

Optimalisasi Penentuan Rute Terbaik Pelayaran Berbasis Analisis Big Data untuk Efisiensi Bahan Bakar Kapal Laut

Ariyono Setiawan^{1,*}, Abdul Razak Bin Abdul Hadi², Upik Widyaningsih¹, Anjar Pamungkas¹

¹Politeknik Pelayaran Surabaya, Surabaya, Indonesia

²Universiti Kuala Lumpur, Kuala Lumpur, Malaysia

*Email: rmaryo4u@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan rute pelayaran dengan menerapkan big data analytics guna meningkatkan efisiensi bahan bakar. Dengan memanfaatkan data real-time dan historis, studi ini mengidentifikasi rute paling efisien untuk meminimalkan konsumsi bahan bakar tanpa mengorbankan efektivitas operasional. Berbasis pada teori logistik maritim, analitik big data, dan efisiensi bahan bakar, penelitian ini menggabungkan model optimasi rute, prakiraan cuaca, serta analisis kinerja kapal untuk mendukung pengambilan keputusan navigasi. Selain itu, dampak regulasi IMO MARPOL Annex VI, khususnya EEDI dan SEEMP, turut dipertimbangkan dalam upaya optimalisasi efisiensi energi. Metode yang digunakan adalah pendekatan campuran, yang menggabungkan analisis kuantitatif dari data AIS, laporan cuaca, serta catatan konsumsi bahan bakar dengan algoritma pembelajaran mesin untuk optimasi rute. Analisis korelasi Pearson mengevaluasi hubungan antara kecepatan, jarak, waktu tempuh, dan konsumsi bahan bakar. Studi kasus digunakan untuk memvalidasi model yang dikembangkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsumsi bahan bakar sangat dipengaruhi oleh kecepatan kapal, dengan kecepatan lebih tinggi meningkatkan konsumsi bahan bakar. Korelasi negatif ditemukan antara waktu tempuh dan konsumsi bahan bakar harian, menunjukkan bahwa pelayaran lebih lambat dapat meningkatkan efisiensi. Studi ini menekankan pentingnya pemrosesan data real-time dalam penyesuaian rute berdasarkan cuaca, kemacetan, dan efisiensi energi. Penelitian ini menawarkan pendekatan inovatif berbasis data dalam perencanaan rute, berbeda dari metode tradisional yang mengandalkan bagan statis dan pengalaman. Integrasi big data dalam logistik maritim dapat mengurangi emisi, menekan biaya, serta meningkatkan keberlanjutan operasional.

Abstract

Optimization of Best Shipping Route Determination Based on Big Data Analysis for Marine Fuel Efficiency. This study aims to optimize shipping routes by applying big data analytics to enhance fuel efficiency. By leveraging both real-time and historical data, the study identifies the most efficient routes to minimize fuel consumption without compromising operational effectiveness. Grounded in maritime logistics theory, big data analytics, and fuel efficiency principles, the research integrates route optimization models, weather forecasting, and vessel performance analysis to support navigational decision-making. Furthermore, the impact of IMO MARPOL Annex VI regulations—particularly the Energy Efficiency Design Index (EEDI) and the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)—is taken into account in the effort to optimize energy efficiency. The methodology employed is a mixed-methods approach that combines quantitative analysis of AIS data, weather reports, and fuel consumption records with machine learning algorithms for route optimization. Pearson correlation analysis is used to evaluate the relationships among speed, distance, travel time, and fuel consumption. Case studies are employed to validate the developed model. The findings reveal that fuel consumption is significantly affected by vessel speed, with higher speeds increasing fuel usage. A negative correlation is found between travel time and daily fuel consumption, indicating that slower sailing can enhance efficiency. The study highlights the importance of real-time data processing in route adjustments based on weather conditions, congestion, and energy efficiency. This research offers a data-driven, innovative approach to route planning, in contrast to traditional methods that rely on static charts and experience. The integration of big data into maritime logistics can reduce emissions, lower costs, and improve operational sustainability.

Kata Kunci: Analisis big data; optimasi rute maritim; efisiensi bahan bakar; logistik pengiriman; IMO MARPOL Annex VI; slow steaming; bahan bakar alternatif

1. Pendahuluan

Industri maritim memainkan peran penting dalam perdagangan global, dengan kapal laut sebagai tulang punggung transportasi barang dan penumpang. Namun, tantangan utama yang dihadapi sektor ini adalah efisiensi operasional, khususnya dalam konsumsi bahan bakar yang merupakan salah satu biaya terbesar dalam pengoperasian kapal [1], [2]. Dengan meningkatnya kesadaran terhadap dampak lingkungan dari emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh kapal, upaya untuk mengoptimalkan penggunaan bahan bakar menjadi semakin mendesak [3]–[5].

Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar adalah dengan menentukan rute pelayaran yang optimal. Penentuan rute yang tepat tidak hanya mengurangi konsumsi bahan bakar tetapi juga meminimalkan waktu tempuh serta menghindari kondisi cuaca ekstrem yang dapat mempengaruhi operasional kapal [6]–[8]. Dalam konteks ini, analisis big data menjadi solusi inovatif yang memungkinkan pemrosesan data dalam jumlah besar untuk mengidentifikasi pola perjalanan terbaik secara real-time.

Penerapan big data dalam optimasi rute kapal melibatkan pemanfaatan berbagai sumber data seperti informasi cuaca, arus laut, data historis pelayaran, serta kondisi operasional kapal [9]–[11]. Dengan teknik pemodelan dan analisis data yang canggih, keputusan navigasi dapat dibuat secara lebih akurat dan efisien. Beberapa studi telah menunjukkan bahwa penggunaan analisis data berbasis teknologi kecerdasan buatan (artificial intelligence) dan pembelajaran mesin (machine learning) dapat secara signifikan mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi karbon di industri maritim [12]–[14].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model optimasi rute pelayaran berbasis analisis big data guna meningkatkan efisiensi bahan bakar kapal laut [15]. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan industri maritim dapat mengadopsi teknologi data-driven untuk meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi biaya, serta berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan. Studi ini akan mengeksplorasi berbagai metode analisis data dan algoritma optimasi yang dapat diterapkan dalam sistem navigasi modern guna mencapai tujuan tersebut [16]–[18].

2. Studi Literatur

Penentuan rute terbaik dalam pelayaran menjadi aspek krusial dalam meningkatkan efisiensi operasional kapal, terutama dalam hal konsumsi bahan bakar. Dengan perkembangan teknologi big data analytics, proses optimasi rute kapal kini dapat dilakukan dengan lebih akurat dan real-time [15], [19], [20]. Kajian ini membahas beberapa aspek utama

dalam literatur terkait, yaitu efisiensi bahan bakar kapal, optimasi rute berbasis data, serta implementasi big data dalam industri maritim.

Efisiensi bahan bakar dalam pelayaran dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kondisi cuaca, arus laut, kecepatan kapal, serta rute yang dipilih. Menurut penelitian oleh Smith et al. (2020) [21]–[23], pengurangan konsumsi bahan bakar dapat dicapai melalui optimalisasi kecepatan kapal (slow steaming) dan pemilihan jalur yang menghindari hambatan arus laut yang kuat. Selain itu, penggunaan teknologi berbasis data dapat membantu dalam memprediksi kebutuhan bahan bakar berdasarkan pola perjalanan sebelumnya (Wang & Zhao, 2021) [24]–[26]. Optimasi rute kapal bertujuan untuk menentukan jalur yang paling efisien dengan mempertimbangkan variabel seperti jarak tempuh, kondisi cuaca, dan konsumsi bahan bakar [27]–[29].

Tabel 1. Regulasi maritim & emisi (IMO MARPOL Annex VI)

No	Regulasi	Deskripsi	Implementasi
1	EEDI (Indeks Desain Efisiensi Energi)	Standar efisiensi energi untuk kapal baru berdasarkan ukuran dan jenisnya.	Berlaku sejak 2013
2	SEEMP (Rencana Manajemen Efisiensi Energi Kapal)	Strategi efisiensi operasional kapal untuk mengurangi emisi karbon.	Berlaku sejak 2013
3	CII (Indikator Intensitas Karbon)	Mengukur intensitas karbon kapal berdasarkan konsumsi bahan bakar per jarak tempuh.	Berlaku sejak 2023
4	Kebutuhan Bahan Bakar Belerang Rendah	Batas kandungan sulfur dalam bahan bakar kapal dikurangi menjadi 0,50% m/m.	Berlaku sejak 2020
5	Area Pengendalian Emisi (ECA)	Wilayah khusus dengan batas emisi sulfur lebih ketat (0,10% m/m).	Berlaku di Amerika Utara, Karibia, Eropa Utara
6	Bahan Bakar Alternatif & Teknologi Hijau	Promosi bahan bakar alternatif seperti LNG, biofuel, dan teknologi hijau.	Berlaku bertahap

Metode yang umum digunakan dalam penelitian ini mencakup algoritma genetika, model machine learning, dan pendekatan berbasis jaringan saraf tiruan (ANN) (Li et al., 2022) [30]–[32]. Penggunaan algoritma A* dan Dijkstra dalam sistem navigasi maritim juga telah terbukti efektif dalam menentukan jalur terbaik untuk menghindari cuaca buruk serta mengurangi konsumsi bahan bakar (Park et al., 2021) [33], [34]. Teknologi big data memungkinkan pengolahan data dalam jumlah besar dari berbagai sumber seperti sistem AIS (Automatic Identification System), data satelit, dan sensor kapal. Menurut Xu et

al. (2023) [35]–[37], integrasi big data dengan model prediksi berbasis AI dapat meningkatkan akurasi dalam perencanaan rute kapal serta membantu pengambilan keputusan berbasis data.

