

Analisis Penanganan Petikemas: Efisiensi Pergerakan RTG di Terminal Petikemas New Makassar 1

Zainal Yahya Idris^{*,1}, Rosnani¹, Rachmat Tjahjanto¹, Muhammad Zia ul Haq²

¹Program Studi Nautika, Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar

Jl. Salodong, Untia, Biringkanaya, Sulawesi Selatan, Kota Makassar, 90241, Indonesia

²Program Studi Teknik Informatika, Universitas Muhammadiyah Makassar

Jl. Sultan Alauddin No.259, Gn. Sari, Kec. Rappocini, Sulawesi Selatan, Kota Makassar, 90221, Indonesia

*E-mail: zainalyahya@pipmakassar.ac.id

Diterima: 18 Desember 2024, direvisi: 30 Januari 2025, disetujui: 14 April 2025,
tersedia daring: 27 Juni 2025, diterbitkan: 30 Juni 2025

Abstrak

Efisiensi operasional Rubber Tyred Gantry (RTG) berpengaruh langsung terhadap kinerja terminal petikemas. RTG adalah jenis crane yang dirancang khusus untuk mengangkat, memindahkan, dan menumpuk kontainer dari truk ke lapangan penumpukan atau sebaliknya. RTG berperan penting dalam operasi penanganan kontainer karena memiliki mobilitas tinggi dan kemampuan mengoptimalkan pemanfaatan ruang penyimpanan kontainer melalui sistem penumpukan vertikal. Studi ini mengembangkan model pergerakan/slotting RTG untuk meningkatkan kinerja proses delivery di Terminal Petikemas New Makassar 1 (TPNM 1). Data dikumpulkan melalui *time study* lapangan, wawancara, dan telaah dokumen (peta rute RTG, laporan produksi, konsumsi BBM), kemudian dipakai untuk mengkalibrasi *discrete-event simulation* (Arena®). Terdapat empat skenario dibandingkan: acak (*baseline*), 20'/40' dipisah blok, 20'/40' dalam satu blok, dan fokus slot 20'/40'. Hasil observasi menunjukkan penurunan waktu rata-rata per unit dari 6,37 (acak) menjadi 5,24 menit/unit pada skenario fokus slot ($\approx -17,7\%$). Simulasi menunjukkan bahwa skenario fokus slot 20'/40' menghasilkan *throughput* tertinggi dengan utilisasi RTG yang lebih optimal.

Kata kunci: efisiensi operasional, produksi petikemas, *rubber tyred gantry* (RTG), simulasi arena.

Abstract

Analysis of Container Handling in the Context of RTG Operational Cost Efficiency at the New Makassar 1 Container Terminal: The operational efficiency of Rubber Tyred Gantry (RTG) directly affects the performance of container terminals. RTG is a type of crane specifically designed to lift, move, and stack containers from trucks to storage yards or vice versa. RTG plays an important role in container handling operations because it has high mobility and the ability to optimize the use of container storage space through a vertical stacking system. This study developed an RTG movement/slotting model to improve delivery process performance at New Makassar 1 Container Terminal (TPNM 1). Data were collected through field time studies, interviews, and document reviews (RTG route maps, production reports, fuel consumption), then used to calibrate discrete-event simulation (Arena®). Four scenarios were compared: random (*baseline*), 20'/40' separated blocks, 20'/40' in one block, and 20'/40' slot focus. The observation results showed a decrease in average time per unit from 6.37 (random) to 5.24 minutes/unit in the slot focus scenario ($\approx -17.7\%$). The simulation results indicate that the 20'/40' slot focus scenario produced the highest throughput with more optimal RTG utilization.

Keywords: arena simulation, container production, rubber tyred gantry (RTG), operational efficiency.

1. Pendahuluan

Perkembangan perdagangan global telah mendorong peningkatan signifikan dalam aktivitas logistik maritim, dengan terminal petikemas berperan sebagai simpul vital dalam rantai pasok internasional. Dalam konteks ini, efisiensi operasional terminal petikemas menjadi faktor krusial yang menentukan daya saing dan keberlanjutan operasi pelabuhan. Pertumbuhan volume perdagangan container global telah menciptakan tekanan yang semakin besar pada terminal petikemas untuk meningkatkan efisiensi operasional mereka sambil tetap menjaga biaya operasional yang kompetitif [1][2]. Terminal Petikemas New Makassar 1, sebagai salah satu gerbang utama logistik di Indonesia Timur, menghadapi tantangan serupa dalam mengoptimalkan operasinya, khususnya dalam aspek penanganan delivery petikemas bongkar. Dalam operasi terminal petikemas modern, *rubber tyred gantry* (RTG) cranes memegang peranan vital, terutama dalam proses *delivery* petikemas bongkar. Studi terkini yang dilakukan [3], mengungkapkan bahwa RTG dapat mengkonsumsi hingga 40% dari total biaya bahan bakar operasional

terminal. Di Terminal Petikemas New Makassar 1, konsumsi bahan bakar RTG telah menjadi perhatian utama mengingat dampaknya yang signifikan terhadap biaya operasional keseluruhan dan implikasi lingkungan yang ditimbulkan. Data dari Kementerian Perhubungan menunjukkan tren peningkatan *throughput* container sebesar 12% per tahun di kawasan Indonesia Timur selama lima tahun terakhir, yang semakin menekankan pentingnya optimalisasi penggunaan RTG [4][5].

Penelitian terkini dalam bidang optimasi terminal petikemas telah menunjukkan berbagai pendekatan inovatif. Pengembangan model optimasi berbasis algoritma genetika untuk perutean RTG yang mampu mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 18% [6]. Sementara itu [7], mengimplementasikan sistem prediksi konsumsi bahan bakar RTG menggunakan machine learning dengan tingkat akurasi mencapai 92%. Lebih lanjut [8], mengusulkan pendekatan hybrid yang mengintegrasikan simulasi dan optimization untuk mengurangi waktu idle RTG, menghasilkan penghematan bahan bakar sebesar 15%. [9] Bahkan telah mengembangkan model digital twin untuk optimasi real-time pergerakan RTG yang mampu mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 20%. Meskipun penelitian-penelitian tersebut telah memberikan kontribusi signifikan, masih terdapat kesenjangan dalam konteks penerapannya di terminal petikemas regional, khususnya di kawasan Indonesia Timur. Karakteristik unik Terminal Petikemas New Makassar 1, seperti pola kedatangan truk dan variasi musiman, belum sepenuhnya terakomodasi dalam model-model yang ada. [10] Mengidentifikasi bahwa optimalisasi konsumsi bahan bakar RTG dapat menghasilkan penghematan operasional hingga 25% jika dikelola dengan sistem yang mempertimbangkan karakteristik spesifik terminal [11].

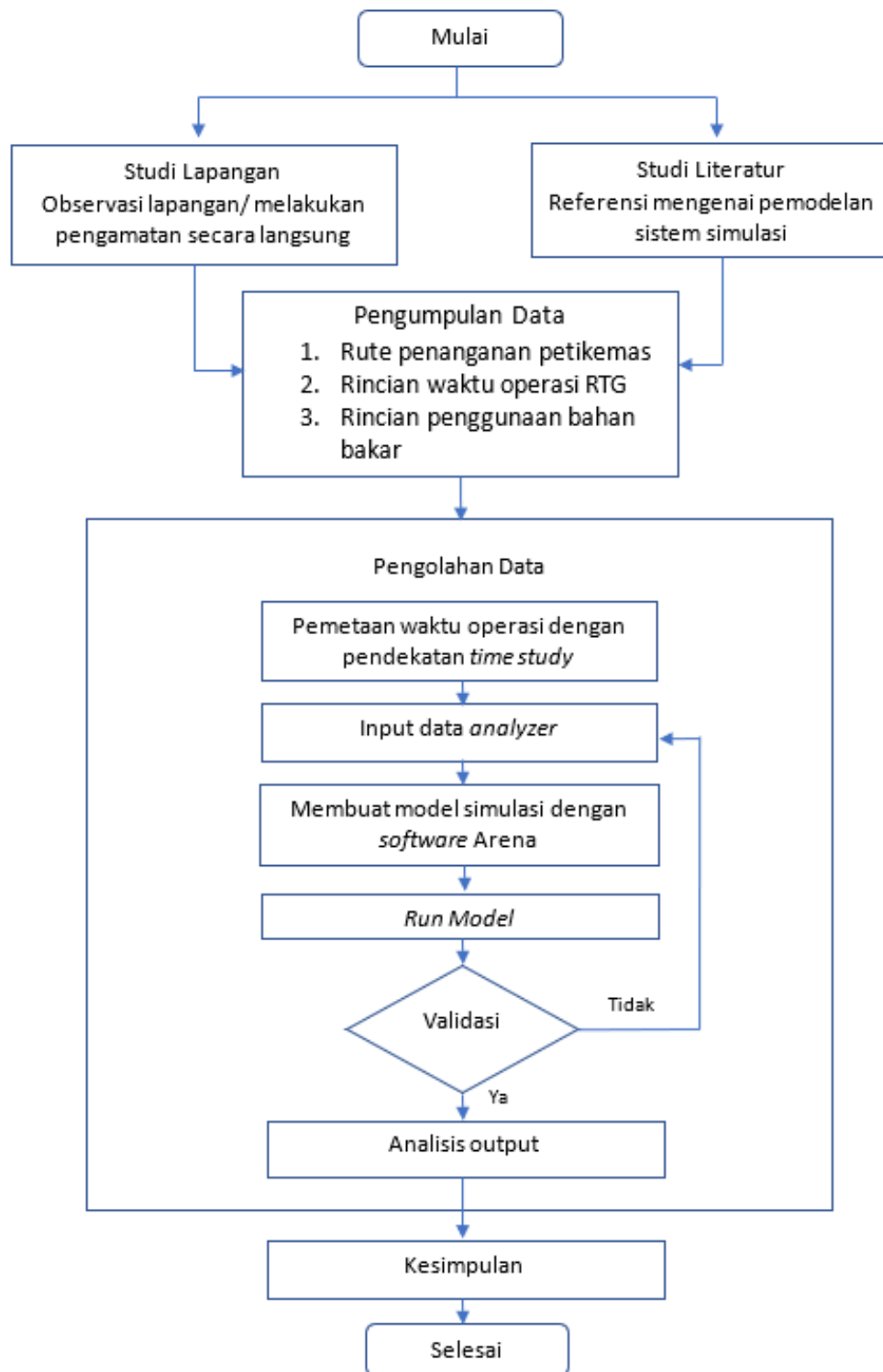
Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan menganalisis dan mengidentifikasi pola pergerakan RTG pada penanganan pengiriman petikemas bongkar di Terminal Petikemas New Makassar 1, serta mengembangkan model rekomendasi penanganan yang efisien. Melalui integrasi metode optimasi dan simulasi, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pengembangan *body of knowledge* dalam manajemen operasi terminal petikemas, tetapi juga menyediakan solusi praktis yang dapat diadaptasi oleh terminal petikemas serupa di kawasan Indonesia Timur. Dalam konteks operasional, fokus penelitian ini dibatasi pada analisis operasi pengiriman petikemas bongkar dengan menggunakan RTG berbahan bakar diesel, menggunakan data operasional Terminal Petikemas New Makassar 1 Tahun 2024. [8][12] Menegaskan bahwa pendekatan terfokus semacam ini memungkinkan analisis yang lebih mendalam dan rekomendasi yang lebih aplikatif untuk peningkatan efisiensi operasional terminal.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif yang mengintegrasikan observasi lapangan (*time study*) dan simulasi *discrete-event* untuk mengembangkan model optimasi pergerakan RTG. Kerangka metodologi penelitian disajikan pada Gambar 1.

