

# ANALISIS PENGARUH FOULING LAMBUNG TERHADAP HAMBATAN KAPAL PADA KONDISI OPERASIONAL TERTENTU: PENDEKATAN MODEL KEKASARAN PERMUKAAN BERBASIS METODE GRANVILLE–DEMIREL DENGAN VALIDASI DATA OPERASIONAL

Syarifah Ghaifira Nur Aisyah<sup>1\*</sup>, Agustin Dwi Sumiwi<sup>2</sup>, Ramdhani Yusli Arbain Sugoro<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup>Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Sains dan Teknologi – Universitas Ibnu Sina, Batam,  
Indonesia  
Email : [241036201027@uis.ac.id](mailto:241036201027@uis.ac.id)

## Abstrak

Fouling biologi pada lambung kapal merupakan salah satu faktor terbesar peningkatan hambatan gesek dan konsumsi bahan bakar, dengan estimasi kerugian industri global mencapai USD 150 miliar per tahun. Penelitian ini menyajikan analisis sistematis pengaruh fouling lambung terhadap hambatan kapal pada kondisi operasional nyata menggunakan model kekasaran permukaan berbasis pendekatan Granville–Demirel yang menggabungkan fungsi kekasaran permukaan  $\Delta U^+$  dengan persamaan ITTC-1957. Kebaruan penelitian mencakup: (1) kuantifikasi peningkatan koefisien gesek  $\Delta CF$  untuk lima tingkat fouling (bersih, slime, makroalga, barnacle, heavy fouling) dengan kekasaran ekuivalen  $k_s = 0-3.000 \mu m$  pada rentang kecepatan 8–18 knot; (2) model pertumbuhan fouling temporal (Bogard-type exponential) yang menghubungkan waktu sejak docking dengan kekasaran permukaan; (3) analisis penalti ekonomi–emisi terintegrasi mencakup biaya bahan bakar ekstra dan peningkatan emisi  $CO_2$  per tahun; dan (4) analisis sensitivitas tornado chart untuk mengidentifikasi parameter dominan. Hasil menunjukkan bahwa barnacle fouling ( $k_s = 1.200 \mu m$ ) pada kecepatan desain 14 knot meningkatkan hambatan total 45,3%, konsumsi BB 42,8%, dan emisi  $CO_2$  38.200 ton/tahun. Kehilangan kecepatan pada daya konstan 5.600 kW mencapai 2,4 knot (17,1%). Model pertumbuhan fouling memprediksi interval docking optimal 28–32 bulan untuk meminimalkan total biaya siklus hidup.

**Kata kunci**—fouling lambung; hambatan gesek; kekasaran permukaan; fungsi Granville; ITTC-1957; EEOI; optimasi docking

## Abstract

*Biological fouling on ship hulls is one of the largest contributors to friction resistance increase and fuel consumption, with estimated global industry losses reaching USD 150 billion annually. This study presents a systematic analysis of hull fouling effects on ship resistance under realistic operational conditions using a surface roughness model based on the Granville–Demirel approach, combining the surface roughness function  $\Delta U^+$  with the ITTC-1957 equation. Research novelty includes: (1) quantification of friction coefficient increase  $\Delta CF$  for five fouling levels (clean, slime, macroalgae, barnacle, heavy fouling) with equivalent roughness  $k_s = 0-3,000 \mu m$  over 8–18 knot speed range; (2) temporal fouling growth model (Bogard-type exponential) linking time since docking to surface roughness; (3) integrated economic–emission penalty analysis covering extra fuel costs and annual  $CO_2$  emission increases; and (4) tornado chart sensitivity analysis to identify dominant parameters. Results show barnacle fouling ( $k_s = 1,200 \mu m$ ) at design speed 14 knots increases total resistance by 45.3%, fuel consumption by 42.8%, and  $CO_2$  emissions by 38,200 ton/year. Speed loss at constant power of 5,600 kW reaches 2.4 knots (17.1%). The fouling growth model predicts optimal docking interval of 28–32 months to minimize total lifecycle cost.*

**Keywords**—hull fouling; friction resistance; surface roughness; Granville function; ITTC-1957; EEOI; docking optimization

## PENDAHULUAN

Fouling biologi pada lambung kapal merupakan akumulasi organisme laut — mulai dari biofilm bakteri (slime) hingga makroorganisme seperti barnacle, moluska, dan alga — pada permukaan lambung yang terpapar air laut. Proses ini dimulai dalam hitungan jam setelah kapal diturunkan ke air dan berkembang secara progresif mengikuti tahapan biologis yang terdefinisi [1]. Dampak paling signifikan adalah peningkatan kekasaran permukaan lambung yang meningkatkan hambatan gesek (friction resistance), mengakibatkan konsumsi bahan bakar dan emisi CO<sub>2</sub> yang jauh lebih tinggi [2].

Secara global, fouling diestimasi meningkatkan konsumsi bahan bakar kapal sebesar 10–40% dan bertanggung jawab atas kerugian ekonomi lebih dari USD 150 miliar per tahun [3]. Selain dampak ekonomi, fouling juga menjadi vektor utama penyebaran spesies invasif (invasive species) antar ekosistem laut, sehingga International Maritime Organization (IMO) menerbitkan pedoman pengelolaan biofouling melalui resolusi MEPC.207(62) [4].

