

Sea toll route optimization with the artificial bee colony algorithm on the capacitated vehicle routing problem

Gunawan^{a1}, Ghaisani Khoirunnisa^a, M. D. Arifin^b

^aDepartemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Depok, 16424

^bDepartemen Teknik Sistem Perkapalan, Universitas Darma Persada, Jakarta, 13450

¹Email korespondensi: gunawan_kapal@eng.ui.ac.id

Abstract. Maritime transportation plays a crucial role in inter-island logistics in Indonesia, including through the Sea Toll Road program. Despite its economic benefits, the shipping sector also contributes to environmental pollution through high levels of fossil fuel consumption and the associated emissions of pollutants. Implementing a carbon tax is one way to reduce fuel consumption by increasing the burden on ship operating costs. As the Sea Toll route expands each year, this study was conducted to evaluate and optimize shipping routes to improve technical efficiency and environmental performance. The research focused on 7 Sea Toll routes departing from Tanjung Perak Port, Surabaya, and solved the Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) using the Artificial Bee Colony (ABC) algorithm, an optimization algorithm inspired by honeybee foraging behavior. The results showed a decrease in total distance traveled from 16,708 NM to 13,816 NM, an increase in average load capacity from 67.86% to 95%, and a 17.3% decrease in carbon tax costs. The research results prove that the ABC algorithm is effective in designing optimal shipping routes in terms of route efficiency, load distribution, operational costs, and environmental sustainability.

Keywords: artificial bee colony algorithm, capacitated vehicle routing problem, carbon emissions, route optimization

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/k9tb3v79>

PENDAHULUAN

Sebagai negara kepulauan terbesar di dunia, Indonesia memiliki wilayah laut seluas 5,8 juta km², mencakup sekitar 70% dari total luas wilayah nasional [1]. Hal ini diperkuat oleh pengakuan dalam Undang-Undang Dasar (UUD) 1945 yang menetapkan Indonesia sebagai negara kepulauan, dengan jumlah pulau mencapai 17.480 dan panjang garis pantai mencapai 95.181 km. Kondisi geografis ini menjadikan transportasi laut sangat penting untuk konektivitas antarpulau. Kapal, khususnya, menawarkan keunggulan strategis karena kapasitas muatnya yang besar dan efisiensi biaya untuk jarak jauh [2]. Namun, sektor pelayaran juga menghadirkan tantangan lingkungan, terutama akibat tingginya konsumsi bahan bakar fosil dan emisi polutan udara [3]. Untuk mengatasi hal ini, penerapan pajak karbon atas penggunaan bahan bakar dipandang sebagai langkah efektif untuk mengurangi emisi melalui peningkatan biaya operasional dan mendorong efisiensi bahan bakar [4].

Indonesia telah mengambil langkah konkret dalam mengatur emisi karbon melalui Undang-Undang No. 7 Tahun 2021 tentang Harmonisasi Peraturan Perpajakan (UUHPP), yang memperkenalkan skema harga karbon, termasuk di dalamnya pajak karbon dengan tarif awal sebesar IDR 30.00 per kilogram emisi karbon. Mulai 1 April 2022, pajak ini pertama kali diterapkan pada sektor pembangkit listrik tenaga batu bara, dan direncanakan akan diperluas ke sektor-sektor lain mulai tahun 2025 [5].

Rencana penerapan pajak karbon secara lebih luas pada tahun 2025 menambah urgensi untuk mengoptimalkan rute pelayaran Tol Laut di Indonesia. Setiap tahun, rute Tol Laut di Indonesia terus dikembangkan untuk memaksimalkan distribusi logistik dan perdagangan antarpulau, yang vital bagi perekonomian nasional [6].

Dalam upaya mendukung tujuan tersebut, penelitian ini dilakukan dengan mengevaluasi dan mengoptimalkan trayek pelayaran. Fokus penelitian diarahkan pada pemilihan rute baru dari 7 trayek Tol Laut yang berangkat dari Pelabuhan Tanjung Perak, Surabaya, yang merupakan pelabuhan utama untuk jalur distribusi menuju wilayah timur Indonesia. Ketujuh trayek ini merupakan jalur yang mencakup 15 pelabuhan di wilayah timur Indonesia yang konsisten aktif dalam distribusi program Tol Laut selama 5 tahun terakhir.

