

# Penentuan Rute Pelayaran Kapal Tramp: Integrasi Kecepatan Optimal, Displacement Kapal, dan Pemilihan Pelabuhan Pangkal

Muhammad Suryo Panotogomo Abi Suroso\*, Sherin Ramadhania, Nia Sastra Permata,  
Achmad Samudra Dewantara, Dian Fajarika

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Lampung, Indonesia

\*Koresponden email: muhammad.suroso@ti.itera.ac.id

Diterima: 30 Juni 2025

Disetujui: 07 Juli 2025

## Abstract

PT XYZ is a shipping company that operates in the ad hoc and short-term contract (spot charter) market. The company faces challenges in selecting the most profitable cargo offers and in managing fuel consumption in order to maximise profits and minimise operational costs. This study aims to develop a mathematical model that optimises revenue through optimal cargo selection, while simultaneously minimising operational costs, including fuel consumption for the main and auxiliary engines. The model is based on the actual conditions of the company's fleet and focuses on tramp general cargo services operating under less-than-shipload (LTS) conditions. In addition to addressing fuel management, the study covers fleet routing, vessel allocation and port docking considerations. The proposed model uses a mixed integer nonlinear programming (MINLP) approach to optimise variables such as sailing speed, ship displacement and the sequence of port visits. Feasibility analysis using real fleet data and hypothetical cargo offers indicates that the model consistently produces viable solutions. Sensitivity analysis of key parameters within a variation range of -50% to +50% from their nominal values confirms that the model's outputs remain within acceptable bounds.

**Keywords:** *general cargo ship routing problem, spot charter market, maritime logistics, mixed integer programming, optimal speed, ship displacement, base port*

## Abstrak

PT XYZ merupakan perusahaan pelayaran yang beroperasi di pasar kontrak secara ad-hoc dan jangka pendek (*Spot Charter Market*). Perusahaan ini menghadapi tantangan dalam menentukan tawaran muatan yang paling menguntungkan serta mengelola konsumsi bahan bakar guna memaksimalkan keuntungan dan menekan biaya operasional. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model matematika yang dapat memaksimalkan pendapatan melalui pemilihan muatan secara optimal, sekaligus meminimalkan biaya operasional, termasuk konsumsi bahan bakar pada mesin induk dan motor induk. Model dirancang berdasarkan kondisi armada milik perusahaan dan difokuskan pada layanan pelayaran tramp *general cargo* dalam kondisi *less than shipload* (LTS). Selain membahas pengelolaan bahan bakar, penelitian ini juga mencakup perencanaan rute armada, penempatan kapal, serta pertimbangan aktivitas sandar di pelabuhan. Model yang diusulkan menggunakan pendekatan pemrograman campuran bilangan bulat nonlinier (MINLP) untuk mengoptimalkan variabel-variabel seperti kecepatan pelayaran, displacement kapal, dan urutan pelabuhan yang dikunjungi. Analisis keberjalanan model yang dikembangkan, menggunakan data armada serta penawaran muatan, menunjukkan bahwa model ini secara konsisten menghasilkan solusi yang layak. Hasil analisis sensitivitas terhadap parameter-parameter utama dalam rentang variasi sebesar -50% hingga +50% dari nilai normal juga mengonfirmasi bahwa keluaran model tetap berada dalam kategori layak.

**Kata Kunci:** *masalah rute kapal general cargo, spot charter market, logistik maritim, mixed integer programming, kecepatan optimal, displacement kapal, pelabuhan pangkal*

## 1. Pendahuluan

Transportasi maritim secara umum dibedakan menjadi tiga jenis layanan utama, yaitu liner shipping, industrial shipping, dan tramp shipping. Masing-masing layanan memiliki karakteristik yang berbeda berdasarkan lokasi pelabuhan, urutan sandar, jadwal pelayaran, serta kepemilikan muatan [1]. Kapal tramp beroperasi secara fleksibel, menyesuaikan dengan permintaan pasar untuk mengoptimalkan rute dan jadwal pelayaran, sehingga dapat meraih keuntungan dari pelayaran yang bersifat opsional [2]. Berbeda dengan itu, pelayaran liner mengikuti rute dan jadwal yang tetap, dengan pola operasional end-to-end sebagai bentuk dominan [3]. Sementara itu, pelayaran industri fokus pada perencanaan armada jangka panjang

untuk memenuhi kontrak pengangkutan muatan tertentu [4]. Perbedaan utama di antara ketiganya mencakup tingkat fleksibilitas dalam penentuan rute, jenis kontrak yang dijalankan, dan kendala operasional yang dihadapi.

Kajian-kajian mengenai tramp shipping banyak berfokus pada aspek optimasi konsumsi bahan bakar [5], pembatasan pelayaran tertentu [2], serta perilaku pemilihan layanan oleh pengirim barang [6]. Perkembangan mutakhir dalam penelitian ini mencakup optimasi multiobjektif untuk efisiensi dan pengurangan emisi [7], integrasi antara perencanaan armada dan analisis kontrak [4], serta peningkatan sistem peramalan dan perluasan skala sistem penjadwalan serta perutean kapal [8].

Selain pengelompokan berdasarkan jenis layanan pelayaran, perencanaan juga dibedakan berdasarkan jenis muatan yang diangkut, antara lain *special cargo*, *general cargo*, *container*, *roll-on-roll-off*, *refrigerated cargo*, dan *containerized cargo* [1]. Kapal *general cargo* tidak secara khusus dirancang untuk satu jenis muatan tertentu, melainkan mampu mengangkut kombinasi muatan curah, palet, dan kontainer dalam satu pelayaran [9]. Kapal jenis ini memiliki fleksibilitas tinggi karena tidak memerlukan sekat atau perlengkapan khusus, sehingga cocok digunakan dalam sistem tramp yang bergantung pada variasi penawaran muatan. Di samping itu, optimalisasi perencanaan muatan kapal *general cargo* yang membawa berbagai jenis muatan dapat meningkatkan efisiensi serta stabilitas operasional [10].

Penelitian ini berfokus pada perencanaan armada kapal tramp *general cargo* dari perspektif operator pelayaran. Aspek yang dianalisis mencakup pemilihan pelabuhan singgah, urutan titik asal dan tujuan (O/D), penjadwalan kapal, serta kelayakan pengangkutan dalam kondisi LTS. Untuk menjawab tantangan tersebut, dirancang sebuah pendekatan penjadwalan armada yang mampu memilih muatan secara strategis guna menghindari kerugian peluang (*opportunity loss*) dan memaksimalkan pendapatan dengan proses yang efisien dan cepat. Seiring dengan itu, pengelolaan bahan bakar menjadi fokus utama dalam mendukung efisiensi sistem.

