



Model Simulasi Sistem Antrian dalam Rantai Pasok Industri Batu Bara untuk Optimalisasi Jaringan Logistik

Yoga Rahmad Abdullah^{1✉}, Hilyatun Nuha¹, Hery Murnawan¹

⁽¹⁾Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya

DOI: 10.31004/jutin.v8i3.45696

✉ Corresponding author:

[yogarahmad175@gmail.com]

Article Info	Abstrak
Kata kunci: <i>Biaya Demurrage; Model Simulasi; Optimalisasi Logistik; Sistem Antrian; Software ARENA</i>	Permintaan batu bara dalam negeri yang tinggi mendorong perusahaan pertambangan seperti PT. X untuk meningkatkan efisiensi dalam sistem logistik dan rantai pasok. Penelitian ini bertujuan untuk merancang model simulasi sistem antrian guna mengoptimalkan kinerja logistik perusahaan, dengan memanfaatkan pendekatan teori antrian dan perangkat lunak simulasi ARENA. Penelitian ini mengevaluasi variabel kunci seperti durasi waktu tunggu, panjang antrian, serta tingkat pemanfaatan fasilitas bongkar muat sebagai upaya mengatasi permasalahan <i>demurrage</i> yang timbul akibat kurangnya efisiensi sistem. Metodologi yang digunakan menggabungkan pendekatan kuantitatif dan kualitatif dengan memanfaatkan data primer dan sekunder dari kegiatan logistik PT. X selama periode Januari hingga Juni 2024. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan efektivitas logistik dapat dicapai melalui pengaturan jumlah operator, perbaikan sarana bongkar muat, dan pengelolaan alur distribusi yang lebih terstruktur. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan dalam pengembangan model logistik berbasis simulasi di industri batu bara serta memberikan kontribusi terhadap penerapan teori antrian di lingkungan industri.
Keywords: <i>Demurrage Cost; Simulation Model; Logistics Optimization; Queuing System; ARENA Software</i>	Abstract <i>The high domestic demand for coal necessitates improved efficiency in logistics and supply chain systems, particularly for mining companies such as PT. X. This study aims to design a queuing system simulation model to optimize the company's logistics performance by utilizing queuing theory and the ARENA simulation software. The research evaluates key variables such as waiting time duration, queue length, and the utilization rate of loading and unloading facilities as an effort to address demurrage issues arising from inefficiencies in the system. The methodology combines both quantitative and qualitative approaches by utilizing primary and secondary data from PT. X logistics operations during the period of January to June 2024. Simulation results indicate that improved logistics effectiveness can be achieved through optimizing the number of operators, enhancing unloading</i>

facilities, and managing distribution flows in a more structured manner. This research is expected to serve as a foundation for the development of simulation-based logistics models in the coal industry and to contribute to the application of queuing theory in industrial settings.

1. PENDAHULUAN

Pemerintah Indonesia memproyeksikan bahwa kebutuhan batu bara dalam negeri (Domestic Market Obligation/DMO) pada tahun 2024 hingga 2025 akan meningkat signifikan hingga mencapai 187 juta metrik ton (MT), meningkat sekitar 35,5% dari angka penggunaan tahun 2019 yang hanya sekitar 138 juta MT sebagaimana tercatat dalam laporan (Anisatul Umah, 2020). Kenaikan ini didorong oleh tingginya permintaan dari berbagai sektor industri dalam negeri, terutama dari sektor strategis seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), industri semen, dan fasilitas pengolahan mineral seperti smelter, yang seluruhnya memerlukan pasokan energi dalam jumlah besar dan stabil. Hal ini disampaikan oleh Ridwan Djamaluddin selaku Direktur Jenderal Mineral dan Batu Bara Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, yang menjelaskan bahwa peningkatan permintaan domestik menjadi alasan utama di balik penyusunan proyeksi tersebut. Dalam merespons perkembangan ini, Asosiasi Pertambangan Mineral dan Batu Bara Indonesia (APBI) melalui Direktur Eksekutifnya, Hendra Sinadia, menyatakan bahwa angka kebutuhan sebesar 187 juta MT lebih realistis apabila diasumsikan adanya pertumbuhan permintaan sekitar 10% per tahun. (Anisatul Umah, 2020).



Gambar 1. Visualisasi end-to-end dari proses logistik

Batubara masih menjadi sumber energi utama di Indonesia dan memberikan kontribusi besar bagi ekonomi nasional. PT. X, menghadapi tantangan dalam memenuhi permintaan yang terus meningkat, terutama dalam hal efisiensi logistik. Keterlambatan transportasi sering menyebabkan biaya demurrage akibat molornya pengembalian tongkang. Penyebabnya meliputi hambatan bea cukai, logistik, serta keterbatasan tenaga kerja. Oleh karena itu, pengelolaan waktu bongkar muat dan kesiapan logistik perlu ditingkatkan agar kerugian dapat diminimalkan. (Darmawan et al., 2023)

Untuk mengatasi permasalahan logistik, PT. X perlu melakukan analisis sistemik menggunakan pendekatan teori antrian yang disimulasikan dengan software Arena 14.0. Melalui simulasi ini, perusahaan dapat mengidentifikasi kemacetan, memprediksi waktu tunggu, dan merancang solusi yang lebih efisien. Fokus penelitian berada pada sistem antrian saat bongkar muat di stockpile, dengan asumsi sistem berjalan normal, truk tidak berpindah server, dan antrian mengikuti prinsip FIFO (First In First Out). (Andini & Astuti, 2020)