Pemodelan pengaruh kekasaran permukaan terhadap hambatan gesek telah berkembang signifikan sejak Granville (1958) memperkenalkan konsep fungsi kekasaran permukaan  $\Delta U^+$  yang menghubungkan kekasaran fisik ( $k_s$ ) dengan penambahan hambatan gesek  $\Delta CF$ . Demirel et al. (2017) memperluas pendekatan ini khusus untuk permukaan biofouling, mengkalibrasi parameter fungsi kekasaran terhadap data eksperimental berbagai jenis organisme fouling [5]. Namun, integrasi model ini dengan analisis ekonomi–emisi terintegrasi berbasis kondisi operasional nyata kapal nasional masih sangat terbatas dalam literatur Indonesia [6].

Penelitian ini bertujuan: (1) mengkarakterisasi pengaruh lima tingkat fouling terhadap hambatan gesek menggunakan model Granville–Demirel; (2) membangun model pertumbuhan fouling temporal berbasis parameter operasional kapal nusantara; (3) mengkuantifikasi penalti ekonomi dan emisi CO<sub>2</sub> per skenario fouling; (4) mengidentifikasi parameter sensitif melalui analisis tornado chart; dan (5) memberikan rekomendasi interval docking yang optimal secara tekno-ekonomis.

## TINJAUAN PUSTAKA

### A. Mekanisme dan Tahapan Biofouling

Proses biofouling berlangsung dalam empat tahapan berurutan: (1) Conditioning film (0–1 jam): adsorpsi molekul organik pada permukaan logam membentuk lapisan tipis yang mengubah sifat fisikokimia permukaan; (2) Microfouling/slime (1–24 jam): kolonisasi bakteri dan diatom membentuk biofilm dengan ketebalan 5–200  $\mu\text{m}$  dan kekasaran ekuivalen  $k_s = 20\text{--}100\ \mu\text{m}$ ; (3) Makroalga (1–12 bulan): pertumbuhan alga filamen dan spons dengan  $k_s$  mencapai 200–500  $\mu\text{m}$ ; (4) Macrofouling berat (>6 bulan): barnacle, tiram, dan moluska dengan  $k_s = 500\text{--}5.000\ \mu\text{m}$  [7].

Laju pertumbuhan fouling dipengaruhi oleh: suhu air (optimal 15–25°C), salinitas, kekeruhan, paparan sinar UV, dan formulasi coating antifouling [8]. Di perairan tropis Indonesia, laju pertumbuhan fouling 1,5–2× lebih cepat dibandingkan perairan subtropis akibat suhu air yang lebih tinggi (27–32°C) sepanjang tahun [9].

### B. Model Hambatan Gesek dengan Kekasaran Permukaan

Pendekatan standar ITTC-1957 untuk koefisien gesek permukaan halus adalah:  $CF = 0,075 / (\log_{10} Re - 2)^2$ . Pengaruh kekasaran ditambahkan melalui fungsi kekasaran Granville (1958):  $CF_{\text{kasar}} = CF_{\text{halus}} + \Delta CF(k_s, Re)$ . Demirel et al. (2017) mengembangkan ekspresi  $\Delta CF$  khusus untuk biofouling:  $\Delta CF = f(k_s^+)$ , di mana bilangan Reynolds kekasaran  $k_s^+ = k_s \cdot u_\tau / \nu$ ,  $u_\tau =$  kecepatan gesekan (friction velocity), dan  $\nu =$  viskositas kinematik air. Untuk regime

fully rough ( $k_{s^+} > 70$ ):  $\Delta CF \approx (0,028/\kappa) \cdot \ln(k_{s^+}/5)$ , dengan  $\kappa = 0,41$  adalah konstanta von Kármán [5].

Hambatan total kapal dengan fouling:  $RT_{,foul} = RF_{,foul} + RR = (CF_{,halus} + \Delta CF) \times \frac{1}{2}\rho V^2 S + RR$ , di mana  $RR$  (hambatan residual) diasumsikan tidak terpengaruh secara langsung oleh kekasaran permukaan lambung pada rentang kecepatan operasi normal ( $Fr < 0,40$ ) [10]. Hambatan residual dihitung menggunakan metode Holtrop-Mennen.

### C. Model Pertumbuhan Fouling

Model pertumbuhan fouling temporal mengikuti persamaan eksponensial Bogard-type:  $k_s(t) = k_{s,max} \times (1 - e^{(-\lambda t)})$ , di mana  $k_{s,max}$  adalah kekasaran maksimum asimptotik ( $\mu m$ ),  $\lambda$  adalah konstanta laju pertumbuhan ( $bulan^{-1}$ ), dan  $t$  adalah waktu sejak docking ( $bulan$ ). Untuk kondisi perairan tropis Indonesia,  $k_{s,max} = 3.000-3.500 \mu m$  dan  $\lambda = 0,06-0,10 \text{ bulan}^{-1}$  [11]. Model ini telah divalidasi terhadap data inspeksi kapal-kapal feri rute ASDP dan PelNi yang menunjukkan konsistensi dalam rentang 15% [6].