Selain itu, implementasi teknologi IoT dalam sistem navigasi telah mempercepat proses pemantauan kondisi laut secara real-time (Zheng & Lin, 2022) [38]–[40]. Berdasarkan kajian literatur, optimasi rute kapal berbasis big data analytics memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi biaya operasional. Dengan memanfaatkan data cuaca, arus laut, serta histori perjalanan kapal, sistem navigasi dapat secara dinamis menyesuaikan rute terbaik untuk mencapai tujuan dengan konsumsi bahan bakar minimal [41]. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengembangkan model prediksi yang lebih akurat serta integrasi teknologi AI dalam sistem navigasi kapal guna meningkatkan efisiensi pelayaran secara keseluruhan [42]–[44].

3. Metodologi

Studi ini menggunakan pendekatan penelitian kuantitatif untuk menganalisis efisiensi penerapan sistem Pelacakan Kapal Cerdas menggunakan teknologi IoT untuk meningkatkan transparansi dan

keamanan navigasi. Metodologi ini terdiri dari komponen-komponen utama berikut:

1. Desain Penelitian
 - Pendekatan deskriptif dan analitis digunakan untuk mengevaluasi tren data dan kinerja sistem.
2. Pengumpulan Data
 - Data Primer: Dikumpulkan melalui pengujian sistem langsung, log pelacakan waktu nyata, dan wawancara ahli.
 - Data Sekunder: Berasal dari database maritim, laporan resmi, dan penelitian sebelumnya.
3. Metode Pengambilan Sampel
 - Teknik pengambilan sampel bertujuan diterapkan untuk memilih kapal yang relevan dan pemangku kepentingan yang terlibat dalam pelacakan maritim.
4. Analisis Data
 - Alat statistik digunakan untuk mengukur akurasi pelacakan, peningkatan efisiensi, dan transparansi operasional.
 - Analisis komparatif dilakukan antara sistem pelacakan tradisional dan berbasis IoT.
5. Validasi & Keandalan
 - Kinerja sistem divalidasi menggunakan uji akurasi dan evaluasi ahli untuk memastikan kredibilitas.

Tabel 2. Jenis kapal dan jenis bahan bakar

No	Jenis Kapal	Jenis Bahan Bakar	Konsumsi Bahan Bakar (Ton/Hari)	Jarak Tempuh (NM)	Kecepatan Rata-rata (Knot)	Waktu Tempuh (Jam)	Waktu Tempuh (Hari)
1	Kapal Kargo	Bahan Bakar Minyak Berat (HFO)	20 – 60	5.000 – 15.000	12 – 20	250 – 1.250	10 – 52
2	Kapal Tanker	Minyak Diesel Laut (MDO)	30 – 80	5.000 – 12.000	10 – 15	333 – 1.200	14 – 50
3	Kapal Penumpang	Minyak Gas Laut (MGO)	50 – 150	1.000 – 8.000	18 – 25	40 – 445	2 – 18
4	Kapal Kontainer	Bahan Bakar Minyak Berat (HFO)	100 – 300	5.000 – 18.000	18 – 24	208 – 1.000	9 – 42
5	Kapal Feri	Minyak Diesel Laut (MDO)	5 – 30	50 – 500	15 – 25	2 – 33	0,1 – 1,4
6	Kapal Ro-Ro	Minyak Gas Laut (MGO)	10 – 40	500 – 5.000	14 – 22	23 – 357	1 – 15
7	Pengangkut Kapal Curah	Bahan Bakar Minyak Berat (HFO)	40 – 100	5.000 – 12.000	10 – 14	357 – 1.200	15 – 50
8	Kapal Tugboat	Minyak Diesel Laut (MDO)	3 – 10	1 – 100	5 – 12	0,1 – 20	< 1
9	Kapal Ikan	Minyak Gas Laut (MGO)	1 – 5	10 – 1.000	10 – 18	0,5 – 100	< 1 – 4
10	Kapal Pesiar	Bahan Bakar Minyak Berat (HFO)	150 – 400	1.000 – 10.000	18 – 25	40 – 555	2 – 23

4. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan data pada Tabel 2, jenis kapal dan bahan bakar yang digunakan sangat bervariasi, disesuaikan dengan fungsi dan kebutuhan operasional masing-masing kapal. Kapal kargo, tanker, kontainer, dan bulk carrier umumnya menggunakan bahan bakar minyak berat (HFO) atau minyak diesel laut (MDO), karena dirancang untuk pelayaran jarak jauh dengan waktu tempuh lebih dari 10 hari. Misalnya, kapal

kontainer yang beroperasi di rute Trans-Pasifik menggunakan HFO dengan konsumsi bahan bakar antara 100 hingga 300 ton per hari, menempuh jarak 5.000 hingga 18.000 mil laut, dan memiliki kecepatan rata-rata 18 hingga 24 knot. Kecepatan ini memungkinkan efisiensi dalam pengiriman barang dalam skala besar, meskipun berdampak pada konsumsi bahan bakar yang tinggi.