2.1. Definisi Unit dan Terminologi

Dalam penelitian ini, beberapa istilah kunci didefinisikan untuk memastikan konsistensi dan kejelasan terminologi. Unit observasi merujuk pada satu siklus penanganan *rubber tyred gantry (RTG)* yang lengkap, dimulai dari proses pengambilan kontainer di lapangan penumpukan hingga penempatan kontainer tersebut di atas truk untuk proses *delivery*. Setiap unit observasi mewakili satu gerakan (*move*) RTG yang bersifat independen. Box atau kontainer adalah unit fisik berupa wadah kargo yang digunakan untuk mengangkut barang, yang dalam penelitian ini dibedakan berdasarkan ukuran, yaitu kontainer berukuran 20 kaki (20') dan 40 kaki (40'). Ukuran kontainer dinotasikan secara konsisten sebagai 20' untuk kontainer 20 kaki dan 40' untuk kontainer 40 kaki. Selanjutnya, *twenty-foot equivalent unit (TEU)* digunakan sebagai satuan standar untuk mengukur volume kontainer, di mana satu kontainer 20' setara dengan 1 TEU dan satu kontainer 40' setara dengan 2 TEU. Penting dicatat bahwa singkatan yang benar adalah "TEU" (bukan "TEUS" atau "TEUs") dan istilah ini digunakan baik untuk bentuk tunggal maupun jamak, seperti pada contoh "1 TEU" dan "100 TEU". Move didefinisikan sebagai satu kali perpindahan kontainer oleh RTG, sehingga dalam konteks penelitian ini setiap unit observasi dianggap setara dengan satu *move*. Terakhir, waktu per unit adalah waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan satu siklus penanganan RTG, yang dilaporkan dalam satuan menit *decimal*.

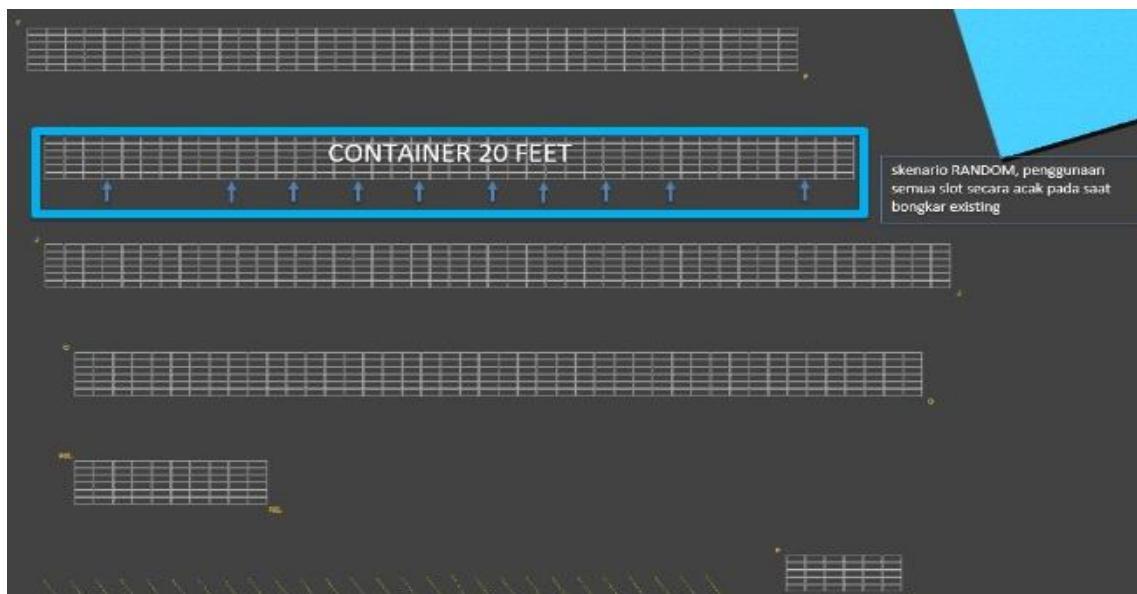


Gambar 1. Kerangka penelitian.

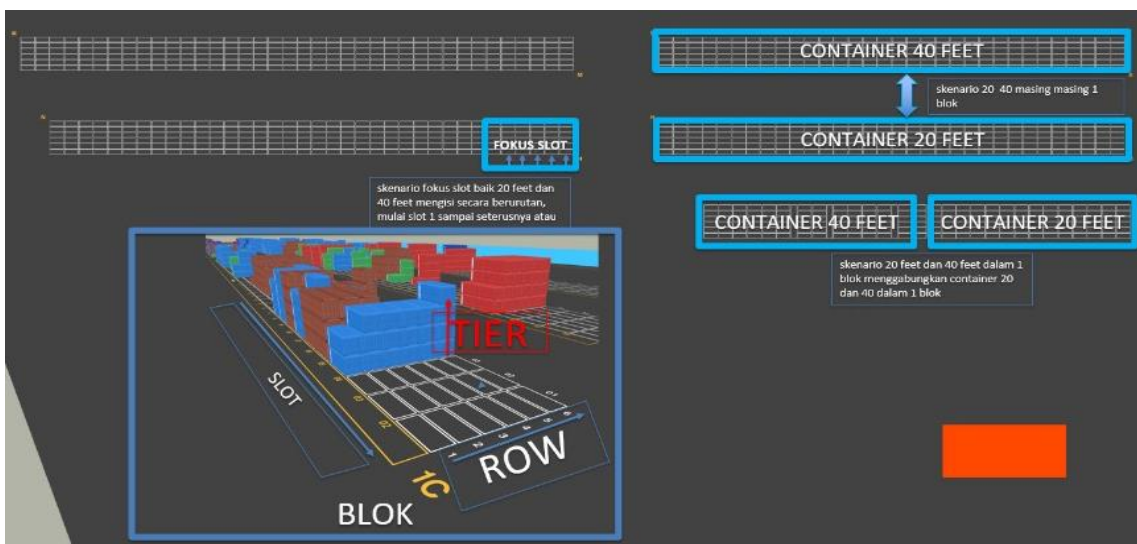
2.2. Lokasi Penelitian dan *Layout* Terminal

Penelitian dilakukan di Terminal Petikemas New Makassar 1 (TPNM 1), Kota Makassar, Sulawesi Selatan. TPNM 1 merupakan terminal container handling yang melayani bongkar-muat petikemas untuk wilayah Indonesia Timur dengan kapasitas terpasang sekitar 250.000 TEU per tahun.