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kondisi eksisting sistem antrian bongkar muat dan mengusulkan perbaikan berbasis hasil simulasi menggunakan software Arena 14.0. Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan metode simulasi dinamis, yang melibatkan pemodelan sistem logistik aktual berdasarkan data operasional PT. X, validasi model terhadap kondisi riil, serta eksplorasi skenario perbaikan untuk mengevaluasi dampaknya terhadap kinerja sistem. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi tiga pihak. Pertama, secara akademis, penelitian ini memperkaya literatur di bidang manajemen logistik dan rantai pasok, serta menjadi studi kasus nyata mengenai penerapan teori antrian dalam industri batu bara. Kedua, bagi PT. X, hasil penelitian dapat menjadi dasar dalam mengidentifikasi dan memecahkan masalah logistik aktual, mengurangi biaya operasional akibat demurrage, serta mengoptimalkan proses distribusi. (Azizi, 2022)

2. METODE

Metode penelitian ini dirancang secara sistematis untuk mengumpulkan dan menganalisis data guna menjawab permasalahan serta mencapai tujuan studi. Penelitian ini menggabungkan pendekatan kuantitatif dan kualitatif secara terpadu; pendekatan kuantitatif digunakan untuk analisis numerik melalui statistik, sementara pendekatan kualitatif digunakan untuk memahami konteks dan dinamika lapangan. Proses penelitian dimulai dari studi lapangan dan studi pustaka, dilanjutkan dengan pengumpulan data penting seperti waktu kedatangan dan pelayanan truk, yang kemudian diolah secara statistik untuk kebutuhan simulasi. (Siswanto et al., 2018) Data yang diperoleh dimasukkan ke dalam software Arena melalui tahapan input analysis dan pengembangan model konseptual, seperti ACD, event graph, dan rich picture. Model ini kemudian dibangun dalam Arena, lalu dilakukan proses verifikasi dan validasi untuk memastikan akurasi representasi sistem. Jika valid, analisis output dilakukan untuk menilai kinerja sistem dan menentukan solusi terbaik melalui simulasi skenario perbaikan. (Wulandari et al., 2021)

3. RESULT AND DISCUSSION

Input Analysis Data

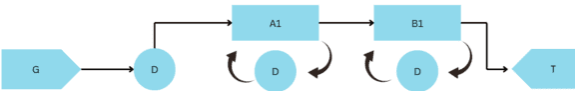
Tabel 1 Input Analysis Data Komponen Sistem Pada Stockpile

Entity	Resources	Attribute	Activities	Event	State Of Variables
Manajemen Pemasaran (Permanen)	Kantor	Seragam	Entry Permintaan Bongkar Muat	Pelayanan	Jumlah Server Sibuk
	Komputer	ID Card	Memberikan Pelayanan		Jumlah Server Idle
	Admin	Logo Perusahaan			
Operator Excavator (Permanen)	Stockpile	Seragam	Entry Permintaan Bongkar Muat	Pelayanan	Jumlah Server Sibuk
	Excavator	ID Card	Memberikan Pelayanan		Jumlah Server Idle
	Operator	Logo Perusahaan			
Operator Dump Truck (Temporary)	Stockpile	Seragam	Melakukan Permintaan Bongkar Muat	Kedatangan dan Kepergian	Jumlah Dump Truck Yang Ada Pada Sistem Antrian
	Dump Truck	ID Card			
	Operator	Logo Perusahaan			

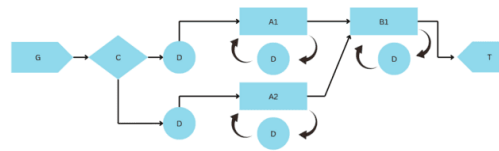
Tabel 1 merinci tiga entitas dalam sistem, yakni Manajemen Pemasaran dan Excavator sebagai entitas permanen, serta Dump Truck yang bersifat sementara. Manajemen dan Excavator berfokus pada proses pelayanan, sedangkan Dump Truck memengaruhi dinamika antrian melalui aktivitas masuk dan keluar. (Siswanto et al., 2018).

Pengembangan Model Konseptual

Activity Cycle Diagram



Gambar 2 ACD System Antrian Bongkar Muat Stockpile 1 Server



Gambar 3 ACD System Antrian Bongkar Muat Stockpile Dengan Menambahkan Server 2

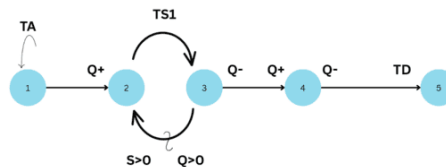
Gambar 2 dan 3 menggambarkan sistem antrian di area bongkar muat dengan konfigurasi server yang berbeda. Pada Gambar 1, pelayanan dilakukan secara tunggal melalui jalur A1 ke B1. Sebaliknya, Gambar 2 menambahkan server A2 sehingga entitas dapat memilih antara A1 dan A2 sebelum menuju B1. Penambahan ini bertujuan mempercepat proses layanan dan mengurangi antrian dalam sistem. (Hadisa, 2011).

