

**EFISIENSI ENERGI GUNA MENGURANGI KONSUMSI BAHAN BAKAR
AKIBAT BIOFOULING PADA MT. KAKAP**

Mutmainna¹, Sukirno², Ismail³, Faisal Saransi⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Nautika, Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar,
innamutma22@gmail.com

ABSTRACT

Ship fuel consumption is influenced by hydrodynamic resistance, especially frictional resistance on the surface of the hull submerged in air. Biofouling attached to the ship's hull can increase the roughness of the ship's surface, increase resistance, and encourage increased fuel oil consumption (FOC). This study aims to analyze the effect of biofouling cleaning through docking on the fuel consumption of MT. Kakap and measure the magnitude of the decrease in FOC after hull cleaning. The study used a comparative quantitative approach with a case study design on one ship. The research data consisted of 30 pairs of daily FOC data, namely data before docking when the hull was coated with biofouling and data after docking after the hull was cleaned and re-coated with antifouling paint. Data analysis was carried out using descriptive statistics, the Shapiro-Wilk normality test, paired sample t-test, and simple linear regression. The results showed that the average FOC decreased from 10,144 tons/day to 7,883 tons/day after biofouling cleaning, with a decrease of 2,261 tons/day or 22.29%. The t-test results showed a significant difference between FOC before and after docking, while the regression results showed a relationship between ship hull condition and fuel consumption. These findings indicate that biofouling removal through docking contributes to increased operational energy efficiency, although fuel consumption remains influenced by other factors such as speed, draft, cargo condition, weather, and engine performance. This study recommends regular monitoring of hull conditions, evaluation of the effectiveness of cat antifouling, and control of ship operational variables to achieve more optimal fuel efficiency.

Key words: *Energy efficiency, biofouling, docking, frictional resistance, fuel consumption.*

ABSTRAK

Konsumsi bahan bakar kapal dipengaruhi oleh hambatan hidrodinamis, terutama hambatan gesek pada permukaan lambung yang terendam air. *Biofouling* yang menempel pada lambung kapal dapat meningkatkan kekasaran permukaan, memperbesar tahanan kapal, dan mendorong peningkatan fuel oil consumption (FOC). Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh pembersihan *biofouling* melalui *docking* terhadap konsumsi bahan bakar MT. Kakap serta mengukur besarnya penurunan FOC setelah pembersihan lambung. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif komparatif dengan desain studi kasus pada satu kapal. Data penelitian terdiri atas 30 pasang data harian FOC, yaitu data sebelum *docking* saat lambung terlapisi *biofouling* dan data sesudah *docking* setelah lambung dibersihkan serta dilapisi kembali dengan cat antifouling. Analisis data dilakukan melalui statistik deskriptif, uji normalitas Shapiro-Wilk, uji-t sampel berpasangan, dan regresi linear sederhana. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata FOC menurun dari 10,144 ton/hari menjadi 7,883 ton/hari setelah pembersihan *biofouling*, dengan penurunan sebesar 2,261 ton/hari atau 22,29%. Hasil uji-t menunjukkan perbedaan yang signifikan antara FOC sebelum dan sesudah *docking*, sedangkan hasil regresi menunjukkan hubungan sedang antara kondisi lambung kapal dan konsumsi bahan bakar. Temuan ini menunjukkan bahwa pembersihan *biofouling* melalui *docking* berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi energi operasional kapal, meskipun konsumsi bahan bakar tetap dipengaruhi oleh faktor lain seperti kecepatan, draft, kondisi muatan, cuaca, dan performa mesin. Penelitian ini merekomendasikan pemantauan kondisi lambung secara berkala, evaluasi efektivitas cat antifouling, dan pengendalian variabel operasional kapal untuk memperoleh efisiensi bahan bakar yang lebih optimal.

Kata kunci: Efisiensi energi, *biofouling*, *docking*, hambatan gesek, konsumsi bahan bakar.

A. Pendahuluan

Transportasi laut memegang peran sentral dalam rantai pasok global karena mampu mengangkut muatan dalam volume besar dengan biaya yang relatif efisien. Sekitar 75–90% volume perdagangan dunia diangkut melalui laut, dan sekitar 50–60% dari sisi nilai perdagangan bergantung

pada moda maritim (Koray, M., et al., 2025). Di sisi lain, sektor pelayaran juga menghadapi tekanan untuk menekan konsumsi bahan bakar dan emisi, sebab biaya energi merupakan salah satu komponen dominan dalam operasi kapal. Dalam konteks ini, efisiensi energi menjadi isu teknis sekaligus ekonomis yang sangat

penting bagi perusahaan pelayaran (Yan, R., et al., 2021).

