan tekanan struktural permanen yang menuntut respons kebijakan investasi yang sistematis.

Di tengah trajektori pertumbuhan tersebut, pelabuhan-pelabuhan utama Indonesia seperti Tanjung Priok dan Tanjung Perak justru beroperasi pada tingkat utilisasi yang melampaui 85%, memicu antrean kapal, penurunan produktivitas, dan pembengkakan biaya logistik. World Bank *Logistics Performance Index* (2023) mencatat biaya logistik Indonesia masih berada di kisaran 23% dari PDB, jauh melampaui Malaysia (13%) dan Thailand (15%). Kondisi ini diperparah oleh lemahnya konektivitas jaringan pelabuhan dalam konteks maritim global: kajian [2], menunjukkan Pelabuhan Jakarta hanya mencatatkan indeks *metric connectivity* sebesar 40,05, sangat tertinggal dibandingkan Singapura yang mencapai 130,86. Persoalan pelabuhan Indonesia dengan demikian tidak semata berdimensi kapasitas fisik, tetapi juga menyentuh posisi strategis dalam jaringan logistik maritim global. Akar dari persoalan ini adalah ketidaksinkronan antara laju pertumbuhan permintaan dan laju penyediaan kapasitas infrastruktur. Proses perencanaan, pendanaan, dan konstruksi membutuhkan *lead time* dua hingga lima tahun, sementara permintaan terus bergerak tanpa jeda. Kondisi ini menciptakan siklus kemacetan yang bersifat *self-reinforcing*: utilisasi menembus ambang aman, *waiting time* meningkat, dan daya saing pelabuhan tergerus [3]. Di sisi lain, investasi yang terlalu agresif tanpa proyeksi permintaan yang akurat dapat melahirkan *idle capacity* yang menekan profitabilitas. Fenomena interaksi berlapis ini dikenal sebagai *dynamic complexity*, dan tidak secara memadai melalui pendekatan analisis statis.

Berbagai peneliti telah mengaplikasikan *System Dynamics* (SD) untuk menelaah aspek operasional pelabuhan. mendemonstrasikan relevansi model SD dalam menganalisis kebijakan mitigasi kemacetan melalui integrasi sub-sistem manajemen waktu, kualitas, dan keuntungan. [4], membangun model SD untuk menyelidiki hubungan interaktif antar faktor inti dalam sistem operasi pelabuhan kontainer. menganalisis mekanisme tata kelola kemacetan dari perspektif interaksi operator dan otoritas pemerintah. Model SD untuk strategi mitigasi kemacetan dengan fokus pada investasi kapasitas dermaga dan adopsi teknologi, sementara memandang pelabuhan sebagai "sistem dari sistem." [5], mengoptimalkan strategi investasi dengan mempertimbangkan ketidakpastian permintaan, dan mengoptimalkan kinerja investasi adaptasi pelabuhan melalui model evolusi kaskade. Menganalisis *Marginal Cost Pricing* sebagai disiplin penetapan harga, menguji dampak investasi terhadap konektivitas, serta [6], menawarkan kerangka adaptasi berbasis risiko iklim gabungan (*compound climate risk*). Namun, terdapat tiga *research gap* yang belum terjawab: pertama, belum ada model SD berskala makro-nasional yang mengkaji investasi infrastruktur pelabuhan secara agregat di Indonesia dengan mengintegrasikan variabel kebijakan nasional sebagai penentu laju investasi; kedua, sebagian besar literatur memisahkan optimasi operasional dari analisis kelayakan finansial sehingga mengabaikan dampak dinamis akumulasi beban utang terhadap kapasitas OPEX; ketiga, belum ada model SD yang dikalibrasi menggunakan data historis Indonesia secara spesifik. Ketiga celah ini sekaligus merupakan kebaruan (*novelty*) penelitian ini.