Keterangan :

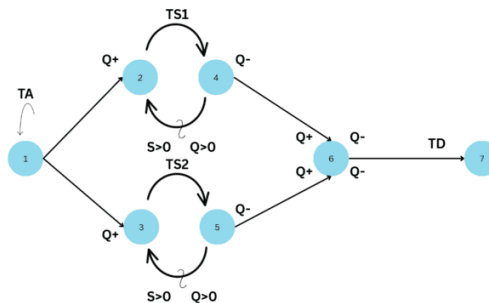
- G = Kedatangan
- C = Chance
- A1 = Server 1
- A2 = Server 2
- B1 = Jembatan Timbang
- D = Dump Truck
- T = Keluar Sistem

Event Graphs

Event Graphs :



Gambar 4 Event Graphs System Antrian Bongkar Muat Stockpile 1 Server



Gambar 5 Event Graphs System Antrian Bongkar Muat Stockpile Dengan Menambahkan Server 2

Gambar 4 dan 5 memperlihatkan proses masuknya dump truck ke sistem dengan dua server. Truk akan langsung dilayani bila ada server yang kosong, namun harus menunggu jika seluruh server sedang aktif. Setelah menyelesaikan proses pelayanan selama waktu tertentu (T_s), truk melanjutkan ke jembatan timbang lalu keluar dari sistem. Server yang selesai melayani akan menangani truk berikutnya jika antrean masih ada, atau tetap dalam kondisi siaga bila antrean kosong. Proses ini berlangsung berulang hingga seluruh truk terlayani. (Hadisa, 2011).

Keterangan :

1 = Kedatangan pelanggan

2 = Start server 1

3 = Start server 2

4 = End server 1

5 = End server 2

6 = Jembatan Timbang

7 = Keluar Sistem

TA = Time of arrival (waktu kedatangan)

TD = Dump truck keluar sistem

$S > 0$ = Menunjukkan server melakukan pelayanan

$Q > 0$ = Menunjukkan terjadinya antrian

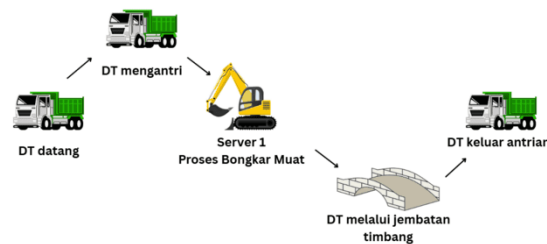
$Q+$ = Adanya antrian konsumen pertama

$Q-$ = Tidak ada antrian

TS = Waktu pelayanan (operator excavator yang sedang melakukan proses bongkar muat)

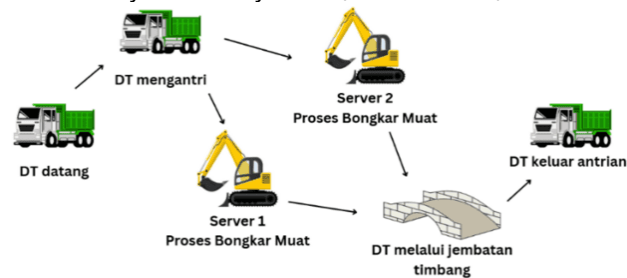
Rich Picture

Berikut adalah penjelasan rich picture di stockpile :



Gambar 6 Rich Picture Sistem Antrian Bongkar Muat di Stockpile dengan 1 Server

Gambar 6 menggambarkan mekanisme antrian dengan satu excavator sebagai server untuk melayani Dump Truck dalam proses bongkar muat. Jika truk datang saat server aktif, truk tersebut harus mengantri. Saat server tersedia, truk terdepan langsung dilayani. Setelah proses selesai, truk menuju jembatan timbang lalu keluar dari sistem, menandai selesainya siklus layanan. (Hadisa, 2011).



Gambar 7 Rich Picture Sistem Antrian Bongkar Muat di Stockpile dengan menambahkan Server 2

Gambar 7 menggambarkan sistem antrian dengan dua server yang melayani Dump Truck dalam kegiatan bongkar muat. Bila kedua server sedang aktif saat truk datang, maka truk harus mengantri. Truk di posisi terdepan akan diproses oleh server yang pertama kali tersedia. Setelah layanan selesai, truk menuju jembatan timbang dan keluar dari sistem, menandai selesainya proses (Hadisa, 2011).

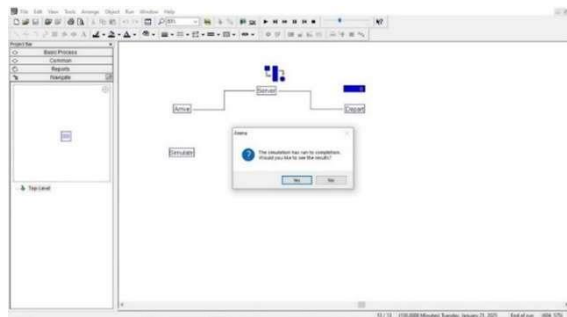
Tabel 2 Tipe Distribusi

Kejadian	Tipe Distribusi	Expression
WAD Trial 1 Hari 1	BETA	$-0.001 + 3.47e+003 * BETA(1.8, 0.481)$
WP Trial 1 Hari 1	BETA	$1.82e+003 + 999 * BETA(0.53, 0.729)$
WAD Trial 1 Hari 2	NORM	$NORM(2.64e+003, 893)$
WP Trial 1 Hari 2	UNIF	$UNIF(1.49e+003, 2.54e+003)$

