



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Peningkatan Hambatan Kapal Planing Karena Kekasaran Biofouling

Juan Lucky Napitupulu¹⁾, Wilma Amiruddin²⁾, Muhammad Luqman Hakim³⁾

¹⁾Laboratorium Kapal Kapal Kecil

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*)}e-mail :napitupulujuan.jn@gmail.com

Abstrak

Kapal planing banyak digunakan untuk berbagai keperluan, namun kinerjanya sangat rentan terhadap biofouling. Biofouling dapat mempengaruhi kenaikan hambatan kapal. Peningkatan hambatan ini berdampak langsung pada kenaikan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peningkatan hambatan karena kekasaran biofouling serta perubahan trim dan heave pada kapal planing. Metode yang digunakan adalah melalui simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) pada kondisi calm water. Objek penelitian yang digunakan adalah model kapal planing C dari Taunton et al yang sudah di skalakan dari ukuran aslinya. Hasil menunjukkan bahwa kekasaran 30-300 μm justru mengurangi hambatan hingga 56.4% akibat efek tripping boundary layer, sedangkan kekasaran $\geq 1000 \mu\text{m}$ mengakibatkan peningkatan hambatan total hingga 67.9% dengan peningkatan koefisien gesek mencapai 908%. Penelitian ini juga mengeksplorasi fenomena dinamis yang terjadi, seperti variasi distribusi tekanan, elevasi gelombang, serta trim dan heave.

Kata Kunci : Hambatan Kapal, Biofouling, Kapal Planing, Computational Fluid Dynamics.

1. PENDAHULUAN

Kapal planing telah menjadi pilihan utama dalam aplikasi militer, komersial, dan rekreasi karena kemampuannya untuk mencapai kecepatan tinggi dan efisiensi melalui mekanisme meluncur (planing) di permukaan air, yang secara signifikan mengurangi hambatan lambung. Namun, performa hidrodinamis yang sensitif ini sangat rentan terhadap kondisi permukaan lambung, khususnya fenomena biofouling [1].

Biofouling merupakan akumulasi organisme akuatik seperti mikroorganisme, tanaman, dan hewan pada permukaan dan struktur yang terbenam atau terpapar lingkungan akuatik [2]. Biofouling ini dapat memicu pembentukan turbulent boundary layer karena permukaan lambung kapal menjadi lebih kasar dari sebelumnya, yang secara drastis meningkatkan hambatan gesek (frictional resistance). Dampak fisik ini bersifat multidimensi seperti [3]:

- Penurunan Kinerja: Kekasaran biofouling dapat mengurangi kecepatan kapal hingga lebih dari 40%.
- Dampak Ekonomi: Peningkatan hambatan gesek menyebabkan kebutuhan daya dorong yang lebih besar, yang berujung pada peningkatan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional yang signifikan.
- Dampak Lingkungan & Operasional: Selain peningkatan biaya, biofouling juga dapat mengubah distribusi gaya hidrodinamis, mempengaruhi stabilitas, trim (sudut angguk), dan heave (gerakan vertikal) kapal, serta berkontribusi pada penyebaran spesies invasif.

Meskipun dampak merusak dari biofouling telah dikonfirmasi pada beberapa studi kapal-kapal displacement hulls seperti KCS dan KVLCC2 di mana peningkatan hambatan tercatat sebesar 77.5% hingga 144.5% [4] aplikasi dan efek spesifik pada kapal planing memerlukan studi mendalam. Kapal planing beroperasi pada mode yang berbeda; perubahan kecil pada trim dan heave yang diinduksi oleh kekasaran dapat secara fundamental mengubah daya angkat (lift) dan hambatan totalnya.

Urgensi penelitian ini ditekankan oleh belum banyak penelitian yang secara sistematis dan kuantitatif menganalisis pengaruh variasi tingkat kekasaran biofouling terhadap karakteristik hidrodinamis (hambatan, trim, heave, dan pola aliran) pada lambung kapal planing dengan mode gerak yang unik dan sensitif. Kebutuhan Data Praktis: Analisis ini, yang akan dilakukan menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD), akan memberikan wawasan mendalam mengenai mekanisme peningkatan hambatan pada berbagai kondisi kekasaran dan kecepatan.

Tujuan dan manfaat dari penelitian ini sangat dibutuhkan oleh perancang kapal dan operator maritim di Indonesia untuk mengoptimalkan desain lambung yang tahan fouling, meningkatkan efisiensi energi, dan menyusun strategi perawatan yang paling efektif untuk menekan biaya operasional. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan pengetahuan tersebut dengan menginvestigasi dampak variasi kekasaran biofouling terhadap peningkatan hambatan, perubahan trim dan heave, serta pola aliran di sekitar kapal planing.