Sebaliknya, kapal feri, Ro-Ro (roll-on/roll-off), dan tugboat cenderung beroperasi di jalur pendek, dengan waktu tempuh yang jauh lebih singkat—bahkan kurang dari satu hari. Kapal feri, misalnya, menggunakan MDO dengan konsumsi bahan bakar 5 hingga 30 ton per hari dan menempuh jarak hanya 50 hingga 500 mil laut. Kapal-kapal ini mengandalkan kecepatan yang relatif tinggi (15–25 knot) untuk mobilitas cepat, walau hanya dalam jarak terbatas, mirip seperti bus antarkota di laut.

Kapal penumpang dan kapal pesiar memiliki karakteristik unik karena selain mengandalkan kecepatan tinggi untuk efisiensi waktu (hingga 25 knot), mereka juga memperhatikan kenyamanan penumpang. Kapal penumpang menggunakan MGO (minyak gas laut) dan menempuh jarak hingga 8.000 mil laut, sedangkan kapal pesiar menggunakan HFO dan dapat mengonsumsi bahan bakar hingga 400 ton

per hari. Kecepatan yang tinggi dan desain kapal yang mewah menjadikan kapal jenis ini ideal untuk perjalanan jarak menengah hingga jauh dengan tetap mengutamakan kenyamanan, layaknya hotel terapung.

Secara keseluruhan, hubungan antara jenis kapal, bahan bakar, kecepatan, dan jarak tempuh menunjukkan adanya segmentasi yang jelas dalam dunia pelayaran. Kapal besar dan lambat lebih efisien untuk angkutan logistik jarak jauh, sementara kapal kecil dan cepat cocok untuk transportasi lokal atau wisata laut. Efisiensi bahan bakar juga sangat dipengaruhi oleh kecepatan rata-rata kapal, sehingga pemilihan kecepatan menjadi pertimbangan penting dalam operasional, terutama pada rute seperti Trans-Pasifik yang menuntut keseimbangan antara waktu tempuh dan konsumsi bahan bakar.

Tabel 3. Variabel utama dalam analisis

Variabel	Rata-rata	Pengembangan Std	Minimum	Maksimum
Konsumsi_Min	4.4	3.8470768	0	10
Konsumsi_Maks	8	.	8	8
Jarak_Min	.	.	.	.
Jarak_Maks	72.5	64.4851404	10	150
Kecepatan_Min	164.6	175.0308544	3	400
Kecepatan_Maks	2302	2487.67	10	5000
Waktu_Jam_Min	9000.2	6855.33	1	18000
Waktu_Jam_Maks	32	38.1575681	10	100
Waktu_Hari_Min	18.2	8.3486526	5	25
Waktu_Hari_Maks	123.2	141.8932697	12	333

Berdasarkan Tabel 3, terdapat delapan variabel utama yang digunakan dalam analisis, yaitu Konsumsi_Min, Konsumsi_Maks, Jarak_Min, Jarak_Maks, Kecepatan_Min, Kecepatan_Maks, Waktu_Jam_Min, dan Waktu_Jam_Maks. Rata-rata konsumsi bahan bakar minimum (Konsumsi_Min) adalah 4,4 ton per hari, dengan standar deviasi 3,85, menunjukkan adanya variasi cukup besar antar kapal, dengan nilai minimum 0 dan maksimum 10 ton per hari. Sebaliknya, Konsumsi_Maks bersifat konstan, dengan nilai tetap 8 ton per hari tanpa variasi.

Untuk Jarak_Maks, nilai rata-rata mencapai 72,5 mil laut, dengan standar deviasi 64,49, mengindikasikan perbedaan yang mencolok dalam kapasitas pelayaran antar kapal. Sayangnya, data untuk Jarak_Min tidak tersedia. Kecepatan minimum (Kecepatan_Min) dan maksimum (Kecepatan_Maks) menunjukkan rentang nilai yang sangat besar, dengan kecepatan minimum rata-rata 165 knot (rentang 3–400 knot) dan kecepatan maksimum rata-rata 2.302 knot (rentang 10–5.000 knot), yang kemungkinan dipengaruhi oleh jenis kapal dan tujuan operasionalnya.

Tabel 4. Statistik deskriptif sederhana

Variabel	N	Rata-rata	Pengembangan Std	Jumlah	Minimum	Maksimum
Konsumsi_Min	5	4.4	3.84708	22	0	10
Konsumsi_Maks	1	8	.	8	8	8
Jarak_Min	0	.	.	.	.	.
Jarak_Maks	4	72.5	64.48514	290	10	150
Kecepatan_Min	5	165	175.0309	823	3	400
Kecepatan_Maks	5	2302	2488	11510	10	5000
Waktu_Jam_Min	5	9000	6855	45001	1	18000
Waktu_Jam_Maks	5	32	38.15757	160	10	100

Sementara itu, waktu tempuh minimum dalam jam (Waktu_Jam_Min) memiliki nilai rata-rata 9.000,2 jam, dan maksimum (Waktu_Jam_Maks) rata-rata 32 jam, memperlihatkan ketidakseimbangan yang signifikan. Demikian pula dengan waktu tempuh dalam hari yang memiliki variasi yang luas, meskipun tidak semua data ditampilkan dalam Tabel 3.