Travelling Salesman Problem (TSP) merupakan salah satu masalah optimasi kombinatorial paling fundamental dalam ilmu komputer. Masalah ini berfokus pada pencarian rute optimal bagi seorang salesman yang harus mengunjungi sejumlah n lokasi (kota) tepat satu kali dan kembali ke titik awal, dengan tujuan meminimalkan total jarak tempuh atau biaya perjalanan [7] (Lau, 1986). Meskipun masalahnya terlihat sederhana, TSP termasuk dalam kategori masalah non-deterministic polynomial-time hard (NP-Hard), yang berarti tidak ada algoritma deterministik yang dapat menyelesaikannya secara efisien dalam waktu polynomial [8] (Leeuwen, 1994).

Salah satu penerapan dari Travelling Salesman Problem (TSP) adalah model dasar untuk pengembangan Vehicle Routing Problem (VRP). TSP memberikan fondasi teoretis dalam memahami strategi perutean yang efisien, karena prinsip dasarnya berlaku dalam perencanaan rute distribusi logistik [9] (Agárdi et al., 2022). Di antara berbagai varian VRP, penelitian ini mengadopsi pendekatan Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP), yang fokus pada pencarian rute optimal untuk armada dengan kapasitas terbatas [10] (Pisinger & Ropke, 2007). Dalam konteks program Tol Laut, penerapan CVRP bertujuan memastikan seluruh pelabuhan dapat dilayani secara efisien, sekaligus meminimalkan pemborosan kapasitas kapal. Untuk menyelesaikan permasalahan CVRP ini, digunakan algoritma Artificial Bee Colony (ABC), yaitu algoritma optimasi yang terinspirasi dari perilaku pencarian makan lebah madu [11] (Karaboga & Basturk, 2007).

METODOLOGI

Penelitian ini berfokus pada evaluasi tujuh trayek pelayaran yang berangkat dari Pelabuhan Tanjung

Perak, yaitu T-5, T-9, T-10, T-11, T-12, T-14, dan T-26. Trayek ini mencakup 15 pelabuhan yang tersebar di wilayah timur Indonesia. Proses pengumpulan data ini bertujuan untuk mendapatkan nilai dari berbagai variabel yang dibutuhkan untuk membangun model permasalahan dalam bentuk matematis.

Data tersebut diperoleh melalui studi literatur, laporan tahunan dari Kementerian Perhubungan - Direktorat Jenderal Perhubungan Laut, Direktorat Lalu Lintas dan Angkutan Laut, serta website milik Kementerian Perdagangan RI, yaitu gerairmaritim, serta surat Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Laut Nomor: KP-DJPL 639 Tahun 2023. Data yang dikumpulkan adalah jarak antar pelabuhan, kebutuhan muatan setiap daerah pelabuhan, dan spesifikasi kapal kontainer.

Data jarak pelabuhan tol laut diperoleh dari sumber resmi, yaitu situs web gerairmaritim milik Kementerian Perdagangan Republik Indonesia, sesuai dengan regulasi yang tertuang dalam Surat Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Laut Nomor KP-DJPL 639 Tahun 2023.

Tabel 1. Data Lokasi Pelabuhan

No	Pelabuhan	Latitude	Longitude
0	Tanjung Perak	-7.222.683	112.737.286
1	Wasior	-2.727.270	134.504.036
2	Nabire	-3.230.891	135.581.504
3	Serui	-1.887.151	136.244.146
4	Maba	9.368.500	128.301.779
5	Namrole	-3.849.588	126.734.089
6	Saumlaki	-7.982.329	131.291.118
7	Dobo	-5.755.398	134.215.950
8	Badas	-8.463.154	117.371.816
9	Bima	-8.447.231	118.714.612
10	Namlea	-3.269.323	127.083.580
11	Fakfak	-2.931.853	132.310.593
12	Kaimana	-3.664.396	133.759.702
13	Galela	1.817.377	127.852.073
14	Morotai	2.049.715	128.289.205
15	Wanci	-5.324.382	123.531.441