2. METODE

Penelitian ini mengadopsi pendekatan numerik CFD untuk menginvestigasi secara sistematis dampak kekasaran permukaan lambung kapal ikan skala penuh (akibat biofouling) pada berbagai komponen hambatan, yaitu hambatan total, gesek, dan residu. Dengan memvariasikan tingkat kekasaran dan kecepatan kapal, simulasi CFD akan menganalisis secara detail distribusi tekanan dinamis dan pola aliran di sekitar lambung. Hal ini bertujuan untuk mengidentifikasi bagaimana degradasi permukaan secara spesifik memengaruhi kontribusi masing-masing komponen hambatan.

2.1 Pengaruh Kekasaran Permukaan Lambung akibat Biofouling terhadap Kinerja Kapal

Penggunaan kapal planing untuk militer, komersial, dan rekreasi meningkat karena efisiensi kecepatannya, namun kinerja ini sangat terganggu oleh kekasaran biofouling yaitu akumulasi organisme akuatik pada lambung

kapal. Biofouling menyebabkan permukaan lambung menjadi tidak rata dan memicu turbulent boundary layer yang signifikan, sehingga meningkatkan hambatan gesek dan mengakibatkan penurunan kecepatan hingga lebih dari 40% [3]. Secara operasional, peningkatan hambatan ini membutuhkan daya tambahan dan meningkatkan konsumsi bahan bakar, yang pada akhirnya meningkatkan biaya dan mengurangi efisiensi [5]. Secara hidrodinamis, biofouling mengubah distribusi tekanan dan gaya, yang berpotensi memengaruhi stabilitas, trim, dan heave kapal, sementara secara lingkungan, biofouling juga menjadi vektor bagi organisme invasif [5]. Analisis mendalam, seperti studi CFD terdahulu pada kapal displacement, menggaris bawahi urgensi untuk mengkaji efek ini secara spesifik pada mode gerak sensitif kapal planing

2.2 Klasifikasi hambatan dan dampak Biofouling

Hambatan kapal merupakan gaya fluida yang bekerja melawan arah gerak kapal, sehingga memperlambat lajunya. Ketika biofouling (organisme laut yang menempel) terbentuk pada permukaan lambung kapal, gaya hambat ini akan meningkat secara signifikan. Peningkatan hambatan yang disebabkan oleh biofouling ini lantas membutuhkan daya dan tenaga (power) yang lebih besar bagi kapal untuk bergerak. Dampak akhirnya adalah peningkatan konsumsi bahan bakar. Saat bergerak, sebuah kapal menghadapi berbagai jenis hambatan yang timbul dari interaksinya dengan lingkungan laut. Menurut Molland[6], hambatan total (R_T) sebuah kapal dapat diuraikan menjadi dua komponen utama yaitu Hambatan Gesek (R_F): Ini disebabkan oleh gesekan antara air (fluida) dan permukaan lambung kapal. Hambatan Sisa (R_R): Ini adalah hambatan yang berhubungan dengan tekanan yang terbagi lagi menjadi hambatan tekanan viskos (R_{VP}) dan hambatan gelombang (R_W). Secara ringkas, (R_T) adalah gabungan dari hambatan gesek dan hambatan sisa, di mana hambatan sisa mencakup hambatan tekanan viskos dan hambatan gelombang.

$$R_T = R_F + R_R \quad (1)$$

$$R_T = R_F + R_R \quad (2)$$

2.3 Peningkatan Gaya Hambat akibat Permukaan yang Kasar

Penelitian sebelumnya menginvestigasi bagaimana kekasaran permukaan memengaruhi sifat aliran fluida[7]. Ditemukan bahwa adanya kekasaran menyebabkan profil kecepatan aliran fluida yang biasanya terjadi pada permukaan halus seperti dijelaskan dalam Persamaan (3) mengalami pergeseran ke bawah di area log law akibat kekasaran.

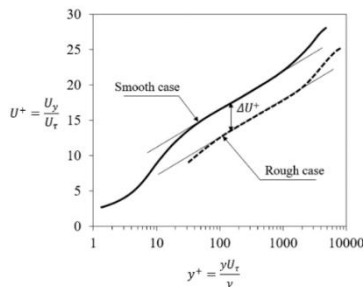
Pergeseran ini menghasilkan profil kecepatan baru yang dijelaskan oleh Hama [8] pada Gambar 1. Penggunaan fungsi kekasaran ($\Delta U^+(k^+)$) sebagai parameter untuk pergeseran ke bawah dan Bilangan Reynolds kekasaran (k^+) digunakan dalam konteks ini, lihat persamaan (5) dan (6).