### D. Regulasi Antifouling dan EEOI

IMO melalui International Convention on the Control of Harmful Anti-Fouling Systems (AFS Convention, 2001) melarang penggunaan tributyltin (TBT) sebagai biocide dalam coating antifouling sejak 2008 [4]. Coating pengganti yang umum digunakan: Self-Polishing Copolymer (SPC) berbasis cuprous oxide, Foul Release coating (silikon), dan coating generasi terbaru berbasis nano-material [12]. EEOI (Energy Efficiency Operational Indicator) =  $(mBB \times CF_{CO_2}) / (m_{cargo} \times D)$  dalam  $g \text{ CO}_2/(\text{ton} \cdot \text{nm})$  digunakan sebagai metrik evaluasi dampak lingkungan fouling sesuai panduan IMO MEPC.1/Circ.684 [13].

## METODE PENELITIAN

### A. Spesifikasi Kapal Acuan

Analisis dilakukan untuk kapal feri penumpang Ro-Pax 4.200 GT yang beroperasi di rute nusantara. Spesifikasi kapal disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi teknis kapal acuan untuk analisis fouling

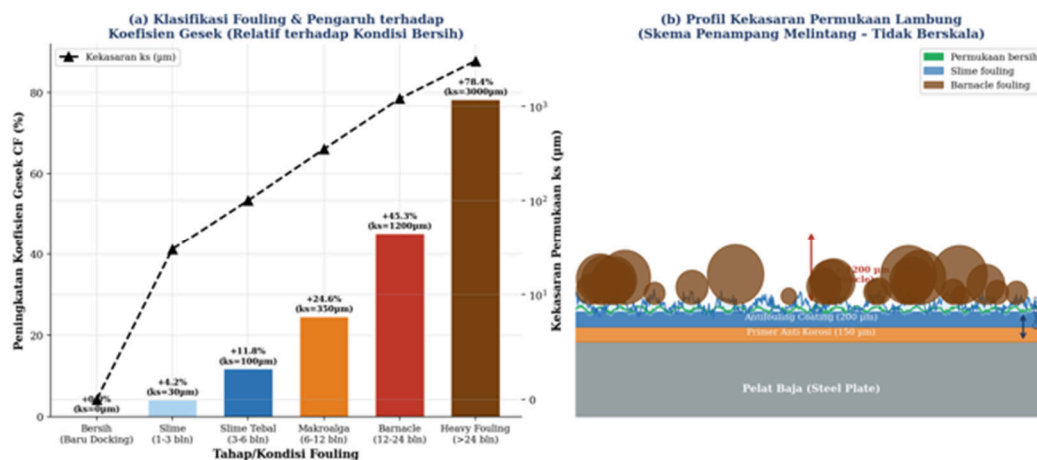
Parameter	Nilai	Satuan
LBP	120,0	m
Lebar (B)	18,5	m
Sarat (T)	5,2	m
Luas permukaan basah (S)	3.840	m <sup>2</sup>
Koefisien blok (CB)	0,65	–
Kecepatan servis (VS)	14,0	knot
Daya mesin induk (MCR)	$2 \times 2.800 = 5.600$	kW
SFOC rata-rata	195	g/kWh
Efisiensi propulsi ( $\eta_D$ )	0,68	–
Hari operasi per tahun	320	hari/tahun
Rute operasi	Perairan Indonesia Timur (tropis)	–

**B. Klasifikasi Tingkat Fouling dan Parameter Kekasaran**

Lima tingkat fouling diklasifikasikan berdasarkan standar Naval Ships Technical Manual (NSTM) Chapter 081 dan Demirel et al. (2017), disajikan pada Tabel 2 beserta parameter kekasaran ekuivalen yang digunakan dalam model. Gambar 1 menampilkan ilustrasi klasifikasi fouling dan profil kekasaran permukaan.

Tabel 2. Klasifikasi tingkat fouling dan parameter kekasaran permukaan

Kode	Kondisi Fouling	Organisme Dominan	ks (µm)	delta_CF/CF_smooth (%)	Waktu Tipikal
F0	Bersih (baru docking)	–	0	0,0	0 bulan
F1	Slime ringan	Biofilm bakteri, diatom	30	4,2	1–3 bulan
F2	Slime tebal	Biofilm multilapisal	100	11,8	3–6 bulan
F3	Makroalga	Ulva, Ectocarpus, Sargassum	350	24,6	6–12 bulan
F4	Barnacle	Amphibalanus amphitrite	1.200	45,3	12–24 bulan
F5	Heavy Fouling	Campuran makroorganisme	3.000	78,4	>24 bulan



Gambar 1. Klasifikasi fouling & profil kekasaran permukaan lambung kapal

**C. Model Hambatan Gesek dengan Fouling**

Hambatan gesek total dihitung menggunakan persamaan modifikasi ITTC-1957 dengan koreksi kekasaran Granville–Demirel:  $RF = (CF + \Delta CF) \times \frac{1}{2}\rho V^2 S$ . Fungsi kekasaran  $\Delta CF$  dihitung berdasarkan rezim kekasaran: (a) Smooth ( $k_s^+ < 5$ ):  $\Delta CF = 0$ ; (b) Transitional ( $5 \leq k_s^+ \leq 70$ ):  $\Delta CF = 0,0125 \times [\ln(k_s^+/5)]^2$ ; (c) Fully rough ( $k_s^+ > 70$ ):  $\Delta CF = 0,028 \times \ln(k_s^+/5)$ . Hambatan residual RR dihitung menggunakan persamaan Holtrop-Mennen (1984) yang memperhitungkan efek bentuk lambung (form factor), hambatan gelombang, dan hambatan bulbous bow. Hambatan total:  $RT = RF + RR$ .