Tabel 2 menyajikan empat jenis kejadian beserta jenis distribusi dan rumusnya. Pada Hari 1, distribusi BETA digunakan untuk memodelkan WAD dan WP. Sedangkan di Hari 2, WAD menggunakan distribusi NORMAL (mean 2640, deviasi 893), dan WP mengikuti distribusi UNIFORM dalam kisaran 1490 hingga 2540, yang mengasumsikan bahwa semua nilai dalam rentang tersebut memiliki peluang yang setara untuk muncul. (Siswanto et al., 2017f).

Verifikasi

Verifikasi adalah proses untuk memastikan bahwa model simulasi yang dikembangkan di komputer telah dibangun dengan benar secara teknis dan sesuai dengan rancangan konseptual awal. Tujuan utamanya adalah memastikan kesesuaian antara model yang diimplementasikan dengan desain yang direncanakan. (Siswanto et al., 2017f)



Gambar 8 Model Terverifikasi

Gambar 8 memperlihatkan bahwa simulasi pada software Arena telah berhasil dijalankan, ditunjukkan oleh munculnya pesan "The simulation has run to completion". Keberhasilan ini menunjukkan bahwa proses verifikasi dan validasi telah berjalan dengan baik, karena model dapat berjalan tanpa kesalahan dan menampilkan alur proses yang logis dimulai dari entitas masuk melalui blok Arrive, diproses di Server, lalu keluar melalui Depart. (Wulandari et al., 2021).

Validasi

Tujuan validasi model adalah memastikan bahwa model benar-benar mencerminkan sistem nyata dengan hasil yang akurat. Berbeda dari verifikasi yang memeriksa langkah-langkah dalam membangun model, validasi lebih menekankan kesesuaian hasil dan melibatkan pihak-pihak terkait karena tidak ada satu metode mutlak untuk menentukannya. Validasi dilakukan secara induktif berdasarkan bukti, misalnya melalui peninjauan animasi, pencocokan output dengan kondisi lapangan, evaluasi asumsi, serta perbandingan dengan data historis. Metode tambahan termasuk perbandingan dengan model lain, uji sensitivitas terhadap perubahan input, dan pengujian terhadap kondisi ekstrem untuk mengetahui respons model dalam skenario luar biasa. (Siswanto et al., 2017f)

Validasi Menggunakan *F*-test

F-Test Validitas Model

Data :

Rata - rata waktu pelayanan : 2167.30 detik

Variansi simulasi (S_1^2) : 114266.3

Variansi aktual (S_2^2) : 126077.5

$n = 17 \rightarrow df_1 = df_2 = 15$

Perhitungan $F : F = \frac{114266.3}{126077.5} = 0.9063$

(1)

F kritis ($\alpha = 0.05, df_1 = 15, df_2 = 15$) ≈ 2.52

Hasil :

Karena $F < F_{kritis}$, maka H_0 diterima $\rightarrow$ Model valid

Analisis Hasil Output

Simulasi sistem antrian di stockpile PT. X menunjukkan layanan belum efisien, ditandai dengan waktu tunggu dump truck yang panjang akibat kapasitas sistem yang tidak seimbang dengan beban kerja. Excavator bekerja mendekati batas maksimal, dan tanpa peningkatan efisiensi, risiko kemacetan serta keterlambatan distribusi akan meningkat. Hal ini dapat menimbulkan biaya tambahan seperti demurrage dan berpotensi menyebabkan kerugian finansial jangka panjang. (Hanrizaldi Bagus Satrio Langgeng et al., 2022)

Tabel 3 Analisis Hasil Output

Kejadian	Total Waktu (detik)	Waktu rata - rata (detik)
Waktu Antar Kedatangan (WAD)	80978	2699,27
Waktu Antri Server 1	11886	396,20
Waktu Proses (WP) Server 1	65019	2167,30
Waktu Delay Server 1	20406	680,20
Waktu Dump Truck dalam sistem	76905	2563,50

Tabel 3 merangkum lima jenis waktu dalam sistem, masing-masing disertai total dan rata-ratanya dalam satuan detik, guna menunjukkan durasi keseluruhan dan rata-rata proses pada tiap kejadian. (Siswanto et al., 2018).

Menentukan Jumlah Replikasi

Jumlah replikasi awal : $n = 17$

Rata - rata waktu pelayanan : 2167,30 detik

Variansi simulasi (S_1^2) : $114266.3 \rightarrow s = \sqrt{114266.3} \approx 337.92$ (1)

Rentang kepercayaan/halfwidth tidak langsung disebutkan, jadi kita asumsikan kamu ingin menurunkan nilai hw baru (hw'), misalnya menjadi 100 detik

Perhitungan dengan $Z = 1.96$ (untuk tingkat kepercayaan 95%)

$$n' = \left(\frac{1.96 \cdot 337.92}{100} \right)^2 = \left(\frac{662.32}{100} \right)^2 = (6.6232)^2 = 43.86 \quad (2)$$

Maka : $n' \approx 44$

Hasil :

Untuk mencapai halfwidth (hw') sebesar 100 detik dengan standar deviasi 337.92 dan tingkat kepercayaan 95%, jumlah replikasi minimal yang dibutuhkan adalah sekitar 44 kali percobaan simulasi.