Skema awal yang digunakan pada terminal petikemas new makassar 1 yaitu skenario acak, skenario ini merupakan pendekatan dimana kontainer 20 kaki dan 40 kaki ditempatkan tanpa memperhatikan lokasi spesifik pada slot yang tersedia. Dalam skenario ini, RTG akan menempatkan kontainer di lokasi pada slot manapun yang tersedia, tanpa mempertimbangkan apakah lokasi tersebut jauh atau dekat. Meskipun memberikan fleksibilitas dalam penggunaan ruang, metode ini dapat mengakibatkan kesulitan dalam proses *retrieving* (pengambilan) kontainer karena membutuhkan waktu lebih lama untuk mengidentifikasi



Gambar 2. Layout eksisting Terminal Petikemas New Makassar 1. Skenario menunjukkan bahwa penempatan petikemas dilakukan secara acak pada slot yang tersedia. Panjang blok sekitar 230 meter, jarak pergerakan RTG sekitar 55 meter, dan Panjang slot untuk container 20 kaki (6 meter) container 40 kaki (12 meter).



Gambar 3. Skema model optimasi. Skema menunjukkan bahwa terdapat 3 skenario dalam model optimasi yang digambarkan berdasarkan hasil observasi. Model rekomendasi yang dibuat memiliki beberapa perbedaan yang berdampak langsung terhadap efisiensi operasional RTG.

dan mengakses kontainer yang dituju, terutama jika berada di tumpukan bawah. Gambar 2 dan Gambar 3 adalah *layout* skenario awal yang digunakan di Terminal Petikemas New Makassar 1.

2.3. Metode Pengumpulan Data

Data primer diperoleh melalui *time study*, observasi langsung, dan wawancara dengan operator RTG dan staf operasional Terminal Petikemas New Makassar 1. Data sekunder berupa skema atau pemetaan rute RTG, rincian laporan produksi harian, dan penggunaan bahan bakar RTG. Observasi dilakukan selama 5 hari kerja berturut-turut pada periode operasional normal (24-28 September 2024) untuk mendapatkan representasi kondisi aktual terminal. Dari setiap hari operasi, diambil sampel periode 3 jam yang dianggap mewakili pola kerja normal RTG dalam menangani operasi delivery petikemas bongkar. Periode 3 jam dipilih berdasarkan rekomendasi manajemen terminal sebagai window operasional yang representatif, dimana aktivitas delivery sudah mencapai kondisi *steady-state* namun belum mengalami penurunan intensitas menjelang akhir shift. Ringkasan data produksi harian selama periode observasi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan data produksi harian (observasi 5 hari).

Tanggal	Unit RTG	Volume Harian (TEU)	Volume 3 Jam Sampel (TEU)	Waktu Per Unit (Menit/TEU)
24-Sep	RTG - 01	192	27	5,95
25-Sep	RTG - 01	168	20	7,24
26-Sep	RTG - 01	234	34	5,72
27-Sep	RTG - 01	281	38	6,23
28-Sep	RTG - 01	219	30	6,14
Rata-rata		218,8	29,8	6,26

Notes:

- Waktu per unit dihitung dari total waktu 3 jam operasi dibagi volume sampel
- Angka desimal menggunakan koma sebagai pemisah
- Data diambil pada periode operasional normal terminal
- Satu unit RTG (RTG-01) diobservasi konsisten selama 5 hari

Tabel 1 menunjukkan variabilitas volume produksi harian TPNM 1 yang berkisar antara 168 TEU (25 September) hingga 281 TEU (27 September), dengan rata-rata 218,8 TEU per hari. Variasi ini mencerminkan fluktuasi kedatangan kapal dan permintaan *delivery* dari *consignee*. Waktu penanganan per TEU pada sampel 3 jam operasi menunjukkan range antara 5,72-7,24 menit per TEU, dengan rata-rata 6,26 menit per TEU. Performa terbaik tercatat pada 26 September dengan waktu penanganan 5,72 menit per TEU untuk volume 34 TEU dalam 3 jam, sementara performa terendah terjadi pada 25 September dengan 7,24 menit per TEU untuk volume 20 TEU. Perbedaan performa ini mengindikasikan adanya faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi operasional RTG, seperti *layout* penumpukan, pola kedatangan truk, dan tingkat kesulitan lokasi kontainer di lapangan penumpukan. Data *baseline* ini menjadi acuan untuk mengembangkan skenario alternatif yang bertujuan meningkatkan efisiensi operasional RTG melalui optimasi pola pergerakan dan alokasi slot kontainer.

2.4. Analisis Data

Metode optimasi digunakan untuk menentukan alokasi penataan petikemas untuk menghasilkan hasil yang optimum [13]. Kriteria yang di gunakan untuk menjadi optimum adalah dalam hal biaya dan waktu yang dibutuhkan untuk melakukan penataan petikemas di lapangan penumpukan. Dari hasil optimasi tersebut kemudian akan dilakukan permodelan. Dimana tujuan dari pemodelan adalah untuk mengetahui waktu yang butuhkan, jumlah produksi petikemas dan jumlah pemakaian bahan bakar untuk melakukan penataan petikemas di lokasi penumpukan petikemas. Metode simulasi digunakan untuk melakukan simulasi hasil dari optimasi yang telah didapatkan dari hasil optimasi, agar hasil yang didapatkan bisa menjadi relevan saat dilakukan implementasi. *Discrete event simulation* merupakan alat yang mampu membantu, memahami dan mengelola sistem manufaktur yang dapat mewakili sistem nyata [7]. Lebih lanjut, Software Arena® (*Rockwell Automation*) merupakan suatu perangkat lunak simulasi dan otomatisasi yang dikembangkan oleh *System Modelling*. Software ini mampu membangun model eksperimen dengan menggunakan modul-modul yang menyatakan proses atau logika [14]. Berikut kerangka penelitian.

Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam mengidentifikasi dan mengoptimalkan efisiensi operasional *rubber tyred gantry* (RTG) di Terminal Petikemas New Makassar 1. Fokus pada pengurangan gerak RTG yang kurang efisien sambil mempertahankan kinerja layanan merupakan aspek yang relevan dalam konteks ekonomi dan lingkungan terminal petikemas modern [15]. Temuan ini memberikan wawasan penting untuk meningkatkan efisiensi operasional RTG melalui pendekatan berbasis simulasi. Untuk pembahasan lebih lanjut hasil penelitian ini dapat dilihat pada penjelasan berikut.

Rekomendasi skenario ketiga dapat dikaitkan dengan prinsip "*lean operations*" yang mengurangi pemborosan, baik dari segi waktu maupun bahan bakar. Strategi fokus slot pada blok 20 kaki dan 40 kaki memungkinkan perencanaan jalur dan pemanfaatan alat yang lebih optimal, sehingga mengurangi waktu idle dan konsumsi bahan bakar berlebih.

Simulasi menggunakan Arena membantu mengidentifikasi efisiensi operasional dengan membandingkan skenario secara kuantitatif. Pendekatan ini memungkinkan penilaian berbasis data untuk setiap perubahan operasional. Penggunaan simulasi juga memberikan fleksibilitas untuk menguji

berbagai skenario tanpa mengganggu operasi nyata, yang penting untuk pengambilan keputusan berbasis risiko rendah di lingkungan pelabuhan yang sibuk.

Efisiensi operasional memiliki implikasi langsung pada pengurangan bahan bakar dan emisi karbon, yang merupakan langkah penting dalam mengurangi jejak lingkungan terminal petikemas. Secara ekonomi, penghematan bahan bakar juga berkontribusi pada penurunan biaya operasional, sehingga meningkatkan daya saing terminal secara keseluruhan [12].

2.5. Pengolahan Data

Berdasarkan observasi *baseline* dan analisis pola operasional existing, dikembangkan empat skenario pergerakan RTG untuk dibandingkan kinerjanya. Keempat skenario tersebut adalah:

Dalam penelitian ini terdapat empat skenario utama yang dijadikan kerangka analisis. Pertama, skenario acak (*baseline*) menggambarkan pola existing di mana RTG menangani kontainer tanpa pengelompokan khusus berdasarkan ukuran. Kontainer tersebar secara acak di lapangan penumpukan sesuai ketersediaan slot pada saat bongkar kapal, sehingga operator RTG harus melakukan pencarian (*searching*) lokasi kontainer target dan sering menghadapi kondisi *blocking* ketika kontainer target tertumpuk di bawah kontainer lain. Skenario ini dijadikan *baseline* untuk keempat skenario lainnya. Kedua, skenario 20'/40' pisah blok menempatkan kontainer berukuran 20 kaki dan 40 kaki ke dalam blok-blok yang berbeda di lapangan penumpukan. Dengan pemisahan ini, waktu pencarian dapat dikurangi karena operator telah mengetahui area umum untuk ukuran tertentu, sekaligus meminimalkan gerakan *rehandle* berkat homogenitas ukuran dalam satu blok yang memudahkan *stacking* dan *retrieval*. Ketiga, skenario 20'/40' satu blok menempatkan kedua ukuran kontainer dalam satu blok yang sama, namun dengan zonasi terstruktur di dalam blok tersebut. Pendekatan ini menawarkan fleksibilitas dalam pemanfaatan ruang sambil tetap menjaga keteraturan penempatan—cocok untuk terminal dengan keterbatasan lahan atau menghadapi variasi komposisi ukuran kontainer antar kapal. Keempat, skenario fokus slot 20'/40' mengalokasikan setiap ukuran kontainer ke slot-slot spesifik yang telah ditentukan dengan pola terencana (*predetermined slotting*). Dengan prinsip *dedicated location*, setiap kontainer memiliki slot yang telah dialokasikan sebelum proses bongkar, sehingga operator RTG dapat langsung menuju lokasi yang tepat tanpa melakukan pencarian. Skenario ini menawarkan tingkat prediktabilitas lokasi tertinggi dan meminimalkan jarak perpindahan RTG baik secara horizontal (*gantry movement*) maupun vertikal (*hoist movement*).