Bertolak dari gap tersebut, studi ini bertujuan mengembangkan dan memvalidasi model *System Dynamics* untuk merepresentasikan dinamika investasi infrastruktur pelabuhan terhadap pertumbuhan volume peti kemas nasional. Secara spesifik: (1) membangun *Causal Loop Diagram* dan *Stock and Flow Diagram* yang mengintegrasikan sub-sistem permintaan, kapasitas fisik, kinerja operasional, dan konstrain kas finansial; (2) menganalisis dampak *construction time delay* terhadap *Target Utilization*, *Waiting Time*, *Berth Competitiveness*, dan *Demand Loss*; (3) mensimulasikan efektivitas skenario kebijakan berdasarkan variasi *Terminal Block Size*; serta (4) merumuskan rekomendasi investasi proaktif untuk mencegah defisit kapasitas kronis. Model ini dirancang sebagai instrumen *Decision Support System* strategis bagi manajemen pelabuhan, sekaligus sebagai *baseline model* bagi peneliti selanjutnya dalam mengkaji ekosistem logistik maritim Indonesia.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menganut paradigma kuantitatif-simulatif dengan metodologi *System Dynamics* (SD) sebagai kerangka analisis utama. Pendekatan ini dipilih karena mampu merepresentasikan perilaku kompleks sistem investasi infrastruktur pelabuhan yang melibatkan interaksi dinamis antara pertumbuhan permintaan peti kemas, kapasitas operasional, dan struktur finansial secara simultan. Berbeda dari pendekatan linear konvensional, SD memandang sistem pelabuhan sebagai ekosistem yang saling memengaruhi, di mana keputusan di satu segmen menghasilkan efek *feedback* ke segmen lainnya. Hipotesa dinamis yang melandasi penelitian ini berpijak pada proposisi bahwa sistem pelabuhan berada dalam kondisi *constrained growth*, di mana permasalahan utama bukan semata keterbatasan fisik infrastruktur, melainkan *time mismatch* antara laju pertumbuhan permintaan dan realisasi kapasitas akibat *lead time* konstruksi yang panjang. Penelitian dilaksanakan di terminal peti kemas PT. Pelindo, Jl. Yos Sudarso No. 9, Koja, Jakarta Utara, dengan periode pengumpulan data Agustus 2025 hingga Juni 2026 dan horizon simulasi 25 tahun (2025–2050). Pemodelan mengaplikasikan tiga instrumen hierarkis. Pertama, *System Diagram* sebagai kanvas konseptual yang memetakan batas sistem dan tiga skenario kebijakan: *Business as Usual* (BAU), Agresif, dan Bertahap, dengan *Terminal Block Size* sebagai variabel pembeda. Kedua, *Causal Loop Diagram* (CLD) yang mengadopsi modul operasional [7] dan modul finansial [8], mengidentifikasi *Reinforcing Loop* (R1) serta *Balancing Loop* (B1 dan B3). Ketiga, *Stock and Flow Diagram* (SFD)

yang menerjemahkan CLD ke dalam persamaan matematis melalui tiga sektor terintegrasi: Permintaan, Kapasitas Operasional, dan Finansial.

Data bersumber dari kombinasi wawancara terstruktur dengan *stakeholders* dan data sekunder kredibel. Parameter utama meliputi kapasitas awal *Infrastructure Capacity* sebesar 8.000.000 TEUs, *Average Demand* sebesar 7.926.435 TEUs/tahun, dan *Service Price* IDR 2.000.000/TEUs yang bersumber dari RIP KEPMENHUB No. KM 11 Tahun 2024. Parameter *GDP Growth* (5%/tahun) dan *Interest Rate* (6%/tahun) diperoleh dari Bank Indonesia, sementara *Unit Cost of Capacity* sebesar IDR 16.000.000/TEUs bersumber dari Laporan Tahunan 2024 PT Pelindo. Model mengintegrasikan total 59 variabel. Validasi dilaksanakan melalui tiga prosedur berjenjang: *Integration Error Test* dengan variasi *time step* (90, 180, 360 hari) yang membuktikan keluaran model tidak sensitif terhadap perubahan interval integrasi; *Boundary Adequacy Test* melalui *Focus Group Discussion* (FGD) bersama *problem owner* di bidang logistik maritim; serta *Behavior Reproduction Test* menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) yang menghasilkan nilai 17%. Berdasarkan kriteria Lewis (1982), nilai ini terklasifikasi sebagai *good forecasting*, membuktikan model mampu mereplikasi tren historis sistem pelabuhan secara akurat dan reliabel untuk proyeksi skenario kebijakan investasi jangka Panjang

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Perancangan Alternatif Skenario

