



## Pengembangan Model Terminal Curah Cair Dengan Metode Simulasi Diskrit *The Development Of Liquid Bulk Terminal Model Using Discrete Event Simulation*

Della Pratama Susetyo<sup>1</sup>, Armand Omar Moeis<sup>1\*</sup>, Dimas Kunto Wibisono<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia,  
Jalan Kampus Baru UI, Depok 16424, Indonesia

<sup>2)</sup> PT Pertamina International Shipping,  
Jalan. Gatot Subroto No.3, Jakarta 12950, Indonesia

Diterima 11 Nov 2019, diperiksa 12 Des 2019, disetujui 29 Des 2019

### Abstrak

Seiring dengan pertumbuhan ekonomi, konsumsi BBM dan BBG semakin meningkat dari tahun ke tahun. Peningkatan tersebut menyebabkan bertambahnya kuantitas kapal tanker untuk mendistribusikan BBM dan BBG ke lokasi tujuan. Kapasitas pelabuhan tidak dapat mengimbangi kuantitas kapal tanker yang meningkat pesat sehingga terbentuk antrian kapal di pelabuhan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang model simulasi untuk mengevaluasi aspek-aspek operasional pada proses bongkar muat BBM dan BBG di sebuah terminal transit di Indonesia agar didapat keputusan investasi yang tepat. Metode sistem diskrit yang digunakan dalam penelitian ini mampu menggambarkan dan mengevaluasi proses dan kegiatan kapal di pelabuhan berdasarkan sistem nyata. Penelitian menunjukkan bahwa perbaikan waktu pada kegiatan bongkar muat kapal menggunakan skenario yang diuji dapat mengurangi antrian kapal dan mengurangi biaya yang harus dikeluarkan. Tiga skenario yang diuji untuk mengurangi waktu antrian kapal adalah penambahan kuantitas *jetty*, pembuatan prioritas pelayanan kapal *Medium Range* dan *Small 2*, dan implementasi *simultaneous pumping* pada kegiatan bongkar kapal.

Kata Kunci: Antrian Kapal, BBM dan BBG, Bongkar Muat Kapal, Simulasi Sistem Diskrit

### Abstract

Along with economic growth, the consumption of oil and gas fuel has increased from time to time. The increase of oil and gas fuel usage has resulted in the rise of the number of tanker ships to distribute both types of cargo all over Indonesia. The capacity of ports can't keep with the drastic increase in the number of tanker ships, and thus, queues of vessels are formed in many ports. This research aims to construct a simulation model to evaluate the operational aspects of a loading and discharge process for oil and gas fuel in a transit terminal in Indonesia to make the right investment choice. Discrete Event Simulation method that is used in this research is capable of visualizing and evaluating the processes and activities of tanker ships in a port based on the real system. This research shows that the improvement of time during the loading and discharge process using the scenarios tested can reduce ship queue time and logistic price. The three scenarios to reduce ship queue time are the addition of jetty quantity, prioritization of ship service for Medium-Range and Small 2 ships, and the implementation of simultaneous pumping in the unloading process.

Keywords: Ship Queue, Oil and Gas, Ship Loading and Unloading Port, Discrete Event Simulation

### 1. Latar Belakang

Fenomena pertumbuhan ekonomi merupakan indikasi keberhasilan pembangunan ekonomi suatu negara. Menurut Setiawan *et.al.* (2019) terjadi hubungan timbal balik antara pertumbuhan ekonomi dengan konsumsi energi para penggunanya (Ernita *et.al.*, 2013).

Indonesia memiliki peningkatan kebutuhan akan bahan bakar minyak/BBM dan bahan bakar gas/BBG (Budya & Arofah, 2011). Distribusi kedua jenis bahan bakar tersebut dilakukan melalui moda transportasi laut. Dari segi kapasitas muatan atau beban yang dibawa, transportasi laut adalah sistem transportasi yang ekonomis dan paling efektif dibandingkan dengan sistem lainnya (Dwarakish & Salim, 2015; Stopford, 2009).

Banyaknya permintaan konsumsi menyebabkan kapal tanker yang beroperasi untuk melakukan proses

\* Corresponding author. Tel: +62 811 902 596  
E-mail: [armand.omar@ui.ac.id](mailto:armand.omar@ui.ac.id)

distribusi semakin bertambah secara kuantitas. Akan tetapi, pertumbuhan infrastruktur pelabuhan tidak dapat menyeimbangi pesatnya pertumbuhan jumlah kapal yang beroperasi dan bertambat di pelabuhan. Hal tersebut menyebabkan terdapatnya antrian kapal-kapal di pelabuhan. Salah satu kegiatan yang mempengaruhi panjangnya antrian kapal adalah proses bongkar muat kapal (Kazemi & Szmerekovsky, 2015). Rata-rata lama waktu kapal di pelabuhan (di industri hilir migas) adalah 63 jam atau 2,6 hari, dimana dalam rentang waktu kurang lebih satu tahun, lama waktu yang dihabiskan kapal di laut adalah 131 hari (36%) dan di pelabuhan sebanyak 243 hari (64%). Antrian di pelabuhan dapat menimbulkan kerugian berupa biaya logistik yang besar dikarenakan biaya sandar dan sewa kapal yang mahal, serta dapat menyebabkan keterlambatan kapal-kapal lainnya. Proses yang menjadi fokus untuk pengurangan waktu di dalam sistem pada penelitian ini adalah proses bongkar muat bahan bakar minyak dan gas.

Penelitian ini akan mengkaji proses-proses yang terjadi pada pelabuhan yang dilakukan dari sudut pandang sistem melalui perancangan model simulasi sistem diskrit. Aspek-aspek yang akan dikaji lebih lanjut dalam penelitian ini adalah antrian kapal untuk memasuki dermaga, *laytime* kapal, waktu pelayanan sebuah kapal ketika sandar, dan waktu keseluruhan sebuah kapal di dalam pelabuhan. Fokus dari penelitian yaitu proses bongkar muat BBM dan BBG pada sebuah terminal transit di Indonesia dengan periode penelitian satu tahun. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan model antrian kapal untuk menguji skenario kebijakan investasi yang paling ekonomis dan efisien dalam mengurangi waktu antrian kapal.

### Tinjauan Teoritis

Kargo dengan jenis *bulk* atau benda curah merupakan jenis kargo yang tidak dikemas. Kargo curah dapat dikelompokkan menjadi kargo curah cair seperti minyak mentah, produk-produk minyak, produk kimia, dan minyak sayur, dan kargo curah kering berbentuk butiran serti biji besi, gula, garam, dan senyawa kimia (pupuk, biji plastik, resin bubuk, serat sintetis, dsb).

Bahan bakar minyak (BBM) dan bahan bakar gas (BBG) yang merupakan fokus dari penelitian ini termasuk ke dalam jenis kargo curah cair. Kargo berbentuk cair ini dimuat dan dibongkar melalui satu bagian kapal yaitu di *manifold* sentral kapal. Hal ini menyebabkan peralatan bongkar muat tidak diperlukan untuk berada di seluruh bagian kapal untuk melakukan pelayanan bongkar muat. Oleh karena itu, terminal untuk kargo curah cair berbeda karena kapal tidak membutuhkan perimeter dermaga yang panjang untuk melakukan proses bongkar muat (Ligteringen & Velsink, 2014). Selain ukuran dermaga yang dibutuhkan, terdapat beberapa aspek lain yang berhubungan dengan dimensi dan sifat dari fasilitas dermaga yang dibutuhkan oleh kapal dengan angkutan kargo curah cair.