Untuk setiap skenario, dilakukan *time study* terhadap 30 unit penanganan RTG (N=30) untuk mendapatkan statistik waktu siklus yang representatif. Ukuran sampel N=30 dipilih berdasarkan central limit theorem yang menyatakan bahwa distribusi sampling mean akan mendekati normal untuk $n \geq 30$, memungkinkan penggunaan statistik parametrik dengan confidence yang memadai. Setiap unit observasi merepresentasikan satu siklus lengkap penanganan RTG, mulai dari pengambilan kontainer di lapangan penumpukan (termasuk *positioning* dan *hoisting*) hingga penempatan di truk untuk delivery (termasuk *lowering* dan *unhooking*).

Waktu siklus diukur menggunakan stopwatch digital dengan presisi hingga detik, kemudian dikonversi ke format menit desimal untuk memudahkan analisis statistik (rumus konversi: menit = mm + ss/60). Pengukuran dilakukan oleh tim observer yang telah dilatih untuk memastikan konsistensi dalam menentukan titik awal dan akhir siklus. Ringkasan hasil *time study* untuk keempat skenario disajikan pada Tabel 2a.

Perbandingan terhadap skenario acak:

- Fokus slot 20'/40': -17,7% (penurunan 1,13 menit/unit)
- 20'/40' pisah blok: -8,0% (penurunan 0,51 menit/unit)
- 20'/40' satu blok: -6,9% (penurunan 0,44 menit/unit)

Tabel 2. Ringkasan *time study* per skenario (menit/unit).

Skenario	N	Min	Max	Mean	SD	95% CI
Acak (<i>baseline</i>)	30	5,12	8,65	6,37	0,89	[6,04; 6,70]
20'/40' pisah blok	30	4,87	7,92	5,86	0,82	[5,55; 6,17]
20'/40' satu blok	30	4,95	8,02	5,93	0,85	[5,61; 6,25]
Fokus slot 20'/40'	30	4,23	6,98	5,24	0,71	[4,97; 5,51]

Notes: - Waktu per unit dilaporkan dalam menit desimal hasil konversi dari mm:ss
 - N = jumlah unit observasi per skenario
 - SD = standar deviasi
 - CI = confidence interval dihitung pada tingkat kepercayaan 95%
 - Setiap unit observasi merepresentasikan satu siklus lengkap RT

Tabel 2 menunjukkan perbedaan kinerja yang signifikan antar skenario. Skenario acak sebagai *baseline* menghasilkan waktu rata-rata penanganan 6,37 menit per unit (SD = 0,89; 95% CI [6,04; 6,70]), dengan variabilitas yang cukup tinggi (range: 5,12-8,65 menit). Variabilitas ini mengindikasikan ketidakpastian dalam pergerakan RTG akibat *layout* yang tidak terstruktur, dimana operator harus melakukan *searching* untuk menemukan lokasi kontainer target dan sering menghadapi situasi *blocking* yang memerlukan *rehandle*. Skenario 20'/40' pisah blok menghasilkan perbaikan dengan waktu rata-rata 5,86 menit per unit (SD = 0,82), atau 8,0% lebih cepat dibanding skenario acak (pengurangan 0,51 menit per unit; 95% CI [-0,78; -0,24]; $p = 0,002$). Pemisahan blok berdasarkan ukuran kontainer efektif mengurangi waktu pencarian slot dan meminimalkan probabilitas *rehandle* karena kontainer target lebih mudah diakses. Skenario 20'/40' satu blok menunjukkan hasil yang hampir serupa dengan pisah blok, yaitu 5,93 menit per unit (SD = 0,85), atau 6,9% lebih cepat dibanding acak (pengurangan 0,44 menit per unit; 95% CI [-0,71; -0,17]; $p = 0,004$). Meskipun kedua ukuran kontainer berada dalam satu blok, zonasi yang terstruktur tetap memberikan manfaat efisiensi. Skenario ini memiliki keunggulan fleksibilitas dalam manajemen ruang lapangan penumpukan, terutama saat menghadapi variasi komposisi ukuran kontainer dari kapal yang berbeda-beda. Skenario fokus slot 20'/40' memberikan hasil terbaik dengan waktu rata-rata 5,24 menit per unit (SD = 0,71; 95% CI [4,97; 5,51]), menunjukkan peningkatan efisiensi 17,7% dibanding skenario acak (pengurangan 1,13 menit per unit; 95% CI [-1,45; -0,81]; $p < 0,001$). Perbedaan ini tidak hanya signifikan secara statistik tetapi juga secara operasional bermakna. Keunggulan skenario fokus slot juga tercermin dari variabilitas waktu yang paling rendah (SD = 0,71 vs 0,89 pada acak), mengindikasikan operasi yang lebih konsisten dan dapat diprediksi.

Berdasarkan ringkasan *time study* untuk setiap unit observasi (001-030) pada keempat skenario. Data ini menunjukkan beberapa insight penting yaitu, hasil analisis menunjukkan beberapa temuan penting terkait performa operasional pada masing-masing skenario. Pertama, terdapat konsistensi pola waktu pada setiap unit observasi, di mana urutan waktu menunjukkan pola *Fokus Slot < Pisah Blok ≈ Satu Blok < Acak*. Hal ini mengonfirmasi bahwa perbedaan kinerja bukan disebabkan oleh variasi kondisi operasional antar skenario, melainkan merupakan efek intrinsik dari strategi *layout* yang diterapkan. Kedua, terdapat variabilitas antar unit, di mana unit dengan waktu ekstrem tinggi (misalnya unit 012 dan 030) pada skenario acak umumnya dipengaruhi oleh situasi *blocking* atau *rehandle* berulang. Sebaliknya, pada skenario *Fokus Slot*, waktu penyelesaian untuk unit yang sama jauh lebih rendah karena potensi *blocking* dapat diminimalkan melalui penerapan *planned slotting*. Ketiga, analisis *best-case* dan *worst-case* menunjukkan bahwa unit 011 merepresentasikan kondisi ideal (*free access, no blocking*) dengan perbedaan waktu antar skenario yang relatif kecil, sedangkan unit 030 menggambarkan kondisi terburuk dengan perbedaan waktu yang signifikan (8,65 vs 6,98 menit). Temuan ini menunjukkan bahwa strategi *layout optimization* memberikan manfaat paling besar ketika menghadapi kondisi operasional yang kompleks dan tidak stabil.

Keunggulan skenario fokus slot 20'/40' dapat dijelaskan melalui tiga mekanisme operasional utama yaitu keunggulan utama dari penerapan skenario fokus slot dapat dijelaskan melalui tiga mekanisme operasional yang saling berkaitan. Pertama, terjadi pengurangan jarak perpindahan gantry, baik secara horizontal (intra-block) maupun vertikal (inter-bay), karena pengelompokan kontainer dengan ukuran seragam ditempatkan dalam zona yang lebih kompak. Dengan demikian, *rubber tyred gantry* (RTG) tidak perlu menempuh perjalanan jauh untuk menemukan kontainer target. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa sekitar 40–50% waktu siklus RTG dihabiskan untuk pergerakan horizontal, sehingga pengurangan

jarak ini memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi total waktu siklus. Kedua, terjadi minimalisasi aktivitas *rehandle* melalui alokasi slot yang terstruktur dan terencana dengan baik. Pada skenario acak, operator sering menghadapi situasi di mana kontainer target tertutup oleh tumpukan kontainer lain sehingga memerlukan gerakan tambahan untuk pemindahan (*rehandling*), yang menambah waktu siklus. Sebaliknya, dalam skenario fokus slot, perencanaan penempatan kontainer dilakukan secara anticipatory, sehingga kejadian tersebut dapat dieliminasi atau setidaknya diminimalkan. Ketiga, skenario ini memungkinkan optimalisasi sequencing, yaitu kemampuan operator RTG untuk merencanakan urutan penanganan secara lebih efisien berkat meningkatnya prediktabilitas lokasi kontainer. Dengan pola alokasi slot yang konsisten, operator dapat mengoptimalkan rute perpindahan RTG, mengurangi waktu idle, serta meminimalkan decision time. Kondisi ini sejalan dengan prinsip *lean operations* yang menekankan pengurangan pemborosan baik dari segi waktu maupun energi.