$$U^+_{smooth} = \frac{1}{k} \ln y^+ + B \quad (3)$$

$$U^+_{rough} = \frac{1}{k} \ln y^+ + B - \Delta U^+ \quad (4)$$

$$\Delta U^+ = f(k^+) \quad (5)$$

$$k_s^+ = \frac{k_s U_\tau}{\nu} \quad (6)$$



Gambar 1. Efek kekasaran terhadap profil kecepatan lapisan batas

2.4 Objek Penelitian dan Variabel

Penelitian ini menggunakan data Kapal Planing model C yang telah dilakukan eksperimen sebelumnya oleh Taunton dkk [9]. Penelitian ini difokuskan pada efek yang ditimbulkan oleh pengaruh kekasaran permukaan (surface roughness) akibat biofouling terhadap peningkatan hambatan pada kapal planing model C. Data yang dikumpulkan anatara lain meliputi ukuran utama kapal dapat dilihat pada Tabel 1, Variasi kekasaran k_s berdasarkan penelitian Schultz yang dijelaskan pada Tabel 2 [10], dan variasi kecepatan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 1. Data Ukuran Kapal Planing model C

Property	Full-scale	Model (1:7.5)	Unit
Length overall, L	15.00	2.00	m
Breadth, B	3.45	0.46	m
Draught, T	0.675	0.09	m
Displacement Weight	1825.5	243.4	N
Deadrise angel	22.50	22.50	degree
Longitudinal center of gravity	33.00	33.00	% L

Tabel 2. Data Kondisi Kekasaran

Description of condition	NSTM rating	k_s (μm)	Rt50 (μm)
Hydraulically smooth surface	0	00	0
Typical as applied AF coating	0	30	150
Deteriorate coating or light slime	10-20	100	300
Heavy Slime	30	300	600
Small calcareous fouling or weed	40-60	1000	1000
Medium calcareous fouling	70-80	3000	3000
Heavy calcareous fouling	90-100	10000	10000

Tabel 3. Variasi Kecepatan Kapal Planing Model C

V(m/s)	Fn
5.14	1.16
7.00	1.58
8.77	1.98
10.23	2.31

2.5 Computational Fluid Dynamic (CFD)

Model kapal yang telah divariasikan akan disimulasikan lebih lanjut dengan memanfaatkan perangkat lunak CFD Numeca. Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan metode analisis aliran fluida yang memanfaatkan pendekatan numerik melalui proses diskritisasi, yaitu pembagian domain menjadi elemen-elemen kecil (grid atau sel)[11]. Dengan cara ini, persamaan diferensial parsial yang menggambarkan fenomena fisik dapat diubah menjadi bentuk aljabar sehingga dapat diselesaikan secara numerik untuk memperoleh solusi yang mendekati kondisi nyata.

2.5.1 Mathematical Formula untuk CFD

Metode Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS) digunakan untuk menyelesaikan persamaan pengendali (governing equation). Persamaan kekekalan massa dan momentum diselesaikan menggunakan perangkat lunak CFD. Persamaan kontinuitas dan momentum rata-rata untuk aliran tak termampatkan dinyatakan dalam notasi tensor dan koordinat Kartesius pada persamaan (7) dan (8).

$$\frac{\partial(\rho \bar{U}_i)}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{U}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{U}_j \bar{U}_j + \rho \bar{U}_j \bar{U}_j) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_i}$$

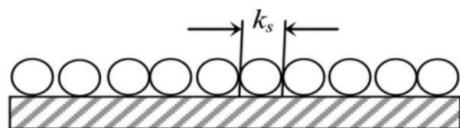
Dimana ρ adalah massa jenis, U_i adalah rata-rata cartesian component dari vector kecepatan, $\bar{\rho}(U_i U_j)$ adalah Reynold stress dan p adalah

tekanan. τ_{ij} adalah viscous stress tensor komponen, μ merupakan viskositas dinamis.

Secara khusus dalam bidang hidrodinamik, model turbulensi yang banyak digunakan adalah model dua persamaan, seperti SST $k-\omega$ dan $k-\epsilon$ [12]. Pada penelitian ini mengadopsi model turbulensi $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) Menter. Model ini dilengkapi dengan fungsi dinding $k-\omega$, yang dirancang khusus untuk memodelkan secara akurat daerah sekitar dinding dan menangkap karakteristik aliran turbulen secara efektif. Selain itu, model ini juga mengintegrasikan model $k-\epsilon$, yang lebih cocok untuk pemodelan aliran jauh dari dinding. Kombinasi kedua model ini dalam $k-\omega$ SST memastikan representasi turbulensi yang menyeluruh di seluruh bidang aliran [13].