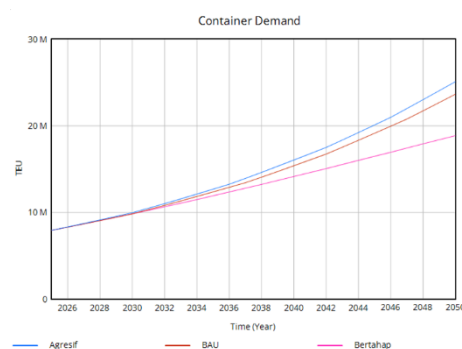
Untuk mengevaluasi ketahanan kebijakan investasi infrastruktur pelabuhan dalam merespons pertumbuhan volume peti kemas nasional, penelitian ini merancang tiga skenario utama yang dibedakan berdasarkan dua parameter keputusan kritis: *Target Utilization* sebagai ambang batas pemicu waktu investasi, dan *Terminal Block Size* sebagai besaran skala fisik ekspansi. Pendekatan tiga skenario ini selaras dengan kerangka yang digunakan [9] dalam menganalisis kebijakan mitigasi kemacetan pelabuhan, serta [10] yang mengeksplorasi skala dan waktu optimal investasi infrastruktur bagi otoritas pelabuhan dengan perilaku sensitif risiko.

Tabel 1. Alternatif Skenario

Variabel	Satuan	Business as Usual (BAU)	Agresif	Bertahap
Target Utilization	Dimensionless	0.8	0.65	0.8
Terminal Blok Size	TEU	3000000	3000000	500000

Skenario *Business as Usual* (BAU) merepresentasikan pola kebijakan konvensional yang umum diterapkan pengelola pelabuhan saat ini, di mana keputusan investasi baru terpicu ketika utilisasi mencapai 80% dengan penambahan kapasitas sebesar 3.000.000 TEU setiap siklusnya. Skenario Agresif mempertahankan *terminal block size* yang sama namun menurunkan *threshold* investasi secara drastis menjadi 65%, sehingga pembangunan infrastruktur selalu dieksekusi lebih awal sebelum utilisasi mencapai titik kritis. Pendekatan ini memprioritaskan *level of service* di atas efisiensi modal jangka pendek, sebagaimana diargumentasikan oleh [11] bahwa ketepatan waktu investasi merupakan variabel penentu utama daya saing operator pelabuhan. Sementara itu, Skenario Bertahap (*Incremental*) mengusulkan pergeseran paradigma menuju investasi modular dengan *terminal block size* yang jauh lebih kecil yakni 500.000 TEU, guna meminimalkan risiko *idle capacity* dan menjaga kesehatan arus kas, sejalan dengan prinsip optimasi modal yang dikaji dalam konteks investasi pelabuhan di bawah ketidakpastian permintaan kargo.

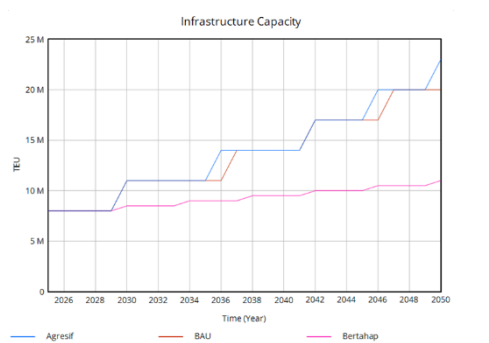
3.2. Analisis Skenario Akumulasi Container Demand



Gambar 1. Grafik Container Demand

Proyeksi akumulasi *Container Demand* selama horizon simulasi 25 tahun (2025–2050) mengungkapkan divergensi yang semakin melebar antara ketiga skenario, bermula dari titik acuan faktual yang sama pada kisaran 8 juta TEU di tahun 2025. Fenomena divergensi ini secara akademis mengonfirmasi berjalannya mekanisme *reinforcing loop* dan *balancing loop* di dalam struktur model, yang intensitasnya sangat dipengaruhi oleh respons kapasitas infrastruktur terhadap tekanan permintaan. Skenario Agresif mencapai akumulasi *Container Demand* tertinggi yakni sekitar 25 juta TEU pada tahun 2050, karena investasi yang proaktif memastikan kapasitas layanan selalu berada di atas kurva permintaan sehingga potensi pasar terkonversi secara maksimal. Skenario BAU menghasilkan akumulasi sekitar 23,5 juta TEU, di mana kesenjangan 1,5 juta TEU terhadap skenario Agresif secara kuantitatif merepresentasikan *opportunity loss* akibat keterlambatan respons kapasitas. Skenario Bertahap hanya mampu mencapai sekitar 19 juta TEU, karena ekspansi parsial memicu *balancing loop* yang lebih awal dan menekan laju masuknya permintaan baru. Hasil ini memperkuat temuan [12] bahwa ketidakcukupan investasi infrastruktur secara sistemik membatasi potensi penyerapan arus peti kemas dalam jangka panjang.