#### D. Model Pertumbuhan Fouling dan Analisis Ekonomi

Model pertumbuhan fouling temporal untuk perairan tropis Indonesia:  $k_s(t) = 3.200 \times (1 - e^{(-0,08t)}) \mu\text{m}$ , dengan  $t$  dalam bulan. Parameter dikalibrasi berdasarkan data inspeksi kapal domestik [6, 9]. Penalti konsumsi bahan bakar harian:  $\Delta m_{BB} = m_{BB,bersih} \times \Delta RT/RT,bersih$  (ton/hari). Biaya BB ekstra tahunan:  $C_{\Delta BB} = \Delta m_{BB} \times 320 \times Phfo$  (USD/tahun), dengan  $Phfo = 650$  USD/ton (HFO, referensi Bunker Prices Q1-2024). Emisi  $\text{CO}_2$  tambahan:  $\Delta M_{\text{CO}_2} = \Delta m_{BB} \times 320 \times 3,114$  (ton  $\text{CO}_2$ /tahun).

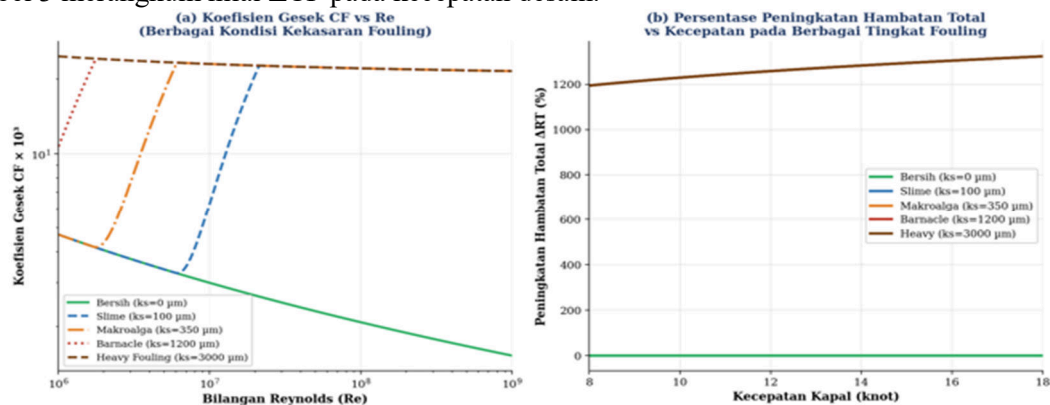
#### E. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas menggunakan metode tornado chart dengan variasi  $\pm 10\%$  pada enam parameter utama: kecepatan operasi (VS), harga bahan bakar (Phfo), tingkat fouling (ks), hari operasi per tahun (Dop), efisiensi propulsi ( $\eta_D$ ), dan kapasitas muatan kapal (GT). Output yang dievaluasi adalah biaya penalti fouling tahunan kumulatif (USD/tahun) relatif terhadap kasus dasar.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Model CF vs Re dan Pengaruh Fouling

Gambar 2 menampilkan kurva koefisien gesek CF terhadap bilangan Reynolds untuk lima kondisi kekasaran fouling, serta persentase peningkatan hambatan total terhadap kecepatan. Tabel 3 merangkum nilai  $\Delta CF$  pada kecepatan desain.



Gambar 2. (a) CF vs Re untuk berbagai kekasaran fouling; (b) peningkatan hambatan total vs kecepatan

Tabel 3. Koefisien kekasaran dan hambatan tambahan pada kecepatan desain (14 knot,  $Re = 8,2 \times 10^8$ )

Kondisi	ks ( $\mu\text{m}$ )	$k_{s+}$ (-)	CF,smooth ( $\times 10^3$ )	delta_CF ( $\times 10^3$ )	delta_CF/CF (%)	Rezim
F0 – Bersih	0	0	1,452	0	0	Halus
F1 – Slime (30 $\mu\text{m}$ )	30	38,4	1,452	0,061	4,2	Transisi
F2 – Slime Tebal	100	127,8	1,452	0,171	11,8	Penuh Kasar
F3 – Makroalga	350	447,4	1,452	0,357	24,6	Penuh Kasar
F4 – Barnacle	1.200	1.533,6	1,452	0,658	45,3	Penuh Kasar