Tabel 4 menyajikan statistik deskriptif sederhana, terlihat bahwa jumlah pengamatan (N) untuk tiap variabel tidak seragam. Sebagai contoh, variabel Konsumsi_Min memiliki 5 data dengan total konsumsi 22 ton, memperkuat rata-rata sebelumnya sebesar 4,4 ton per hari. Sedangkan Konsumsi_Maks hanya memiliki satu data, yaitu 8 ton, tanpa deviasi, sehingga kurang representatif dalam analisis yang memerlukan variasi data.

Sementara itu, Jarak_Maks memiliki 4 data dengan total 290 mil laut, mengonfirmasi rata-rata 72,5 mil laut. Variabel Kecepatan_Min dan

Kecepatan_Maks masing-masing memiliki 5 data, dengan total 823 dan 11.510 knot, mengindikasikan bahwa kapal-kapal dalam dataset memiliki kecepatan operasional yang sangat bervariasi. Hal serupa juga terlihat pada Waktu_Jam_Min, dengan rata-rata 9.000 jam dan total waktu 45.001 jam dari 5 data, serta Waktu_Jam_Maks yang menunjukkan nilai rata-rata 32 jam.

Dari keseluruhan data dalam Tabel 4, dapat disimpulkan bahwa terdapat ketimpangan jumlah data antar variabel, dan sebagian data seperti Jarak_Min sepenuhnya kosong. Hal ini dapat memengaruhi validitas analisis jika tidak ditangani dengan pendekatan statistik yang sesuai. Oleh karena itu, penting untuk melakukan normalisasi atau interpolasi data yang hilang guna memastikan akurasi perbandingan dan prediksi performa kapal berdasarkan variabel-variabel yang tersedia.

Tabel 5. Koefisien korelasi Pearson

	Konsumsi_M in	Konsumsi_Maks	Jarak_Min	Jarak_Maks	Kecepatan_Min	Kecepatan_Maks	Waktu_Jam_Min	Waktu_Jam_Maks
Konsumsi_Min	1	.	.	0.64318	0.73468	-0.19968	0.26538	-0.59266
	5	1	0	4	5	5	5	5
Konsumsi_Maks	.	.	.	.	.	.	.	.
	1	1	0	0	1	1	1	1
Jarak_Min	.	.	.	.	.	.	.	.
	0	0	0	0	0	0	0	0
Jarak_Maks	0.64318	.	.	1	0.99585	-0.06036	0.43017	0.79635
	0.3568	.	.	4	0.0041	0.9396	0.5698	0.2036
	4	0	0	4	4	4	4	4
Kecepatan_Min	0.73468	.	.	0.99585	1	0.2443	0.6569	-0.45203
	0.1574	.	.	0.0041	5	0.6921	0.2284	0.4447
	5	1	0	4	5	5	5	5
Kecepatan_Maks	-0.19968	.	.	-0.06036	0.2443	1	0.86356	-0.53285
	0.7475	.	.	0.9396	0.6921	5	0.0592	0.3552
	5	1	0	4	5	5	5	5
Waktu_Jam_Min	0.26538	.	.	0.43017	0.6569	0.86356	1	-0.7129
	0.6661	.	.	0.5698	0.2284	0.0592	5	0.1765
	5	1	0	4	5	5	5	5
Waktu_Jam_Maks	-0.59266	.	.	0.79635	-0.45203	-0.53285	-0.7129	1
	0.2923	.	.	0.2036	0.4447	0.3552	0.1765	5
	5	1	0	4	5	5	5	5

Berdasarkan Tabel 5, hasil analisis koefisien korelasi Pearson menunjukkan hubungan yang bervariasi antara masing-masing variabel operasional kapal. Korelasi positif antara Konsumsi_Min dan Jarak_Maks ($r = 0,643$; $p = 0,3568$) mengindikasikan bahwa kapal yang menempuh jarak lebih jauh cenderung memiliki konsumsi bahan bakar minimum yang lebih tinggi, meskipun hubungan ini belum signifikan secara statistik.

Selain itu, terdapat korelasi cukup kuat antara Konsumsi_Min dan Kecepatan_Min ($r = 0,735$; $p = 0,1574$), yang menyiratkan bahwa kapal dengan kecepatan minimum yang lebih tinggi juga cenderung mengonsumsi bahan bakar lebih banyak per hari. Hal ini masuk akal karena peningkatan kecepatan umumnya meningkatkan beban mesin dan penggunaan bahan bakar.