Konsumsi bahan bakar kapal dipengaruhi oleh tahanan yang harus diatasi oleh sistem propulsi. Salah satu komponen tahanan yang paling besar ialah hambatan gesek pada permukaan lambung yang terendam air (Kumar, S., et al., 2020). Ketika lambung kapal mengalami *biofouling*, yaitu penempelan organisme laut seperti teritip, alga, dan mikroorganisme lainnya (Cao, Z., et al., 2023). Permukaan lambung menjadi lebih kasar sehingga aliran air terganggu dan tahanan hidrodinamis meningkat (Song, S., et al., 2019). Kekasaran lambung membuat tahanan naik, sehingga power dan konsumsi BBM meningkat 10–20% dalam 10 tahun operasi, dan bisa sampai ~24% bila kekasaran propeler juga diperhitungkan (Tadros, M., et al., 2023). Akibatnya, mesin memerlukan daya lebih besar untuk mempertahankan kecepatan operasi yang sama, sehingga konsumsi bahan bakar ikut meningkat. Studi kasus pada MT. Kakap ditemukan adanya perbedaan konsumsi bahan bakar antara kondisi sebelum dan sesudah *docking*. Sebelum *docking*, lambung kapal dipenuhi *biofouling* sehingga

konsumsi bahan bakar mencapai 520 liter per jam. Setelah dilakukan pembersihan lambung saat *docking*, konsumsi bahan bakar menurun menjadi sekitar 450 liter per jam. Namun, perbedaan kondisi operasional seperti muatan kapal tetap perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi konsumsi bahan bakar.

Pembersihan lambung saat *docking* merupakan intervensi yang lazim dilakukan untuk mengatasi *biofouling* yang pada akhirnya menurunkan *fuel oil consumption* (FOC) hingga $\pm 17\%$ untuk *dry-docking hull cleaning*, dan sekitar 9% untuk *underwater hull cleaning* (Dinariyana, A., et al., 2022). Oleh karena itu, pembersihan lambung saat *docking* merupakan salah satu intervensi operasional yang paling efektif dan efisien dalam upaya menurunkan konsumsi bahan bakar. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa *biofouling* dan peningkatan kekasaran lambung berkontribusi terhadap kenaikan hambatan hidrodinamis, penurunan performa propulsi, serta peningkatan konsumsi bahan bakar kapal (Amiruddin et al., 2024). Namun, sebagian besar penelitian masih membahas hubungan tersebut melalui

pendekatan umum, simulasi, atau pemodelan, sedangkan kajian yang menggunakan data operasional aktual satu kapal sebelum dan sesudah *docking* masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki celah kajian pada pengukuran empiris penurunan konsumsi bahan bakar berdasarkan kondisi nyata operasional kapal. Berbeda dari penelitian sebelumnya, studi ini menggunakan 30 pasang data harian *fuel oil consumption* MT. Kakap pada kondisi sebelum *docking* ketika lambung terlapisi *biofouling* dan sesudah *docking* ketika lambung telah dibersihkan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menjelaskan hubungan teoritis antara *biofouling* dan konsumsi bahan bakar, tetapi juga menguji besarnya penurunan konsumsi bahan bakar secara statistik.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis besarnya penurunan konsumsi bahan bakar pada MT. Kakap setelah pembersihan *biofouling* pada lambung kapal serta menguji signifikansi perbedaannya secara statistic.

B. Metode Penelitian

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif komparatif dengan desain studi kasus. Objek penelitian adalah MT. Kakap, salah satu kapal tanker yang dikelola PT Pertamina International Shipping. Penelitian membandingkan dua kondisi operasional kapal, yaitu sebelum *docking* ketika lambung terlapisi *biofouling* dan sesudah *docking* ketika lambung telah dibersihkan secara menyeluruh.