*Oil Tanker* merupakan kapal pengangkut produk-produk minyak melintasi laut, yang terbagi menjadi dua kategori yaitu minyak mentah dan minyak yang telah diolah menjadi produk seperti BBM. Transportasi minyak mentah biasanya dilakukan dengan menggunakan kapal tanker berukuran besar atau *Very Large Crude Carrier* (VLCC) dengan kapasitas 200.000 ton atau lebih, sedangkan transportasi minyak olahan menggunakan kapal yang lebih kecil. Berikut merupakan dimensi dari *oil tanker* dengan berbagai ukuran.

Tabel 1. Dimensi Oil Tanker

| DWT [t] | water displacement [t] | length L <sub>oa</sub> [m] | width [m] | fully loaded draught [m] | fully loaded freeboard [m] |
|---------|------------------------|----------------------------|-----------|--------------------------|----------------------------|
| 20,000  | 26,000                 | 175                        | 21.4      | 9.2                      | 2.9                        |
| 50,000  | 65,000                 | 230                        | 31.1      | 11.6                     | 3.7                        |
| 70,000  | 87,000                 | 245                        | 35.4      | 12.8                     | 4.0                        |
| 100,000 | 125,000                | 272                        | 39.7      | 14.6                     | 4.6                        |
| 150,000 | 185,000                | 297                        | 44.2      | 17.1                     | 5.5                        |
| 200,000 | 240,000                | 315                        | 48.8      | 18.9                     | 6.4                        |
| 250,000 | 295,000                | 338                        | 51.8      | 20.1                     | 7.3                        |
| 325,000 | 375,000                | 346                        | 53.4      | 24.7                     | 7.3                        |
| 442,000 | 500,000                | 379                        | 68.0      | 24.5                     | 9.5                        |

Sumber: Ligteringen & Velsink (2014)

Gas alam diolah menjadi dua produk yaitu LNG (*Liquefied Natural Gas*) dan LPG (*Liquefied Petroleum Gas*). Kedua produk tersebut ditransportasikan melalui laut setelah dilakukan proses likuidasi yaitu pengubahan fase gas alam yang dikondensasikan dengan suhu sekitar -161oC menjadi berwujud cair untuk mengurangi volumenya sehingga transportasi lebih ekonomis. Transportasi maritim untuk LNG (sebagian besar metana, densitas relatif 0,45) dan LPG (campuran dari propana dan butana, densitas relatif 0,6) terjadi dalam keadaan didinginkan atau dibekukan. Terdapat dua tipe kapal yang dikategorikan berdasarkan jenis gas tersebut yaitu *Liquefied Natural Gas* dan *Liquefied Petroleum Gas Carriers*. LNG dikondensasikan pada suhu yang rendah dan diberikan tekanan sedikit lebih tinggi diatas tekanan atmosfer, sedangkan LPG ditransportasikan dengan tiga kondisi berbeda, yaitu 1) Dibekukan sepenuhnya diatas tekanan level atmosfer, 2) Dibekukan dengan tekanan pada temperatur dibawah suhu ruangan dan diatas tekanan level atmosfer dan 3) Diberikan tekanan penuh pada suhu ruangan. Berikut pada tabel 2 merupakan dimensi dari *liquid gas carrier*.

Tabel 2. Dimensi *Liquid Gas Carrier*

| cargo<br>[m <sup>3</sup> ] | water displacement<br>[t] | length<br>L <sub>oa</sub> [m] | width<br>[m] | fully loaded<br>draught [m] | fully loaded<br>freeboard [m] |
|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 10,000                     | 15,000                    | 138                           | 19.2         | 7.0                         | 4.3                           |
| 35,000                     | 43,000                    | 187                           | 27.0         | 10.5                        | 7.8                           |
| 75,000                     | 69,000                    | 220                           | 34.8         | 11.5                        | 9.2                           |
| 125,000                    | 110,000                   | 278                           | 42.0         | 13.6                        | 14.5                          |
| 210,000                    | 149,000                   | 315                           | 50.0         | 12.5                        | 14.5                          |
| 266,000                    | 179,000                   | 345                           | 53.8         | 12.2                        | 14.8                          |

Sumber: Ligteringen & Velsink (2014)

Pada setiap kapal, terdapat batas minimum dari sarat air kapal (*draft*) atau jarak vertikal antara garis air sampai dengan lunas kapal yang harus dipenuhi sebagai salah satu persyaratan kapal untuk dapat berlayar (Wijnolst & Wergeland, 2009). Semakin berat muatan kapal, semakin dalam kapal masuk ke dalam air. Ketika sebuah kapal tidak memiliki muatan yang cukup berat untuk mencapai ketentuan *draft* minimum, berat tambahan diperlukan untuk mengimbangi daya apung untuk mengkompensasikan kurangnya perendaman baling-baling, inklinasi transversal dan longitudinal air laut, serta tekanan lainnya pada lambung kapal. Material yang digunakan sebagai penambahan berat pada kapal disebut *ballast*. Secara historis, material untuk *ballast* berwujud solid, tetapi sejak besi digunakan sebagai material dasar untuk kapal sekitar pertengahan abad ke-19, *ballast* menggunakan air laut (*ballast water*) yang dimuat ke dalam tangki karena teruji lebih efisien. Sedangkan, ketika kapal bermuatan penuh, air laut pada tangki *ballast* dikosongkan atau yang disebut dengan *deballasting*. Sistem tersebut digunakan untuk memenuhi persyaratan *draft* minimum pada kapal.

Terdapat perbedaan pada *draft* kapal pada pengangkut LPG/LNG dan minyak mentah/BBM. *Draft* pada tangki *ballast* kapal LPG hanya tidak berbeda jauh dengan *draft* ketika kapal sedang bermuatan penuh karena keharusan kapal untuk mengangkut air *ballast* dalam kuantitas besar untuk alasan stabilitas.

Tabel 3. Perbedaan Dimensi Kapal LNG dan VLCC

|                  |                    | LNG<br>[m <sup>3</sup> ] | 133,000<br>VLCC<br>150,000 [t] |
|------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Keterangan       |                    |                          |                                |
| length           | [L <sub>BP</sub> ] | 280                      | 297                            |
| width            | [m]                | 42                       | 44                             |
| draught          | [m]                | 11.5                     | 17.1                           |
| load capacity    | [t]                | 60,000                   | 150,000                        |
| loaded freeboard | [m]                | 14.5 - 16.5              | 5.5                            |

Sumber: Lightering & Velsink, 2014

## 2. Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi sistem diskrit. Menurut Banks, et. al. (2014), simulasi sistem diskrit adalah proses pengkodean perilaku sistem yang kompleks sebagai urutan-urutan kejadian yang terdefinisi dengan baik.