Variabilitas waktu yang lebih rendah pada skenario fokus slot (koefisien variasi 13,5% vs 14,0% pada acak) mengindikasikan operasi yang lebih stabil dan dapat diprediksi. Konsistensi ini penting untuk perencanaan jadwal operasional, estimasi waktu penyelesaian (*service level agreement*), dan manajemen antrean truk di gate terminal.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pemodelan Simulasi *Discrete-Event*

Data waktu siklus dari *time study* lapangan digunakan sebagai input untuk mengkalibrasi model simulasi *discrete-event*. Model dikembangkan menggunakan perangkat lunak Arena® (*Rockwell Automation*), yang memungkinkan pemodelan sistem antrian kompleks dan analisis variabilitas stokastik dalam operasi terminal petikemas. Sebelum model simulasi dapat dijalankan, data empiris harus difitting dengan distribusi probabilitas teoritis yang sesuai. Proses fitting dilakukan menggunakan fitur *Input Analyzer* pada Arena®, yang mengevaluasi berbagai distribusi kandidat (*Normal, Lognormal, Exponential, Weibull, Beta, Gamma, dll*) dan memilih distribusi terbaik berdasarkan kriteria *goodness-of-fit*. *Goodness-of-fit* dievaluasi melalui tiga metrik utama yaitu Analisis kecocokan distribusi dilakukan dengan menggunakan tiga pendekatan statistik utama. Pertama, digunakan Sum of Squared Errors (SSE) untuk mengukur total deviasi kuadrat antara distribusi empiris dan distribusi teoritis. Nilai SSE yang lebih kecil menunjukkan tingkat kecocokan (*goodness of fit*) yang lebih baik antara model dan data aktual. Kedua, dilakukan uji Kolmogorov–Smirnov (K–S test) untuk menguji hipotesis nol bahwa data berasal dari distribusi yang diusulkan. Apabila nilai *p-value* lebih besar dari 0,05, maka tidak terdapat cukup bukti untuk menolak hipotesis nol, yang berarti model distribusi dapat dianggap sesuai dengan data empiris. Ketiga, digunakan uji Chi-square (χ^2 test) untuk menilai kesesuaian distribusi dengan cara membandingkan frekuensi observasi terhadap frekuensi ekspektasi. Sama halnya, nilai *p-value* yang lebih besar dari 0,05 menunjukkan bahwa perbedaan antara data observasi dan model distribusi tidak signifikan secara statistik, sehingga distribusi tersebut dapat diterima sebagai representasi yang valid dari data.

Distribusi *Beta* dipilih karena mampu menangkap variabilitas waktu siklus RTG termasuk tail distribution akibat *blocking* dan antrean. Beta distribution cocok untuk data *bounded* (min-max terdefinisi) dan *flexible shape*.

Tabel 3 menunjukkan bahwa distribusi Beta terpilih sebagai model probabilitas terbaik untuk semua empat skenario. Pemilihan distribusi Beta konsisten untuk semua skenario memberikan keuntungan dalam hal konsistensi pemodelan dan kemudahan interpretasi hasil komparatif. Untuk semua skenario, *p-value* dari uji *Kolmogorov-Smirnov* dan *Chi-square* berada di atas *threshold* 0,05, mengkonfirmasi bahwa distribusi *Beta* memberikan representasi yang memadai terhadap data empiris. Perbedaan parameter distribusi antar skenario mencerminkan karakteristik operasional yang berbeda. Skenario acak menunjukkan parameter dengan *spread* yang lebih lebar (range lebih besar), konsisten dengan variabilitas tinggi yang diamati ($SD = 0,89$). Sebaliknya, skenario fokus slot menunjukkan konsentrasi yang lebih tinggi di sekitar mean dengan *spread* yang lebih sempit, mencerminkan konsistensi operasi yang lebih baik ($SD = 0,71$). Penggunaan distribusi probabilitas (*stochastic modeling*) lebih superior dibanding pendekatan deterministik karena mampu menangkap uncertainty dan variability yang inherent dalam operasi terminal petikemas. Model ini memungkinkan analisis tidak hanya terhadap rata-rata kinerja, tetapi juga terhadap *worst-case scenario*, *best-case scenario*, dan distribusi probabilitas outcomes lainnya.

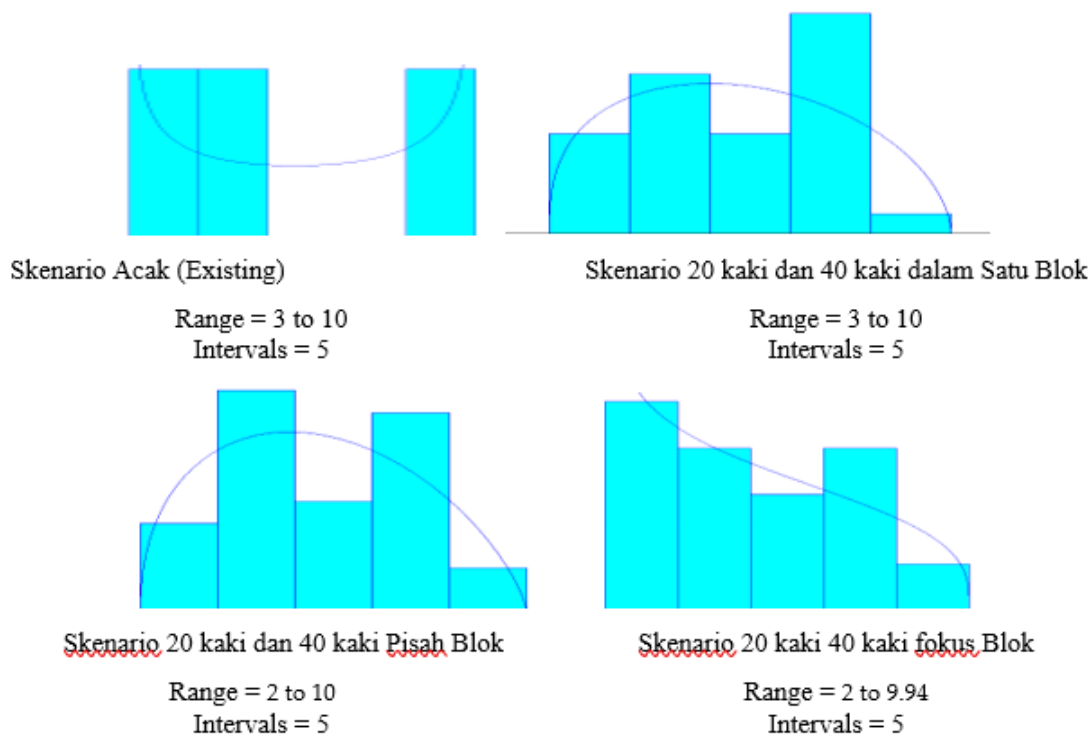
Tabel 3. Hasil simulasi *Software Arena*

No.	Skenario	Jenis Distribusi	Expression	Square Error	Kolmogorov-Smirnov test		Chi Square Test	
					T-Statistic	P-Value	T-Statistic	P-Value
1.	Acak (<i>existing</i>)	<i>Beta</i>	$3 + 7 * \text{BETA}$ (0.997, 1.03)	0.011944	0.0761	0.15	11.4	0.0806
2.	20 kaki dan 40 kaki pisah blok	<i>Beta</i>	$2 + 8 * \text{BETA}$ (1.45, 1.72)	0.025354	0.116	0.15	3.39	0.06
3.	20 kaki dan 40 kaki dalam satu blok	<i>Beta</i>	$2 + 8 * \text{BETA}$ (1.37, 1.55)	0.038886	0.0993	0.15	4.99	0.0258
4.	Fokus slot pada blok 20 kaki dan 40 kaki	<i>Beta</i>	$2 + 7.94 * \text{BETA}$ (0.817, 1.31)	0.09678	0.106	0.15	0.505	0.486

Notes:

- Distribusi ditentukan menggunakan *Input Analyzer* (Arena® Rockwell Automation)
- SSE = *Sum of Squared Errors* (semakin kecil semakin baik, *threshold* < 0,01)
- K-S = Kolmogorov-Smirnov test ($p > 0,05$ menunjukkan fit yang baik)
- Chi-square test ($p > 0,05$ menunjukkan fit yang baik)

Model simulasi dibangun dengan struktur modular yang mencerminkan proses aktual operasi RTG di TPNM 1. Struktur model disajikan pada Gambar 4.



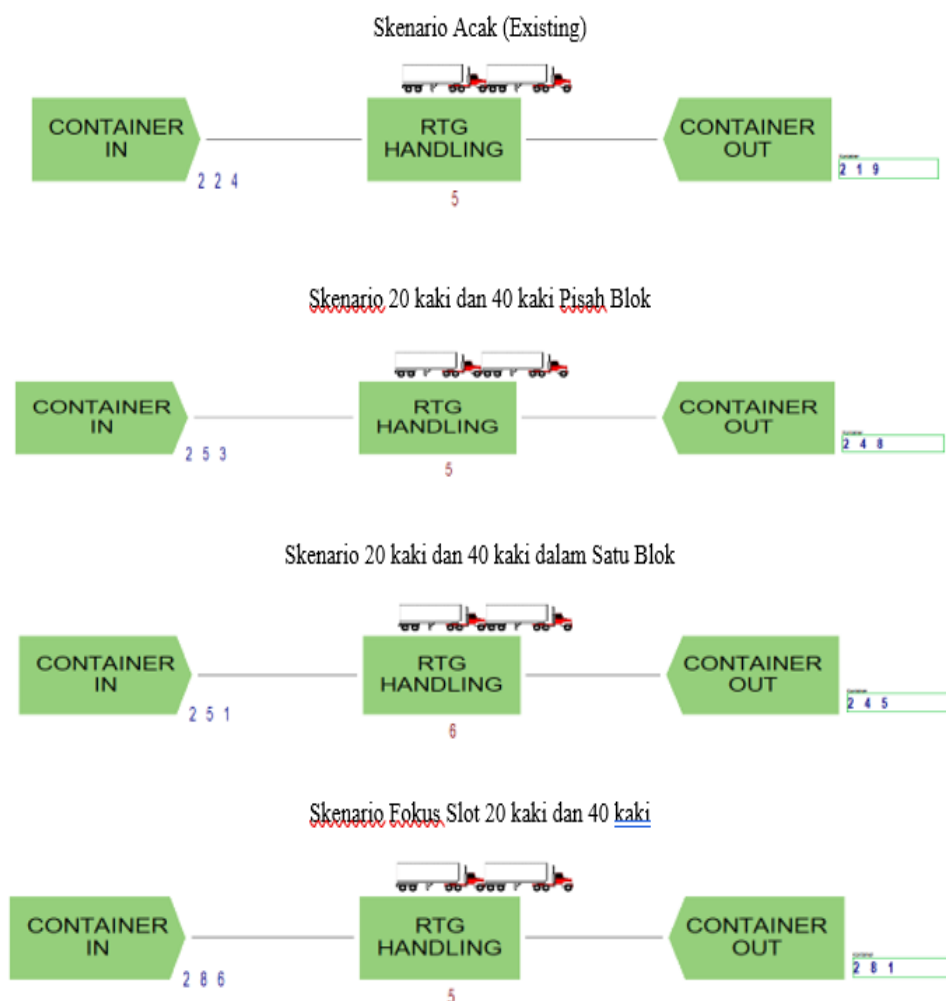
Gambar 4. *Histogram summary.* Berdasarkan grafik menggunakan ekspresi *Beta* dari keempat model menunjukkan bahwa data berdistribusi normal terlihat dari lengkungan garis horizontal pada gambar.