2.5.2 Model Kekasaran Permukaan Berbasis Modified Wall Function

Metode modified wall function menyesuaikan persamaan fungsi dinding yang semula untuk permukaan halus dengan menambahkan penggeser kecepatan (ΔU^+) guna merepresentasikan efek kekasaran. Pendekatan ini meningkatkan akurasi prediksi profil kecepatan dan distribusi tegangan gesek di dekat dinding. Menurut Demirel dkk [14], metode ini efektif untuk menghitung peningkatan hambatan gesek akibat kekasaran dengan mempertimbangkan skala dan fungsi kekasaran yang sesuai. Keunggulannya terletak pada efisiensi komputasi karena tidak perlu menyelesaikan seluruh lapisan batas secara langsung dan dapat menggunakan mesh yang lebih kasar tanpa kehilangan akurasi [15]. Selain itu, metode ini fleksibel untuk geometri kompleks seperti lambung kapal, memungkinkan analisis efek kekasaran tanpa diskritisasi permukaan yang sangat detail.

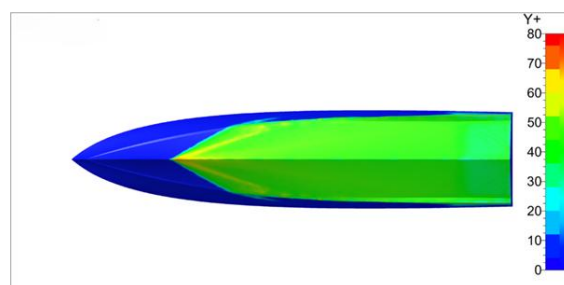


Gambar 2. Kekasaran Butir Pasir Ekuivalen (k_s)

2.5.3 Komputasi Numerik

Distribusi nilai wall Y^+ pada permukaan lambung kapal menunjukkan bahwa resolusi boundary layer telah memenuhi kriteria untuk model turbulensi $k-\omega$ SST. Dengan rentang nilai Y^+ antara 0 hingga 100 dan dominan pada kisaran 30–60, mesh di area dekat dinding dinyatakan memadai untuk mensimulasikan profil kecepatan secara akurat. Kondisi ini memastikan prediksi

hambatan gesek yang andal serta membuktikan bahwa desain mesh dan konfigurasi model turbulensi telah sesuai dengan standar ITTC[16], sehingga hasil simulasi hambatan total kapal akibat kekasaran biofouling valid secara numerik.



Gambar 3. Visualisasi Wall Y^+

2.5.4 Geometri dan Boundary Condition

Penentuan ukuran domain komputasi yang tepat berperan penting dalam meningkatkan keakuratan simulasi numerik. Dengan menggunakan domain berbentuk persegi panjang berukuran $3.5 \times 3.5 \times 3.0$ LPP dan penerapan bidang simetri pada sumbu memanjang kapal, penelitian ini berhasil mengoptimalkan efisiensi komputasi. Pendekatan tersebut memungkinkan analisis aliran di sekitar lambung kapal Planing dilakukan secara akurat tanpa memerlukan pemodelan seluruh badan kapal, sehingga waktu dan biaya komputasi dapat dikurangi secara signifikan.

Tabel 4. Dimensi Virtual Towing Tank

Parameter (m)	Background	Overset
Length	1 L from FP	0.2L from FP
	2.5 L from AP	0.2L from AP
Height	1 L from deck	0.75H from H
	2 L from keel	0.75H from keel
Breadth	1.5 L from symmetry	1B from symmetry

Selanjutnya, kondisi batas komputasi ditetapkan agar menyerupai kondisi sebenarnya. Dengan demikian, virtual towing tank dibagi menjadi beberapa zona atau area sesuai dengan fungsi dan karakteristik masing-masing.

Tabel 5. Dimensi Virtual Towing Tank

Parameter	Boundary	Type
Background	Top	Velocity inlet
	Bottom	Velocity inlet
	Side	Velocity inlet
	Inlet	Velocity inlet
	Outlet	Pressure outlet
	Symmetry	Symmetry plane
Overset	Block surface	Overset mesh
	Hull	No-slip wall
	Symmetry	Symmetry plane

Dimensi domain komputasi ditunjukkan pada Gambar 3.4, dengan jarak 1L dari FP, 2.5L dari AP, serta tinggi masing-masing 1L dari H dan 2L dari Keel. Setiap batas domain ditetapkan berdasarkan kondisi fisik aliran. Karena fluida memasuki domain melalui beberapa sisi, maka bagian depan, atas, samping, dan bawah model kapal ditetapkan sebagai *velocity inlet*. Mengingat simulasi dilakukan pada setengah badan kapal, sisi yang sejajar dengan garis tengah kapal ditentukan sebagai *symmetry plane* untuk menunjukkan kesamaan antara sisi kiri dan kanan model. Sementara itu, bagian belakang domain diatur sebagai *pressure outlet* karena berfungsi sebagai area keluarnya aliran tekanan.