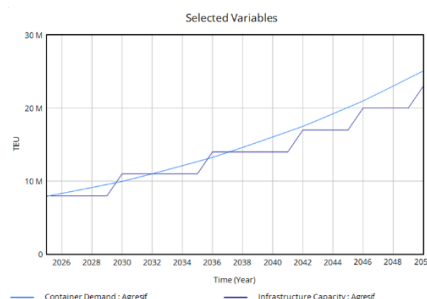
3.3. Analisis Skenario *Infrastructure Capacity*



Gambar 2. Grafik *Infrastructure Capacity*

Berbeda dari kurva permintaan yang membentuk lintasan eksponensial mulus, grafik *Infrastructure Capacity* pada ketiga skenario membentuk pola kurva berundak (*step function*), yang secara teoretis mengonfirmasi perilaku sistem yang logis dan valid. Penambahan kapasitas fisik pelabuhan tidak berlangsung secara malar, melainkan diskret mengikuti penyelesaian proyek konstruksi pada titik-titik waktu tertentu setelah melampaui *Construction Time*. Pada Skenario Agresif, ekspansi infrastruktur berlangsung secara masif dan lebih awal dengan lonjakan kapasitas yang signifikan pada sekitar tahun 2030, 2035, dan melesat hingga sekitar 23 juta TEU pada 2050. Skenario BAU mencerminkan lintasan ekspansi konvensional yang mencapai 20 juta TEU, namun dengan *time delay* yang nyata dibandingkan skenario Agresif, membuktikan bahwa respons investasi yang reaktif menciptakan jeda sistemik antara kebutuhan kapasitas dan realisasi fisiknya. Skenario Bertahap menunjukkan lintasan yang sangat konservatif dengan kapasitas akhir hanya menyentuh 11 juta TEU pada 2050, mengonfirmasi bahwa penggunaan *terminal block size* yang terlalu kecil, meskipun menekan risiko finansial, justru menyebabkan sistem pelabuhan tidak mampu menyerap potensi pertumbuhan pasar secara penuh, sebagaimana dikritisi [13] dalam konteks kinerja investasi adaptasi pelabuhan yang tidak memadai.

3.4. Analisis Interaksi Kapasitas Infrastruktur dan Permintaan pada Skenario Agresif

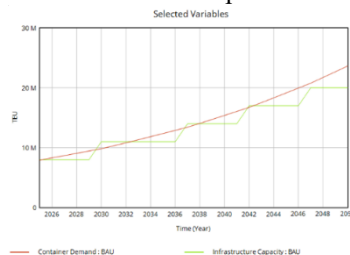


Gambar 3. Grafik *Container Demand vs Infrastructure Capacity Skenario Agresif*

Visualisasi komparatif antara *Container Demand* dan *Infrastructure Capacity* pada Skenario Agresif mengungkapkan bahwa garis permintaan secara periodik memotong dan berada di atas garis kapasitas pada rentang waktu 2032–2035, 2037–2041, dan 2043–2045. Fenomena persinggungan ini merepresentasikan terjadinya defisit kapasitas sementara (*capacity shortfall*) yang

merupakan konsekuensi logis dari pengaruh kuat *time delay* dalam struktur model, khususnya *Construction Time*. Laju pertumbuhan permintaan yang bersifat eksponensial seringkali mendahului penyelesaian proyek infrastruktur, memaksa sistem beroperasi dalam kondisi *over-utilization* pada periode transisi. Temuan ini selaras dengan [14] yang mendemonstrasikan bahwa jeda waktu konstruksi merupakan variabel paling dominan dalam membentuk pola *bottleneck* operasional bahkan pada skenario investasi agresif sekalipun. Meskipun demikian, secara agregat Skenario Agresif berhasil menjaga batas atas kapasitas mendekati 23 juta TEU pada 2050, membuktikan bahwa pendekatan investasi proaktif dengan *terminal block size* yang memadai mampu mengawal tren pertumbuhan jangka panjang secara lebih efektif.