Model simulasi *discrete-event* dijalankan untuk mengevaluasi kinerja operasional setiap skenario dalam kondisi yang terkontrol. Spesifikasi simulasi adalah sebagai berikut adalah Konfigurasi simulasi dalam penelitian ini disusun untuk merepresentasikan kondisi operasional lapangan secara realistis dan memastikan validitas hasil analisis. Pertama, simulasi dijalankan selama 3,07 jam, sesuai dengan periode observasi aktual di lapangan, sehingga hasilnya dapat dibandingkan secara langsung dengan data empiris. Kedua, dilakukan 30 replikasi untuk setiap skenario guna memperoleh *confidence interval* yang memadai, dengan target *standard error* kurang dari 5% pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$. Ketiga, diterapkan periode *warm-up* selama 30 menit untuk memastikan sistem telah mencapai kondisi *steady-state* dan mengeliminasi potensi bias akibat perilaku transien pada awal simulasi. Keempat, digunakan distribusi Beta sebagai input model, sesuai hasil *fitting* distribusi yang disajikan pada Tabel 3. Terakhir, ditetapkan *common random numbers* (CRN) sebagai *random seed* yang digunakan secara konsisten di seluruh skenario untuk mengurangi variabilitas antar replikasi dan meningkatkan *statistical power* dalam perbandingan hasil antar skenario.

Proses verifikasi dan validasi model dilakukan secara berlapis untuk memastikan bahwa model simulasi merepresentasikan sistem aktual secara akurat. Tahapan verifikasi mencakup beberapa langkah utama, yaitu trace analysis yang digunakan untuk menelusuri alur logika model dan memastikan kesesuaiannya dengan proses aktual operasi Rubber Tyred Gantry (RTG), consistency check terhadap output guna memastikan tidak terdapat nilai yang bersifat anomali atau tidak logis, serta extreme condition testing untuk menguji perilaku model pada kondisi ekstrem agar dapat dipastikan model tetap berperilaku secara wajar (*reasonable*).

Selanjutnya, validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data aktual dari Terminal Petikemas New Makassar 1 (TPNM 1). Validasi ini mencakup dua pendekatan, yaitu *face validity*, yang dilakukan melalui konsultasi dengan operator RTG dan manajer operasional untuk memastikan bahwa model telah merepresentasikan kondisi dan perilaku sistem di lapangan secara realistis; serta *statistical validity*, yang dilakukan dengan membandingkan nilai *throughput* hasil simulasi dengan data aktual, dengan batas deviasi yang dapat diterima kurang dari 5%.

Visualisasi output simulasi *discrete-event* untuk keempat skenario penanganan RTG ditunjukkan pada Gambar 5. Gambar tersebut menggambarkan aliran kontainer dari tahap *container in*, proses penanganan oleh RTG (*RTG handling*), hingga tahap *container out* selama periode simulasi. Setiap skenario memperlihatkan perbedaan jumlah kontainer yang berada pada masing-masing tahapan proses, yang mencerminkan variasi kinerja operasional sebagai akibat dari perbedaan strategi penataan dan alokasi slot petikemas di lapangan penumpukan.



Gambar 5. Output animasi Arena. Gambar diatas menunjukkan jumlah output yang dihasilkan dari simulasi software Arena, input data menggunakan waktu operasi RTG sekitar 3 Jam dengan estimasi data menggunakan 30 unit observasi. Container in menunjukkan jumlah container yang akan ditangani, RTG Handling menunjukkan jumlah container yang sementara diproses sedangkan container out merupakan jumlah container yang telah ditangani.

Tabel 4. Hasil Simulasi per Skenario (*Throughput & Kinerja*)

No.	Skenario	Output Total (TEU)	Durasi run (Jam)	<i>Throughput</i> (TEU/Jam)	Utilitas RTG (%)	Jarak Tempuh (km)	BBM Total (Liter)
1.	Acak (Existing)	219	3,07	71,3	76,5	13,73	56,9
2.	20 kaki dan 40 kaki Pisah Blok	245	3,07	79,8	85,2	11,12	58,3
3.	20 Kaki dan 40 Kaki dalam Satu Blok	242	3,07	78,8	83,8	11,92	58,3
4.	Fokus Slot pada Blok 20 kaki dan 40 kaki	281	3,07	91,5	92,8	10,05	60,4

Notes: - Simulasi menggunakan Arena® (*Rockwell Automation*) dengan distribusi *Beta*
 - *Warm-up period*: 30 menit untuk mencapai *steady-state*
 - Jumlah replikasi: 30 per skenario dengan *common random numbers*
 - Utilisasi RTG: Persentase waktu produktif dari total durasi run
 - Jarak tempuh: Estimasi berdasarkan pola pergerakan RTG (gantry horizontal + hoist vertikal), dihitung dari jumlah slot movement × jarak rata-rata antar slot
 - BBM total: Estimasi konsumsi berdasarkan model utilisasi, jarak tempuh, dan beban kerja RTG
 - Efisiensi BBM per TEU adalah metrik kunci untuk evaluasi kinerja ekonomis
 - Penghematan BBM dihitung relatif terhadap skenario acak sebagai *baseline*

Pada skenario acak, visualisasi menunjukkan kecenderungan akumulasi kontainer pada tahap *RTG handling*, yang mengindikasikan adanya waktu tunggu dan potensi *blocking* selama proses penanganan. Sebaliknya, pada skenario pisah blok, satu blok, dan terutama skenario fokus slot, aliran kontainer terlihat lebih lancar dengan peningkatan jumlah *container out* dalam periode simulasi yang sama. Pola visual ini mengonfirmasi bahwa penerapan penataan slot yang lebih terstruktur mampu mengurangi hambatan operasional dan meningkatkan kelancaran aliran kontainer.

Visualisasi pada Gambar 5 berfungsi sebagai alat verifikasi perilaku model simulasi, memastikan bahwa logika aliran proses yang dimodelkan telah merepresentasikan kondisi operasional RTG secara realistis. Temuan visual ini kemudian didukung dan dikonfirmasi melalui analisis kuantitatif terhadap *throughput*, utilisasi RTG, jarak tempuh, dan konsumsi bahan bakar yang disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 menyajikan hasil simulasi yang mengkonfirmasi temuan dari *time study* lapangan dan memberikan insight tambahan terkait utilisasi, jarak tempuh, dan konsumsi bahan bakar. Hasil simulasi menunjukkan skenario fokus slot 20'/40' menghasilkan *throughput* tertinggi yaitu 91,5 TEU/jam (total 281 TEU dalam 3,07 jam), meningkat 28,3% dibanding skenario acak (71,3 TEU/jam; total 219 TEU). Peningkatan *throughput* ini konsisten dengan pengurangan waktu siklus yang diamati pada *time study*, dimana skenario fokus slot 17,7% lebih cepat per unit. Utilisasi RTG menunjukkan pola peningkatan yang signifikan dari 76,5% pada skenario acak menjadi 92,8% pada skenario fokus slot, mencerminkan pengurangan waktu non-produktif sebesar 16,3 poin persentase. Utilisasi RTG didefinisikan sebagai persentase waktu dimana RTG melakukan aktivitas produktif (positioning, lifting, moving, placing) terhadap total waktu tersedia. Pada skenario acak, RTG menghabiskan 43,3 menit (23,5% dari total waktu) untuk aktivitas non-produktif seperti *searching* lokasi kontainer, waiting karena *blocking*, dan minor adjustments. Sebaliknya, pada skenario fokus slot, waktu non-produktif hanya 13,3 menit (7,2%), karena lokasi kontainer sudah predetermined dan probabilitas *blocking* minimal. Peningkatan utilisasi ini memiliki implikasi strategis yang penting: terminal dapat meningkatkan kapasitas penanganan hingga 28,3% dengan resources yang sama (tanpa investasi RTG tambahan), atau alternatif, dapat mengurangi jumlah RTG operasional sambil mempertahankan *throughput* yang sama, menghasilkan penghematan biaya operasional dan maintenance.