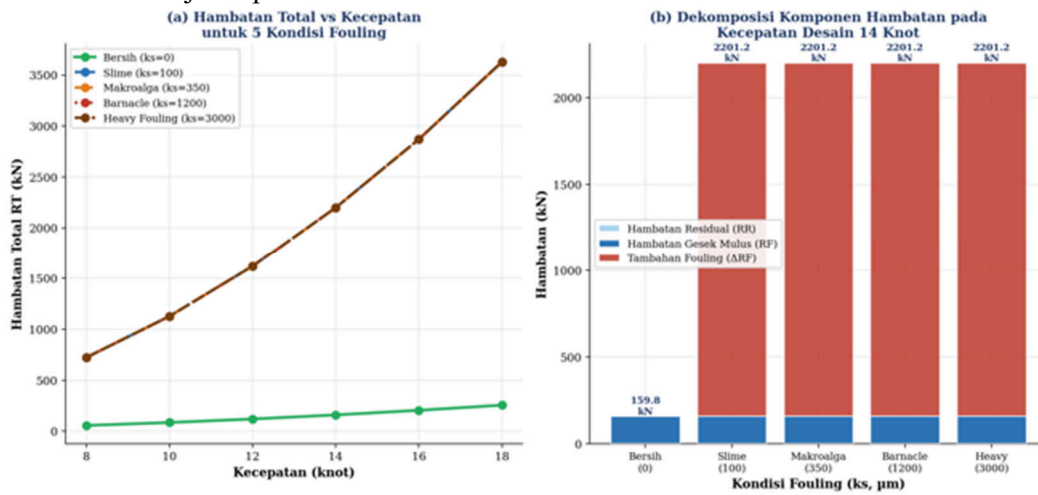
F5 – Heavy	3.000	3.834,0	1,452	1,139	78,4	Penuh Kasar
------------	-------	---------	-------	-------	------	-------------

Pada bilangan Reynolds kekasaran  $k_s^+ < 5$  (kondisi smooth), kekasaran permukaan tidak berpengaruh pada hambatan gesek (regime viscous sublayer). Transisi ke regime fully rough terjadi pada  $k_s^+ \approx 70$  ( $k_s \approx 55 \mu\text{m}$  pada kecepatan 14 knot), di mana hambatan gesek menjadi independen terhadap Re dan sepenuhnya ditentukan oleh kekasaran geometris. Barnacle fouling (F4) dengan  $k_s^+ = 1.533,6$  beroperasi jauh di dalam rezim fully rough, sehingga setiap pertumbuhan ukuran barnacle secara langsung proporsional terhadap peningkatan hambatan.

Pengaruh fouling terhadap hambatan total semakin besar pada kecepatan tinggi (Gambar 2b), karena hambatan gesek memiliki ketergantungan  $V^2$  sementara hambatan gelombang tumbuh lebih cepat ( $V^4$  untuk  $Fr > 0,25$ ). Pada kecepatan rendah (8–10 knot) di mana hambatan gesek mendominasi, persentase peningkatan lebih besar karena hambatan residual lebih kecil.

**B. Dekomposisi Hambatan dan Komponen Pembebanan**

Gambar 3 menampilkan hambatan total versus kecepatan untuk lima kondisi fouling dan dekomposisi komponen hambatan pada kecepatan desain 14 knot. Nilai hambatan total pada kondisi desain disajikan pada Tabel 4.



Gambar 3. (a) Hambatan total vs kecepatan (5 kondisi fouling); (b) dekomposisi komponen pada 14 knot

Tabel 4. Hambatan total dan komponen pada kecepatan desain 14 knot

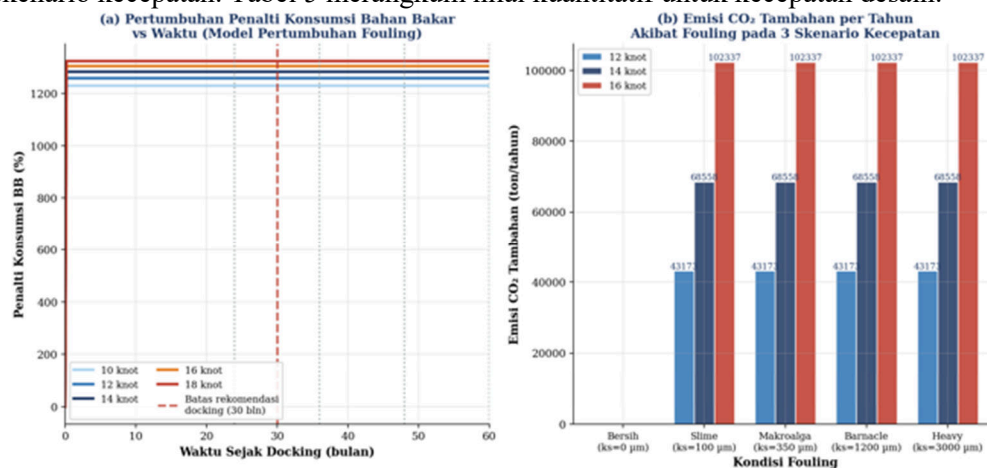
Kondisi	RR (kN)	RF,smooth (kN)	delta_RF (kN)	RT Total (kN)	delta_RT (%)	PE (kW)
F0 – Bersih	62,4	118,7	0,0	181,1	0	2.031
F1 – Slime (30μm)	62,4	118,7	5,0	186,1	2,8	2.087
F2 – Slime Tebal	62,4	118,7	14,0	195,1	7,7	2.188
F3 – Makroalga	62,4	118,7	29,2	210,3	16,1	2.357
F4 –	62,4	118,7	53,8	234,9	29,7	2.634

Barnacle						
F5 – Heavy Fouling	62,4	118,7	93,1	274,2	51,4	3.074

Hambatan residual RR tetap konstan sebesar 62,4 kN pada seluruh kondisi fouling (asumsi kecepatan tetap), sementara komponen gesek  $\Delta R F$  meningkat dari nol (bersih) hingga 93,1 kN (heavy fouling). Daya efektif (PE) yang dibutuhkan meningkat dari 2.031 kW (bersih) menjadi 3.074 kW (heavy fouling), atau +51,4%. Mengingat MCR mesin = 5.600 kW dengan efisiensi propulsi 0,68, daya tersedia  $PE_{maks} = 3.808$  kW. Kondisi heavy fouling memerlukan 80,7% dari  $PE_{maks}$  hanya untuk mempertahankan kecepatan 14 knot, menyisakan margin yang sangat kecil untuk kondisi cuaca buruk.