Tabel 2. Trayek T-5, T-9, T-10, T-11, T-12, T-14, dan T-26 Tol Laut 2024

Trayek	Jaringan Trayek	Jarak (NM)
T-5	Tanjung Perak- 1540 - Wasior- 126 - Nabire - 95 - Serui - 1878 - Tanjung Perak	3639
T-9	Tanjung Perak -437- Makassar -853-Maba -144- Galela -72- Morotai -1327- Tanjung Perak	2833
T-10	Tanjung Perak- 710 - Wanci- 216 - Namrole -895- Tanjung Perak	1821
T-11	Tanjung Perak- 1133 - Saumlaki- 231 - Dobo - 1313 - Tanjung Perak	2677
T-12	Tanjung Perak - 334 - Badas - 118 - Bima- 415 - Tanjung Perak	867
T-14	Tanjung Perak - 992 - Namlea - 992 - Tanjung Perak	1984
T-26	Tanjung Perak - 1264 - Fakfak - 180 - Kaimana - 130 - Dobo - 1313 - Tanjung Perak	2887
Total Jarak Awal		16708

Jarak antar pelabuhan dihitung dari data yang telah dikumpulkan, kemudian diolah menjadi matriks menggunakan pendekatan Travelling Salesman Problem (TSP) melalui persamaan berikut:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Di mana S_{ij} merupakan jarak antar pelabuhan i dan pelabuhan j dalam satuan nautical miles, yang diperoleh berdasarkan hasil pengukuran jarak antar pelabuhan pada setiap rute Tol Laut.

Data kebutuhan barang juga diperoleh dari situs web gerairmaritim milik Kementerian Perdagangan Republik Indonesia, yang menyajikan data kebutuhan per bulan. Data yang digunakan sebagai acuan adalah data dari tahun 2023, yang kemudian dirata-ratakan untuk mendapatkan kebutuhan per daerah selama satu bulan. Kebutuhan ini kemudian ditotalkan dalam

satuan kilogram dan dikonversi ke satuan TEU (Twenty-foot Equivalent Unit). Dalam perhitungan ini, kapasitas satu TEU diasumsikan dapat menampung 28.000 kg muatan. Berdasarkan data dari laporan Pengembangan E-Book Data dan Penyajian Informasi Angkutan Laut: Data dan Informasi Angkutan Laut 2020 yang diterbitkan oleh Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, terdapat target frekuensi kunjungan kapal per tahun. Perhitungan dilakukan sebagai berikut:

$$\sum K = \frac{K \times 12}{F} \quad (2)$$

Di mana $\sum K$ merupakan kebutuhan muatan per kunjungan, K adalah rata-rata kebutuhan muatan per bulan, dan F adalah rekuensi kunjungan kapal per tahun. Sehingga didapatkan hasil perhitungan demand di muatan untuk setiap daerah.

Berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 106 Tahun 2015 tentang Penyelenggaraan Kewajiban Pelayanan Publik untuk Angkutan Barang Dalam Rangka Pelaksanaan Tol Laut, Kementerian Perhubungan melalui Direktur Jenderal Perhubungan Laut merencanakan pembangunan 15 kapal semi-kontainer dengan kapasitas 100 TEU. Kapal ini dirancang agar sesuai dengan kondisi perairan Indonesia, dengan ukuran utama yang ideal untuk pelayaran di laut dalam serta tingkat keamanan barang yang terjamin karena

menggunakan sistem peti kemas. Salah satu kapal yang dibangun dalam program ini adalah KM. Kendhaga Nusantara 4 dengan kapasitas 1.789 GT.

Algoritma Artificial Bee Colony (ABC) adalah metode optimasi population-based metaheuristic yang terinspirasi oleh perilaku pencarian makan lebah madu [11] (Karaboga & Basturk, 2007). Dikembangkan oleh Derviş Karaboga pada tahun 2005, algoritma ini bekerja seperti koloni lebah yang berkolaborasi untuk mencari sumber makanan [11] (Karaboga, 2005). Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) memodelkan setiap solusi sebagai sumber makanan, yang merepresentasikan kumpulan rute kapal atau kendaraan. Untuk perhitungan konsumsi bahan bakar dalam satu pelayaran berdasarkan Peraturan Menteri

Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 22 Tahun 2018. Besaran tarif awal pajak karbon ditetapkan IDR 30,00 per kilogram emisi CO₂ yang dihasilkan berdasarkan Undang-Undang Harmonisasi Peraturan Perpajakan (UU HPP) Tahun 2021.