Dalam konteks efisiensi operasional kapal tramp *general cargo*, penelitian ini menekankan pentingnya penentuan kecepatan pelayaran optimal di setiap segmen perjalanan dengan mempertimbangkan nilai displacement yang bersifat dinamis. Penyesuaian kecepatan ini bertujuan untuk mengoptimalkan konsumsi bahan bakar, mengingat menurut Stopford [11], konsumsi bahan bakar untuk mesin induk dan motor induk dapat mencapai 30,4% dari total biaya operasional kapal. Barrass [12] menambahkan bahwa kebutuhan bahan bakar harian sangat dipengaruhi oleh kecepatan pelayaran dan berat aktual kapal, sehingga kedua faktor tersebut menjadi kunci utama dalam pengelolaan biaya operasional. Berdasarkan hal tersebut, tujuan utama penelitian ini adalah memaksimalkan pendapatan armada kapal milik PT XYZ sekaligus meminimalkan konsumsi bahan bakar melalui penjadwalan pelayaran yang efisien dan berbasis model matematika. Adapun rumusan masalah yang diangkat adalah, “*Bagaimana merancang model matematika untuk menentukan kecepatan pelayaran optimal dengan mempertimbangkan displacement yang bersifat dinamis?*” Model ini ditujukan untuk mengoptimalkan keuntungan seluruh armada dalam satu horizon perencanaan, yaitu satu siklus pelayaran berdasarkan muatan yang tersedia.

## 2. Metode Penelitian

### Material

**Tabel 1** memuat data teknis lima kapal milik PT XYZ, meliputi kapasitas angkut, berat kosong kapal (LWT), kecepatan minimum dan maksimum, serta pelabuhan asal. Kapasitas kapal berkisar antara 3.550 hingga 11.044 ton, sedangkan LWT antara 2.023 hingga 5.478 ton. Kecepatan minimum berada di kisaran 6,0–9,0 knot dan maksimum 12,0–14,8 knot. Dua kapal beroperasi dari Tanjung Perak dan tiga dari Tanjung Priok. Data ini berguna untuk merencanakan rute dan distribusi muatan secara efisien.

Tabel ini juga menunjukkan konsumsi bahan bakar motor induk (A/E) dalam dua kondisi: saat berlayar dan saat sandar. Konsumsi saat berlayar berkisar 0,046–0,057 ton per jam, sementara saat sandar 0,017–0,021 ton per jam. Pemisahan ini penting karena kebutuhan energi berbeda tergantung kondisi kapal. Informasi ini membantu perusahaan menghitung kebutuhan bahan bakar secara tepat dan mengendalikan biaya operasional.

**Tabel 1.** Spesifikasi teknis armada kapal PT XYZ

| Data            | Kapal  |       |       |       |        | Satuan |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|
|                 | 1      | 2     | 3     | 4     | 5      |        |
| Kapasitas Kapal | 11.044 | 3.550 | 3.550 | 3.550 | 10.500 | Ton    |
| LWT             | 4.416  | 2.023 | 2.023 | 2.023 | 5.478  | Ton    |
| Vmininal        | 6,0    | 6,0   | 6,0   | 6,0   | 9,0    | Knot   |

| Data                          | Kapal     |           |           |           |           | Satuan  |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
|                               | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         |         |
| Vmaksimal                     | 12,4      | 12,0      | 12,0      | 12,0      | 14,8      | Knot    |
| Konsumsi A/E (Berlayar)       | 0,053     | 0,057     | 0,057     | 0,057     | 0,046     | Ton/Jam |
| Konsumsi A/E (Sandar Berdaya) | 0,020     | 0,021     | 0,021     | 0,021     | 0,017     | Ton/Jam |
| Pelabuhan Pangkal (Awal)      | Tj. Perak | Tj. Perak | Tj. Priok | Tj. Priok | Tj. Priok | -       |

Sumber: PT XYZ (2025)

**Tabel 2** menyajikan data operasional armada kapal PT XYZ pada bulan Mei 2019, yang menunjukkan bahwa hanya dua kapal yang digunakan, yaitu kapal 1 dan kapal 5, untuk mengangkut dua muatan terpilih. Kapal 1 digunakan untuk rute Cigading ke Batam, dengan total pendapatan sebesar Rp2.357,85 juta, berat kargo 8.574 ton, waktu pelayaran selama 8,66 hari, dan pelabuhan pangkal akhir di Tj. Priok. Sementara itu, kapal 5 digunakan untuk rute Bahodopi ke Surabaya, dengan pendapatan sebesar Rp1.475 juta, berat muatan 6.249 ton, durasi pelayaran 5,14 hari, dan pelabuhan pangkal akhir di Tj. Perak.

Pemilihan rute dan kapal ini menghasilkan total keuntungan armada sebesar Rp1.452.515.661. Masing-masing rute ditulis dalam format titik muat diikuti titik bongkar, mencerminkan arah pergerakan kargo. Data ini menjadi contoh konkret dari strategi penjadwalan dan alokasi kapal yang efisien, serta dapat dijadikan dasar evaluasi dalam pengembangan model optimasi pelayaran yang lebih dinamis dan adaptif.

**Tabel 2.** Data operasionalisasi armada kapal PT XYZ bulan Mei 2019

| Kargo Terpilih (O/D) | Pendapatan (Rp jt) | Berat Kargo (Ton) | Durasi Pelayaran (hari) | Kapal Terpilih | Pelabuhan Pangkal (Akhir) | Total Keuntungan Armada |
|----------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|----------------|---------------------------|-------------------------|
| Cigading/Batam       | 2.357,85           | 8.574             | 8,66                    | 1              | Tj. Priok                 | Rp1.452.515.661         |
| Bahodopi/Surabaya    | 1.475              | 6.249             | 5,14                    | 5              | Tj. Perak                 |                         |

Sumber: PT XYZ (2025)

### Metode

Pengembangan model dalam penelitian ini diawali dengan menentukan model acuan yang relevan dari studi-studi sebelumnya. Model acuan utama yang dipilih adalah model yang dikembangkan oleh Norstad et al. [13], karena paling mendekati permasalahan yang dirumuskan, yakni penjadwalan armada kapal tramp secara efisien melalui penentuan kecepatan optimal dengan mempertimbangkan displacement yang bersifat dinamis. Model ini memiliki kesamaan karakteristik dengan fokus penelitian, termasuk pembatasan umum sistem penjadwalan kapal tramp, seperti:

- Armada kapal melayani *on-spot* dan *contracted cargo*,
- Adanya pembatas aliran kapal,
- Proses bongkar/muat hanya dilakukan di pelabuhan penjemputan atau pengantaran,
- Adanya pembatasan kapasitas kapal,
- Waktu kedatangan kapal di pelabuhan sesuai dengan jendela waktu pelayanan,
- Pelabuhan muat harus dikunjungi sebelum pelabuhan bongkar,
- Adanya batasan jendela waktu pelayanan di tiap pelabuhan, dan
- Adanya pembatasan kecepatan kapal.

Namun, model tersebut masih memiliki beberapa kekurangan dalam menangani kompleksitas persoalan aktual. Oleh karena itu, penelitian ini melengkapi kelemahan tersebut dengan mengintegrasikan beberapa model pelengkap dari literatur lain. Beberapa aspek yang diperbaiki meliputi:

- Model [13] belum mempertimbangkan perbedaan waktu antara kedatangan kapal dan dimulainya pelayanan bongkar/muat. Model [14] digunakan untuk mengatasi kekurangan ini.
- Kompatibilitas antara kapal dan pelabuhan sebagai syarat pelayanan bongkar/muat juga tidak diperhitungkan, yang diperbaiki dengan pendekatan dari [14].
- Adanya waktu tunggu sebelum pelayanan bongkar/muat dimulai tidak diakomodasi dalam model utama, sehingga ditambahkan melalui model dari Fan et al. [15].