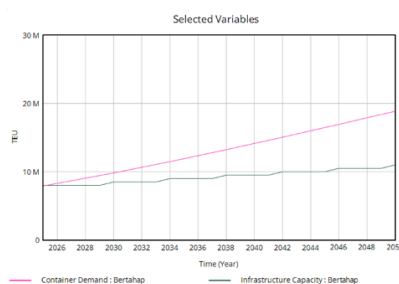
3.5. Analisis Interaksi Kapasitas Infrastruktur dan Permintaan pada Skenario *Business as Usual* (BAU)



Gambar 4. Grafik *Container Demand vs Infrastructure Capacity Skenario BAU*

Profil interaksi kedua kurva pada Skenario BAU memperlihatkan risiko operasional yang jauh lebih tinggi, ditandai dengan fenomena defisit kapasitas yang bersifat kronis dan berulang. Kurva permintaan mendominasi kurva kapasitas selama periode panjang: fase kritis berlangsung dari 2031 hingga 2036, berulang pada 2037 hingga 2041, dan kembali dari 2042 hingga 2046. Mekanisme investasi yang reaktif di mana inisiasi proyek baru hanya disetujui setelah utilisasi mencapai titik jenuh menyebabkan durasi *Construction Time* terlewat saat laju permintaan sudah melesat jauh. Hal ini mengonfirmasi argumentasi [15] bahwa ketidakseimbangan antara respons regulator/operator dan tekanan permintaan pasar merupakan akar dari kemacetan sistemik pelabuhan. Puncak dari akumulasi dampak kebijakan reaktif ini terlihat pada akhir periode simulasi, di mana *Infrastructure Capacity* tertahan pada angka 20 juta TEU sementara *Container Demand* melesat melampaui 23 juta TEU, menghasilkan kesenjangan permanen lebih dari 3 juta TEU yang mencerminkan *lost opportunity* dan potensi stagnasi logistik nasional jika pola BAU dipertahankan.

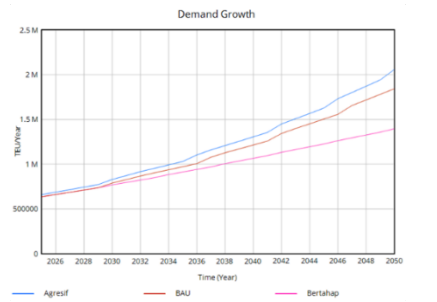
3.6. Analisis Interaksi Kapasitas Infrastruktur dan Permintaan pada Skenario Bertahap



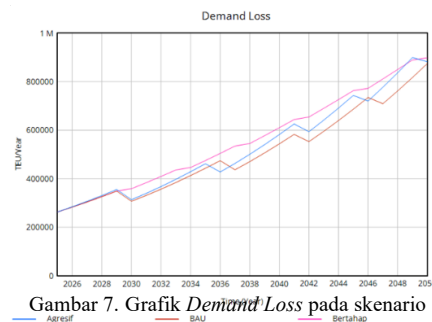
Gambar 5. Grafik *Container Demand vs Infrastructure Capacity Skenario Bertahap*

Skenario Bertahap memperlihatkan divergensi paling ekstrem di antara ketiga skenario yang diuji. Kurva *Infrastructure Capacity* tertinggal sangat jauh di bawah kurva permintaan sepanjang periode simulasi, menghasilkan defisit lebih dari 8 juta TEU yang bersifat permanen pada tahun 2050 di mana permintaan hampir menyentuh 19 juta TEU sementara kapasitas hanya bertahan di kisaran 11 juta TEU. Kondisi di mana volume permintaan secara konsisten melampaui kapasitas terpasang memaksa sistem beroperasi dengan tingkat utilisasi yang melampaui ambang kritis, memicu efek *balancing loop* yang destruktif berupa lonjakan *Waiting Time* dan antrean lapangan penumpukan yang tidak terkendali. Pendekatan modular dengan *terminal block size* yang sangat kecil terbukti menghasilkan injeksi kapasitas yang terlalu minim untuk merespons daya dorong *demand rate* yang bersifat eksponensial. Hasil ini memperkuat temuan Qian et al. (2018) bahwa ketidakseimbangan antara kapasitas fisik dan tekanan permintaan dalam sistem operasi pelabuhan kontainer menciptakan fluktuasi kinerja yang bersifat non-linear dan sulit dipulihkan tanpa intervensi investasi yang substansial. Analisis ini membuktikan bahwa penghematan modal di awal tidak sebanding dengan *opportunity cost* berupa hilangnya pangsa pasar jutaan TEU dan inefisiensi rantai pasok nasional dalam jangka panjang.