$$E = FCl_{total} \times EF \quad (3)$$

dimana E merupakan emisi karbon dalam kilogram CO₂, FCl_{total} adalah volume bahan bakar dalam satu pelayaran dalam liter, EF adalah faktor emisi bahan bakar sebesar 3.206 kg CO₂ per liter, dan IDR 30 adalah tarif pajak karbon per kilogram CO₂.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter test

Hasil pengujian terbaik diperoleh dengan jarak rute terpendek sebesar 15.007 NM. Berdasarkan kombinasi

Perhitungan emisi karbon dari konsumsi bahan bakar kapal mengacu pada faktor emisi dari IPCC 1996, di mana faktor emisi untuk HSD sebesar 3,206 kg CO₂/liter. Maka, total emisi karbon dari bahan bakar dapat dihitung dengan rumus:

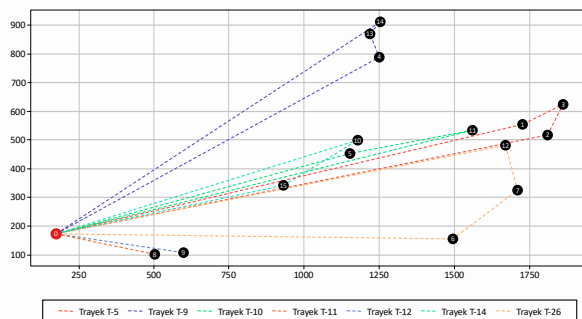
parameter yang diuji, dapat disimpulkan bahwa algoritma ABC menghasilkan solusi terbaik dengan jarak rute terpendek sebesar 15.007 NM. Konfigurasi optimal yang menghasilkan solusi tersebut adalah jumlah sumber makanan sejumlah 80, jumlah onlooker bees sejumlah 5, limit sebanyak 30, dan iterasi maksimum sebesar 600.

Rute terpendek

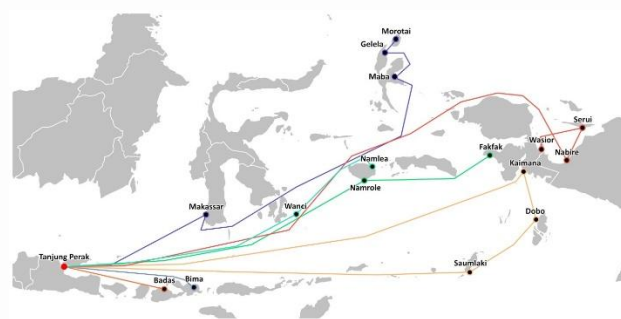
Adapun pemilihan rute terpendek yang diperoleh adalah sebagai berikut.

Tabel 3. Pemilihan Rute Terpendek

Trayek Baru	Pemilihan Rute	Jarak (NM)
T-5	Tanjung Perak - 1607 - Nabire - 95 - Serui - 136 - Wasior - 1540 - Tanjung Perak	3378
T-9	Tanjung Perak -437- Makassar -853-Maba -144- Galela -72- Morotai -1327- Tanjung Perak	2833
T-10	Tanjung Perak - 895 - Namrole - 356 - Fakfak - 1264 - Tanjung Perak	2515
T-11	Tanjung Perak - 334 - Badas - 334 - Tanjung Perak	668
T-12	Tanjung Perak - 415 - Bima - 415 - Tanjung Perak	830
T-14	Tanjung Perak- 710 - Wanci- 298 - Namlea -992- Tanjung Perak	2000
T-26	Tanjung Perak - 1133 - Saumlaki - 231 - Dobo - 130 - Kaimana - 1289 - Tanjung Perak	2783
Total Jarak Terpendek		15007



(a)



(b)

Gambar 1. Visualisasi Rute Terpendek: (a) Grafik; and (b) Ilustrasi

Hasil optimasi menunjukkan pengurangan total jarak sebesar 1701 NM dari total jarak awal sebelum optimasi. Namun, di sisi lain, terdapat beberapa trayek yang dinilai kurang optimal jika dilihat dari aspek

distribusi muatannya. Ketidakseimbangan distribusi ini berpotensi mengurangi efisiensi operasional secara keseluruhan meskipun terjadi penghematan jarak.