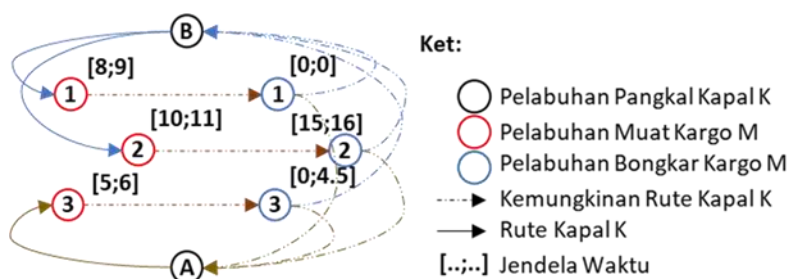
- d. Model utama hanya menggunakan satu jenis bahan bakar, sementara penelitian ini mengadopsi pendekatan dari [15] yang mempertimbangkan dua jenis bahan bakar, yaitu *Marine Fuel Oil* (MFO) dan *High Speed Diesel* (HSD).

Langkah pengembangan model dilakukan secara iteratif, dimulai dari telaah model acuan utama, kemudian ditambah dengan model-model pelengkap yang relevan. Proses ini diulang hingga diperoleh model akhir yang layak dan tervalidasi. Setelah model dikembangkan, dilakukan pengujian dan analisis menggunakan data armada kapal dan penawaran muatan PT XYZ. Selanjutnya, dilakukan analisis sensitivitas untuk mengevaluasi pengaruh perubahan parameter terhadap kinerja model serta memastikan kestabilan dan kelayakan solusi dalam berbagai skenario operasional.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### Sistem Umum Kajian

Penjadwalan yang dilakukan oleh operator pelayaran bertujuan untuk mencocokkan kapal dengan muatan yang telah dipilih sebelumnya. Proses ini sangat bergantung pada keputusan mengenai muatan yang akan dilayani. Setelah proses pemilihan muatan selesai, informasi mengenai lokasi pelabuhan muat dan bongkar akan diketahui. Selanjutnya, operator dapat menentukan urutan layanan muat dan bongkar berdasarkan *time window* di setiap pelabuhan untuk setiap muatan. Penjelasan proses ini tergambarkan pada **Gambar 1**, yang menunjukkan bahwa pelayaran dimulai dari pelabuhan pangkalan, kemudian menuju pelabuhan muat M. Setelah itu, kapal dapat melanjutkan ke pelabuhan muat M lainnya atau langsung menuju pelabuhan bongkar M akhir.



**Gambar 1.** Ilustrasi penjadwalan kapal *general cargo* pada pasar on spot  
Sumber: Penelitian (2025)

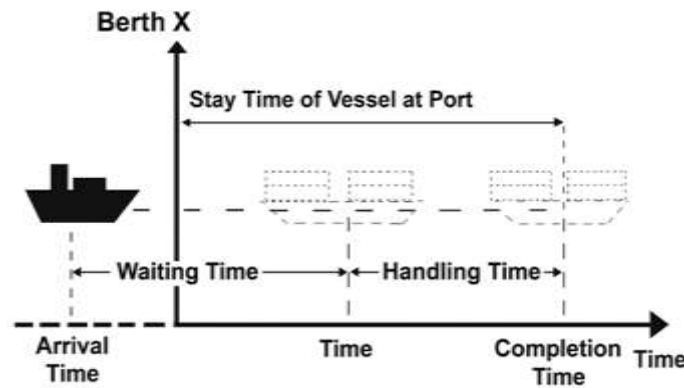


**Gambar 2.** Jenis berat tonnage pada kapal (displacement kapal)  
Sumber: Penelitian (2025)

Dari sisi kapal, terdapat parameter penting berupa kapasitas angkut kapal yang menyatakan batas maksimum berat total muatan yang dapat dibawa dalam satuan ton. Selain itu, istilah teknis lain yang perlu dipahami adalah displacement atau berat benaman kapal, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2**. Displacement dihitung sebagai jumlah dari dua komponen utama, yaitu berat mati kapal (DWT) dan berat kosong kapal (LWT). DWT mencakup berat bahan bakar, pelumas, perlengkapan awak, serta muatan yang dibawa kapal. Sementara itu, LWT mencakup berat struktur kapal dan instalasi tetap. Displacement bersifat dinamis dan dapat berubah, terutama akibat perubahan DWT, dengan berat muatan menjadi faktor paling

signifikan yang memengaruhi total displacement aktual kapal. Kondisi ini menggambarkan moda pelayaran kapal, yakni dalam keadaan bermuatan (*laden mode*) dan tanpa muatan (*ballast mode*).

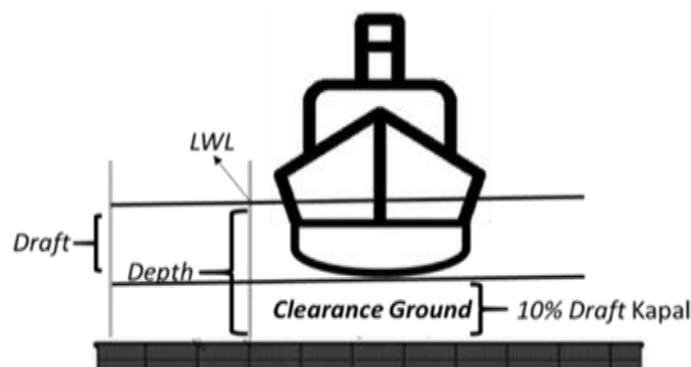
Dari sisi pelabuhan, terdapat istilah teknis durasi Bongkar/Muat (B/M) yang merujuk pada durasi waktu penanganan muatan. Durasi ini tercantum dalam charter party (perjanjian sewa kapal) yang disepakati antara operator kapal dan pemilik muatan. Estimasi durasi B/M umumnya dikelola oleh pengirim barang bekerja sama dengan operator pelabuhan.



**Gambar 3.** Istilah teknis pembagian waktu pada Industri Pelayaran  
Sumber: Adaptasi dari [16]

Selain itu, istilah lain yang berkaitan dengan keberadaan kapal di pelabuhan dapat dilihat pada **Gambar 3**, yakni:

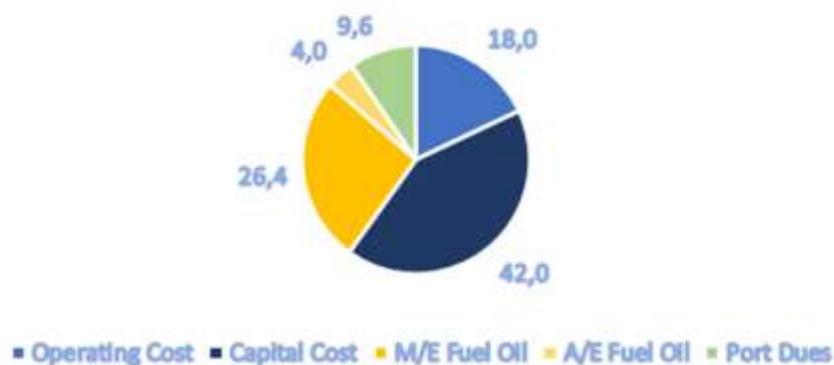
- Waktu tunggu (*waiting time*): waktu kapal mengantre sebelum kegiatan bongkar/muat dimulai.
- Waktu penanganan (*handling time*): durasi pelaksanaan bongkar/muat.
- Waktu tinggal (*staying time*): jumlah dari waktu tunggu dan waktu penanganan.