Usulan Perbaikan Sistem Antrian Bongkar Muat di Stockpile

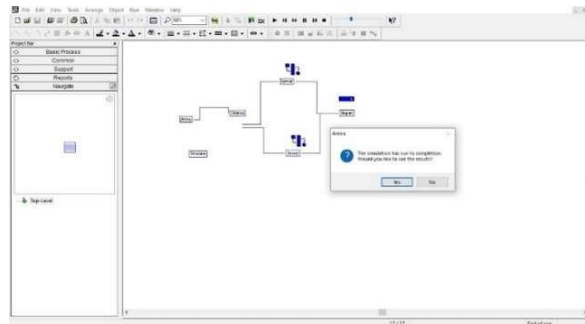
Tabel 4 Tipe Distribusi Skenario 1 dengan 2 Server

Kejadian	Tipe Distribusi	Expression
WAD Skenario 1	BETA	$-0.001 + 3.47e+003 * BETA(1.8, 0.481)$
WP Server 1 Skenario 1	BETA	$1.82e+003 + 999 * BETA(0.53, 0.729)$
WP Server 2 Skenario 1	TRIA	$TRIA(1.49e+003, 2.42e+003, 2.83e+003)$

Tabel 4 merangkum distribusi WAD, WP Server 1, dan WP Server 2 dalam Skenario 1, menggunakan distribusi BETA dan TRIANGULAR. Setiap distribusi dilengkapi parameter statistik guna merepresentasikan pola kejadian dalam model simulasi. (Siswanto et al., 2017f)

Verifikasi Skenario 1

Verifikasi merupakan proses untuk memastikan bahwa model simulasi telah dibangun dengan benar secara teknis sesuai dengan rancangan konseptual. Langkah ini dilakukan guna menjamin bahwa implementasi model di komputer telah sesuai dengan desain awal dan tidak mengandung kesalahan logika atau pemrograman. (Siswanto et al., 2017f)



Gambar 9 Skenario 1 Model Terverifikasi

Gambar 9 memperlihatkan bahwa simulasi pada software Arena berhasil diselesaikan, ditunjukkan dengan munculnya pesan "The simulation has run to completion. Would you like to see the results?". Ini mengindikasikan bahwa proses verifikasi dan validasi berjalan dengan baik, karena model dapat dijalankan tanpa error dan menampilkan alur proses yang logis, mulai dari entitas masuk (Arrive), diproses (Server), hingga keluar dari sistem (Depart). (Wulandari et al., 2021)

Validasi Skenario 1

Validasi memastikan model simulasi sesuai kondisi nyata dengan menilai ketepatan hasil, melibatkan pemangku kepentingan, dan menggunakan berbagai bukti seperti animasi, data historis, serta uji sensitivitas dan ekstrem. Pendekatannya induktif dan berbeda dari verifikasi yang fokus pada proses pembangunan model. (Siswanto et al., 2017f)

Validasi Menggunakan *F*-test

SKENARIO 1 : *F*-Test Validitas Model

Data :

Rata - rata waktu pelayanan server 1 : 1807.23 detik

Variansi simulasi server 1 (S_1^2) : 102304.1

Variansi aktual server 2 (S_2^2) : 108155.4

$n = 17 \rightarrow df_1 = df_2 = 15$

Perhitungan *F* : $F = \frac{102304.1}{108155.4} = 0.9460$

(1)

F kritis ($\alpha = 0.05, df_1 = 15, df_2 = 15$) ≈ 2.52

Hasil :

Karena $F < F_{\text{kritis}}$, maka H_0 diterima $\rightarrow$ Model valid pada Skenario 1

Analisis Hasil Output Skenario 1

Simulasi menunjukkan bahwa sistem bongkar muat di PT. X belum seimbang, dengan waktu tunggu truk yang lama akibat kapasitas layanan yang hampir penuh. Tanpa perbaikan, risiko keterlambatan dan biaya tambahan seperti demurrage akan terus membesar dan berdampak pada kondisi finansial perusahaan. (Hanrizaldi Bagus Satrio Langgeng et al., 2022)

Tabel 5 Analisis Hasil Output Skenario 1

Kejadian	Total Waktu (detik)	Waktu rata - rata (detik)
Waktu Antar Kedatangan (WAD)	46606	2742,53
Waktu Antri Server 1	5833	343,12
Waktu Antri Server 2	6373	374,88
Waktu Proses (WP) Server 1	38156	2244,47
Waktu Proses (WP) Server 2	37144	2184,94
Waktu Delay Server 1	10882	640,12
Waktu Delay Server 2	11137	655,12
Waktu Dump Truck dalam sistem Server 1	43989	2587,59
Waktu Dump Truck dalam sistem Server 2	43517	2559,82

Tabel 5 menyajikan data durasi berbagai proses dalam sistem dua server, mencakup waktu antar kedatangan, antrian, proses, dan delay pada Server 1 dan Server 2, serta total waktu *dump truck* berada dalam masing - masing server. Setiap kejadian dilengkapi dengan total waktu dan waktu rata - rata (dalam detik), yang memberikan gambaran kuantitatif tentang kinerja dan efisiensi sistem secara keseluruhan, dan delay turun ke kisaran 640,12 – 655,12 detik. (Siswanto et al., 2018).