Tabel 4. Distribusi Muatan Rute Terpendek

Trayek Baru	Distribusi Muatan
T-5	95
T-9	84
T-10	96
T-11	14
T-12	4
T-14	81
T-26	100

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa distribusi muatan pada beberapa trayek masih kurang merata, terutama pada T-11 dan T-12, yang memiliki tingkat distribusi sangat rendah dibandingkan dengan trayek lainnya. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi lebih lanjut terkait kemungkinan penggabungan atau pengurangan jumlah trayek dan kapal untuk meningkatkan efisiensi operasional.

Pengurangan trayek

Untuk mengevaluasi efisiensi jumlah rute atau trayek, dilakukan percobaan dengan menguji parameter jumlah rute (n) yang dikurangi secara bertahap. Percobaan ini dilakukan hingga jumlah trayek mencapai $n = 5$, karena berdasarkan kapasitas maksimum masing-masing kapal, jumlah trayek tidak dapat dikurangi lebih dari itu tanpa menyebabkan kelebihan kapasitas (overcapacity).

Tabel 5. Perbandingan Pengurangan Trayek

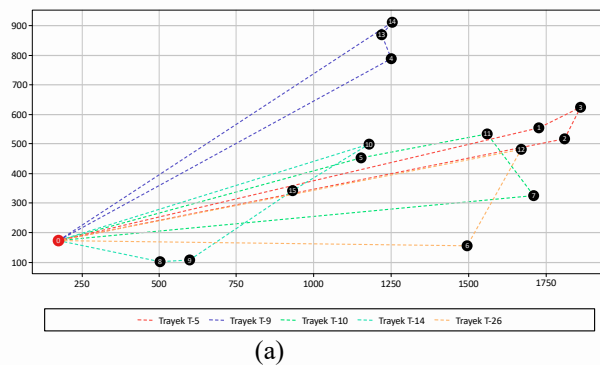
Trayek	Pemilihan Rute
$n = 7$ (Initial)	
T-5	Tanjung Perak - Nabire - Serui - Wasior - Tanjung Perak
T-9	Tanjung Perak - Makassar - Maba - Galela - Morotai - Tanjung Perak
T-10	Tanjung Perak - Namrole - Fakfak - Tanjung Perak
T-11	Tanjung Perak - Badas - Tanjung Perak
T-12	Tanjung Perak - Bima - Tanjung Perak
T-14	Tanjung Perak - Wanci - Namlea - Tanjung Perak
T-26	Tanjung Perak - Saumlaki - Dobo - Kaimana - Tanjung Perak
Total Jarak	15007
$n = 6$	
T-5	Tanjung Perak - Nabire - Serui - Wasior - Tanjung Perak
T-9	Tanjung Perak - Makassar - Maba - Galela - Morotai - Tanjung Perak
T-10	Tanjung Perak - Bima - Fakfak - Namrole - Tanjung Perak
T-11	Tanjung Perak - Badas - Tanjung Perak
T-14	Tanjung Perak - Wanci - Namlea - Tanjung Perak
T-26	Tanjung Perak - Saumlaki - Dobo - Kaimana - Tanjung Perak
Total Jarak	14231
$n = 5$	
T-5	Tanjung Perak - Nabire - Serui - Wasior - Tanjung Perak
T-9	Tanjung Perak - Makassar - Maba - Galela - Morotai - Tanjung Perak
T-10	Tanjung Perak - Namrole - Fakfak - Dobo - Tanjung Perak

T-14	Tanjung Perak - Namlea - Wanci - Bima - Badas - Tanjung Perak
T-26	Tanjung Perak - Kaimana - Saumlaki - Tanjung Perak
Total Jarak	13816

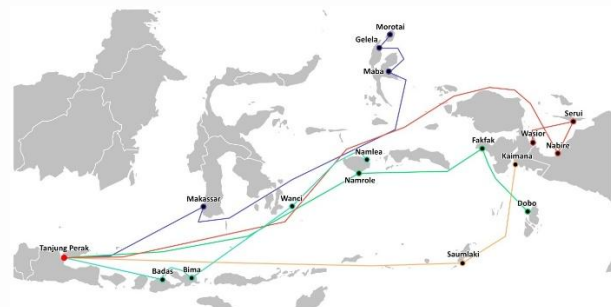
Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa pengurangan jumlah trayek hingga $n = 5$ memberikan efisiensi terbaik dengan penurunan jarak tempuh dan tetap memenuhi batasan kapasitas operasional.