**Gambar 4.** Kompatibilitas antara kedalaman pelabuhan dan draft kapal  
Sumber: Penelitian (2025)

Aspek kecocokan kapal dengan pelabuhan (ship-port compatibility) ditentukan oleh nilai draft kapal dan kedalaman kolam terminal pelabuhan (LWS), sebagaimana ditunjukkan dalam **Gambar 4**. Draft merupakan ukuran vertikal dari garis air maksimum ke bagian terdalam lambung kapal, dan menjadi batas maksimum pengisian DWT ditambah LWT.

Mengacu pada Keputusan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor KP 820 Tahun 2018 [17], nilai ground clearance atau jarak bebas antara dasar kapal dan dasar kolam pelabuhan harus memiliki nilai minimum 10% dari draft kapal. Artinya, apabila draft kapal melebihi kedalaman kolam pelabuhan (misalnya draft 1,1 meter > LWS terminal), maka kapal tersebut tidak dapat bersandar untuk melayani kegiatan bongkar atau muat.



**Gambar 5.** Struktur Biaya Pengoperasian Kapal Pada Industri Pelayaran

Sumber: Adaptasi dari [11]

Terakhir, aspek biaya operasional diilustrasikan melalui **Gambar 5**, yang membagi komponen biaya ke dalam dua kategori utama [11]:

- Biaya Variabel; (1) Biaya bahan bakar mesin induk (M/E); (2) Biaya bahan bakar motor induk (A/E); (3) Biaya pelabuhan (*port dues*).
- Biaya Tetap; (1) Biaya operasional (pelumas, persediaan kapal, gaji awak kapal, dan pemeliharaan); (2) Biaya modal (pembelian kapal, penyusutan, dan asuransi). Seluruh aspek ini menjadi pertimbangan utama dalam pengembangan model penjadwalan armada yang optimal dan realistis, sesuai dengan kondisi operasional perusahaan pelayaran tramp *general cargo*.

#### Model Matematis

Penelitian ini dilakukan dengan mengacu pada sejumlah asumsi. Pertama, jarak antar pelabuhan bersifat simetris. Kedua, seluruh pelabuhan memberikan layanan selama 24 jam penuh setiap hari (24/7). Ketiga, informasi terkait muatan yang ditawarkan bersifat deterministik. Keempat, durasi kegiatan bongkar/muat (B/M) di setiap pelabuhan adalah selama 24 jam. Kelima, tidak terjadi keterlambatan dalam proses bongkar/muat. Keenam, nilai berat benaman (*displacement*) dinamis hanya mempertimbangkan muatan yang berada di atas kapal. Ketujuh, penjadwalan pelayaran tidak dipengaruhi oleh kondisi cuaca atau *force majeure*. Kedelapan, pengisian bahan bakar dilakukan di setiap pelabuhan singgah kapal.

Lebih lanjut, terdapat pula beberapa batasan dalam penelitian ini. Pertama, armada kapal hanya melayani muatan *onspot*. Kedua, kesesuaian antara spesifikasi kapal dan fasilitas pelabuhan diperhitungkan. Ketiga, nilai *displacement* dinamis kapal dipengaruhi oleh kondisi pelayaran dalam keadaan *ballast* atau *laden*. Keempat, kapal hanya melakukan proses bongkar atau muat di pelabuhan asal atau pelabuhan tujuan. Kelima, waktu kedatangan kapal di setiap pelabuhan tidak harus bertepatan dengan waktu dimulainya proses bongkar/muat, namun harus berada dalam rentang waktu layanan B/M (*time window*). Keenam, waktu tunggu diartikan sebagai kapal *laden* sampai dimulainya B/M.

Model matematika ini menggambarkan sistem yang dibangun dalam bentuk formulasi matematis. Dalam model tersebut, muatan direpresentasikan menggunakan indeks  $i$ , yang merepresentasikan pelabuhan tertentu sebagai titik lokasi. Setiap muatan memiliki pasangan titik muat ( $i$ ) dan titik bongkar ( $n + i$ ), dengan  $n$  menyatakan jumlah total penawaran muatan. Titik muat termasuk dalam himpunan  $Np = \{1, \dots, n\}$ , sementara titik bongkar berada pada himpunan  $Nd = \{n+1, \dots, 2n\}$ . Basis awal dan akhir dari armada kapal masing-masing diwakili oleh himpunan  $\{o(k)\}$  dan  $\{p\}$ , sesuai konfigurasi yang ditetapkan oleh model. Himpunan semesta titik ( $Nk$ ) mencakup elemen-elemen dari  $\{o(k)\}$ ,  $\{p\}$ ,  $\{1, \dots, n\}$ , dan  $\{n+1, \dots, 2n\}$ , di mana satu titik dapat mewakili pelabuhan fisik yang sama. Karakteristik muatan, pelabuhan, serta kapal dinyatakan melalui sejumlah parameter yang mencerminkan kondisi teknis masing-masing entitas. Berat benaman kapal (*displacement*) merupakan akumulasi bobot kapal saat melintasi rute dari titik  $i$  ke titik  $j$ , yang bersifat dinamis mengikuti perubahan muatan.

Komponen biaya terdiri dari beberapa aspek. Biaya pelayaran mencakup konsumsi bahan bakar mesin induk (M/E) untuk mendorong kapal dan motor induk (A/E) yang berfungsi untuk penerangan serta sistem pendukung lainnya selama perjalanan. Biaya pelabuhan menggabungkan ongkos sandar (termasuk jasa *mooring*, *piloting*, dan *tugging*) serta konsumsi bahan bakar dalam berbagai mode seperti bongkar muat, manuver, dan sandar berdaya. Sementara itu, biaya harian operasional mencakup beban rutin seperti kebutuhan awak kapal, premi asuransi, pelumas, perawatan, serta biaya kapital yang berasal dari investasi dan depresiasi aset kapal. Model ini juga memperhitungkan batasan teknis berupa kendala keras (*hard*

constraint) terkait kesesuaian antara kapal dan pelabuhan. Apabila draft maksimum kapal lebih kecil dari kedalaman pelabuhan, maka kapal dinyatakan kompatibel ( $Bd = 1$ ); bila tidak, maka dianggap tidak memenuhi syarat ( $Bd = 0$ ).