Dalam penelitian ini, *overset mesh* diterapkan untuk mensimulasikan gerakan kompleks kapal, seperti *trim* dan *heave (sinkage)*, menggunakan metode *computational fluid dynamics (CFD)*. +, mesh dapat dibuat di sekitar model kapal dan digerakkan relatif terhadap *background mesh* tanpa menimbulkan masalah pada keterhubungan atau distorsi sel.

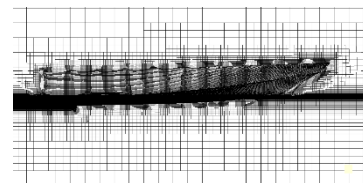
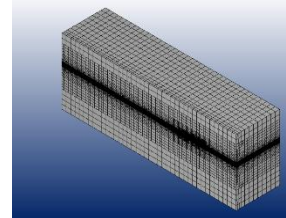
Domain *overset* memiliki panjang 0.2L dari FP hingga 0.2L dari AP, dengan tinggi 0.75H dari deck hingga 0.75H dari keel, serta lebar 1B dari bidang *symmetry*. Penerapan *overset* ini bertujuan untuk menganalisis pergerakan yang terjadi pada badan kapal, sehingga penentuan dimensinya harus mencakup seluruh area kapal yang akan disimulasikan.

2.5.5 Meshing

Kerapatan mesh difokuskan pada area objek dan permukaan air untuk menjaga akurasi dengan waktu

komputasi lebih efisien. Metode *mesh refinement* diterapkan untuk memperhalus mesh di sekitar *hull* dengan kepadatan lebih tinggi pada permukaan dan garis kapal.

Pergerakan geometri dinamis dalam CFD ditangani menggunakan teknik *morphing mesh*, yang memungkinkan perubahan bentuk tanpa memindahkan domain. Proses ini dilakukan melalui interpolasi antara model sumber dan target, dengan bentuk ekstrem dapat diperoleh menggunakan koordinat Laplace.



Gambar 4. Visualisasi Mesh

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

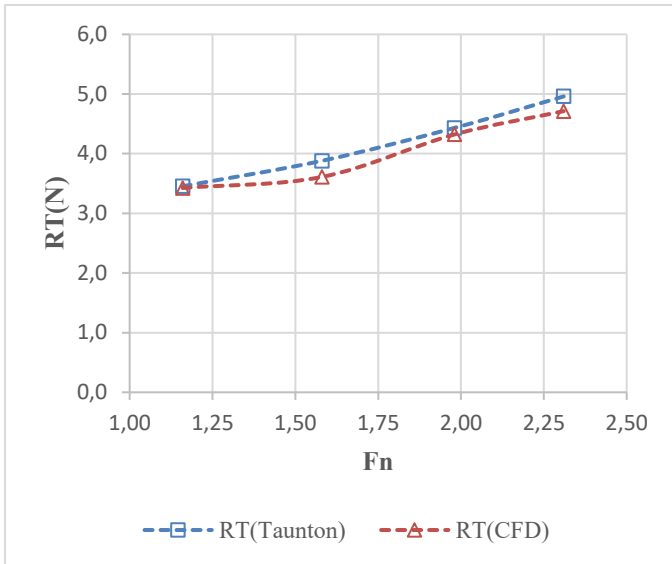
Pada hasil dan pembahasan ini dijelaskan mengenai validasi model kapal yang akan digunakan, menentukan jumlah mesh yang optimal, dan hasil analisis kekasaran permukaan terhadap komponen hambatan pada kapal seperti hambatan total, hambatan gesek, dan hambatan residu serta pengaruh kekasaran terhadap gelombang yang terbentuk.

3.1 Pembahasan Hasil Validasi Hambatan

Setelah segala aspek telah memenuhi kriteria, selanjutnya dilakukan validasi hambatan total. Hambatan total dari kapal skala model yang disimulasi pada CFD harus memiliki selisih <10 % dari data hambatan kapal skala model yang telah diuji oleh peneliti sebelumnya (eksperimen). Data Validasi hambatan total kapal skala model pada CFD terhadap hambatan total pada eksperimen sebelumnya dapat dilihat pada Tabel dan bentuk grafik dari hambatan total keduanya dapat dilihat pada Gambar

Tabel 6. Validasi Hambatan Total Kapal Planing

Fn	V	R _T Taunton (N)	R _T CFD (N)	Selisih (%)	Keterangan
1.16	5.14	3.454	3.425	0.03	Valid
1.58	7.00	3.880	3.610	0.27	Valid
1.98	8.77	4.432	4.322	0.11	Valid
2.31	10.23	4.960	4.713	0.25	Valid