3.7. Analisis Kausalitas antara *Demand Loss* dan *Demand Growth*



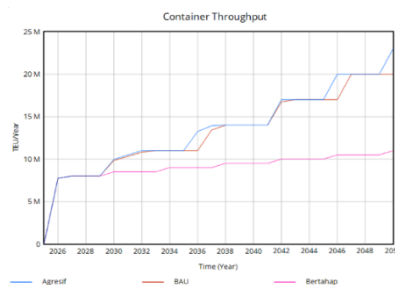
Gambar 6. Grafik *Demand Growth* pada scenario



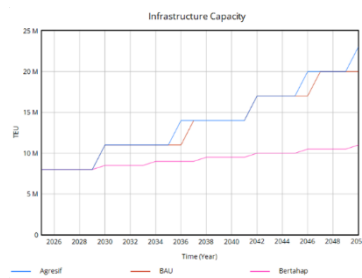
Gambar 7. Grafik *Demand Loss* pada scenario

Dua variabel *flow* yang bekerja secara berlawanan ini mengungkapkan mekanisme kausalitas yang paling fundamental dalam sistem: seberapa besar potensi pasar yang mampu dipertahankan versus yang terbuang akibat inefisiensi layanan. Grafik *Demand Loss* memperlihatkan pola perilaku yang sangat kontras antar skenario. Kurva Skenario Bertahap menunjukkan *Demand Loss* tertinggi yang terus merambat naik secara linear hingga mendekati angka 900.000 TEU per tahun pada 2050, sebagai konsekuensi langsung dari defisit kapasitas permanen yang mendorong *Target Utilization* menembus angka kritis. Sebaliknya, kurva Skenario Agresif dan BAU memperlihatkan fluktuasi periodik berupa penurunan tajam pada titik-titik waktu penyelesaian konstruksi sekitar tahun 2030, 2036, dan 2042 yang berkorelasi langsung dengan momen injeksi *terminal block size* baru ke dalam sistem. Fenomena pola *sawtooth* pada *Demand Loss* ini mengonfirmasi validitas mekanisme *balancing loop* B1 dalam struktur CLD yang dirancang mengacu pada kerangka Bahadir & Akdag (2019). Grafik *Demand Growth* merupakan cerminan inversnya: Skenario Agresif yang berhasil menekan *Demand Loss* secara periodik memungkinkan *reinforcing loop* pertumbuhan pasar bekerja optimal, mendorong *Demand Growth* mencapai 2 juta TEU per tahun pada akhir simulasi. Sementara pada Skenario Bertahap, *Demand Loss* yang masif bertindak sebagai rem sistemik yang menekan *Demand Growth* hanya hingga sekitar 1,4 juta TEU per tahun. Hasil ini secara empiris mengonfirmasi prinsip *Limits to Growth* sebagaimana diargumentasikan, bahwa kapasitas pelabuhan yang terbatas berfungsi sebagai batasan struktural pertumbuhan permintaan, bukan sekadar variabel operasional.

3.8. Analisis Kausalitas antara Kapasitas Infrastruktur dan *Container Throughput*



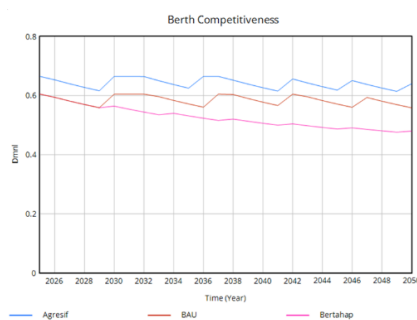
Gambar 8. Grafik *Container Throughput* pada scenario