*Indeks:*

- $i, j$  Indeks titik
- $k$  Indeks kapal

*Himpunan:*

- $N_k$  Himpunan titik semesta
- $K$  Himpunan kapal
- $N_p \subseteq N_k$  Himpunan titik pick-up muatan ( $\{1, \dots, n\}$ ), dengan (n) adalah jumlah penawaran muatan
- $N_d \subseteq N_k$  Himpunan titik delivery muatan ( $\{n+1, \dots, 2n\}$ )
- $N_c \subseteq N_k$  Himpunan titik muatan
- $o(k) \subseteq N_k$  Titik pelabuhan pangkal awal kapal (k)
- $p \subseteq N_k$  Titik pelabuhan pangkal akhir kapal (k)
- $AK$  Asosiasi busur dalam ( $N_k$ )

*Variabel Tak Terkendali:*

- $D_{ij}$  Jarak antara titik (i) dan (j) (mil laut)
- $R_{ij}$  Pendapatan dari muatan (i) (Rp)
- $Cap_k$  Kapasitas muatan maksimum kapal (k) (ton)
- $Q_i$  Berat muatan (i) (ton)
- $s_i$  Durasi proses bongkar/muat di titik (i) (hari)
- $A_i, B_i$  Batas bawah dan atas jendela waktu layanan di titik (i) (hari)
- $V_{k \min}, V_{k \max}$  Batas kecepatan minimum dan maksimum kapal (k) (knot)
- $\Omega_k$  Berat kosong kapal (k) (ton)
- $C_k^p$  Biaya pelabuhan untuk kapal (k) (Rp)
- $P_{f1}, P_{f2}$  Harga bahan bakar tipe 1 (MFO) dan tipe 2 (HSD) (Rp/ton)
- $Fc_k$  Biaya tetap kapal (k) per hari
- $\mu$  Koefisien mesin diesel
- $\pi_k$  Konsumsi A/E saat pelayaran (ton/jam)
- $\alpha_k$  Konsumsi A/E saat idle (ton/jam)
- $Bd_{jk}$  Kompatibilitas kapal dan pelabuhan  
(biner: 1 jika kedalaman pelabuhan  $> 1,1$  draft kapal; 0 jika bukan)
- $o(k)_k$  Lokasi pelabuhan awal kapal (k)
- $d_k$  Lokasi pelabuhan akhir kapal (k)

*Fungsi Konsumsi Bahan Bakar [12]:*

- $F(c) = \text{konsumsi bahan bakar berlyar M/E}$
- $F(c) = \mu \times V_{ijk}^3 \times (\Delta_{ik})^{2/3} (\text{Ton/hari})$

*Variabel Terkendali:*

- $X_{ijk}$  Variabel keputusan rute kapal,  $\{0,1\}$  jika kapal (k) berlayar dari titik (i) ke (j)
- $Y_{jk}$  Variabel keputusan pelabuhan singgah kapal,  $\{0,1\}$  jika kapal (k) mengunjungi titik (j)
- $Z_k$  Variabel keputusan penugasan kapal,  $\{0,1\}$  jika kapal (k) ditugaskan
- $V_{ijk}$  Variabel keputusan kecepatan kapal (k) dari titik (i) ke (j)
- $T_{ik}$  Variabel bantu pelayanan B/M di titik (i) oleh kapal (k)
- $\Delta_{ik}$  Variabel bantu displacement kapal B/M di titik (i)

Fungsi Tujuan :

$$\begin{aligned} \text{Maksimasi } (Z) = & \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A_k} R_i X_{ijk} - \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A_k} P_f 1 \times F(c)_{ijk} \times \frac{D_{ij}}{24V_{ijk}} \times X_{ijk} \\ & - \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A_k} P_f 2 \times \pi_k \times \frac{D_{ij}}{V_{ijk}} \times X_{ijk} - \sum_{k \in K} \sum_{j \in N_k} (C_k^p + P_f 2 \times \alpha_k \times W t_{jk}) \times Y_{jk} \\ & - \sum_{k \in K} SD_k \times Fc_k \times Z_k \end{aligned} \quad (III.1)$$

Fungsi Pembatas :

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N_k} X_{ijk} \leq 1; \forall i \in Np \quad (III.2)$$

$$X_{ijk} \leq B d_{jk}; (i,j) \in A_k, k \in K \quad (III.3)$$

$$\sum_{i \in Nk} X_{ijk} = Y_{jk}; j \in Nk, k \in K \quad (III.4)$$

$$X_{ijk} = 1 - Z_k; i \in o(k), j \in p, k \in K \quad (III.5)$$

$$\sum_{j \in Np \cup p} X_{ijk} = 1; i \in o(k), k \in K \quad (III.6)$$

$$\sum_{i \in Nk} X_{ijk} - \sum_{i \in Nk} X_{jik} = 0; k \in K, j \in Nc \quad (III.7)$$

$$\sum_{i \in Nd \cup o(k)} X_{ijk} = 1; j \in p, k \in K \quad (III.8)$$

$$\sum_{j \in Nk} X_{ijk} - \sum_{j \in Nk} X_{i+njk} = 0; k \in K, i \in Np \quad (III.9)$$

$$l_{ik} + \Omega_k = \Delta_{ik}; k \in K, i \in Nv \quad (III.10)$$

$$X_{ijk} (l_{ik} + Q_j - l_{ik}) = 0; k \in K, (i,j) \in A_k, j \in Np \quad (III.11)$$

$$X_{ijk} (l_{ik} - Q_j - l_{j+nk}) = 0; k \in K, (i,j+n) \in A_k, j \in Np \quad (III.12)$$

$$l_{ik} = 0; k \in K, i \in o(k) \quad (III.13)$$

$$l_{ik} = 0; k \in K, i \in p \quad (III.14)$$

$$0 \leq l_{ik} \leq Cap_k; k \in K, i \in Nk \quad (III.15)$$

$$s_i + \frac{D_{ij}}{24V_{ijk}} = W_{ijk}; k \in K, (i,j) \in k \quad (III.16)$$

$$\sum_{j \in p} T_{jk} \times Y_{jk} - \sum_{j \in o(k)} T_{jk} \times Y_{jk} = SD_k; k \in K \quad (III.17)$$

$$X_{ijk} (T_{jk} - W_{ijk} - T_{ik}) = W t_{jk}; k \in K, (i,j) \in A_k \quad (III.18)$$

$$T_{i+nk} \geq T_{ik}; k \in K, i \in Np \quad (III.19)$$

$$A_i \leq T_{ik} \leq B_i; k \in K, (i,j) \in A_k \quad (III.20)$$

$$V_k \min \leq V_{ijk} \leq V_k \max; k \in K, (i,j) \in A_k \quad (III.21)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\}; \forall k \in K, \forall (i,j) \in A_k \quad (III.22)$$

$$Y_{ik} \in \{0, 1\}; \forall k \in K, \forall i \in N_k \quad (III.23)$$

$$Z_k \in \{0, 1\}; \forall k \in K \quad (III.24)$$

### Pengujian Model

Pada **Tabel 3**, disajikan kumpulan penawaran kargo hipotetik yang disusun menyerupai struktur dan parameter penawaran aktual yang diterima PT XYZ. Tujuh rute pengiriman: Cigading–Batam, Kuala Tanjung–Cigading, Makassar–Sorong, Samarinda–Majene, Tanjung Priok–Gresik, Gresik–Makassar, dan Ambon–Cigading. Ditampilkan dengan rentang tenggat waktu penjemputan pada Maret 2019, estimasi pendapatan dalam jutaan Rupiah, serta berat kargo dalam ton.