Gambar 5. Grafik Validasi Hambatan Total Kapal Planing Model C

Berdasarkan hasil validasi data hambatan total kapal model simulasi Planing yang dianalisis menggunakan *Software Numeca Fine Marine*, diperoleh selisih kurang dari 5% dibandingkan dengan data eksperimen sebelumnya. Selisih yang minimal ini mengonfirmasi akurasi tinggi simulasi numerik terhadap hasil eksperimen, sekaligus menguatkan validitas model komputasional yang digunakan. Grafik perbandingan hambatan total dari kedua metode menunjukkan pola *kurva* yang saling berdekatan, mengindikasikan konsistensi dan keselarasan hasil yang baik. Hal ini membuktikan kemampuan handal simulasi CFD simulasi dalam merepresentasikan performa aktual kapal. Dengan tingkat validasi yang memuaskan, kapal planing (simulasi) telah memenuhi kriteria kelayakan untuk digunakan dalam studi variasi lanjutan, termasuk analisis pengaruh kekasaran permukaan dan variasi kecepatan kapal.

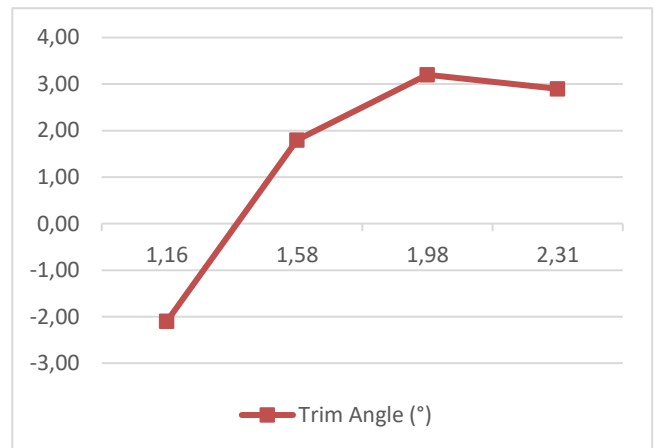
3.2 Peningkatan Trim dan Heave Pada Kapal Planing

3.2.1 Analisis Perubahan Trim

Tabel 7. Perubahan Trim Kapal Planing Model C

Fr	Trim Angle (°)	% Δ Trim	Karakteristik
1.16	-2.1	0%	Bow down
1.58	+1.8	+286%	Transisi positif
1.98	+3.2	+252%	Stabil planing
2.31	+2.9	-9%	Optimalisasi

Kapal menunjukkan kondisi bow down dengan sudut trim $-2,1^\circ$, yang menandakan bagian haluan berada lebih rendah dibanding buritan. Kondisi ini merupakan ciri transisi awal menuju fase planing, di mana kapal masih dipengaruhi oleh hambatan gelombang. Saat kecepatan meningkat ke $Fr = 1.58$, terjadi perubahan signifikan dengan sudut trim meningkat menjadi $+1,8^\circ$ (naik 286%), menandakan kapal mulai memasuki fase planing penuh, ketika gaya angkat dinamis mulai dominan dan mengangkat haluan. Pada $Fr = 1.98$, sudut trim mencapai puncak $+3,2^\circ$ (kenaikan 252%), menunjukkan kapal berada pada fase planing stabil dengan distribusi tekanan optimal serta efisiensi hidrodinamik tertinggi. Namun, pada kecepatan maksimum ($Fr = 2.31$), sudut trim menurun sebesar 9% menjadi $+2,9^\circ$, menandakan adanya mekanisme penyesuaian alami (*self-regulation*), di mana kapal menyesuaikan posisi trim untuk mengurangi hambatan tekanan dan memaksimalkan efisiensi gerak, sehingga tercapai keseimbangan antara gaya angkat dan hambatan total pada trim optimal.



Gambar 6. Grafik Perubahan Trim

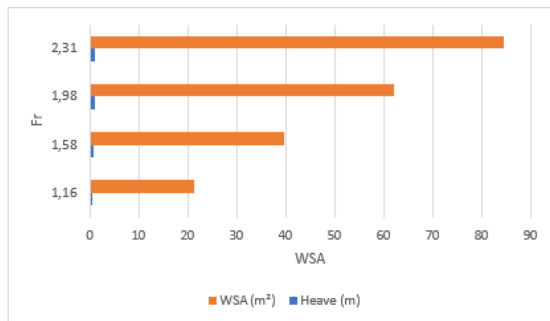
3.2.2 Analisis Perubahan Heave

Tabel 8. Hasil Perubahan Heave

Fr	Heave (m)	WSA (m ²)	% Δ WSA	Dynamic Lift
1.16	0.45	21.349	0%	Mulai terbentuk
1.58	0.82	39.608	+85%	Meningkat
1.98	1.15	62.201	+191%	Optimal
2.31	1.08	84.662	+296%	Stabil

Analisis perubahan heave pada kapal planing menunjukkan hubungan erat antara peningkatan kecepatan dengan perubahan posisi vertikal kapal dan luas permukaan basah (WSA). Pada $Fr = 1.16$, kapal mengalami heave 0,45 m dengan WSA 21,349 m², menandakan awal terbentuknya gaya angkat dinamis.