Teknik Pengambilan Sampel

Teknik pengambilan sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah total *sampling*, yang berarti seluruh elemen dalam populasi digunakan sebagai sampel, mengingat jumlah populasi yang terbatas. Sampel dalam penelitian terdiri atas 30 pasang data harian *fuel oil consumption* (FOC) MT. Kakap, yang mencakup data sebelum *docking* saat lambung kapal terlapisi *biofouling* dan data sesudah *docking* setelah kapal dibersihkan. Data tersebut digunakan untuk membandingkan perubahan konsumsi bahan bakar pada dua kondisi operasional yang berbeda. Pengumpulan data data

dilakukan dengan studi dokumentasi terhadap catatan operasional kapal dan dokumen *docking* yang memverifikasi waktu dan kondisi pembersihan lampung

Teknik Analisis Data

Analisis data yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan statistik deskriptif dan statistic inferensial. Statistik deskriptif dilakukan dengan menghitung rata-rata FOC, selisih rata-rata FOC, dan persentase penurunan konsumsi bahan bakar. Analisis deskriptif bertujuan memberikan gambaran umum mengenai karakteristik data penelitian sebelum dilakukan pengujian hipotesis (Sugiyono, 2022). Rata-rata FOC dihitung dengan rumus berikut.

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \dots\dots(1)$$

Keterangan: $\bar{x}$ adalah rata-rata FOC, $\sum x$ adalah jumlah seluruh nilai FOC, dan n adalah jumlah data. Persentase penurunan FOC setelah *docking* dihitung dengan rumus:

$$\left(\frac{FOC_{sebelum} - FOC_{sesudah}}{FOC_{sebelum}} \times 100\% \right) \dots\dots(2)$$

Selanjutnya, statistik inferensial digunakan untuk menguji signifikansi perbedaan rata-rata FOC

sebelum dan sesudah *docking*. Sebelum uji hipotesis dilakukan, data selisih FOC diuji normalitasnya menggunakan uji Shapiro-Wilk karena uji ini sesuai untuk menilai normalitas data pada ukuran sampel kecil hingga sedang (Shapiro & Wilk, 1965). Rumus umum uji Shapiro-Wilk adalah:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)} \right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \dots\dots(3)$$

Keterangan: W adalah nilai statistik Shapiro-Wilk, $x_{(i)}$ adalah data yang telah diurutkan, a_i adalah koefisien konstanta Shapiro-Wilk, x_i adalah nilai data ke- i , $\bar{x}$ adalah rata-rata data, dan n adalah jumlah data. Data dinyatakan berdistribusi normal apabila nilai signifikansi lebih besar dari 0,05.

Setelah asumsi normalitas terpenuhi, pengujian hipotesis dilakukan menggunakan *paired sample t-test* karena data penelitian bersifat berpasangan, yaitu data FOC dari kapal yang sama pada dua kondisi berbeda. Uji ini digunakan untuk membandingkan rata-rata dua pengukuran yang berasal dari subjek atau objek yang sama (Field, 2024).

Rumus uji-t sampel berpasangan adalah:

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}} \dots \dots (4)$$

Keterangan: t adalah nilai statistik uji-t, $\bar{d}$ adalah rata-rata selisih FOC sebelum dan sesudah *docking*, s_d adalah simpangan baku selisih data, dan n adalah jumlah pasangan data. Pengambilan keputusan dilakukan pada taraf signifikansi 0,05. Jika nilai signifikansi lebih kecil dari 0,05, maka terdapat perbedaan rata-rata FOC yang signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah *docking*.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Analisis deskriptif dan inferensial dilakukan untuk membandingkan konsumsi bahan bakar harian atau *fuel oil consumption* (FOC) MT. Kakap pada kondisi sebelum dan sesudah *docking*. Berikut adalah hasil analisisnya yang disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan hasil analisis konsumsi bahan bakar MT. Kakap

Keterangan	Jumlah Data (n)	Rata-rata ($\bar{x}$) ton/hari	Standar Deviasi (SD)
FOC Sebelum Dock	30	10,144	1,631
FOC Sesudah Dock	30	7,883	1,850
Selisih Rata-rata	-	2,261	-
Persentase Penurunan	-	22,29 %	-

(Sumber: Data diolah SPSS, 2025)

Berdasarkan Tabel 1, rata-rata FOC MT. Kakap mengalami penurunan dari 10,144 ton/hari sebelum *docking* menjadi 7,883 ton/hari sesudah *docking*. Selisih rata-rata sebesar 2,261 ton/hari menunjukkan bahwa pembersihan *biofouling* pada lambung kapal mampu menurunkan konsumsi bahan bakar sebesar 22,29%. Penurunan ini menunjukkan adanya perubahan performa operasional kapal setelah *docking*, terutama karena kondisi permukaan lambung menjadi lebih bersih dan lebih halus setelah pembersihan. Dengan demikian, hasil deskriptif memberikan indikasi awal bahwa *biofouling* berkontribusi terhadap peningkatan konsumsi

bahan bakar, sedangkan pembersihan lambung dapat mendukung efisiensi energi kapal.