**Tabel 3.** Penawaran muatan hipotetik

| Penawaran Kargo (O/D) | Tenggat Waktu Penjemputan | Pendapatan (Rp jt) | Berat Kargo (Ton) |
|-----------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|
| Cigading/Batam        | 3-4 Mar 19                | 2.357,85           | 8.574             |
| Kuala Tj./Cigading    | 22-23 Mar 19              | 821,12             | 5.132             |
| Makassar/Sorong       | 9-10 Mar 19               | 1.308,80           | 5.342             |
| Samarinda/Majene      | 6-7 Mar 19                | 334,7              | 1.424             |
| Tj. Priok/Gresik      | 1-2 Mar 19                | 385                | 2.200             |
| Gresik/Makassar       | 3-4 Mar 19                | 435                | 2.320             |
| Ambon/Cigading        | 13-14 Mar 19              | 1.082,3            | 3.750             |

Sumber: Penelitian (2025)

Data hipotetik ini dirancang khusus untuk menguji keberjalanan model MINLP. Dalam kerangka model, setiap penawaran diwakili oleh variabel keputusan biner. Lebih lanjut, variabel biner dipasangkan dengan kendala kapasitas kapal dan jadwal penjemputan. Struktur MINLP memungkinkan peneliti memasukkan fungsi objektif nonlinier, misalnya rasio pendapatan per ton atau biaya bahan bakar yang berubah seiring berat muatan yang diangkut, sehingga model menangkap kompleksitas keputusan operasional dengan lebih akurat.

**Tabel 4**, menyajikan ringkasan hasil komputasi model MINLP yang dijalankan menggunakan data pada **Tabel 3**. Waktu komputasi diatur agar maksimal mencapai 3 jam. Hasil global optimal yang harus dicapai lebih dari 3 jam memberi indikasi perlunya strategi percepatan atau dekomposisi komputasi untuk skala data yang lebih besar.

**Tabel 4.** Penawaran muatan hipotetik

| Jumlah Penawaran | Kapal (1,2,3,4,5)                      |                      |                | Kapal (1,4,5)                                         |                      |                |
|------------------|----------------------------------------|----------------------|----------------|-------------------------------------------------------|----------------------|----------------|
|                  | Kargo Terpilih (Keuntungan)            | Elapsed Running Time | Status Model   | Kargo Terpilih (Keuntungan)                           | Elapsed Running Time | Status Model   |
| 2 kargo          | Ciganding (Rp1.525.275.000)            | 82,62 s              | Global Optimal | Ciganding (Rp1.525.275.000)                           | 36,57 s              | Global Optimal |
| 3 kargo          | Ciganding, Makassar (Rp1.534.155.000)  | 194,31 s             | Global Optimal | Ciganding, Makassar (Rp1.534.155.000)                 | 115,94 s             | Global Optimal |
| 4 kargo          | Ciganding, Makassar (Rp1.534.155.000)  | 1.645,8 s            | Global Optimal | Ciganding, Makassar (Rp1.534.155.000)                 | 342,91 s             | Global Optimal |
| 5 kargo          | Ciganding, Tj. Priok (Rp1.610.867.000) | 3 h                  | Local Optimal  | Ciganding, Tj. Priok (Rp1.552.899.000)                | 1.837,8 s            | Global Optimal |
| 6 kargo          | Tidak dihitung                         | -                    | -              | Ciganding, Makassar, Gressik (Rp1.694.840.000)        | 1,54 h               | Global Optimal |
| 7 kargo          | Tidak dihitung                         | -                    | -              | Ciganding, Makassar, Gressik, Ambon (Rp2.074.269.000) | 3 h                  | Local Optimal  |

Sumber: Penelitian (2025)

Pada setiap kombinasi jumlah kapal dan total muatan, misalnya tiga kapal dengan tujuh penawaran muatan, maupun lima kapal dengan jumlah lima penawaran muatan, model konsisten menemukan solusi optimal. Solusi optimal global mewakili nilai objektif terbaik di seluruh ruang pencarian, sementara optimal lokal adalah sebaliknya. Dengan demikian, data hipotetik ini tidak hanya memverifikasi kemampuan model dalam mencapai solusi, tetapi juga memberikan wawasan tentang trade-off antara kualitas solusi dan waktu komputasi.

#### Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk menguji apakah model tetap memberikan hasil yang layak (*feasible*) terhadap perubahan besar pada parameter-parameter utama. Parameter utama ini dipilih karena berkontribusi besar terhadap total keuntungan, dan sangat mungkin mengalami fluktuasi di kondisi nyata, terutama akibat perubahan harga bahan bakar dan biaya operasional.

**Tabel 5.** Pengaruh Perubahan Harga MFO

| MFO  | Rute Kapal 1                             | Rute Kapal 5                     | Total Keuntungan Armada | Perubahan keuntungan |
|------|------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------|
| 50%  | Tj. Perak - Cigading - Batam - Tj. Priok | Tj. Priok - Bahodopi - Tj. Perak | Rp 2.224.749,000        | 17.19%               |
| 75%  | Tj. Perak - Cigading - Batam - Tj. Priok | Tj. Priok - Bahodopi - Tj. Perak | Rp 2.065.772,000        | 8.8%                 |
| 100% | Tj. Perak - Cigading - Batam - Tj. Priok | Tj. Priok - Bahodopi - Tj. Perak | Rp 1.898,340,000        | 0.0%                 |
| 125% | Tj. Perak - Cigading - Batam - Tj. Priok | Tj. Priok - Bahodopi - Tj. Perak | Rp 1.800.341.000        | -5.2%                |
| 150% | Tj. Perak - Cigading - Batam - Tj. Priok | Tj. Priok - Bahodopi - Tj. Perak | Rp 1.687.754.000        | -11.1%               |

Sumber: Penelitian (2025)

**Tabel 5** menunjukkan bahwa perubahan harga MFO dalam rentang -50% hingga +50% tidak menyebabkan ketidaklayakan (*infeasibility*) pada keluaran model yang dikembangkan. Perubahan total keuntungan juga tidak terlalu signifikan, yaitu masih berada dalam kisaran -11,1% hingga +17,19%. Hal ini ditunjukkan oleh fakta bahwa tidak terjadi perubahan pada muatan yang dipilih maupun kapal yang ditugaskan. Muatan yang dipilih tetap sama pada setiap skenario perubahan harga MFO, yang mengindikasikan bahwa muatan tersebut memang telah membentuk rute pelayanan kapal yang optimal.

**Tabel 6.** Pengaruh Perubahan Harga HSD

| HSD  | Rute Kapal 1                             | Rute Kapal 5                     | Total Keuntungan Armada | Perubahan keuntungan |
|------|------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------|
| 50%  | Tj. Perak - Cigading - Batam - Tj. Priok | Tj. Priok - Bahodopi - Tj. Perak | Rp 2.025.679.000        | 6.71%                |
| 75%  | Tj. Perak - Cigading - Batam - Tj. Priok | Tj. Priok - Bahodopi - Tj. Perak | Rp 1.930.638.000        | 1.7%                 |
| 100% | Tj. Perak - Cigading - Batam - Tj. Priok | Tj. Priok - Bahodopi - Tj. Perak | Rp 1.898.340.000        | 0.0%                 |
| 125% | Tj. Perak - Cigading - Batam - Tj. Priok | Tj. Priok - Bahodopi - Tj. Perak | Rp 1.871.537.000        | -1.4%                |
| 150% | Tj. Perak - Cigading - Batam - Tj. Priok | Tj. Priok - Bahodopi - Tj. Perak | Rp 1.821.599.000        | -4.0%                |

Sumber: Penelitian (2025)

**Tabel 6** menunjukkan bahwa pengaruh perubahan harga MFO terhadap model yang dikembangkan tidak menyebabkan ketidaklayakan (*infeasibility*) pada keluaran model. Sementara itu, total keuntungan berdasarkan perubahan nilai HSD berada dalam rentang -4,0% hingga +6,71%. Muatan yang dipilih tetap sama meskipun terjadi perubahan nilai HSD, yang menunjukkan bahwa model tetap mampu menghasilkan rute pengiriman barang yang optimal.