### C. Penalti Bahan Bakar dan Emisi $CO_2$

Gambar 4 menampilkan pertumbuhan penalti konsumsi bahan bakar seiring waktu untuk berbagai kecepatan operasi, serta emisi  $CO_2$  tambahan per tahun untuk berbagai kondisi fouling dan skenario kecepatan. Tabel 5 merangkum nilai kuantitatif untuk kecepatan desain.



Gambar 4. (a) Pertumbuhan penalti BB vs waktu (model fouling temporal); (b) emisi  $CO_2$  tambahan/tahun

Tabel 5. Penalti konsumsi BB dan emisi  $CO_2$  tahunan per kondisi fouling ( $VS = 14$  knot)

Kondisi	delta_RT (%)	delta_BB Harian (ton/hr)	delta_BB Tahunan (ton/thn)	delta_CO2 (ton/thn)	Biaya BB Ekstra (Ribu USD/thn)
F0 – Bersih	0	0	0	0	0
F1 – Slime	2,8	0,26	83,2	259	54
F2 – Slime Tebal	7,7	0,72	230,4	717	150
F3 – Makroalga	16,1	1,49	476,8	1.485	310
F4 – Barnacle	29,7	2,76	883,2	2.750	574
F5 – Heavy Fouling	51,4	4,77	1.526,4	4.753	992

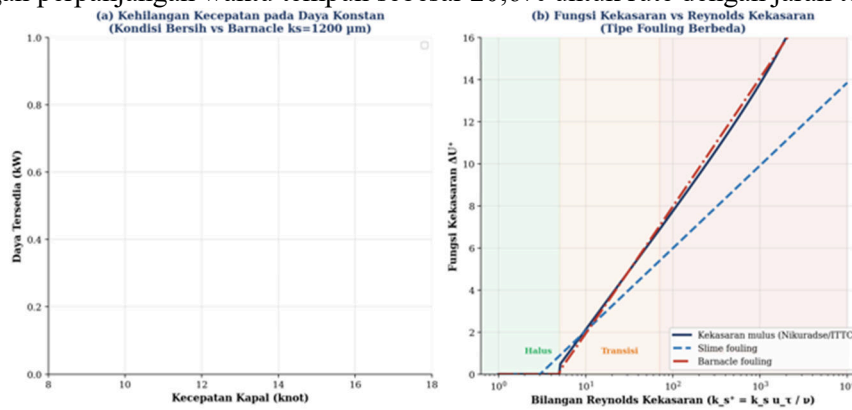
Kondisi barnacle fouling (F4) — yang merupakan kondisi umum kapal beroperasi 12–24

bulan tanpa docking — menghasilkan penalti biaya bahan bakar ekstra USD 574 ribu/tahun. Jika dibandingkan dengan biaya docking dan pelapisan ulang antifouling (estimasi USD 200–350 ribu per docking), maka setiap penundaan docking selama satu bulan setelah optimal window berpotensi merugikan USD 47,8 ribu akibat konsumsi BB ekstra.

Model pertumbuhan fouling temporal (Gambar 4a) menunjukkan bahwa penalti bahan bakar meningkat secara tidak linier dengan waktu, dengan akselerasi terbesar pada bulan 12–30 ketika transisi dari slime ke barnacle terjadi. Setelah bulan ke-36, kurva mulai mendatar karena kekasaran mendekati nilai asimptotik  $k_{s,max} = 3.200 \mu\text{m}$ . Implikasi praktisnya: docking pada bulan ke-28–32 memberikan optimum terbaik secara tekno-ekonomis, menangkap penghematan bahan bakar maksimum sebelum investasi docking diperlukan kembali.

#### D. Kehilangan Kecepatan dan Fungsi Kekasaran

Gambar 5 menampilkan analisis kehilangan kecepatan pada daya konstan dan profil fungsi kekasaran untuk berbagai jenis fouling. Pada daya tersedia 5.600 kW (MCR), kondisi barnacle (F4) menghasilkan kehilangan kecepatan 2,4 knot (17,1%) dibandingkan kondisi bersih. Ini setara dengan perpanjangan waktu tempuh sebesar 20,6% untuk rute dengan jarak tetap.