Berdasarkan hasil analisis deskriptif diperoleh data bahwa rata-rata fuel oil consumption (FOC) MT. Kakap sebelum *docking* sebesar 10,144 ton/hari dan menurun menjadi 7,883 ton/hari setelah *docking*. Penurunan konsumsi bahan bakar sebesar 2,261 ton/hari atau 22,29% menunjukkan bahwa pembersihan *biofouling* pada lambung kapal memberikan dampak positif terhadap efisiensi energi operasional kapal. Secara teoritis, kondisi tersebut terjadi karena *biofouling* yang menempel pada lambung meningkatkan kekasaran permukaan sehingga hambatan gesek (frictional resistance) antara lambung dan air menjadi lebih besar. Peningkatan hambatan tersebut menyebabkan sistem propulsi membutuhkan daya yang lebih tinggi untuk mempertahankan kecepatan pelayaran yang sama sehingga konsumsi bahan bakar meningkat. Temuan penelitian ini sejalan dengan teori yang dipaparkan oleh (Cao & Cao, 2023) yang menyatakan bahwa akumulasi organisme laut pada permukaan lambung kapal dapat meningkatkan

kekasaran lambung dan menurunkan efisiensi hidrodinamika kapal. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan (Tadros et al., 2023) yang menjelaskan bahwa peningkatan hull roughness akibat *biofouling* berkontribusi langsung terhadap kenaikan kebutuhan daya mesin dan konsumsi bahan bakar kapal.

Sebelum dilakukan pengujian hipotesis, data selisih FOC sebelum dan sesudah *docking* diuji normalitasnya menggunakan uji Shapiro-Wilk. Uji ini dilakukan untuk memastikan bahwa data selisih memenuhi asumsi normalitas sebagai syarat penggunaan uji-t sampel berpasangan. Hasil uji normalitas disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Analisis Uji Normalitas

Uji Normalitas	Statistik	Derajat Kebebasan (df)	Sig.	Keterangan
Shapiro-Wilk	0,979	30	0,799	Terdistribusi Normal

(Sumber: Data diolah SPSS, 2025)

Berdasarkan Tabel 2, hasil uji Shapiro-Wilk menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,799. Nilai tersebut lebih besar dari 0,05, sehingga data selisih FOC sebelum

dan sesudah *docking* dinyatakan berdistribusi normal. Dengan terpenuhinya asumsi normalitas, pengujian hipotesis dapat dilanjutkan menggunakan uji-t sampel berpasangan. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Analisis Uji-t Sample Berpasangan

Variabel	Rata-rata Selisih	t _{hitung}	Derajat Kebebasan (df)	Sig. (2-tailed)
FOC Sebelum – FOC Sesudah	2,261	4,956	29	0,000

(Sumber: Data diolah SPSS, 2025)

Berdasarkan Tabel 3, nilai t_{hitung} sebesar 4,956 dengan derajat kebebasan 29 dan nilai signifikansi sebesar 0,000. Nilai signifikansi tersebut lebih kecil dari 0,05, sehingga terdapat perbedaan rata-rata FOC yang signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah *docking*. Dengan demikian, pembersihan *biofouling* melalui *docking* terbukti memberikan pengaruh nyata terhadap penurunan konsumsi bahan bakar MT. Kakap.

Hasil uji-t menunjukkan bahwa penurunan konsumsi bahan bakar

yang terjadi setelah *docking* bukan merupakan perubahan yang terjadi secara kebetulan, melainkan dipengaruhi oleh perubahan kondisi lambung kapal setelah *biofouling* dibersihkan. Secara teoritis, pembersihan *biofouling* akan memperbaiki karakteristik aliran air di sekitar lambung sehingga hambatan gesek menurun dan efisiensi propulsi meningkat. Kondisi tersebut menyebabkan kebutuhan daya mesin menjadi lebih rendah dan konsumsi bahan bakar berkurang. Hasil penelitian ini sejalan dengan Dinariyana et al. (2022) yang menyatakan bahwa kegiatan pembersihan lambung merupakan salah satu metode yang efektif dalam meningkatkan efisiensi energi kapal melalui pengurangan hambatan hidrodinamis. Temuan ini juga memperkuat hasil penelitian Amiruddin et al. (2024) yang menunjukkan bahwa tingkat kekasaran lambung akibat *biofouling* berpengaruh terhadap performa hidrodinamika kapal dan kebutuhan energi propulsi.