Saat kecepatan naik ke $Fr = 1.58$, heave meningkat menjadi 0,82 m dan WSA naik 85% menjadi 39,608 m^2 , menunjukkan gaya angkat dinamis mulai dominan. Pada $Fr = 1.98$, heave mencapai 1,15 m dan WSA 62,201 m^2 (naik 191%), menandakan fase planing penuh dengan efisiensi hidrodinamik optimal. Namun pada $Fr = 2.31$, heave menurun menjadi 1,08 m meski WSA naik hingga 84,662 m^2 (296%), mengindikasikan fase stabilisasi, di mana kapal mencapai keseimbangan dinamis dengan gaya angkat yang efisien dan gerakan vertikal yang terkendali.



Gambar 7. Hasil Perubahan Heave Pada Kapal Planing Tipe C

3.2.3 Pengaruh tinggi kekasaran Biofouling terhadap hambatan dan kecepatan kapal planing

Analisis pengaruh variasi tinggi kekasaran biofouling terhadap performa kapal planing menunjukkan bahwa kekasaran permukaan lambung berperan signifikan terhadap hambatan total dan kinerja kapal. Hasil simulasi pada Froude Number 1.16–2.31 memperlihatkan pola sistematis bahwa peningkatan kekasaran menyebabkan kenaikan hambatan yang nyata.

Tabel 9. Hasil Kekasaran Biofouling terhadap Hambatan Total pada *Various Froude Number*

Ks (μm)	Fr 1.16	Fr 1.58	Fr 1.98 Rt (N)	Fr 2.31 Rt (N)	%ΔRT Rata-rata
	Rt (N)	Rt (N)			
0	3.378	4.582	6.098	7.138	0%
30	1.339	2.484	3.901	5.310	-56.4%
100	1.749	3.244	5.095	6.935	-41.9%
300	2.225	4.128	6.482	8.823	-24.4%
1000	2.889	5.360	8.418	11.458	0%
3000	3.661	6.793	10.667	14.519	+28.3%
10000	4.739	8.792	13.807	18.793	+67.9%

Simulasi menunjukkan bahwa pada kekasaran rendah (30–300 μm), hambatan total justru menurun hingga 56,4% dibanding permukaan halus. Hal ini disebabkan oleh mekanisme *tripping boundary layer*, di mana kekasaran ringan mempercepat transisi aliran menjadi turbulen sehingga lapisan batas lebih stabil dan separasi aliran berkurang. Kekasaran biofouling mikro dengan ukuran 30–300 μm berperan sebagai *boundary layer trip* yang mempercepat transisi lapisan batas dari laminar menuju turbulen. Menurut teori lapisan batas oleh Schlichting & Gersten [18], lapisan batas turbulen memiliki momentum yang lebih besar di dekat dinding sehingga lebih mampu melawan gradien tekanan negatif dan mempertahankan keterikatan aliran pada permukaan lambung. Dengan terjadinya transisi dini ini, kecenderungan pemisahan aliran pada bagian bawah lambung kapal planing dapat ditekan secara signifikan.

Pengurangan pemisahan aliran tersebut berdampak langsung pada penurunan hambatan tekanan, yang pada regime planing lebih dominan dibandingkan hambatan gesek. Meskipun lapisan batas turbulen secara teoritis meningkatkan hambatan gesek, kontribusi peningkatan gesekan ini relatif kecil dibandingkan penurunan hambatan tekanan yang dihasilkan oleh aliran yang lebih stabil dan melekat. Oleh karena itu, efek bersih dari kekasaran biofouling mikro dalam rentang 30–300 μm dapat berupa penurunan hambatan total yang signifikan, sebagaimana ditunjukkan oleh hasil penurunan sebesar 56,4%.

Studi mengenai pengaruh kekasaran permukaan terhadap aliran turbulen menunjukkan bahwa kekasaran dengan skala kecil relatif terhadap ketebalan lapisan batas tidak selalu meningkatkan hambatan total. Flack et al.[19] menyatakan bahwa kekasaran mikro cenderung berfungsi sebagai pemicu transisi aliran dibandingkan sebagai sumber drag tambahan, terutama pada aliran berkecepatan tinggi. Dalam konteks kapal planing, ketebalan lapisan batas yang relatif besar menyebabkan kekasaran 30–300 μm masih berada dalam kategori *hydraulically small roughness*, sehingga efek dominannya adalah pengendalian transisi aliran.