Tabel 6. Pemilihan Efisiensi Jumlah Trayek

Trayek	Pemilihan Rute	Jarak (NM)
T-5	Tanjung Perak - 1607 - Nabire - 95 - Serui - 136 - Wasior - 1540 - Tanjung Perak	3378
T-9	Tanjung Perak - 437 - Makassar - 853 - Maba - 144 - Galela - 72 - Morotai - 1327 - Tanjung Perak	2833
T-10	Tanjung Perak - 895 - Namrole - 356 - Fakfak - 205 - Dobo - 1313 - Tanjung Perak	2769
T-14	Tanjung Perak - 992 - Namlea - 298 - Wanci - 362 - Bima - 118 - Badas - 334 - Tanjung Perak	2104
T-26	Tanjung Perak - 1289 - Kaimana - 310 - Saumlaki - 1133 - Tanjung Perak	2732
Total Jarak Terpendek		13816



(a)



(b)

Gambar 2 Visualisasi Efisiensi Jumlah Trayek: (a) Grafik; and (b) Ilustrasi

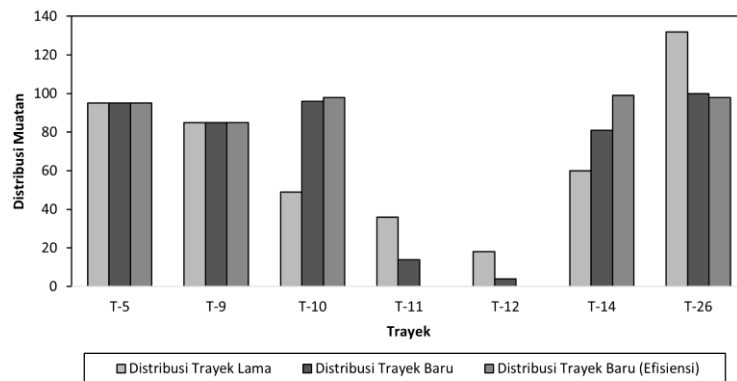
Dari pengujian tersebut, algoritma berhasil menemukan solusi terbaik dengan total jarak tempuh terpendek sebesar 13.816 NM. Hasil optimasi dengan pengurangan jumlah trayek menunjukkan peningkatan efisiensi yang cukup signifikan, yakni total jarak

tempuh berhasil dikurangi sebesar 2.892 NM dari total jarak awal sebelum optimasi. Angka ini menunjukkan peningkatan efisiensi yang lebih besar dibandingkan dengan optimasi sebelumnya yang hanya menghasilkan pengurangan sebesar 1.701 NM.

Tabel 7. Perbandingan Jarak Rute Efisiensi Jumlah Trayek

Trayek	Jarak Rute Awal (NM)	Jarak Rute Terpendek (NM)	Jarak Efisiensi Jumlah Trayek (NM)
T-5	3639	3378	3378
T-9	2833	2833	2833
T-10	1821	2515	2769
T-11	2677	668	-
T-12	867	830	-
T-14	1984	2000	2104

T-26	2887	2783	2732
Total Jarak	16708	15007	13816



Gambar 3 Grafik Perbandingan Distribusi Muatan per Trayek

Meskipun terjadi penambahan jarak pada beberapa trayek, perubahan ini dinilai lebih efisien dari sisi jumlah rute dan pengurangan jarak total trayek secara keseluruhan. Efisiensi tersebut tidak hanya mengurangi kebutuhan jumlah armada, tetapi juga mengurangi distribusi muatan yang lebih seimbang untuk setiap trayeknya.

Distribusi muatan pada konfigurasi efisiensi jumlah trayek menunjukkan pola yang jauh lebih merata dibandingkan dengan konfigurasi awal. Sebelumnya, tingkat keterisian muatan rata-rata per trayek hanya sebesar 67,86%, dengan beberapa trayek memiliki tingkat keterisian yang cukup rendah di bawah rata-rata. Namun, setelah dilakukan optimasi efisiensi, rata-rata keterisian muatan meningkat secara signifikan menjadi 95%, menunjukkan penyebaran muatan yang lebih merata di masing-masing trayek.