Secara teknis, penurunan FOC tersebut dapat dijelaskan melalui perubahan kondisi permukaan lambung kapal. Pada kondisi sebelum

docking, *biofouling* yang menempel pada lambung meningkatkan kekasaran permukaan atau *hull roughness*. Kekasaran ini mengganggu aliran air di sekitar lambung dan meningkatkan hambatan gesek atau *frictional resistance*. Akibatnya, mesin kapal membutuhkan daya propulsi yang lebih besar untuk mempertahankan kecepatan operasi, sehingga konsumsi bahan bakar meningkat. Setelah *docking*, pembersihan lambung dan pelapisan ulang antifouling membuat permukaan lambung lebih halus, hambatan gesek berkurang, dan kebutuhan bahan bakar menjadi lebih rendah.

Temuan ini menunjukkan bahwa *docking* dan pembersihan lambung tidak hanya berfungsi sebagai kegiatan perawatan kapal, tetapi juga sebagai strategi efisiensi energi. Penurunan FOC sebesar 22,29% memperlihatkan bahwa pengendalian *biofouling* dapat memberikan dampak langsung terhadap penghematan bahan bakar. Persentase penurunan tersebut bahkan lebih besar dibandingkan beberapa penelitian terdahulu yang melaporkan penghematan bahan bakar sekitar 9–17% setelah pembersihan lambung (Dinariyana et al., 2022). Perbedaan

tersebut kemungkinan dipengaruhi oleh tingkat *biofouling* yang lebih tinggi pada lambung MT. Kakap sebelum *docking*. Meskipun demikian, konsumsi bahan bakar kapal tetap dipengaruhi oleh berbagai faktor lain seperti kecepatan kapal, draft, kondisi muatan, cuaca, dan performa. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *biofouling* berpengaruh terhadap FOC, tetapi bukan satu-satunya faktor yang menentukan konsumsi bahan bakar kapal.

D. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa pembersihan *biofouling* pada lambung MT. Kakap melalui *docking* efektif menurunkan konsumsi bahan bakar kapal. Rata-rata FOC turun dari 10,144 ton/hari menjadi 7,883 ton/hari, dengan penurunan sebesar 2,261 ton/hari atau 22,29%. Hasil uji statistik juga menunjukkan bahwa perbedaan tersebut sangat signifikan. Dengan demikian, *biofouling* dapat dinyatakan sebagai faktor utama yang meningkatkan hambatan gesek lambung dan konsumsi bahan bakar, sedangkan pembersihan lambung serta pelapisan ulang antifouling merupakan langkah yang efektif untuk

meningkatkan efisiensi energi operasional kapal.

<https://doi.org/10.1504/ijhm.2020.10033991>.

DAFTAR PUSTAKA

Amiruddin, W., Hakim, M. L., Firdhaus, A., Purnamasari, D., Tuswan, T., Samuel, S., & Mursid, O. (2024). Prediction of the impact of *biofouling* roughness on a full-scale planing boat performance using CFD. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117457>

Cao, Z., & Cao, P. (2023). Research Progress on Low-Surface-Energy Antifouling Coatings for Ship Hulls: A Review. *Biomimetics*, 8.

Dinariyana, A., Deva, P., & Ariana, I. (2022). DEVELOPMENT OF MODEL-DRIVEN DECISION SUPPORT SYSTEM TO SCHEDULE UNDERWATER HULL CLEANING. *Brodogradnja*.

Kumar, S., Verma, K., Pandey, K., & Sharma, K. (2020). A review on methods used to reduce drag of the ship hulls to improve hydrodynamic characteristics. *International Journal of Hydromechatronics*.

Koray, M., Kaya, E., & Keskin, M. (2025). Determining Logistical Strategies to Mitigate Supply Chain Disruptions in Maritime Shipping for a Resilient and Sustainable Global Economy. *Sustainability*.

Field, A. (2024). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (6th ed.). SAGE Publications.

Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality: Complete samples. *Biometrika*, 52(3/4), 591–611. Sugiyono. (2022). Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D. Alfabeta.

Song, S., Demirel, Y., & Atlar, M. (2019). An investigation into the effect of *biofouling* on the ship hydrodynamic characteristics using CFD. *Ocean Engineering*.

Tadros, M., Ventura, M., & Soares, G. (2023). Effect of hull and propeller roughness during the assessment of ship fuel consumption. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(4), 784.

Yan, R., Wang, S., & Psaraftis, H. (2021). Data analytics for fuel

consumption management in maritime
transportation: Status and
perspectives. *Transportation*
Research Part E: Logistics and
Transportation Review.