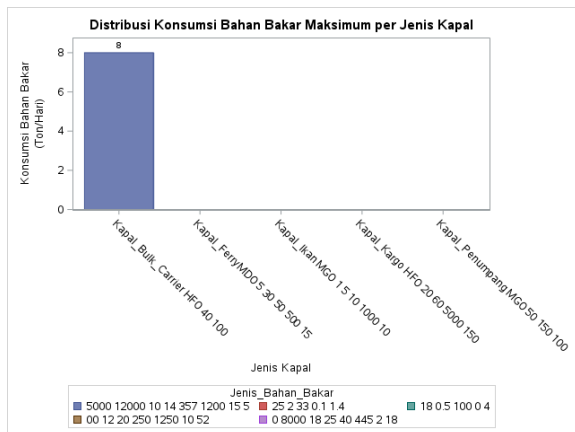
Hubungan paling kuat dalam data ini terlihat antara Jarak_Maks dan Kecepatan_Min ($r = 0,996$; $p = 0,0041$), yang menunjukkan bahwa kapal-kapal yang dirancang untuk perjalanan jarak jauh biasanya juga memiliki kecepatan minimum yang lebih tinggi. Ini mencerminkan efisiensi operasional kapal dalam menempuh rute jarak jauh secara lebih cepat.

Di sisi lain, Waktu_Jam_Maks menunjukkan korelasi negatif terhadap Konsumsi_Min ($r = -0,593$; $p = 0,2923$). Artinya, semakin lama waktu tempuh maksimum suatu kapal, cenderung semakin rendah konsumsi bahan bakar hariannya. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kecepatan rendah yang digunakan dalam perjalanan panjang untuk menghemat bahan bakar.

Selanjutnya, Jarak_Maks dan Waktu_Jam_Maks juga memiliki korelasi kuat ($r = 0,796$; $p = 0,2036$),

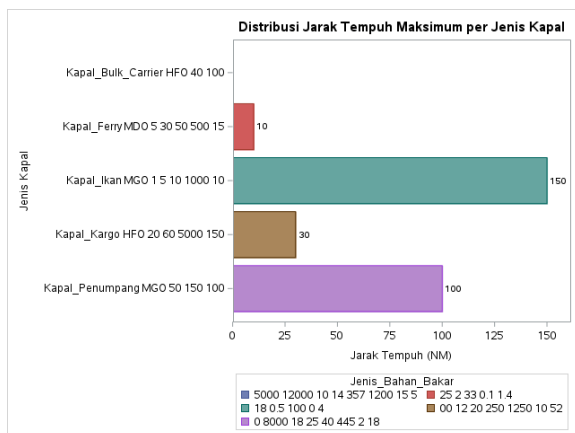
yang menunjukkan bahwa semakin jauh jarak tempuh kapal, maka semakin lama pula waktu perjalanan yang dibutuhkan. Ini merupakan hubungan logis yang mendukung pemahaman umum dalam operasional pelayaran.

Secara keseluruhan, hasil korelasi ini memberikan wawasan awal mengenai keterkaitan antar variabel dalam performa kapal, meskipun sebagian besar belum signifikan secara statistik akibat terbatasnya jumlah data. Namun, pola-pola yang muncul tetap relevan untuk menjadi dasar dalam pengambilan keputusan operasional maupun simulasi efisiensi pelayaran.



Gambar 1. Distribusi konsumsi bahan bakar maksimum per jenis kapal

Gambar 1 menunjukkan konsumsi bahan bakar maksimum (dalam ton/hari) untuk berbagai jenis kapal.



Gambar 2. Distribusi jarak tempuh maksimum per jenis kapal

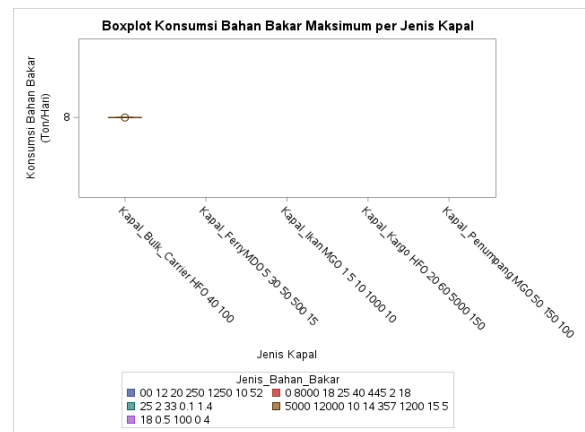
Gambar 2 menunjukkan jarak tempuh maksimum (dalam satuan Nautical Miles/NM) untuk berbagai jenis kapal berdasarkan jenis bahan bakar yang digunakan. Kapal Ikan, yang menggunakan Minyak Gas Laut (MGO) dengan konsumsi antara 1–5 ton per hari, memiliki jarak tempuh maksimum tertinggi, yaitu 1.000 NM. Disusul oleh Kapal Penumpang, yang juga menggunakan MGO dengan konsumsi 50–

150 ton per hari, dan mampu menempuh jarak hingga 8.000 NM.