Biaya operasional

Dengan memanfaatkan algoritma optimasi, pemilihan rute terpendek dan pengurangan jumlah trayek terbukti efektif dalam mengurangi jarak tempuh kapal. Rute awal memiliki total jarak tempuh sebesar 16.708 NM, yang kemudian berkurang menjadi 15.007 NM saat diterapkan rute terpendek, dan semakin efisien menjadi 13.816 NM setelah jumlah trayek juga dioptimalkan. Pengurangan jarak ini secara langsung berdampak pada berkurangnya waktu pelayaran dan konsumsi bahan bakar. Karena emisi karbon (CO₂) berbanding lurus dengan konsumsi bahan bakar, pengurangan jarak tempuh secara otomatis juga mengurangi emisi yang dihasilkan.

Tabel 8. Hasil Optimasi

	Jarak Rute Awal	Jarak Rute Terpendek	Jarak Efisiensi Jumlah Trayek
Biaya Operasional (IDR)	5.918.135.883,25	5.315.625.161,60	4.893.761.393,52
Jarak (NM)	16708	15007	13816
Waktu Pelayaran (jam)	1392,333	1250,583	1151,333
Konsumsi Bahan Bakar (ton)	870,3141	781,7096	719,6708

Secara keseluruhan, biaya pajak karbon tanpa optimasi berada pada angka Rp 83.706.810,00. Setelah diterapkan rute terpendek, biaya tersebut turun menjadi Rp 75.184.827,00. Dalam hal ini terjadi pengurangan sebesar 10,21%. Selanjutnya, dengan optimasi jumlah trayek, biaya kembali turun menjadi Rp 69.217.936,00 sehingga menghasilkan total penghematan sekitar 17,34% dibandingkan dengan kondisi awal.

KESIMPULAN

Studi ini menunjukkan efektivitas algoritma Artificial Bee Colony (ABC) pada Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) dalam mengoptimalkan logistik maritim, khususnya dalam meminimalkan total jarak pelayaran dan memperbaiki distribusi muatan dalam program Tol Laut. Dengan menerapkan optimasi rute dan pengurangan jumlah trayek pelayaran, trayek mengalami pengurangan total jarak tempuh yang signifikan. Konsumsi bahan bakar serta ekuivalen

besarnya pajak karbon hasil emisi juga mengalami penurunan sebesar 17,34%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bappenas. (2010). *Indonesia Climate Change Sectoral Roadmap ICCSR—Marine and Fishery Sector Report*. Bappenas, Jakarta.
- [2] Ghiani, G., Laporte, G., & Musmanno, R. (2004). *Introduction to logistics systems planning and control*. John Wiley & Sons, Ltd.
- [3] Kesgin, U., & Vardar, N. (2001). A study on exhaust gas emissions from ships in Turkish Straits. *Atmospheric Environment*, 35(10), 1863–1870. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(00\)00487-8](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(00)00487-8)
- [4] Yu, Y., Tu, J., Shi, K., Liu, M., & Chen, J. (2021). Flexible optimization of international shipping routes considering carbon emission cost. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2021/6678473>
- [5] Hermiliani, O., Ambarwati, Suwandi, W. A., & Ananda, L. D. (2023). The implementation of carbon tax in Indonesia: Regulations, challenges, and its impacts. *Jurnal RAK (Riset Akuntansi Keuangan)*, 8(2), 180–193. <https://doi.org/10.31002/rak.v8i2.1142>
- [6] Pambudi, M. A. L., & Handayani, T. (2023). Application of Sea Toll as a Means to Maintain the Availability of Goods in the 3T Area (Lagging, Frontier and Outermost). *Maritime Park: Journal of Maritime Technology and Society*, 2(2), 37–45. <https://doi.org/10.62012/mp.v2i2.26360>
- [7] Lau, H. T. (1986). Traveling Salesman Problem. In *Combinatorial Heuristic Algorithms with FORTRAN. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol 280. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61649-5_4
- [8] Van Leeuwen, J. (1998). *Handbook of theoretical computer science, Vol. A: Algorithms and complexity*. Elsevier.
- [9] Agárdi, A., Kovács, L., & Bányai, T. (2022). Mathematical model for the generalized VRP model. *Sustainability*, 14(18), 11639. <https://doi.org/10.3390/su141811639>
- [10] Pisinger, D., & Ropke, S. (2007). A general heuristic for vehicle routing problems. *Computers and Operations Research*, 34(8), 2403–2435. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.09.012>
- [11] Karaboga, D., & Basturk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, 39(3), 459–471. <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x>