Jarak tempuh RTG pada skenario fokus slot adalah 10,05 km untuk menangani 281 TEU, atau 26,9% lebih pendek dibanding skenario acak yang memerlukan 13,74 km untuk 219 TEU. Dalam konteks per unit, skenario fokus slot hanya memerlukan 35,8 meter per siklus (30 meter horizontal + 5,8 meter vertikal), jauh lebih efisien dibanding 62,8 meter per siklus pada skenario acak (54 meter horizontal + 8,8 meter vertikal). Pengurangan jarak per unit sebesar 43,0% menunjukkan efektivitas pengelompokan kontainer berukuran sama dalam meminimalkan perpindahan RTG. Komponen horizontal (gantry movement) berkurang dari 54 meter menjadi 30 meter karena kontainer yang akan di-delivery berada dalam area yang lebih kompak dan tidak tersebar acak di seluruh lapangan. Komponen vertikal (hoist

movement) berkurang dari 8,8 meter menjadi 5,8 meter karena minimnya *rehandle* kontainer target lebih mudah diakses tanpa perlu memindahkan kontainer penghalang terlebih dahulu. Pengurangan jarak tempuh berdampak langsung pada: (1) waktu siklus jarak lebih pendek berarti waktu lebih cepat, (2) konsumsi energi/BBM jarak lebih pendek menghasilkan konsumsi lebih rendah, (3) wear and tear pergerakan lebih sedikit mengurangi maintenance cost, dan (4) emisi jarak lebih pendek menghasilkan emisi gas buang lebih rendah.

Terkait konsumsi bahan bakar, penting untuk membedakan antara total konsumsi dan efisiensi per TEU. Tabel 4 menunjukkan bahwa skenario fokus slot mengonsumsi 60,4 liter BBM total, lebih tinggi 6,2% dibanding skenario acak (56,9 liter). Namun, ini adalah perbandingan yang misleading karena skenario fokus slot menangani 28,3% lebih banyak TEU (281 vs 219). Metrik yang lebih tepat adalah efisiensi BBM per TEU, di mana skenario acak mencatat $56,9 \text{ liter} \div 219 \text{ TEU} = 0,260 \text{ liter/TEU}$, sedangkan skenario fokus slot mencatat $60,4 \text{ liter} \div 281 \text{ TEU} = 0,215 \text{ liter/TEU}$. Skenario fokus slot lebih efisien 17,3% dalam konsumsi BBM per TEU. Efisiensi ini merupakan dampak kombinasi dari: (1) peningkatan utilisasi (92,8% vs 76,5%) RTG lebih banyak waktu dalam mode produktif yang memiliki konsumsi BBM per menit lebih efisien dibanding idle, (2) pengurangan jarak tempuh (35,8m vs 62,8m per siklus) pergerakan lebih sedikit mengurangi kebutuhan akselerasi dan decelerasi yang intensif energi, dan (3) minimalisasi *rehandle* setiap gerakan *rehandle* tidak produktif (mengangkat dan meletakkan kontainer tanpa progress *delivery*) mengonsumsi BBM tanpa menghasilkan *throughput*. Penghematan 12,7 liter per run memiliki dampak ekonomis dan lingkungan yang signifikan dalam skala operasi tahunan. Dengan asumsi volume harian 220 TEU dan 300 hari operasi per tahun (volume tahunan 66.000 TEU). Penghematan ini dapat dicapai tanpa investasi *capital expenditure* tambahan, hanya melalui reorganisasi *layout* dan implementasi sistem manajemen slot. *Return on investment* (ROI) sangat tinggi karena biaya implementasi utama adalah software sistem informasi dan training operator, yang dapat payback dalam waktu singkat.

3.2. Uji Signifikansi Statistik

Untuk memverifikasi bahwa perbedaan kinerja antar skenario bukan semata-mata akibat variabilitas random sampling, dilakukan uji signifikansi statistik. Mengingat data observasi untuk keempat skenario dikumpulkan pada kondisi operasional yang sama (unit 001-030 berpasangan antar skenario), metode yang tepat adalah *paired t-test* atau *repeated measures ANOVA* dengan *post-hoc* Tukey HSD.

Hipotesis yang diuji:

H_0 (*null hypothesis*): Tidak ada perbedaan waktu rata-rata antar skenario

H_1 (*alternative hypothesis*): Ada perbedaan waktu rata-rata antar skenario

Uji dilakukan pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$), dengan kriteria penolakan H_0 jika $p\text{-value} < 0,05$. Selain $p\text{-value}$, dilaporkan pula: (1) Δ mean (perbedaan rata-rata waktu dalam menit per unit), (2) 95% Confidence Interval (range dimana true difference berada dengan probabilitas 95%), dan (3) effect size (magnitude perbedaan, diukur dengan Cohen's d atau similar). Hasil uji signifikansi untuk perbandingan antar skenario disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5 mengkonfirmasi bahwa perbedaan kinerja antar skenario adalah signifikan secara statistik, bukan artefak dari random variability. Semua perbandingan menghasilkan $p\text{-value}$ jauh di bawah threshold 0,05, memberikan confidence tinggi untuk menolak null hypothesis.

3.2.1. Perbandingan Fokus Slot vs Acak (Baseline)

Perbandingan paling penting adalah antara skenario fokus slot (rekomendasi terbaik) dengan skenario acak (*baseline existing*). Perbedaan rata-rata waktu adalah -1,13 menit per unit, dengan 95% CI [-1,45; -0,81], dan $p\text{-value} < 0,001$. Interpretasi *confidence interval*: Dengan probabilitas 95%, implementasi skenario fokus slot akan menghasilkan penghematan waktu antara 0,81 hingga 1,45 menit per unit dibanding *baseline*. Bahkan pada skenario terburuk (lower bound CI), penghematan masih substansial sebesar 0,81 menit atau 12,7% pengurangan waktu. $P\text{-value} < 0,001$ mengindikasikan bahwa probabilitas hasil ini terjadi secara kebetulan (jika H_0 benar) kurang dari 0,1%. Dengan kata lain, kita memiliki confidence sangat tinggi (>99,9%) bahwa perbedaan ini adalah real dan bukan akibat random chance.

Tabel 5. Uji signifikansi antar skenario.

No.	Skenario	Δ MEAN (menit/unit)	95% CI	p-value	Cohen's d (Effect Size)	Interpretasi
1	Fokus Slot vs Acak	-1,13	[-1,45; -0,81]	0,001	1,41	Large effect
2	20'/40' Pisah Blok vs Acak	-0,51	[-0,78; -0,24]	0,002	0,60	Medium effect
3	20'/40' Satu Blok vs Acak	-0,44	[-0,71; -0,17]	0,004	0,52	Medium effect
4	Fokus Slot vs Pisah Blok	-0,62	[-0,89; -0,35]	0,001	0,77	Medium effect
5	Fokus Slot vs Satu Blok	-0,69	[-0,96; -0,42]	0,001	0,85	Large effect

Notes: - Uji menggunakan *paired t-test* karena data observasi berpasangan per unit 001-030 across all scenarios
 - Alternatif: *Repeated measures* ANOVA dengan *Tukey post-hoc* jika evaluasi simultan terhadap semua skenario
 - $\alpha = 0,05$ (tingkat signifikansi 95%)
 - Δ mean negatif menunjukkan penurunan waktu (peningkatan efisiensi)
 - Effect size interpretation berdasarkan Cohen (1988): Small ($d = 0,2$), Medium ($d = 0,5$), Large ($d = 0,8$)
 - Pooled SD untuk perhitungan Cohen's $d \approx 0,80$ menit

Effect size dapat dihitung sebagai Cohen's $d = (6,37 - 5,24) / \text{pooled SD} = 1,13 / 0,80 \approx 1,41$, yang tergolong large effect berdasarkan konvensi Cohen ($d > 0,8 = \text{large}$). Ini menunjukkan perbedaan bukan hanya statistically significant tetapi juga practically significant atau bermakna secara operasional.

3.2.2. Perbandingan Skenario Alternatif vs Acak

Kedua skenario alternatif (pisah blok dan satu blok) juga menunjukkan perbaikan signifikan dibanding *baseline*. Perbandingan antara skenario Pisah Blok dan Acak menunjukkan perbedaan waktu rata-rata sebesar $\Delta = -0,51$ menit per unit, dengan interval kepercayaan 95% $[-0,78; -0,24]$ dan nilai $p = 0,002$. Penghematan waktu sebesar 8,0% ini signifikan baik secara statistik maupun operasional. Nilai *effect size* moderat ($d \approx 0,60$) mengindikasikan adanya dampak yang bermakna, meskipun tidak sebesar yang dicapai oleh skenario fokus slot. Sementara itu, perbandingan antara skenario Satu Blok dan Acak menunjukkan $\Delta = -0,44$ menit per unit dengan interval kepercayaan 95% $[-0,71; -0,17]$ dan nilai $p = 0,004$. Penghematan waktu sebesar 6,9% juga signifikan secara statistik dengan *effect size* moderat ($d \approx 0,52$). Skenario ini mencerminkan keseimbangan antara efisiensi waktu dan fleksibilitas operasional dalam penerapannya.