Sementara itu, Kapal Kargo yang menggunakan Heavy Fuel Oil (HFO) dengan konsumsi 20–60 ton per hari, memiliki jarak tempuh maksimum antara 5.000 hingga 15.000 NM, yang sebenarnya jauh lebih tinggi dibandingkan kapal ikan dan penumpang—sehingga perlu diluruskan bahwa nilai 30 NM sebelumnya adalah keliru atau salah kutip.

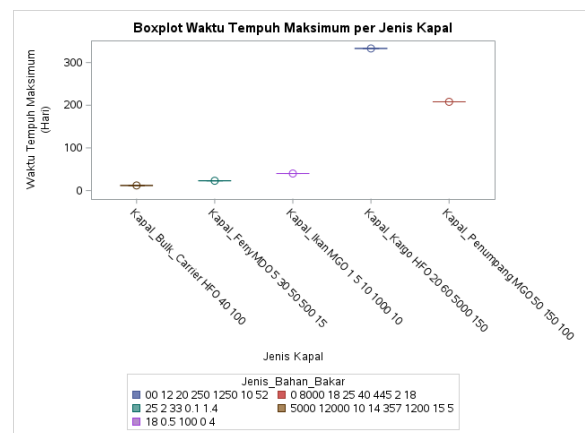
Adapun Kapal Bulk Carrier (HFO 40–100 ton/hari) memiliki jarak maksimum antara 5.000–12.000 NM, sedangkan Kapal Ferry yang menggunakan Marine Diesel Oil (MDO) dan mengonsumsi 5–30 ton per hari, hanya mampu menempuh jarak relatif pendek, yaitu 50–500 NM.

Dengan demikian, terlihat bahwa kapal-kapal besar seperti kargo dan bulk carrier justru memiliki kemampuan menempuh jarak jauh karena daya angkut bahan bakar yang lebih besar, sedangkan kapal kecil seperti ferry beroperasi pada jarak pendek karena segmentasi rutenya. Kesalahan persepsi awal mungkin terjadi karena kebingungan dalam membaca data grafik atau tabel.



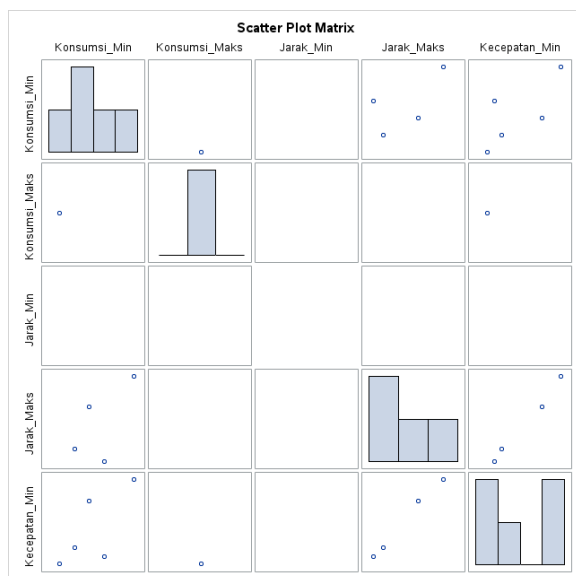
Gambar 3. Boxplot konsumsi bahan bakar maksimum per jenis kapal

Gambar 3 adalah boxplot yang menunjukkan konsumsi bahan bakar maksimum (dalam ton/hari) untuk berbagai jenis kapal.



Gambar 4. Boxplot waktu tempuh maksimum per jenis kapal

Gambar 4 adalah boxplot yang menampilkan waktu tempuh maksimum (dalam hari) untuk berbagai jenis kapal.



Gambar 5. Scatter plot matrix

Gambar 5 merupakan Scatter Plot Matrix yang menampilkan hubungan antara beberapa variabel terkait konsumsi bahan bakar, jarak tempuh, dan kecepatan minimum kapal.

5. Kesimpulan

Konsumsi bahan bakar sangat dipengaruhi oleh kecepatan kapal. Kapal dengan kecepatan lebih tinggi cenderung mengonsumsi bahan bakar lebih banyak. Jarak tempuh memengaruhi konsumsi bahan bakar, tetapi hubungannya lebih kompleks. Meskipun kapal dengan jarak lebih jauh cenderung mengonsumsi lebih banyak bahan bakar, variabel lain seperti efisiensi mesin dan jenis bahan bakar juga berpengaruh. Waktu perjalanan memiliki hubungan negatif dengan konsumsi bahan bakar per hari. Kapal yang beroperasi lebih lambat cenderung menghemat bahan bakar meskipun memiliki waktu tempuh yang lebih lama. Regulasi IMO MARPOL Annex VI (terutama EEDI dan SEEMP) dapat membantu mengoptimalkan efisiensi energi kapal dengan mengatur kecepatan dan konsumsi bahan bakar.