Simulasi sistem diskrit umumnya digunakan untuk memantau dan memprediksi perilaku pada sistem untuk membuat suatu keputusan atau kebijakan investasi. Model simulasi dibuat sedekat mungkin dengan keadaan sistem pada realitas sebagai bentuk trial and error yang memungkinkan pembuat keputusan untuk melihat sistem dari sudut pandang yang lebih detail untuk menghemat waktu, biaya, dan lain-lain.

### Distribusi Probabilitas Diskrit

Distribusi probabilitas merupakan uji statistik yang digunakan untuk memastikan bahwa simulasi sesuai dengan populasi yang diwakilinya. Distribusi probabilitas menunjukkan besarnya peluang dari setiap hasil yang muncul dalam suatu percobaan acak (*random*). Lebih lanjut dijelaskan jenis-jenis distribusi probabilitas diskrit.

### Distribusi uniform

Variabel *random*  $X$  memiliki distribusi uniform diskrit jika setiap nilai  $n$  pada jangkauan  $x_1, x_2, \dots, x_n$  memiliki peluang yang setara. Sehingga,

$$f(x_i) = \frac{1}{n} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana  $f(x)$  merepresentasikan fungsi massa peluang atau probability mass function (PMF).

### Distribusi binomial

Jika suatu percobaan memiliki dua hasil keluaran, dilambangkan dengan S untuk sukses dan G untuk gagal dengan

$$P(G) = p \text{ dan } P(G) = 1 - p \dots \dots \dots (2)$$

Percobaan tersebut disebut *Bernoulli trial*. Jika dilakukan eksperimen secara acak dengan mengulang sebanyak  $n$  kali percobaan Bernoulli yang independen, sehingga variabel acak  $X$  merepresentasikan jumlah percobaan yang sukses pada  $n$  kali percobaan memiliki distribusi binomial. Nilai yang memungkinkan untuk variabel acak binomial  $X$  bergantung pada jumlah percobaan Bernoulli yang direplikasi secara independen, dan adalah  $\{0, 1, 2, \dots, n\}$ . Sebelum dilakukan eksperimen, jumlah sukses yang akan terjadi tidak diketahui dan dapat berjumlah nol sukses, atau sebanyak  $n$  sukses.

### Distribusi multinomial

Jika sebuah percobaan memiliki lebih dari dua kemungkinan hasil maka percobaan tersebut merupakan distribusi multinomial. Jika sebuah percobaan memiliki kemungkinan hasil yaitu  $E_1, E_2, \dots, E_k$  dengan peluang masing-masing  $p = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$  maka distribusi peluang dari variabel random  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_k\}$  yang menggambarkan jumlah kemunculan  $E_1, E_2, \dots, E_k$  dalam  $n$  percobaan independen akan mengikuti distribusi multinomial dengan fungsi kepadatan peluang (*pdf*).

$$f(x; n, p) = \frac{n!}{x_1!x_2! \dots x_k!} p_1^{x_1} \dots p_k^{x_k} \dots \dots \dots (3)$$

dimana

$$x_1 + x_2 + \dots + x_k = n \dots \dots \dots (4)$$

$$p_1 + p_2 + \dots + p_k = 1 \dots \dots \dots (5)$$

### Distribusi hipergeometrik

Jika  $X$  adalah jumlah dari  $S$  pada sampel yang sepenuhnya acak dengan ukuran  $n$  yang didapat dari populasi yang terdiri dari  $M$  jumlah  $S$  dan  $N - M$  jumlah  $F$  sehingga  $X$  memiliki distribusi hipergeometrik.

PMF  $h(x; n, M, N)$  dari sebuah distribusi hipergeometrik tidak bernilai nol dan hanya merupakan nilai bilangan bulat  $x$  yang memenuhi  $\max(0, n - N + M) \leq x \leq \min(n, M)$

$$P(X = x) = h(x; n, M, N) = \frac{\binom{M}{x} \binom{N-M}{n-x}}{\binom{N}{n}} \dots \dots \dots (6)$$

### Distribusi Poisson

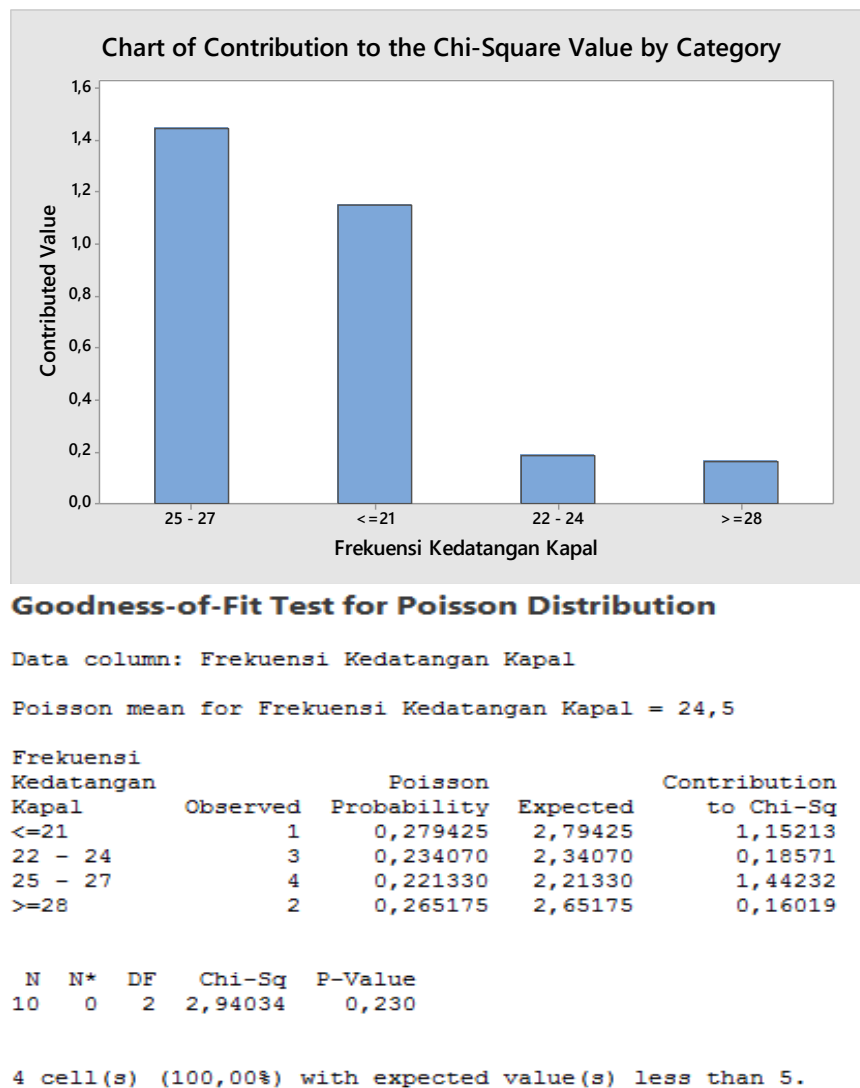
Proses Poisson dihasilkan dari serangkaian kejadian diskrit yang terjadi seiring berjalannya waktu atau kontinum lainnya seperti jarak dan memiliki kondisi 1) Terdapat parameter  $\alpha < 0$  sehingga pada interval waktu yang singkat dengan panjang  $\Delta t$ , peluang dari suatu kejadian adalah  $\alpha \cdot \Delta t$ ; 2) Peluang terjadinya lebih dari satu kejadian pada suatu interval yang pendek adalah nol; 3) Jumlah kejadian pada suatu interval bersifat independen terhadap jumlah dari kejadian yang terjadi sebelum interval tersebut. Proses tidak memiliki “ingatan” sehingga dapat diulang.