Menentukan Jumlah Replikasi Skenario 1

Skenario 1 :

Varians : 87645.6

$$S_2 = \sqrt{87645.6} \approx 296.04 \quad (1)$$

$$n_2' = \left(\frac{1.96 \cdot 296.04}{100} \right)^2 = (5.802)^2 = 34 \quad (2)$$

Maka : $n_2' \approx 34$

Hasil :

Untuk mencapai halfwidth (hw') sebesar 100 detik dengan standar deviasi 296.04 dan tingkat kepercayaan 95%, jumlah replikasi minimal yang dibutuhkan adalah sekitar 34 kali percobaan simulasi.

Tabel 6 Tipe Distribusi Skenario 2 dengan 3 Server

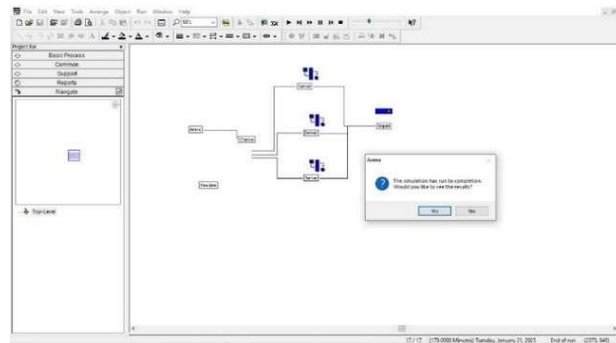
Kejadian	Tipe Distribusi	Expression
WAD Skenario 2	BETA	$-0.001 + 3.47e+003 * BETA(1.8, 0.481)$
WP Server 1 Skenario 2	BETA	$1.82e+003 + 999 * BETA(0.53, 0.729)$
WP Server 2 Skenario 2	TRIA	$TRIA(1.49e+003, 2.42e+003, 2.83e+003)$
WP Server 3 Skenario 2	BETA	$1.78e+003 + 1.08e+003 * BETA(0.682, 0.651)$

Tabel 6 menampilkan distribusi probabilitas untuk empat kejadian dalam Skenario 2, yaitu WAD, WP. Dalam simulasi, sebagian besar kejadian mengikuti distribusi BETA, kecuali WP Server 2 yang memakai distribusi segitiga. Setiap distribusi dijelaskan dengan parameter statistik utama untuk menggambarkan pola kejadian dalam model. (Siswanto et al., 2017f).

Verifikasi Skenario 2

Verifikasi adalah proses yang bertujuan untuk memastikan bahwa model yang telah dirancang dan diimplementasikan ke dalam sistem komputer sudah sesuai dan benar secara teknis. Tahapan ini dilakukan

untuk menjamin bahwa model simulasi yang dibangun benar - benar mencerminkan model konseptual yang telah direncanakan sebelumnya. (Siswanto et al., 2017f)



Gambar 10 Skenario 2 Model Terverifikasi & Tervalidasi

Gambar 10 menunjukkan simulasi di software Arena berhasil dijalankan hingga selesai, ditandai dengan pesan "The simulation has run to completion". Hal ini menandakan bahwa proses verifikasi dan validasi telah berhasil, serta model dapat berjalan lancar tanpa kendala teknis, menggambarkan alur entitas dari masuk (Arrive), diproses (Server), hingga keluar (Depart) dengan logis. (Wulandari et al., 2021).

Validasi Skenario 2

Validasi model bertujuan memastikan kesesuaian antara simulasi dan kondisi nyata, dengan menekankan ketepatan hasil akhir. Tidak seperti verifikasi yang menilai proses pembangunan model, validasi bersifat induktif dan melibatkan pengguna serta stakeholder. Proses ini dilakukan melalui evaluasi animasi, perbandingan dengan data nyata, peninjauan asumsi, serta pengujian sensitivitas, ekstrem, dan data historis guna mengukur keandalan model dalam berbagai skenario. (Siswanto et al., 2017f)

Validasi Menggunakan *F*-test

SKENARIO 2 : *F*-Test Validitas Model

Data :

Rata - rata waktu pelayanan server 1 : 1653.52 detik

Variansi simulasi server 1 (S_1^2) : 98452.6

Variansi aktual server 2 (S_2^2) : 101930.3

$n = 16 \rightarrow df_1 = df_2 = 15$

Perhitungan *F* : $F = \frac{98452.6}{101930.3} = 0.9661$

(1)

F kritis ($\alpha = 0.05, df_1 = 15, df_2 = 15$) ≈ 2.52

Hasil :

Karena $F < F_{kritis}$, maka H_0 diterima $\rightarrow$ Model valid pada Skenario 2