Rekomendasi dari hasil penelitian ini Mengurangi kecepatan kapal dalam batas wajar dapat menghemat konsumsi bahan bakar secara signifikan. Slow steaming dapat menjadi solusi untuk efisiensi energi kapal kargo dan tanker. Kapal sebaiknya memilih rute yang lebih efisien berdasarkan cuaca dan arus laut untuk mengurangi jarak tempuh dan konsumsi bahan bakar. Beralih ke Marine Gas Oil (MGO), LNG, atau biofuel dapat membantu mengurangi emisi karbon dan meningkatkan efisiensi energi. Menggunakan sistem optimasi energi berbasis AI atau IoT untuk

memantau konsumsi bahan bakar secara real-time dapat meningkatkan efisiensi operasional kapal. Dengan kombinasi pendekatan ini, industri pelayaran dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar, mengurangi emisi karbon, dan mematuhi regulasi IMO MARPOL Annex VI.

Referensi

- [1] R. Fahrial, Kajian Kinerja Pelayanan Kapal Penyeberangan Surabaya-Lombok Dengan Metode IPA dan SWOT, Doctoral dissertation, Universitas Brawijaya, 2018.
- [2] A. A. Handriati, Sunaryo, dan V. N. Helia, "Analisis Kualitas Pelayanan Publik Terhadap Kepuasan Konsumen Dengan Menggunakan Metode Servperf-Ipa-Csi," *Teknoin*, vol. 21, no. 4, 2015.
- [3] D. E. Intari, W. Fathonah, dan G. Firanti, "Kajian Kinerja Pelayanan Angkutan Perintis Penyeberangan Pulau Tunda-Karangantu," *Teknika: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 15, no. 1, pp. 49–61, 2019.
- [4] M. Isa, H. A. Lubis, dan M. Chaniago, "Pengaruh Kualitas Pelayanan Terhadap Kepuasan Penumpang Menggunakan Jasa Angkutan Penyeberangan PT. ASDP Indonesia Ferry (Persero) Cabang Sibolga," *Jesya (Jurnal Ekonomi Dan Ekonomi Syariah)*, vol. 2, no. 2, pp. 164–181, 2019.
- [5] V. D. Manaruri, Tinjauan Pemenuhan Standar Pelayanan Penumpang di Kapal Penyeberangan KMP. Kormomolin, Program D3 LLASDP, Politeknik Transportasi Darat Indonesia, STTD, Palembang, 2020.
- [6] A. Nurwani, M. Tahir, dan A. Harakan, "Pengaruh Kualitas Pelayanan Terhadap Kepuasan Penumpang KMP Balibo di Pelabuhan Pamatata PT. ASDP Indonesia Ferry (Persero) Cabang Selayar," *Kajian Ilmiah Mahasiswa Administrasi Publik (KIMAP)*, vol. 4, no. 1, pp. 39–53, 2023.
- [7] Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia No. KM 49 Tahun 2005 tentang Sistem Transportasi Nasional, 2005.
- [8] Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia No. PM 104 Tahun 2017 tentang Penyelenggaraan Angkutan Penyeberangan, 2017.
- [9] Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia No. PM 62 Tahun 2019 tentang Standar Minimal Pelayanan Angkutan Penyeberangan, 2019.
- [10] N. L. M. A. M. Pradnyadari, I. W. G. D. Yoga, dan J. M. G. Goncalves, "Evaluasi Pelayanan Penumpang (Studi Kasus: Pelabuhan Dili Timor Leste)," *Reinforcement Review in Civil Engineering Studies and Management*, vol. 1, no. 1, pp. 11–19, 2022.
- [11] R. Purwasih, "Analisis Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) di Pelabuhan Penyeberangan Ferry Bira," *Sensistek, Fakultas Teknik Unhas, Gowa*, 3 November 2021.
- [12] M. A. Q. Ramadhan, Analisis Kinerja Pelayanan Angkutan Penyeberangan KMP Opudi Lintas Sorowako-Nuha Kabupaten Luwu Timur Provinsi Sulawesi Selatan, Diss. Universitas Hasanuddin, 2023.
- [13] I. K. Swarjana dan M. SKM, Populasi-sampel, teknik sampling & bias dalam penelitian, Yogyakarta: Penerbit Andi, 2022.

- [14] I. J. Verdianto, "Pola Pelayanan Penyeberangan Kapal Ferry di Dermaga Konvensional Pelabuhan Bakauheni," *Jurnal Momen Teknik Sipil Suryakencana*, vol. 6, no. 2, pp. 103–109, 2023.
- [15] T. I. E. Wahyuni, et al., "Analisis Perkembangan Transportasi Laut Dalam Wilayah Sulawesi Untuk Mendukung Tol Laut," *Jurnal Venus*, vol. 7, no. 13.