### Pengujian Distribusi Data

Prosedur pengujian data kedatangan kapal digunakan untuk mengetahui bentuk-bentuk fungsi dari populasi. Pengujian distribusi pada data terbagi menjadi beberapa kategori berdasarkan sifat data tersebut. Uji yang akan dibahas pada penelitian ini adalah distribusi Poisson. Pada uji distribusi Poisson untuk data kedatangan kapal pada proses bongkar muat. Dalam kedua uji tersebut berlaku hipotesis 1)  $H_0$ : Data mengikuti distribusi Poisson; dan 2)  $H_1$ : Data tidak mengikuti distribusi Poisson.

Penentuan pada uji distribusi dilakukan dengan melakukan komparasi pada taraf signifikansi atau *significance level* ( $\alpha$ ) dengan *P-value*. Taraf signifikansi biasanya adalah sebesar 0,05 dan mengindikasikan risiko sebesar 5% untuk sebuah konklusi bahwa data tidak mengikuti distribusi Poisson ketika data tersebut mengikuti distribusi Poisson.

Data yang digunakan merupakan data frekuensi kedatangan kapal per bulan untuk proses bongkar dan muat, serta empat jenis ukuran kapal.

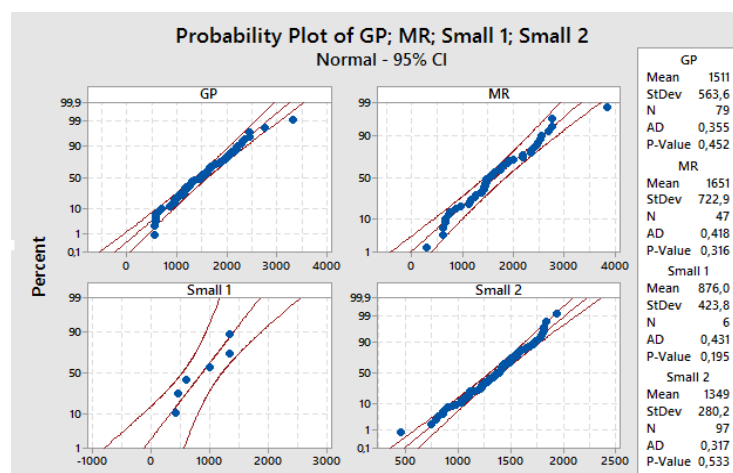


Gambar 1. Uji Goodness-of-Fit Distribusi Poisson

P-Value yang dihasilkan oleh uji *Goodness-of-Fit* distribusi Poisson pada frekuensi kedatangan kapal setiap bulannya menunjukkan nilai 0,230, dimana taraf signifikansi adalah sebesar 0,05. Hipotesis nol tidak ditolak sehingga data mengikuti distribusi Poisson, yang terlihat pada gambar 1.

### Distribusi Waktu Bongkar Muat Kapal

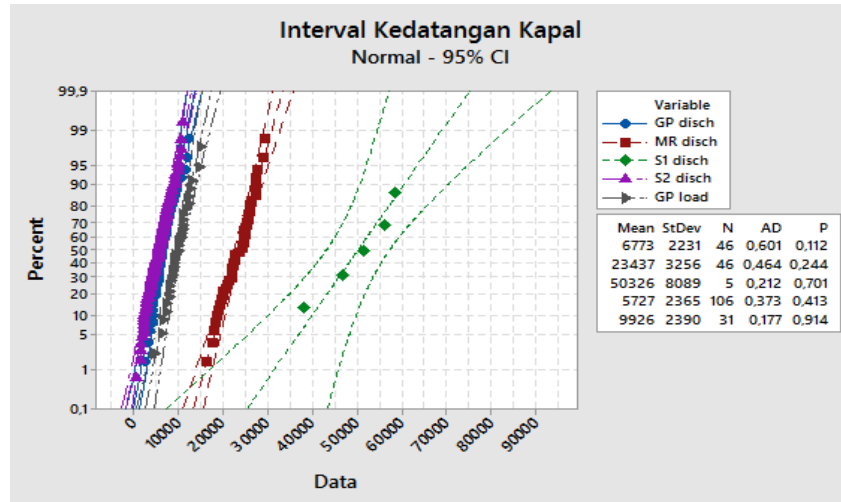
Waktu yang digunakan untuk melakukan proses bongkar atau muat pada kapal berbeda untuk setiap ukuran kapal. Kapal yang merupakan objek penelitian merupakan kapal tanker minyak dengan tipe yang berdasarkan ukuran yaitu *General Purpose* dan *Medium Range*, sedangkan kapal gas dengan tipe berdasarkan ukuran yaitu *Small 1* dan *Small 2*. Hipotesisnya adalah 1)  $H_0$ : Data mengikuti uji distribusi yang diuji; dan 2)  $H_1$ : Data tidak mengikuti uji distribusi yang diuji.



Gambar 2. Uji Distribusi Normal pada Waktu Bongkar Muat Kapal

Uji distribusi normal pada keempat tipe kapal menghasilkan *P-Value* sebesar 0,497 untuk kapal dengan tipe *General Purpose*, 0,364 untuk kapal dengan tipe *Medium Range*, dan 0,195 untuk kapal dengan tipe *Small 2*, dimana keempat hasilnya lebih besar dari  $\alpha$  yaitu 0,05. Hipotesa nol tidak ditolak untuk ketiga jenis kapal tersebut, sehingga data interval kedatangan kapal mengikuti distribusi normal, dimana terlihat pada gambar 2.