Gambar 9. Grafik *Infrastructure Capacity* pada skenario

Korelasi struktural antara *Container Throughput* dan *Infrastructure Capacity* menghasilkan temuan yang paling kuat dalam membuktikan validitas logika kausalitas model. Kurva *Throughput* pada ketiga skenario membentuk pola *step function* yang nyaris identik dengan kurva *Capacity*, mengonfirmasi berjalannya mekanisme *Limits to Growth* di dalam sistem. Ketika permintaan secara konsisten melampaui kapasitas kondisi yang terjadi hampir sepanjang waktu simulasi nilai aktual *Throughput* berkorelasi langsung dengan batas atas kapasitas yang tersedia. Setiap penyelesaian proyek konstruksi yang menginjeksikan kapasitas baru langsung terserap secara instan oleh akumulasi permintaan yang tertahan, membuktikan bahwa ketersediaan fasilitas fisik merupakan *bottleneck* utama bagi realisasi arus barang. Pada Skenario Agresif, eksekusi *terminal block size* yang memadai memungkinkan *Throughput* melonjak mendekati 23 juta TEU per tahun pada 2050, membuktikan bahwa sebagian besar potensi pasar nasional berhasil diakomodasi. Skenario BAU mencatatkan *Throughput* 20 juta TEU per tahun dengan kesenjangan volume yang tidak dapat dilayani akibat keterlambatan ekspansi, sebagaimana dikritisi [16] bahwa kegagalan perencanaan kapasitas yang tidak terintegrasi secara sistemis dengan dinamika permintaan akan selalu menghasilkan *throughput* yang sub-optimal. Skenario Bertahap menunjukkan *Throughput* yang stagnan di kisaran 11 juta TEU per tahun, kondisi di mana *Yard Occupancy Ratio* (YOR) yang kritis mengakibatkan sisa permintaan yang tidak tertampung beralih menjadi *Demand Loss* secara permanen. Hasil ini memvalidasi secara empiris bahwa variabel makroekonomi sebesar apapun tidak akan dapat dikonversi menjadi *throughput* nyata tanpa didukung konfigurasi *terminal block size* yang dieksekusi pada waktu yang presisi.

3.9. Analisis Skenario Daya Saing Dermaga



Gambar 10. Grafik *Berth Competitiveness* pada skenario

Dinamika *Berth Competitiveness* pada skala *dimensionless* 0 hingga 1 selama periode 2025–2050 menyajikan sintesis akhir dari seluruh mekanisme kausalitas yang telah dianalisis. Variabel ini berfungsi sebagai katalisator yang menjembatani kondisi fisik infrastruktur dengan respons pasar, dan perilakunya secara langsung mencerminkan kualitas keputusan investasi yang diambil. Kurva Skenario Agresif mempertahankan skor daya saing tertinggi yang secara konsisten berada di atas 0,6 sepanjang periode simulasi, dengan pola *sawtooth* periodik di mana penurunan gradual akibat akumulasi permintaan langsung dipulihkan oleh lonjakan tajam yang menandai penyelesaian konstruksi pada tahun 2030, 2036, dan 2042. Pemulihan cepat ini merupakan bukti empiris efektivitas *terminal block size* yang memadai dalam menjaga *reinforcing loop* pertumbuhan pasar bekerja optimal. Skenario BAU memperlihatkan pola fluktuasi serupa namun pada *baseline* yang lebih rendah berkisar 0,55 hingga 0,61, mengonfirmasi bahwa investasi reaktif mengakibatkan pelabuhan beroperasi dalam kondisi sub-optimal lebih lama sebelum kapasitas baru tersedia, selaras dengan temuan [17] bahwa ketidakmampuan mengantisipasi kebutuhan ekspansi secara tepat waktu berdampak langsung pada degradasi performa layanan. Skenario Bertahap menunjukkan degradasi linear yang paling mengkhawatirkan, dari angka 0,56 pada 2025 turun mendekati 0,48 pada 2050 tanpa ada pemulihan signifikan, karena penambahan

kapasitas yang terlalu konservatif menjebak pelabuhan dalam defisit permanen yang menjadi pemicu utama *Demand Loss* berskala masif. Hasil analisis *Berth Competitiveness* secara menyeluruh membuktikan bahwa utilisasi yang dibiarkan mendekati batas maksimal bukanlah indikator efisiensi, melainkan sinyal kegagalan sistem layanan. Temuan ini menegaskan bahwa untuk menjawab pertumbuhan volume peti kemas nasional secara berkelanjutan, penentuan *terminal block size* yang tepat harus dieksekusi secara proaktif guna memastikan utilitas berada pada batas toleransi yang aman sehingga daya saing dermaga terjaga dan pelabuhan terhindar dari kehilangan pelanggan potensial secara paksa, sebagaimana direkomendasikan [9] bahwa ketidakpastian permintaan pasar harus diantisipasi melalui strategi investasi yang berani dan terstruktur, bukan melalui penundaan yang reaktif.

4. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa pendekatan *System Dynamics* mampu merepresentasikan kompleksitas interaksi antara pertumbuhan permintaan peti kemas, kapasitas infrastruktur, dan kebijakan investasi pelabuhan secara komprehensif. Dari tiga skenario yang disimulasikan selama horizon 2025–2050, Skenario Agresif terbukti paling optimal dalam menjaga *Berth Competitiveness*, menekan *Demand Loss*, dan memaksimalkan akumulasi *Container Throughput* hingga mendekati 23 juta TEU. Skenario BAU menghasilkan defisit kapasitas yang bersifat kronis akibat pendekatan investasi reaktif, sementara Skenario Bertahap justru memicu kegagalan sistemik dengan divergensi permintaan-kapasitas yang permanen. Variabel *Terminal Block Size* dan ketepatan waktu *Investment Decision* terbukti sebagai penentu utama efektivitas kebijakan. Hasil ini menegaskan bahwa investasi infrastruktur pelabuhan yang proaktif, terencana, dan berskala memadai merupakan prasyarat mutlak dalam menjawab pertumbuhan volume peti kemas nasional tanpa mengorbankan daya saing logistik.

References

- [1] A. Hlali, "Theoretical highlights in container port logistics systems," pp. 181–191, 2020, doi: 10.21463/jmic.2020.09.2.13.
- [2] L. I. U. Xuefei, "This is the Pre-Published Version . Integrating route optimization with vehicle and unloading dock scheduling in LCL cargo collection," vol. 11, pp. 262–280, 2019.
- [3] B. Unhelkar, S. Joshi, M. Sharma, S. Prakash, A. Krishna, and M. Prasad, "International Journal of Information Management Data Insights Enhancing supply chain performance using RFID technology and decision support systems in the industry 4.0 – A systematic literature review," *Int. J. Inf. Manag. Data Insights*, vol. 2, no. 2, p. 100084, 2022, doi: 10.1016/j.ijime.2022.100084.
- [4] A. Stefano, "Policy Modeling as a new area for research : perspectives for a Systems Thinking and System Dynamics approach ?," pp. 1–22, 2014.
- [5] A. H. M. Shamsuzzoha and P. T. Helo, "Real-time Tracking and Tracing System : Potentials for the Logistics Network," pp. 242–250, 2011.
- [6] G. Taylor and M. McDonald, "In practice and in principle : ' Free market ' discourses and container port reform in Australia," no. 1991, 2024, doi: 10.1177/10245294231181967.
- [7] D. Sinha and V. Bagodi, "A causal review of dynamics in Indian ports," *IIM Kozhikode Soc. Manag. Rev.*, vol. 8, no. 1, pp. 60–73, 2019.
- [8] J. P. Monat and T. F. Gannon, "What is Systems Thinking ? A Review of Selected Literature Plus Recommendations," vol. 4, no. 1, pp. 11–26, 2015, doi: 10.5923/j.ajss.20150401.02.
- [9] T. Jamrus and C. Chien, "Extended priority-based hybrid genetic algorithm for the less-than-container loading problem," 2016.
- [10] M. Cagatay and H. Camgoz, "The System Dynamics Modelling for Container Capacity & Transportation Planning Policies," *Asian J. Shipp. Logist.*, vol. 35, no. 4, pp. 200–212, 2019, doi: 10.1016/j.ajsl.2019.12.007.
- [11] H. Campos, D. Oliveira, J. You, and A. Pires, "Governing coalitions and key performance indicators of port governance," *Marit. Transp. Res.*, vol. 2, no. May, p. 100023, 2021, doi: 10.1016/j.martra.2021.100023.
- [12] A. Alavi, H. Nguyen, J. Fei, and J. Sayareh, "Port Logistics Integration : Challenges and Approaches," vol. 7, no. 6, pp. 389–402, 2018.
- [13] L. M. Ascencio, L. A. Bearzotti, and N. R. Smith, "A Collaborative Supply Chain Management System for a Maritime Port," *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 444–458, 2014, doi: 10.1016/S1665-6423(14)71625-6.
- [14] A. Li, S. Zhuang, T. Yang, W. Lu, and J. Xu, "Optimization of Logistics Cargo Tracking and Transportation Efficiency based on Data Science Deep Learning Models Optimization of Logistics Cargo Tracking and Transportation Efficiency based on Data Science," 2024, doi: 10.20944/preprints202407.1428.v1.
- [15] R. Addo-tenkorang, D. Nguyen, and P. T. Helo, "Performance evaluation of tracking and tracing for logistics operations," vol. 5, no. 1, pp. 31–54, 2013.
- [16] C. Organizations, M. Schwaninger, and J. Klocker, "Applying Integrative Systems Methodology : The Case of Health," 2024.
- [17] K. Yamaguchi and Y. Yamaguchi, "Accounting System Dynamics Modeling of Money Stock as Debts Theory and Case Analysis of Japan," 2021.