**Tabel 7.** Pengaruh Perubahan Biaya Tetap Harian

| HSD  | Rute Kapal 1                                | Rute Kapal 5                                | Total Keuntungan Armada | Perubahan keuntungan |
|------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------|----------------------|
|      |                                             | Tj. Priok - Gresik –<br>Sorong - Bahodopi - |                         |                      |
| 50%  | Tj. Perak - Cigading -<br>Batam - Tj. Priok | Tj. Perak                                   | Rp 2.701.903.000        | 42.33%               |
| 75%  | Tj. Perak - Cigading -<br>Batam - Tj. Priok | Tj. Priok - Bahodopi -<br>Tj. Perak         | Rp 2.213.361.000        | 16.6%                |
| 100% | Tj. Perak - Cigading -<br>Batam - Tj. Priok | Tj. Priok - Bahodopi -<br>Tj. Perak         | Rp 1.898.340.000        | 0.0%                 |
| 125% | Tj. Perak - Cigading -<br>Batam - Tj. Priok | Tj. Priok - Bahodopi -<br>Tj. Perak         | Rp 1.641.525.000        | -13.5%               |
| 150% | Tj. Perak - Cigading -<br>Batam - Tj. Priok | Tj. Priok - Bahodopi -<br>Tj. Perak         | Rp 1.369.308.000        | -27.9%               |

Sumber: Penelitian (2025)

Dalam **Tabel 7**, pengaruh perubahan biaya tetap harian dalam rentang -50% hingga +50% tidak menunjukkan ketidaklayakan (*infeasibility*) pada model yang dikembangkan. Namun, perubahan total keuntungan mengalami fluktuasi yang signifikan, sebagaimana dijelaskan [11]. Hal ini disebabkan oleh besarnya porsi biaya tetap dalam menjalankan operasional kapal, baik dari sisi biaya modal maupun operasional. Nilainya dapat mencapai hingga 60% dari total biaya. Perubahan total keuntungan tercatat berada dalam kisaran -27,9% hingga +42,33%.

Menariknya, pada saat biaya tetap harian turun hingga -50%, terjadi perubahan dalam pemilihan rute pengangkutan muatan, di mana model memilih tiga titik muat: Cigading, Gresik, dan Bahodopi. Ketiga titik tersebut diangkut oleh dua kapal, yaitu kapal 1 dan kapal 5, yang dialokasikan secara simultan untuk melayani distribusi barang dari ketiga lokasi tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa model mampu beradaptasi terhadap perubahan parameter biaya dengan mengatur ulang strategi rute dan alokasi kapal secara dinamis. Lebih lanjut, model matematika yang dikembangkan secara konsisten menunjukkan kemampuan optimasi dalam mencari konfigurasi terbaik untuk memaksimalkan keuntungan, sekaligus mempertahankan fleksibilitas operasional dalam berbagai kondisi biaya.

### Pembahasan

Pada sub-bab Sistem Umum Kajian, dijelaskan kerangka operasional PT XYZ sebagai operator tramp vessel, mulai dari proses pemilihan muatan hingga penentuan urutan layanan muat dan bongkar berdasarkan jendela waktu di pelabuhan. Parameter kapal seperti kapasitas angkut dan displacement, serta kendala di pelabuhan seperti durasi bongkar muat, waktu tunggu, *staying time*, dan kecocokan draft kapal dengan kedalaman kolam dibahas untuk menggambarkan kompleksitas keputusan operasional dan kebutuhan efisiensi biaya secara menyeluruh.

Berdasarkan gambaran sistem tersebut, Model Matematis disusun dalam bentuk MINLP yang memformalkan setiap keputusan penerimaan muatan sebagai variabel biner, serta mengintegrasikan kendala teknis dan batas waktu layanan. Fungsi objektif yang digunakan menggabungkan perhitungan pendapatan per ton, biaya bahan bakar yang berubah mengikuti displacement, serta *staying time* kapal di pelabuhan, sehingga mencerminkan keseimbangan antara profitabilitas dan efisiensi operasional.

Selanjutnya, Pengujian Model dilakukan dengan menggunakan data hipotetik yang menyerupai kondisi nyata PT XYZ untuk menilai kelayakan struktur model. Hasil pengujian menunjukkan bahwa model mampu menghasilkan solusi optimal dalam berbagai skenario armada dan beberapa penwaran pengangkutan muatan. Kemudian, Analisis Sensitivitas dilakukan untuk menguji ketahanan model terhadap perubahan parameter utama seperti harga bahan bakar dan biaya tetap harian. Berbeda dengan sub-bab Pengujian Model, analisis ini menggunakan data penawaran aktual yang diterima PT XYZ. Hal ini dimaksudkan untuk memastikan bahwa model tidak hanya berjalan secara logis pada skenario simulasi, tetapi juga tetap dapat diandalkan saat diterapkan pada kondisi nyata di lapangan. Hubungan antara keempat sub-bab ini menunjukkan kesinambungan dari pemahaman sistem nyata menuju pembentukan model, pengujian awal dengan data simulasi, dan pembuktian ketahanan model sebelum implementasi operasional.

## 4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan suatu model penjadwalan armada kapal tramp untuk pasar *general cargo-spot charter* menggunakan pendekatan MINLP. Model yang dirancang telah mengakomodasi berbagai aspek penting dalam operasional PT XYZ, termasuk jendela waktu pelayanan di pelabuhan, waktu tunggu bongkar muat, kompatibilitas kapal dengan pelabuhan, penentuan pelabuhan akhir, kapasitas kapal, durasi pelayaran, displacement yang bersifat dinamis, serta struktur biaya operasional seperti bahan bakar, biaya pelabuhan, biaya tetap, dan kecepatan pelayaran optimal yang mempertimbangkan penggunaan dua jenis bahan bakar, yakni MFO dan HSD.

Pengujian terhadap keberjalanan model menunjukkan bahwa struktur yang dikembangkan mampu menghasilkan solusi yang layak untuk skenario dengan jumlah kapal hingga lima unit dan penawaran muatan hingga lima kargo. Model juga tetap berjalan baik saat digunakan dalam skenario tiga kapal dan tujuh penawaran muatan. Namun, pada skala data yang lebih besar dari dua skenario tersebut, waktu komputasi melampaui batas tiga jam yang telah ditentukan, sehingga simulasi dihentikan. Pemberhentian model ini semata-mata disebabkan oleh pembatasan waktu komputasi, bukan karena kegagalan model. Bahkan, hasil yang diperoleh menunjukkan solusi lokal optimal, yang menjadi indikasi bahwa struktur model matematis telah berjalan dengan baik. Untuk penyempurnaan strategi dalam mengatasi kendala waktu komputasi pada skala data yang lebih besar, penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada penerapan pendekatan heuristik maupun meta-heuristik.