### Distribusi Interval Kedatangan Kapal



Gambar 3. Uji Distribusi Normal pada Interval Kedatangan Setiap Kapal

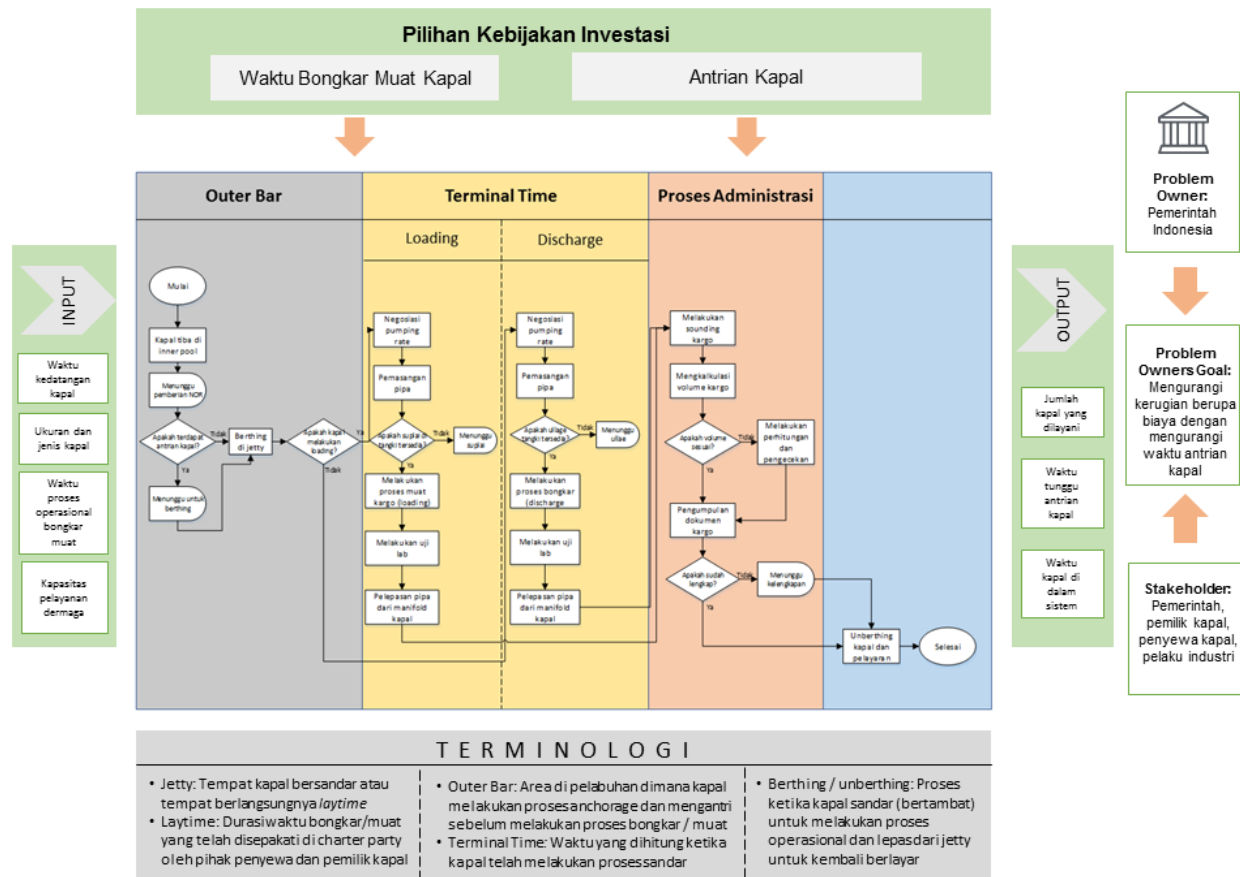
Hipotesis yang berlaku untuk pengujian distribusi normal pada gambar 3 adalah 1)  $H_0$ : Data mengikuti uji distribusi yang diuji; dan 2)  $H_1$ : Data tidak mengikuti uji distribusi yang diuji.

Uji distribusi normal menghasilkan *P-value* 0,112 untuk kapal *General Purpose* dengan kegiatan muat, 0,244 untuk kapal *Medium Range*, 0,701 untuk kapal *Small 1*, 0,413 untuk kapal *Small 2*, dan 0,914 untuk kapal *General Purpose* dengan kegiatan bongkar. Kelima hasil menunjukkan *P-value* yang lebih besar dari taraf signifikansi ( $\alpha$ ) yaitu 0,05. Hipotesa nol tidak ditolak, sehingga data interval kedatangan kelima tipe kapal mengikuti distribusi normal.

### Kerangka Perancangan Model

Model Konseptual terdiri atas input, proses, dan output, dimana input dari model konseptual merupakan frekuensi kedatangan kapal, interval kedatangan kapal, jumlah dan jenis kapal, dan kapasitas penanganan pelabuhan. Sementara proses yang dilakukan oleh kapal BBM dan BBG di dalam terminal transit pada penelitian ini mencakup (1) Datangnya kapal ke pelabuhan (dalam hal ini *jetty*); (2) Penambatan kapal; (3) Menunggu pemberian *Notice of Readiness* (NOR); (4) Negosiasi *pumping rate*; (5) Pemasangan pipa ke *manifold* kapal; (6) Proses bongkar atau muat; (7) Pelepasan pipa dari *manifold* kapal; (8) Melakukan *sounding* kargo dan mengkalkulasi volume kargo; (9) Pengumpulan dokumen kargo dan pengecekan kelengkapan; (10) Pelepasan kapal dari tempat sandar; (11) Berlayar kembali ke laut.

*Output* dari model konseptual adalah waktu pelayanan kapal, waktu tunggu kapal, waktu keseluruhan kapal di dalam sistem, serta jumlah kapal yang dilayani.



Gambar 4. Model Konseptual Sistem Antrian Kapal (diadaptasi dari: Thissen &amp; Walker, 2013)

### Model Simulasi

Tahap-tahap dalam pembuatan model adalah membangun *layout* model, melakukan *input* data ke dalam model, mengatur alur pergerakan pada sistem secara kronologis, memberikan *logic* yang sesuai, dan menjalankan model simulasi.

*Layout* model disesuaikan dengan keadaan di sistem nyata dan disimplifikasikan. Pembangunan *layout* model yang semakin rinci dapat memberikan nilai estetika yang lebih baik, sehingga model dapat memberikan gambaran dari sistem nyata secara lebih akurat.

Input data ke dalam model mencakup jumlah entitas yang diteliti, waktu berbagai kegiatan, baik waktu menunggu suatu proses maupun proses operasinya, yang dilalui entitas di dalam sistem, serta data lainnya dengan rentang kedatangan entitas pada sistem dan keluarnya entitas dari sistem.

Alur pergerakan yang terjadi pada sistem di model harus sesuai dengan sistem nyata, dimana jika alur tidak terjadi secara kronologis, maka model tidak dapat dikatakan telah merepresentasikan sistem. Alur pergerakan serta kegiatan dan operasi yang terjadi di sistem diatur oleh peneliti sesuai dengan deskripsi dan presisi yang diterjemahkan ke dalam *logic* pada perangkat lunak. *Logic* mengatur pergerakan serta skala prioritas entitas yang diteliti.

Jika langkah-langkah sebelumnya telah dilakukan dengan tepat dan tidak terdapat kesalahan pada data maupun *logic*, model akan dapat dijalankan untuk dilakukan simulasi sesuai dengan periode waktu yang telah ditetapkan.

### Pengembangan Skenario

Penambahan kuantitas *jetty* pada dermaga merupakan solusi yang instan untuk mengurangi antrian kapal dan mengurangi waktu pelayanan pada proses operasional serta relatif mudah untuk diterapkan pada model, namun biayanya mahal sehingga perlu dilakukan pertimbangan dan analisis dari segi biaya.

Ukuran *jetty* yang ditambahkan di dermaga sama dengan dua *jetty* yang telah ada, pada kedalaman minus 14,5 meter LWS dengan kapasitas 6.000 sampai dengan 35.000 DWT. *Breasting dolphin* pada *jetty* adalah dua unit dengan jarak antara keduanya adalah 60 meter. Skenario penambahan *jetty* memungkinkan untuk diimplementasikan dari segi konstruksi dan infrastruktur pelabuhan yang diteliti.