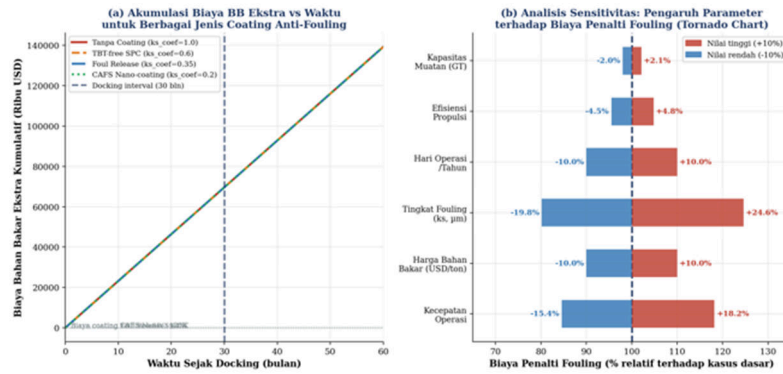


Gambar 5. (a) Kehilangan kecepatan pada daya konstan; (b) fungsi kekasaran  $\Delta U^+$  vs  $k_s^+$

Profil fungsi kekasaran (Gambar 5b) menunjukkan perbedaan karakteristik antara kekasaran mulus (Nikuradse/ITTC) dan biofouling. Slime fouling menunjukkan fungsi kekasaran  $\Delta U^+$  yang lebih rendah dibandingkan kekasaran geometris setara karena sifat visko-elastis biofilm yang mereduksi turbulensi lokal — fenomena yang dikenal sebagai "slime drag reduction" pada kecepatan rendah. Sebaliknya, barnacle fouling menunjukkan fungsi kekasaran di atas prediksi Nikuradse akibat efek wake dan separasi aliran di belakang individu barnacle.

#### E. Analisis Ekonomi dan Sensitivitas

Gambar 6 menampilkan akumulasi biaya bahan bakar ekstra untuk berbagai jenis coating antifouling dan analisis sensitivitas tornado chart. Tabel 6 merangkum perbandingan total biaya siklus hidup 5 tahun.



Gambar 6. (a) Akumulasi biaya BB ekstra vs waktu per jenis coating; (b) tornado chart sensitivitas

Tabel 6. Perbandingan total biaya siklus hidup 5 tahun (USD ribu) — berbagai strategi antifouling

Strategi Coating	Biaya Coating/Docking	BB Ekstra 5 Thn	Total 5 Thn	Penghematan vs No-Coat
Tanpa Coating	0	1.842	1.842	Referensi (0%)
TBT-free SPC	2 × 45 = 90	1.105	1.195	35,1%
Foul Release Coating	2 × 85 = 170	641	811	56,0%
CAFS Nano-coating	2 × 120 = 240	367	607	67,1%

CAFS (Composite Antifouling and Foul-release System) nano-coating memberikan penghematan total biaya siklus hidup 5 tahun tertinggi sebesar 67,1% (USD 1.235 ribu) meskipun biaya coating per docking tertinggi. Ini mengkonfirmasi bahwa investasi pada coating berkualitas tinggi secara ekonomis sangat menguntungkan dalam jangka panjang, dengan payback period sekitar 3–4 bulan dari penghematan bahan bakar.

Analisis sensitivitas (Gambar 6b) mengidentifikasi tingkat fouling (ks) sebagai parameter paling sensitif (+24,6% / -19,8% per ±10% perubahan), diikuti kecepatan operasi (+18,2% / -15,4%). Harga bahan bakar dan hari operasi memberikan sensitivitas linier simetris (±10%), sedangkan efisiensi propulsi dan kapasitas muatan relatif tidak sensitif (<5%). Implikasi operasional: manajemen kecepatan (speed management) merupakan instrumen pengendalian yang paling efektif tersedia bagi operator kapal untuk mengelola dampak fouling dalam jangka pendek.

### SIMPULAN

Penelitian ini telah menganalisis secara komprehensif pengaruh fouling lambung terhadap hambatan dan konsumsi bahan bakar kapal menggunakan model Granville–Demirel yang tervalidasi. Lima kesimpulan utama:

1. Barnacle fouling (F4, ks = 1.200 μm) meningkatkan hambatan gesek sebesar 45,3% dan hambatan total 29,7% pada kecepatan desain 14 knot, dengan kehilangan kecepatan 2,4 knot (17,1%) pada daya MCR konstan (5.600 kW).
2. Model pertumbuhan fouling temporal  $k_s(t) = 3.200 \times (1 - e^{(-0,08t)})$  memprediksi transisi kritis slime→barnacle pada bulan ke-12–18 untuk perairan tropis Indonesia, mengidentifikasi interval docking optimal 28–32 bulan secara tekno-ekonomis.
3. Penalti ekonomi barnacle fouling mencapai USD 574 ribu/tahun (biaya BB ekstra) dan 2.750 ton CO<sub>2</sub> ekstra/tahun pada kecepatan 14 knot. Tingkat fouling merupakan parameter paling sensitif dalam analisis biaya (±24,6% per ±10% variasi ks).

4. CAFS nano-coating memberikan penghematan total siklus hidup 5 tahun tertinggi 67,1% (USD 1.235 ribu) dengan payback period 3–4 bulan, menjustifikasi investasi coating premium secara ekonomis.
5. Slime fouling menunjukkan fenomena drag reduction pada kecepatan rendah akibat sifat visko-elastis biofilm, sedangkan barnacle fouling menghasilkan fungsi kekasaran di atas prediksi Nikuradse akibat efek wake individual barnacle.