Perbandingan hasil penjadwalan antara model yang dikembangkan dengan metode operasional aktual PT XYZ menunjukkan adanya peningkatan keuntungan total sebesar 30,6 % (Rp1.452.515.661 menjadi Rp 1.898.340.000). Selain itu, kecepatan pelayaran yang ditentukan oleh model juga berbeda dibandingkan praktik aktual, yang menunjukkan bahwa model turut mempertimbangkan kecepatan optimal sebagai faktor dalam memaksimalkan profit. Analisis sensitivitas terhadap perubahan harga bahan bakar menunjukkan bahwa model tetap memberikan hasil yang layak dalam rentang perubahan harga MFO dan HSD antara -50 % hingga +50 %. Dalam rentang perubahan tersebut, tidak terjadi perubahan pada muatan yang dipilih untuk dilayani. Pada skenario perubahan biaya tetap harian kapal, model tetap layak tetapi menunjukkan perubahan pilihan muatan ketika biaya tetap diturunkan sebesar 50 %. Hal ini membuktikan bahwa model memiliki ketahanan yang kuat, fleksibel terhadap perubahan kondisi operasional, dan dapat diandalkan sebagai alat bantu pengambilan keputusan dalam perencanaan armada tramp di pasar *general cargo-spot charter* PT XYZ.

## 5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih atas dukungan dan kontribusi intelektual dari rekan penulis dan kolega di Departemen Teknik Industri, Institut Teknologi Sumatera, yang telah memperkaya penelitian ini secara signifikan.

## 6. Daftar Singkatan

|       |                                     |
|-------|-------------------------------------|
| LTS   | Less than shipload                  |
| MINLP | Mixed Integer Nonlinear Programming |
| O/D   | Origin/Destination                  |
| LWT   | Light Weight Tonnage                |
| DWT   | Dead Weight Tonnage                 |
| HSD   | High Speed Diesel                   |
| MFO   | Marine Fuel Oil                     |
| M/E   | Main Engine                         |
| A/E   | Auxiliary Engine                    |
| B/M   | Bongkar/Muat                        |
| LWS   | Lowest Water Surface                |

## 7. Daftar Pustaka

- [1] M. Christiansen, K. Fagerholt, B. Nygreen, dan D. Ronen, "Ship routing and scheduling in the new millennium," *European Journal of Operational Research*, vol. 228, no. 3, hlm. 467–483, Agustus 2013, doi: 10.1016/j.ejor.2012.12.002.
- [2] C. Vilhelmsen, R. M. Lusby, dan J. Larsen, "Tramp ship routing and scheduling with voyage separation requirements," *OR Spectrum*, vol. 39, hlm. 913–943, Mei 2017, doi: 10.1007/s00291-017-0488-4.

- [3] N. K. Tran dan H.-D. Haasis, "A research on operational patterns in container liner shipping," *Transport*, vol. 33, no. 3, hlm. 619–632, 2018, doi: 10.3846/transport.2018.1571.
- [4] J. Laake dan A. Zhang, "Joint optimization of strategic fleet planning and contract analysis in tramp shipping," *Applied Economics*, vol. 48, no. 3, hlm. 203–211, 2016, doi: 10.1080/00036846.2015.1076151.
- [5] Z. Hu, T. Zhou, R. Zhen, Y. Jin, X. Li, dan M. T. Osman, "A two-step strategy for fuel consumption prediction and optimization of ocean-going ships," *Ocean Engineering*, vol. 249, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.110904.
- [6] Y. Zhao dan Z. Yang, "Ship scheduling in the tramp spot market based on shipper's choice behavior and the spatial and temporal shipping demand," *Transportation Journal*, vol. 57, no. 3, 2018, doi: 10.5325/transportationj.57.3.0310.
- [7] Z. Huang, L. Xu, B. Wang, dan J. Li, "Optimizing power systems and microgrids: A novel multi-objective model for energy hubs with innovative algorithmic optimization," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 69, hlm. 927–943, Juni 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.04.341.
- [8] S. E. Noshokaty, "Ship routing and scheduling systems: forecasting, upscaling and viability," *Journal of Shipping and Trade*, vol. 6, no. 1, hlm. 95–112, Juli 2020. Tersedia: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/mabr-04-2020-0027/full/html>
- [9] O. Loshkarov dan O. Kornelyuk, "Optimization of the stages of a ship's cargo plan development for shipping of general cargoes," *Control Processes*, vol. 5, no. 3(113), 2021, doi: 10.15587/1729-4061.2021.241487.
- [10] J. Parunov, T. Uroda, dan I. Senjanović, "Structural analysis of a general cargo ship," *Brodogradnja*, vol. 69, no. 2, hlm. 28–35, 2018, doi: 10.21278/brod69203.
- [11] M. Stopford, *Maritime Economics*, ed. ke-3. London, UK: Routledge, 2009. Tersedia: <https://www.routledge.com/Maritime-Economics-3e/Stopford/p/book/9780415275583>.
- [12] C. B. Barrass dan D. R. Derrett, *Ship Design and Performance for Masters and Mates*, ed. ke-2. Oxford, UK: Elsevier, 2004. Tersedia: <https://shop.elsevier.com/books/ship-design-and-performance-for-masters-and-mates/barrass/978-0-7506-6000-6>.
- [13] J. Fagerholt dan H. Psaraftis, "Maritime scheduling with speed optimization: Conceptual design and computational results," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 19, no. 5, hlm. 680–690, Oktober 2011, doi: 10.1016/j.trc.2010.07.007.
- [14] M. Wen, S. Ropke, H. L. Petersen, R. Larsen, dan O. B. G. Madsen, "Full-shipload tramp ship routing and scheduling with variable speeds," *Computers & Operations Research*, vol. 70, hlm. 1–8, 2016. Tersedia: <https://www.dendanskemaritimefond.dk/wp-content/uploads/2016/03/Tanker-planner-COR-2016.pdf>.
- [15] H. Fan, J. Yu, dan X. Liu, "Tramp ship routing and scheduling with speed optimization considering carbon emissions," *Sustainability*, vol. 11, no. 22, hlm. 6367, Nov. 2019, doi: 10.3390/su11226367.
- [16] L. Guan, C. Zhou, Q. Sun, dan A. Che, "Delay-tolerated vehicle positioning and scheduling problem at terminal aprons: a target-oriented robust optimisation approach," *International Journal of Production Research*, vol. 62, no. 1, hlm. 1–21, 2024, doi: 10.1080/00207543.2025.2474214.
- [17] Kementerian Perhubungan, Keputusan Menteri Perhubungan Nomor KP 820 Tahun 2018 tentang Penetapan Alur-Pelayaran, Sistem Rute, Tata Cara Berlalu Lintas, dan Daerah Labuh Kapal Sesuai Dengan Kepentingannya di Alur-Pelayaran Masuk Pelabuhan Lembar, 18 Mei 2018. Tersedia: <https://peraturan.infoasn.id/keputusan-menteri-perhubungan-nomor-kp-820-tahun-2018/>