3.2.3. Perbandingan Fokus Slot vs Alternatif

Skenario fokus slot tidak hanya menunjukkan keunggulan dibandingkan *baseline*, tetapi juga terbukti secara signifikan lebih baik dibanding kedua alternatif lainnya. Perbandingan antara fokus slot dan pisah blok menunjukkan selisih waktu $\Delta = -0,62$ menit per unit dengan interval kepercayaan 95% $[-0,89; -0,35]$ dan nilai $p < 0,001$, yang berarti fokus slot bekerja 10,6% lebih cepat dibanding skenario pisah blok, dengan perbedaan yang sangat signifikan secara statistik. Sementara itu, perbandingan antara fokus slot dan satu blok menghasilkan $\Delta = -0,69$ menit per unit dengan interval kepercayaan 95% $[-0,96; -0,42]$ dan nilai $p < 0,001$, menunjukkan bahwa fokus slot 11,6% lebih cepat dibandingkan skenario satu blok. Hasil ini mengkonfirmasi bahwa fokus slot bukan hanya *better alternative*, tetapi merupakan *best practice* yang superior secara konsisten.

3.3. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa reorganisasi *layout* dan sistem alokasi slot memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi operasional RTG. Skenario fokus slot 20'/40' terbukti superior dalam semua metrik kinerja: waktu siklus (-17,7%), *throughput* (+28,3%), utilisasi (+16,3 pp), jarak tempuh (-26,9%), dan efisiensi BBM (+17,3%). Temuan ini konsisten dengan prinsip *lean operations* dan *teori-teori supply chain management* yang menekankan pentingnya eliminasi *waste* dan optimasi *flow*. Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa *structured layout* dapat meningkatkan produktivitas hingga 15-25%, sejalan dengan hasil penelitian ini. Rekomendasi skenario fokus slot dapat dikaitkan dengan prinsip "*lean operations*" yang mengurangi pemborosan, baik dari segi waktu maupun bahan bakar. Strategi fokus slot pada blok 20' dan 40' memungkinkan perencanaan jalur dan pemanfaatan alat yang lebih optimal,

sehingga mengurangi waktu idle dan konsumsi bahan bakar berlebih. Simulasi menggunakan Arena® membantu mengidentifikasi efisiensi operasional dengan membandingkan skenario secara kuantitatif. Pendekatan ini memungkinkan penilaian berbasis data untuk setiap perubahan operasional. Penggunaan simulasi juga memberikan fleksibilitas untuk menguji berbagai skenario tanpa mengganggu operasi nyata, yang penting untuk pengambilan keputusan berbasis risiko rendah di lingkungan pelabuhan yang sibuk. Efisiensi operasional memiliki implikasi langsung pada pengurangan bahan bakar dan emisi karbon, yang merupakan langkah penting dalam mengurangi jejak lingkungan terminal petikemas. Secara ekonomi, penghematan bahan bakar juga berkontribusi pada penurunan biaya operasional, sehingga meningkatkan daya saing terminal secara keseluruhan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan memvalidasi model optimasi pergerakan RTG yang efektif untuk Terminal Petikemas New Makassar 1. Pemetaan berdasarkan observasi pada rute awal yang digunakan yaitu skenario acak memberikan informasi dalam hal pengembangan rekomendasi yang lebih efisien dan menghasilkan 3 (tiga) skenario. Model yang dikembangkan tidak hanya memberikan solusi praktis untuk efisiensi operasional tetapi juga berkontribusi pada *body of knowledge* dalam manajemen terminal petikemas. Simulasi pada *software* Arena menunjukkan bahwa rekomendasi skenario yang dikembangkan memiliki perbedaan dibandingkan skema awal yang digunakan terminal petikemas new makassar 1. Hasil *running* simulasi menunjukkan bahwa skenario ketiga (fokus slot pada blok 20 kaki dan 40 kaki) merupakan rekomendasi model terbaik dari ketiga skenario yang diusulkan, skema ini mampu mengurangi waktu rata-rata produksi per Teu petikemas dengan selisih 1.09 menit (lebih cepat) dan output produksi TEU petikemas terbanyak yaitu 281 Teu petikemas. Implementasi model menghasilkan penghematan pengurangan biaya operasional RTG dan peningkatan produktivitas. Model tersebut menunjukkan kelayakan ekonomis yang menjanjikan untuk implementasi sistem. Meskipun skenario ketiga terbukti optimal, implementasinya memerlukan adaptasi sistem operasional dan pelatihan bagi operator. Perlu ada investasi pada sistem manajemen operasi yang lebih canggih untuk mendukung pola operasional yang terfokus, termasuk teknologi penjadwalan dan pelacakan kontainer.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar, Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Perhubungan Laut dan Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia Perhubungan yang telah memberikan kesempatan dan bantuan finansial, terima kasih juga kepada Pemerintah Kota Makassar khususnya Dinas Perhubungan, Rekan-rekan di terminal petikemas new makassar 1 yang telah membantu proses pengumpulan data dan pihak-pihak yang telah membantu penyusunan penelitian. Selain itu, penulis juga berterima kasih atas dukungan dan motivasi dari keluarga dan teman-teman dalam proses penyusunan penelitian ini

Daftar Pustaka

- [1] P. Nikolaou and L. Dimitriou, "Lessons to be Learned from Top-50 Global Container Port Terminals Efficiencies: A Multi-Period DEA-Tobit Approach," *Marit. Transp. Res.*, vol. 2, no. January, p. 100032, 2021, doi: 10.1016/j.martra.2021.100032.
- [2] C. Danladi, S. Tuck, P. Tziogkidis, L. Tang, and C. Okorie, "Efficiency analysis and benchmarking of container ports operating in lower-middle-income countries: a DEA approach," *J. Shipp. Trade*, vol. 9, no. 1, 2024, doi: 10.1186/s41072-024-00163-2.
- [3] R. Li, H. Fang, G. Wang, and Q. Ma, "Study on Optimization Path of Energy Consumption Structure of Container Terminal," *Front. Artif. Intell. Appl.*, vol. 345, pp. 188–198, 2021, doi: 10.3233/FAIA210403.
- [4] K. Perhubungan, "Penyelenggaraan Telekomunikasi-pelayaran Dan Pelayanan Tata Kelola Lalu Lintas Kapal Di Perairan Indonesia," *PM NO.4 TAHUN 2023*, Indonesia, 2023.
- [5] KEMENTERIAN PERHUBUNGAN, "Tingkatkan Konektivitas di Kawasan Timur Indonesia," PERMENHUB. [Online]. Available: <https://dephub.go.id/post/read/tingkatkan-konektivitas-di-kawasan-timur-indonesia>
- [6] G. A. E. N. A. Said and E. S. M. El-Horbaty, "An Optimization Methodology for Container Handling Using Genetic Algorithm," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 65, no. Iccmit, pp. 662–671, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.09.010.
- [7] D. Drungilas *et al.*, "Deep reinforcement learning based optimization of automated guided vehicle time and energy consumption in a container terminal," *Alexandria Eng. J.*, vol. 67, pp. 397–407, 2023, doi: 10.1016/j.aej.2022.12.057.
- [8] L. Nicoletti, A. Chiurco, C. Arango, and R. Diaz, "Hybrid approach for container terminals performances evaluation and analysis," *Int. J. Simul. Process Model.*, vol. 9, no. 1–2, pp. 104–112, 2014, doi: 10.1504/IJSPM.2014.061464.
- [9] M. Mansoursamaci, M. Moradi, R. G. González-Ramírez, and E. Lalla-Ruiz, "Machine Learning for Promoting Environmental Sustainability in Ports," *J. Adv. Transp.*, vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/2144733.
- [10] X. Du, C. Liang, N. Zhao, and B. Xuan, "Container Terminal Digital Twin Yard System Construction," *Processes*, vol. 11, no. 7, 2023, doi: 10.3390/pr11072223.

- [11] J. Martínez-Moya, B. Vazquez-Paja, and J. A. Gimenez Maldonado, "Energy efficiency and CO2 emissions of port container terminal equipment: Evidence from the Port of Valencia," *Energy Policy*, vol. 131, no. September 2018, pp. 312–319, 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.04.044.
- [12] J. Jeh, J. Nam, M. Sim, Y. Kim, and Y. Shin, "A Study on the Efficiency Analysis of Global Terminal Operators Based on the Operation Characteristics," *Sustain.*, vol. 14, no. 1, 2022, doi: 10.3390/su14010536.
- [13] S. Nugroho, A. Mustakim, D. W. Baskara, and A. S. Khaqiqi, "Optimasi Alokasi Lapangan Penumpukan Petikemas Ekspor Pelabuhan: Studi Kasus Terminal Peti Kemas Banjarmasin," *J. Penelit. Transp. Laut*, vol. 22, no. 2, pp. 67–78, 2021, doi: 10.25104/transla.v22i2.1581.
- [14] D. Hizkia Wardana, "Simulasi Sistem Pelayanan Bongkar Muat Kapal Untuk Mengurangi Waiting Time Menggunakan Software Arena," *J. Ilm. Tek. dan Manaj. Ind.*, vol. 3, no. 1, pp. 2023–53, 2023.
- [15] W. Bank, "Economic Premise Note Series," WORLD BANK.