Pada umumnya, sistem pelayanan yang diterapkan pada kapal adalah FIFO (*First In, First Out*), dimana kapal akan dilayani sesuai dengan urutan kedatangannya. Sistem FIFO tidak memperhitungkan perbedaan pada biaya sewa kapal dengan ukuran yang berbeda. Pembangunan skenario ini didasari dengan kesadaran bahwa lama waktu kapal menunggu untuk setiap jenis kapal dengan ukuran dan biaya sewa berbeda tidak dimasukkan ke dalam perhitungan efisiensi biaya yang harus dikeluarkan.

Kapal yang diprioritaskan adalah *Medium Range* dan *Small 2* karena kedua jenis kapal tersebut memiliki

*charter rate* per hari yang lebih mahal dibandingkan dengan jenis kapal lainnya karena ukurannya yang besar.

Implementasi *Simultaneous Pumping* pada kapal tanker pengangkut minyak dan gas pada umumnya memiliki tiga tangki kargo dengan jenis yang berbeda di dalam kapal, akan tetapi kegiatan bongkar kargo dilakukan dengan menggunakan satu buah pipa atau *hose* yang disambungkan pada *manifold* kapal yang berarti proses *pumping* untuk ketiga tangki dilakukan satu persatu secara tidak bersamaan. *Simultaneous pumping* adalah teknologi yang dapat digunakan untuk memompa kargo dari ketiga tangki kapal ke tangki timbun di darat secara bersamaan dengan menggunakan tiga pipa berbeda dengan *rate* masing-masing pipa yang tidak berubah kecepatannya, sehingga dapat mempersingkat waktu pada proses bongkar kargo.

Pompa pada teknologi *simultaneous pumping* disambungkan pada kapal, sehingga jenis dan ukurannya berbeda-beda untuk setiap kapal. Biaya untuk *simultaneous pumping* tidak dapat dikalkulasikan karena spesifikasi yang berbeda-beda. Dari segi infrastruktur dan konstruksi, skenario ini *feasible* untuk dilakukan karena tidak memakan ruang yang besar atau terdapat perubahan yang mendasar dari *pumping hose* sebelumnya.

Skenario ini dibangun dengan melihat bahwa tangki kargo lainnya *idle* ketika sebuah tangki sedang dibongkar, sehingga hal tersebut dapat diefisienkan dengan teknologi *simultaneous pumping*.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### Verifikasi dan Validasi Model

Validasi adalah proses penentuan apakah model, sebagai konseptualisasi atau abstraksi, merupakan representasi berarti dan akurat dari sistem nyata (Stahlbock & Voß, 2008). Terdapat banyak metode validasi yang dapat digunakan untuk membuktikan validitas model sehingga merepresentasikan sistem nyata. Dalam penelitian ini penulis menggunakan metode komparasi output dari model dengan sistem nyata menggunakan uji validasi statistik menggunakan perangkat lunak Minitab (2010).

Input dalam data yang dimasukkan ke dalam model berfungsi sebagai dasar dari pembangunan model sehingga jika *input* dan *flow* dari model akurat, model simulasi akan mengeluarkan informasi yang serupa dengan sistem nyata setelah dijalankan. Data input yang dimaksud adalah jumlah kapal untuk setiap jenisnya yang berhasil keluar dari sistem sebanyak 239 total kapal berdasarkan periode waktu simulasi pada dunia nyata, yaitu selama satu tahun.

Proses validasi statistik dilakukan dengan membandingkan data pada sistem nyata dengan data yang dihasilkan oleh model simulasi.

*Output* yang dihasilkan oleh model dikomparasikan dengan sistem yang berada di dunia nyata untuk memastikan kemiripan variasi model dan sistem nyata. Uji hipotesa yang dilakukan adalah uji *Chi-Square*, dengan hipotesa 1)  $H_0: x^2 = y^2$ ; *model dapat merepresentasikan sistem nyata*; dan 2)  $H_1: x^2 \neq y^2$ ; *model tidak dapat merepresentasikan sistem nyata*; dimana  $x$  merepresentasikan hasil simulasi dari model dan  $y$  merepresentasikan sistem nyata. Hasil yang didapat dari uji *Chi-Square* melalui uji *Chi-Square Test for Association* terlihat pada gambar 5.

#### Chi-Square Test for Association: Variansi; Worksheet columns

| Rows: Variansi                                               |                         | Columns: Worksheet columns |                      |                 |                 |      |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|------|
|                                                              | General Purpose Muat    | General Purpose Bongkar    | Medium Range Bongkar | Small 1 Bongkar | Small 2 Bongkar | All  |
| Sistem Nyata                                                 | 96<br>102,9             | 127<br>130,6               | 152<br>146,7         | 19<br>20,2      | 255<br>248,6    | 649  |
| Model                                                        | 108<br>101,1            | 132<br>128,4               | 139<br>144,3         | 21<br>19,8      | 238<br>244,4    | 638  |
| All                                                          | 204                     | 259                        | 291                  | 40              | 493             | 1287 |
| Cell Contents:                                               | Count<br>Expected count |                            |                      |                 |                 |      |
| Pearson Chi-Square = 1,975; DF = 4; P-Value = 0,740          |                         |                            |                      |                 |                 |      |
| Likelihood Ratio Chi-Square = 1,976; DF = 4; P-Value = 0,740 |                         |                            |                      |                 |                 |      |

Gambar 5. Uji Chi-Square pada data Model dan Sistem Nyata (dalam menit)

P-Value yang dihasilkan oleh *Chi-Square Test for Association* untuk mengetahui variansi pada waktu setiap tipe kapal di sistem nyata dan model menunjukkan nilai 0,740, dimana taraf signifikansi adalah sebesar 0,05. Hipotesis nol tidak ditolak sehingga model tervalidasi dan dapat merepresentasikan sistem nyata.

Verifikasi pada model dilakukan untuk membuktikan akurasi dari implementasi model dan data yang digunakan untuk membangun model. Selain itu, verifikasi pada model dilakukan untuk memastikan bahwa model telah merepresentasikan deskripsi yang diberikan serta spesifikasi tertentu oleh pemodel.

Model simulasi pada penelitian ini dirancang dengan menggunakan perangkat lunak Promodel (2009), dimana proses verifikasi pada model dilakukan dengan menguji *error* yang terdapat pada model simulasi. Model simulasi tidak akan berjalan jika masih terdapat *error* pada input atau proses pada model, atau jika terdapat data yang tidak

bersinkronisasi dengan data lainnya. Jika terdapat kesalahan, perangkat lunak akan memberitahu area yang perlu diperbaiki, baik itu data input maupun proses atau kesalahan *logic*.

Model dapat dikatakan telah terverifikasi jika data input dan proses pada model sudah sesuai sehingga model dapat dijalankan dan mengeluarkan *output*. Model antrian kapal pada penelitian ini telah dapat dijalankan dan disimulasikan, seperti yang terlihat pada tabel 4.