Analisis Hasil Output Skenario 2

Hasil simulasi sistem antrian bongkar muat batu bara di stockpile PT. X menunjukkan masih rendahnya efisiensi logistik. Waktu tunggu dump truck yang panjang mencerminkan ketidakseimbangan antara kapasitas layanan dan beban kerja, menyebabkan antrean serta penurunan kinerja distribusi. Excavator dalam sistem tercatat telah bekerja mendekati kapasitas penuhnya. Tanpa peningkatan efisiensi atau kapasitas, potensi kemacetan dan keterlambatan distribusi akan meningkat. Dampaknya bisa berupa biaya tambahan seperti demurrage, yang jika terus terjadi, berisiko membebani kondisi keuangan perusahaan dalam jangka panjang. (Hanrizaldi Bagus Satrio Langgeng et al., 2022)

Tabel 7 Analisis Hasil Output Skenario 2

Kejadian	Total Waktu (detik)	Waktu rata - rata (detik)
Waktu Antar Kedatangan (WAD)	46606	2742,53
Waktu Antri Server 1	5833	343,12
Waktu Antri Server 2	6373	374,88
Waktu Antri Server 3	4276	251,53
Waktu Proses (WP) Server 1	38156	2244,47
Waktu Proses (WP) Server 2	37144	2184,94
Waktu Proses (WP) Server 3	39622	2330,71
Waktu Delay Server 1	10882	640,12
Waktu Delay Server 2	11137	655,12
Waktu Delay Server 3	8875	522,06
Waktu Dump Truck dalam sistem Server 1	43989	2587,59
Waktu Dump Truck dalam sistem Server 2	43517	2559,82
Waktu Dump Truck dalam sistem Server 3	43898	2582,24

Tabel 7 merangkum data kinerja sistem dengan tiga server, mencakup waktu antar kedatangan, waktu antri, waktu proses, delay, dan total waktu dump truck di masing - masing server. Setiap kejadian disajikan dengan total waktu dan waktu rata - rata dalam detik, yang memberikan gambaran menyeluruh tentang durasi dan efisiensi proses dalam sistem tersebut. (Siswanto et al., 2018)

Menentukan Jumlah Replikasi Skenario 2

Skenario 2 :

Varians : 69796.2

$$S_3 = \sqrt{69796.2} \approx 264.18 \quad (1)$$

$$n_3' = \left(\frac{1.96 \cdot 296.18}{100} \right)^2 = (5.177)^2 = 27 \quad (2)$$

Maka : $n_3' \approx 27$

Hasil :

Untuk mencapai halfwidth (hw') sebesar 100 detik dengan standar deviasi 264.18 dan tingkat kepercayaan 95%, jumlah replikasi minimal yang dibutuhkan adalah sekitar 27 kali percobaan simulasi.

Tabel 8 Jumlah Replikasi dari 3 Trial

Trial	s (Standar Deviasi)	n' (Jumlah Replikasi Baru)
1	337.92	44
2	296.04	34
3	264.18	27

Tabel 8 menampilkan hasil dari tiga "Trial" (percobaan), dengan mencantumkan nilai "s" (standar deviasi) dan "n'" (jumlah replikasi baru) untuk masing - masing. Standar deviasi menggambarkan tingkat penyebaran data dalam setiap trial, sementara "n'" menunjukkan jumlah replikasi tambahan yang disarankan berdasarkan tingkat variasi data yang diamati. (Siswanto et al., 2017f)

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan satu server (excavator) mampu menurunkan waktu tunggu hingga 13%, dari 396,20 detik menjadi sekitar 343 detik. Penambahan server ketiga dapat mengurangi waktu tunggu hingga 37%. Disarankan penggunaan dua unit excavator saat jam sibuk, dan tiga unit saat permintaan tinggi untuk mencegah demurrage. Pengaturan jadwal kedatangan dump truck secara merata dan monitoring utilisasi server secara berkala penting untuk mencegah bottleneck. Meskipun menambah biaya operasional, strategi ini sebanding dengan penghematan biaya demurrage yang dapat timbul akibat keterlambatan distribusi. Saran untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengembangkan model simulasi dengan mempertimbangkan variabel eksternal seperti cuaca, kondisi jalan, dan kapasitas dump truck yang bervariasi. Selain itu, analisis dapat diperluas melalui penambahan aspek biaya operasional dan pemeliharaan secara rinci, serta penggunaan jumlah replikasi yang lebih sesuai. Pendekatan multi-echelon dan integrasi distribusi hingga pelabuhan juga dapat dipertimbangkan agar model rantai pasok menjadi lebih komprehensif. Untuk meningkatkan akurasi, disarankan penggunaan data real-time dan software simulasi yang lebih canggih.