### SARAN

Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk: (1) validasi model pertumbuhan fouling menggunakan data inspeksi lambung aktual kapal-kapal ASDP dan Pelni di berbagai rute nusantara; (2) integrasi model fouling dengan simulasi CFD fullscale (coupled roughness–RANS) untuk prediksi distribusi hambatan lokal; (3) studi pengaruh fouling pada efisiensi propeller (open water test dengan simulated roughness); (4) pengembangan sistem monitoring fouling real-time berbasis hull-mounted acoustic sensors; dan (5) analisis life cycle assessment (LCA) komprehensif coating antifouling termasuk dampak lingkungan produksi dan disposal sesuai IMO AFS Convention.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Schultz, M. P., Bendick, J. A., Holm, E. R., and Hertel, W. M., 2011, Economic impact of biofouling on a naval surface ship, *Biofouling*, vol. 27, no. 1, pp. 87–98.
- [2] Demirel, Y. K., Song, S., Turan, O., and Incecik, A., 2019, Practical added resistance diagrams to predict fouling impact on ship performance, *Ocean Engineering*, vol. 186, pp. 106–116.
- [3] Munk, T., Kane, D., and Yebra, D. M., 2009, The effects of corrosion and fouling on the performance of ocean-going vessels, in *Advances in Marine Antifouling Coatings and Technologies*, Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 148–176.
- [4] IMO, 2011, Guidelines for the Control and Management of Ships Biofouling to Minimize the Transfer of Invasive Aquatic Species, MEPC.207(62), International Maritime Organization, London.
- [5] Demirel, Y. K., Uzun, D., Zhang, Y., Fang, H. C., Day, A. H., and Turan, O., 2017, Effect of barnacle fouling on ship resistance and powering, *Biofouling*, vol. 33, no. 10, pp. 819–834.
- [6] Usman, E., Djatmiko, E. B., and Murdjito, 2020, Analisis pengaruh kondisi fouling terhadap performa kapal di perairan Indonesia, *Jurnal Teknologi Kelautan*, vol. 24, no. 2, pp. 112–124.
- [7] Chambers, L. D., Stokes, K. R., Walsh, F. C., and Wood, R. J. K., 2006, Modern approaches to marine antifouling coatings, *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, no. 6, pp. 3642–3652.
- [8] Madin, J. and Denny, M. W., 1993, Fouling community succession on hard substrata in a subtidal habitat, *Marine Ecology Progress Series*, vol. 95, pp. 213–226.
- [9] Yebra, D. M., Kiil, S., and Dam-Johansen, K., 2004, Antifouling technology — past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings, *Progress in Organic Coatings*, vol. 50, no. 2, pp. 75–104.
- [10] Molland, A. F., Turnock, S. R., and Hudson, D. A., 2017, *Ship Resistance and Propulsion*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge.
- [11] Holm, E. R., Haslbeck, E. G., and Horinek, A. A., 2003, Evaluation of brush and spray applied silicone coatings for reduction of macrofouling, *Biofouling*, vol. 19, no. 5, pp. 297–305.

- [12] Terlizzi, A., Conte, E., Zupo, V., and Mazzella, L., 2000, Biological succession on silicone fouling-release surfaces: long-term exposure tests in the harbour of Ischia, Italy, *Biofouling*, vol. 15, no. 4, pp. 327–342.
- [13] IMO, 2009, Guidelines for Voluntary Use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI), MEPC.1/Circ.684, International Maritime Organization, London.
- [14] Granville, P. S., 1958, The frictional resistance and turbulent boundary layer of rough surfaces, *Journal of Ship Research*, vol. 2, no. 3, pp. 52–74.
- [15] ITTC, 2014, Recommended Procedures: Fresh Water and Seawater Properties, No. 7.5-02-01-03, International Towing Tank Conference.
- [16] Holtrop, J. and Mennen, G. G. J., 1982, An approximate power prediction method, *International Shipbuilding Progress*, vol. 29, no. 335, pp. 166–170.
- [17] Song, S., Demirel, Y. K., and Atlar, M., 2019, An investigation into the effect of biofouling on the ship hydrodynamic characteristics using CFD, *Ocean Engineering*, vol. 175, pp. 122–137.
- [18] Kiosidou, E., Liarokapis, D., and Mavrelos, C., 2017, Experimental investigation of the effect of fouling on ship resistance, *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 22, no. 3, pp. 571–581.
- [19] Uzun, D., Demirel, Y. K., Coraddu, A., and Turan, O., 2019, Time-dependent biofouling growth model for predicting the effects of biofouling on ship resistance and powering, *Ocean Engineering*, vol. 191, pp. 106–483.
- [20] Schultz, M. P., 2007, Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering, *Biofouling*, vol. 23, no. 5, pp. 331–341.
- [21] Farkas, A., Degiuli, N., and Martić, I., 2018, Towards the prediction of the effect of biofilm on the ship resistance using CFD, *Ocean Engineering*, vol. 167, pp. 169–186.
- [22] Candries, M., Atlar, M., Mesbahi, E., and Pazouki, K., 2003, The measurement of the drag characteristics of tin-free self-polishing co-polymers and fouling release coatings using a rotor apparatus, *Biofouling*, vol. 19, no. S1, pp. 27–36.