Tabel 4. Verifikasi Model

| No | Detail Model                                                | Model    | Sistem Nyata | Kesesuaian |
|----|-------------------------------------------------------------|----------|--------------|------------|
| 1  | Jumlah <i>Jetty</i>                                         | 2        | 2            | Sesuai     |
| 2  | Jumlah kapal <i>General Purpose</i> yang keluar dari sistem | 79       | 79           | Sesuai     |
| 3  | Jumlah kapal <i>Medium Range</i> yang keluar dari sistem    | 47       | 47           | Sesuai     |
| 4  | Jumlah kapal <i>Small 1</i> yang keluar dari sistem         | 6        | 6            | Sesuai     |
| 5  | Jumlah kapal <i>Small 2</i> yang keluar dari sistem         | 107      | 107          | Sesuai     |
| 6  | Jumlah Tangki Timbun                                        | 8        | 8            | Sesuai     |
| 7  | Jumlah kapal yang masuk ke dalam sistem                     | 239      | 239          | Sesuai     |
| 8  | Waktu simulasi                                              | 7368 jam | 307 hari     | Sesuai     |

### Simulasi Model

Model dirancang dengan data input dan sebaran distribusi data yang telah diuji sebelumnya disimulasikan untuk mendapatkan *output* yang representatif terhadap sistem nyata. Hasil dari model simulasi dianalisis untuk kemudian diuji akurasi melalui proses validasi data. Data yang dihasilkan oleh model adalah terlihat pada gambar 6.

| Entity Name  | Total Exits | Current Quantity In System | Average Minutes In System | Average Minutes In Move Logic | Average Minutes Wait For Res, etc. | Average Minutes In Operation | Average Minutes Blocked |
|--------------|-------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| E GP         | 47          | 0                          | 4043.40                   | 2164.70                       | 0.0                                | 196.00                       | 1682.70                 |
| E MR         | 47          | 0                          | 4264.57                   | 2402.17                       | 0.0                                | 234.00                       | 1628.40                 |
| E Small 1    | 6           | 0                          | 5063.00                   | 2815.83                       | 0.0                                | 142.00                       | 2105.16                 |
| E Small 2    | 107         | 0                          | 3198.66                   | 1853.44                       | 0.0                                | 198.00                       | 1147.21                 |
| E GP Loading | 32          | 0                          | 4840.56                   | 2020.25                       | 1347.37                            | 117.81                       | 1355.12                 |

Gambar 6. Aktivitas Entitas pada Model

Data pada kolom *Blocked* merupakan rata-rata waktu antrian kapal di kolam pelabuhan untuk empat ukuran dan kegiatan kapal dalam menunggu ketersediaan *jetty*. Berdasarkan data diatas, dapat dihitung rata-rata waktu menunggu untuk setiap tipe kapal yang datang di pelabuhan dalam satuan hari (ringkasan pada tabel 5).

Tabel 5. Waktu Antri Kapal pada Model As-Is

| (dalam hari) |                        | Waktu antri rata-rata |
|--------------|------------------------|-----------------------|
| Bongkar      | <i>General Purpose</i> | 1,17                  |
| Bongkar      | <i>Medium Range</i>    | 1,13                  |
| Bongkar      | <i>Small 1</i>         | 1,46                  |
| Bongkar      | <i>Small 2</i>         | 0,8                   |
| Muat         | <i>General Purpose</i> | 0,94                  |

Berdasarkan data hasil simulasi, jumlah waktu seluruh kapal di dalam sistem pada model adalah 640 hari dengan rata-rata 2,7 hari untuk setiap kapal.

Total waktu antrian yang dilalui oleh seluruh kapal di dalam sistem selama periode simulasi berjalan adalah 232 hari, dengan rata-rata 0,97 hari mengantri untuk setiap kapal dari rata-rata 2,7 hari yang dihabiskan sebuah kapal di pelabuhan. Waktu yang dihabiskan oleh kapal untuk mengantri di terminal transit yang diteliti adalah 40% dari keseluruhan waktu sebuah kapal berada di pelabuhan.

#### Analisis Skenario Penambahan Jetty

| Entity Name  | Total Exits | Current Quantity In System | Average Minutes In System | Average Minutes In Move Logic | Average Minutes Wait For Res, etc. | Average Minutes In Operation | Average Minutes Blocked |
|--------------|-------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| E GP         | 47          | 0                          | 2500.80                   | 2155.38                       | 0.0                                | 196.00                       | 149.42                  |
| E MR         | 47          | 0                          | 2977.70                   | 2540.63                       | 0.0                                | 234.00                       | 203.06                  |
| E Small 1    | 6           | 0                          | 3878.00                   | 2678.50                       | 0.0                                | 149.66                       | 1049.83                 |
| E Small 2    | 107         | 0                          | 2266.14                   | 1906.46                       | 0.0                                | 198.00                       | 161.67                  |
| E GP Loading | 32          | 0                          | 4608.78                   | 2221.65                       | 1984.65                            | 118.00                       | 284.46                  |

Gambar 7. Keluaran Model Penambahan Kuantitas Jetty

Berdasarkan keluaran dari model *improvement* dengan tiga buah jetty di dermaga (gambar 7), total waktu yang dihabiskan kelima jenis kapal di dalam sistem adalah 166 hari dengan rata-rata 1,95 hari per kapal. Waktu yang dihabiskan oleh kapal untuk mengantri di kolam pelabuhan berkurang sebanyak 200 hari menjadi 35 hari dengan pengurangan 90% dari model aktual dan rata-rata 0,14 hari per kapal. Persentase kapal mengantri di pelabuhan adalah sebesar 7% dari keseluruhan waktu kapal berada di dalam sistem, dan telah berkurang sebanyak 200 hari dengan rata-rata pengurangan 0,83 hari per kapal.

#### Analisis Skenario Simultaneous Pumping

| Entity Name  | Total Exits | Current Quantity In System | Average Minutes In System | Average Minutes In Move Logic | Average Minutes Wait For Res, etc. | Average Minutes In Operation | Average Minutes Blocked |
|--------------|-------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| E GP         | 47          | 0                          | 3047.93                   | 1816.31                       | 0.0                                | 196.00                       | 1035.61                 |
| E MR         | 47          | 0                          | 3522.17                   | 2059.40                       | 0.0                                | 234.00                       | 1228.76                 |
| E Small 1    | 6           | 0                          | 4019.33                   | 2196.16                       | 0.0                                | 271.66                       | 1551.50                 |
| E Small 2    | 107         | 0                          | 2767.65                   | 1735.95                       | 0.0                                | 198.00                       | 833.70                  |
| E GP Loading | 32          | 0                          | 4141.84                   | 1984.34                       | 968.59                             | 118.00                       | 1070.90                 |

Gambar 8. Keluaran Model Prioritas Pelayanan Kapal

Model dengan skenario implementasi *simultaneous pumping* menghasilkan total waktu seluruh kapal di dalam sistem yaitu 530 hari dengan rata-rata 2,21 hari per kapal. Total waktu antrian kapal adalah 170 hari dengan pengurangan sebanyak 70 hari atau 30% dan rata-rata 0,7 hari per kapal. Pengurangan waktu antrian adalah sebesar 0,27 hari per kapal atau 30% dari waktu antrian pada model aktual. Persentase lamanya kapal mengantri dibandingkan dengan keseluruhan waktu kapal di dalam sistem untuk setiap kapal adalah 30% (gambar 8).