5. REFERENSI

- Abryandoko, E. W. (2022). *Statistik Industri I* (N. Rismawati (ed.)). WIDINA BHAKTI PERSADA BANDUNG.
- Adolph, R. (2016). *KAJIAN TEKNIS DESAIN DAN MANAJEMEN PENIMBUNAN*. 1–23.
- Andini, R., & Astuti, Y. P. (2020). Penerapan Teori Antrian Bongkar Muat Pada Docking Kapal Tanker. *MATHunesa: Jurnal Ilmiah Matematika*, 9(2), 437–446. <https://doi.org/10.26740/mathunesa.v9n2.p437-446>
- Anisatul Umah. (2020). *Konsumsi Batu Bara Domestik Ditargetkan Naik 35,5% pada 2024*. CNBC Indonesia. <https://www.cnbcindonesia.com/news/20200828174052-4-182880/konsumsi-batu-bara-domestik-ditargetkan-naik-355-pada-2024>
- Arta, M., & Ansory. (2019). Rancangan Teknis Stockpile 2 Di PT Bukit Asam Tbk , Unit Pelabuhan Tarahan - Lampung. *Jurnal Bina Tambang*, 4(1), 266–275.
- Azizi, M. (2022). Analisa Sistem Antrian Loker Pembayaran (Kasir) pada CV Toko Happy Swalayan Srigunting dengan Menggunakan Software Arena. *Doctoral Dissertation, Universitas Medan Area*, 13(1), 10–23.
- Budiharti, N. (2015). Simulasi Sistem Industri. In *Suparyanto dan Rosad (2015 (Vol. 5, Issue 3)*.
- Darmawan, R. S., Sukendar, I., & Sagaf, M. (2023). Analisis Supply Chain Management Dalam Menjaga Kontinuitas Pasokan Batubara Dengan Mengoptimalkan Alat Angkut Batubara (Additional Vessel) Pada Pt. Pln (Persero) Unit Induk Pembangkitan Tanjung Jati B. *Jurnal Teknik Industri (JURTI)*, 2(2), 86–95.
- Hadisa, G. (2011). *Teori Antrian (Queueing Theory)*. 1–7.
- Hanrizaldi Bagus Satrio Langgeng, Nuha, H., & Murnawan, H. (2022). Analisis Sistem Antrian Pelayanan Bongkar Muat Kapal Tongkang Batu Bara pada Mother Vessel untuk Meminimalisir Waktu Bongkar Muat pada PT. Handil Bhakti Persada. *Jurnal Teknik Industri*, 12(2), 133–143. <https://doi.org/10.25105/jti.v12i2.15638>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2024). *Keputusan Menteri ESDM Nomor 277.K/MB.01/MEM.B/2024.pdf*.
- Kumparan. (2024). *Bahlil Tetapkan Harga Acuan Batu Bara dan Mineral Oktober 2024*. KumparanBisnis. <https://kumparan.com/kumparanbisnis/bahlil-tetapkan-harga-acuan-batu-bara-dan-mineral-oktober-2024-23mflRRvJ6Z?ref=register>
- Nugroho, D. S. (2024). *Harga Batubara Acuan Oktober 2024 Naik Jadi USD131,17 Per Ton*. Banyuurip. https://suarabanyuurip.com/2024/10/31/harga-batubara-acuan-oktober-2024-naik-jadi-usd13117-per-ton/?utm_source=chatgpt.com
- Panjaitan, D. D. I., Virgiyanti, L., & Wiryanto, Y. H. (2018). Cost Coal Processing di Stckpile Posrt Muara Bengalun PT. Mitrabara Adiperdana, Tbk Desa Malinau Kota Kecamatan Malinau Kota Kabupaten Malinau Provinsi Kalimantan Utara. *Jurnal Teknika*, 2(1), 68–76.
- Rusli, E. O., Prasetyo, H., & Fitria, L. (2014). Rancangan Sistem Pengendalian Persediaan Bahan Baku Sandal Dengan Menggunakan Metode Single Item Single Supplier dan Multi Item Single Supplier (Studi Kasus Di PT. Cat Style). *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 02(04), 96–107.
- Siswanto, N., Latiffianti, E., & Wiratno, S. E. (2017a). *Simulasi Sistem Diskrit Bab 1: Pengenalan Simulasi*.

- Siswanto, N., Latiffianti, E., & Wiratno, S. E. (2017b). *Simulasi Sistem Diskrit Bab 2: Dinamika Sistem*.
- Siswanto, N., Latiffianti, E., & Wiratno, S. E. (2017c). *Simulasi Sistem Diskrit Bab 3: Dasar-Dasar Simulasi*.
- Siswanto, N., Latiffianti, E., & Wiratno, S. E. (2017d). *Simulasi Sistem Diskrit Bab 4: Simulasi Kejadian Diskrit*.
- Siswanto, N., Latiffianti, E., & Wiratno, S. E. (2017e). *Simulasi Sistem Diskrit Bab 6: Analisis Data Input Simulasi*.
- Siswanto, N., Latiffianti, E., & Wiratno, S. E. (2017f). *Simulasi Sistem Diskrit Bab 7: Analisis Output Simulasi*.
- Siswanto, N., Latiffianti, E., & Wiratno, S. E. (2018). *Simulasi Sistem Diskrit Bab 5: Pengembangan Model dengan Arena Nurhadi*.
- Ummah, M. S. (2019). Network and Discrete Location. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1). http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- UTAMI, F. O. (2023). *ANALISIS TERJADINYA PENUNDAAN PEMUATAN PADA PROSES TRANSHIPMENT BATU BARA RUTE BINTANG NINGGI-TABONEO DI PT. ENERGI SAMUDRA LOGISTICS*.
- Wulandari, Y., Wahyudi, T., Rahmahwati, R., Uslianti, S., & Prima, F. (2021). Simulation of Queue System of Retirement Fund Retrieval at The Sanggau Post Office During the Covid-19 Pandemic Using Arena Software. *Opsi*, 14(1), 89. <https://doi.org/10.31315/opsi.v14i1.4776>