### Analisis Skenario Prioritas Kapal

Output dari model gambar 9 dengan skenario perubahan prioritas pelayanan kapal tidak menunjukkan perubahan yang signifikan terhadap waktu antrian kapal, dimana total waktu seluruh kapal di dalam sistem adalah 640 hari dengan rata-rata 2,66 hari per kapal. Total antrian kapal adalah 260 hari dengan rata-rata 1,08 hari per kapal. Persentase lamanya kapal mengantri dibandingkan dengan keseluruhan waktu kapal di dalam sistem pada sebuah kapal adalah 40%.

| Entity Name  | Total Exits | Current Quantity In System | Average Minutes In System | Average Minutes In Move Logic | Average Minutes Wait For Res, etc. | Average Minutes In Operation | Average Minutes Blocked |
|--------------|-------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| E GP         | 47          | 0                          | 5364.53                   | 2199.19                       | 0.0                                | 196.00                       | 2969.34                 |
| E MR         | 47          | 0                          | 3179.19                   | 2301.55                       | 0.0                                | 234.00                       | 643.63                  |
| E Small 1    | 6           | 0                          | 5852.00                   | 2730.33                       | 0.0                                | 221.83                       | 5899.83                 |
| E Small 2    | 107         | 0                          | 2622.77                   | 1858.21                       | 0.0                                | 198.00                       | 566.55                  |
| E GP Loading | 32          | 0                          | 6239.18                   | 2173.75                       | 1595.03                            | 109.78                       | 3360.62                 |

Gambar 9. Output Model Prioritas Pelayanan Kapal

Perubahan pada prioritas pelayanan kapal mengurangi waktu total dari kapal *Medium-Range* di dalam sistem secara signifikan dalam satu periode simulasi, yaitu 35 hari, dan kapal *Small 2* yaitu sebanyak 43 hari. Hal tersebut berujung pada peningkatan efisiensi biaya sewa kapal yang harus dikeluarkan.

### 4. Kesimpulan

Penelitian terhadap waktu antrian kapal di pelabuhan dimodelkan menggunakan metode simulasi sistem diskrit untuk memahami sistem yang kompleks melalui model simulasi. Metode simulasi sistem diskrit menghasilkan waktu antrian kapal untuk setiap jenisnya serta waktu keseluruhan kapal di dalam sistem. Model yang dirancang pada penelitian ini menggambarkan pergerakan kapal di sistem nyata yang dimulai dari masuknya kapal ke kolam pelabuhan untuk melakukan *anchorage* hingga kapal berlayar kembali ke laut berdasarkan periode waktu yang sesuai dengan sistem.

Pengurangan waktu antrian kapal terjadi paling banyak pada skenario penambahan *jetty*, dimana waktu kapal di dalam sistem berkurang sebanyak 200 hari dengan pengurangan 90% dari model aktual yang telah tervalidasi dan dapat merepresentasikan sistem nyata, dengan pengurangan kedua terbanyak adalah skenario *simultaneous pumping* dengan total waktu antrian kapal selama 166 hari dengan pengurangan 30%. Pengurangan biaya yang terbesar juga dihasilkan oleh skenario penambahan *jetty*, tanpa mempertimbangkan biaya konstruksi *jetty* secara keseluruhan. Penelitian ini memberikan wawasan dan gambaran mengenai proses operasional kapal ketika berada di pelabuhan dengan kejadian yang tersusun secara kronologis yang didasarkan oleh waktu. Mengingat bahwa antrian kapal di pelabuhan mempengaruhi keseluruhan performa logistik dan ketepatan waktu kapal-kapal yang akan melakukan perhentian di pelabuhan-pelabuhan lainnya.

Keputusan kebijakan investasi dapat dilakukan dengan mengombinasikan dua atau lebih skenario secara bersamaan untuk mencapai hasil yang maksimal. Akan tetapi, investasi penambahan fasilitas perlu dipertimbangkan dari segi biaya dan lama waktu pembangunan serta biaya modal yang harus ditanggung sebelum keputusan akhir dibuat. Selain itu, perlu dipastikan agar penerapan solusi tidak merusak lingkungan atau memberikan efek atau dampak yang negatif terhadap aspek-aspek lainnya yang bersangkutan dengan proses keseluruhan kapal di dalam sistem pelabuhan. Saran yang dapat penulis berikan adalah untuk menambah variabel dan lingkup penelitian untuk menghasilkan keluaran yang lebih representatif terhadap sistem pelabuhan di Indonesia sehingga skenario atau solusi yang diajukan tidak terbatas dari sebuah pelabuhan saja.

### Daftar Pustaka

- Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2014). *Discrete-Event System Simulation*. Harlow: Pearson. Retrieved from <https://books.google.com.tr/books?id=JiWpBwAAQBAJ>
- Budya, H., & Arofat, M. Y. (2011). Providing cleaner energy access in Indonesia through the megaproject of kerosene conversion to LPG. *Energy Policy*, 39(12), 7575–7586. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.02.061>
- Dwarakish, G. S., & Salim, A. M. (2015). Review on the Role of Ports in the Development of a Nation. In *Aquatic Procedia* (Vol. 4, pp. 295–301). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.040>
- Ernita, D., Amar, S., & Syofyan, E. (2013). Analisis Pertumbuhan Ekonomi, Investasi, dan Konsumsi di Indonesia. *Jurnal Kajian Ekonomi*, 1(2).
- Kazemi, Y., & Szmerekovsky, J. (2015). Modeling downstream petroleum supply chain: The importance of multi-mode transportation to strategic planning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 83, 111–125. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.09.004>
- Ligteringen, H., & Velsink, H. (2014). *Ports and Terminals*. Delft: Delft Academic Press.
- Minitab. (2010). *Minitab 17 Statistical Software*. State College, PA: Minitab, Inc. Retrieved from [www.minitab.com](http://www.minitab.com)
- ProModel. (2009). *ProModel*. Trexlertown, Pennsylvania: ProModel Corporation. Retrieved from [www.promodel.com](http://www.promodel.com)
- Setiawan, A., Tua, D. P., & Husin, M. K. E. (2019). Pengaruh Konsumsi Bahan Bakar Fosil Terhadap Produk

- Domestik Bruto Indonesia Dan Hubungan Timbal Balik Di Antara Keduanya. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 15(3).
- Stahlbock, R., & Voß, S. (2008). Operations research at container terminals: A literature update. *OR Spectrum*, 30(1), 1–52. <https://doi.org/10.1007/s00291-007-0100-9>
- Stopford, M. (2009). *Maritime Economics* (3rd ed.). London: Routledge.
- Thissen, W. A. H., & Walker, W. E. (Eds.). (2013). *Public Policy Analysis: New Development*. International Series in Operations Research and Management Science (Vol. 179). Dordrecht: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4602-6>
- Wijnolst, N., & Wergeland, T. (2009). *Shipping innovation*. Amsterdam: IOS Press.