Selain itu, Schultz [20] menegaskan bahwa biofouling mikro memberikan dampak yang berbeda dibandingkan fouling makro. Biofouling mikro tidak selalu meningkatkan hambatan kapal, dan pada kondisi tertentu justru dapat memperbaiki performa hidrodinamika dengan menstabilkan aliran di dekat permukaan. Hal ini mendukung temuan bahwa kekasaran biofouling mikro dapat menghasilkan efek positif pada kapal planing melalui mekanisme *tripping boundary layer* dan pengurangan hambatan tekanan.

Dengan demikian, penurunan hambatan total sebesar 56,4% dapat dijelaskan secara ilmiah sebagai hasil dari kombinasi antara transisi lapisan batas yang lebih awal, berkurangnya pemisahan aliran, dan dominannya penurunan hambatan tekanan dibandingkan peningkatan hambatan gesek. Argumen

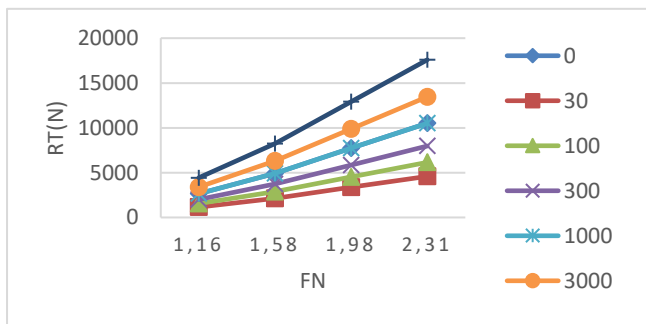
ini memperkuat kesimpulan bahwa pengaruh biofouling mikro tidak dapat digeneralisasi sebagai faktor peningkat hambatan, melainkan sangat bergantung pada skala kekasaran dan regime aliran kapal.

Namun, pada kekasaran tinggi (>1000 μm), hambatan meningkat secara progresif hingga 67,9% pada kondisi biofouling berat ($K_s = 10000 \mu\text{m}$).

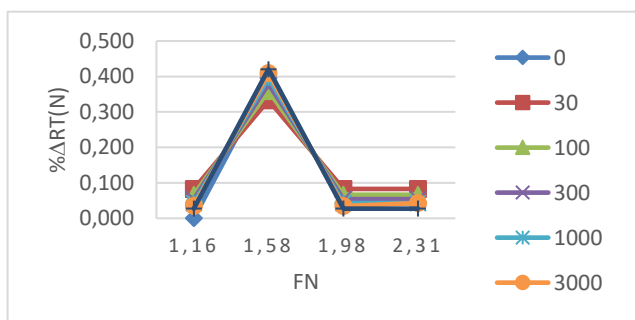
Tabel 10. Dampak Kekasaran terhadap Kebutuhan Daya dan Koefisien Hambatan

K_s (μm)	CF ($\times 10^{-3}$)	% Δ CF	RF (kW) Fr 1.16	% Δ RF	CT ($\times 10^{-3}$)	% Δ CT
0	1.3	0%	11,616	0%	2.100	0%
30	3.4	+161%	6,298	+129%	1.968	-6.3%
100	4.6	+254%	8,225	+71%	2.011	-4.2%
3000	5.9	+354%	10,463	+32%	2.052	-2.3%
1000	7.8	+500%	13,589	0%	2.100	0%
3000	10.0	+669%	17,219	-22%	2.146	+2.2%
10000	13.1	+908%	22,288	-40%	2.200	+4.8%

Analisis menunjukkan bahwa koefisien gesek (CF) meningkat tajam hingga 908% pada kondisi biofouling ekstrem, sedangkan koefisien hambatan total (CT) hanya naik 4,8%. Perbedaan ini menandakan bahwa pada kapal planing, pressure drag tetap menjadi komponen dominan, meskipun friction drag meningkat signifikan akibat kekasaran permukaan.



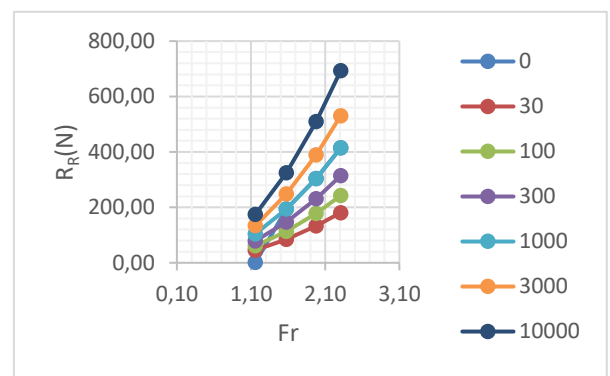
Gambar 8. Grafik Hambatan Total Variasi Kekasaran Kapal Planing Model C



Gambar 9. Grafik Persentase Peningkatan Hambatan Total Variasi Kekasaran Kapal Planing Model C

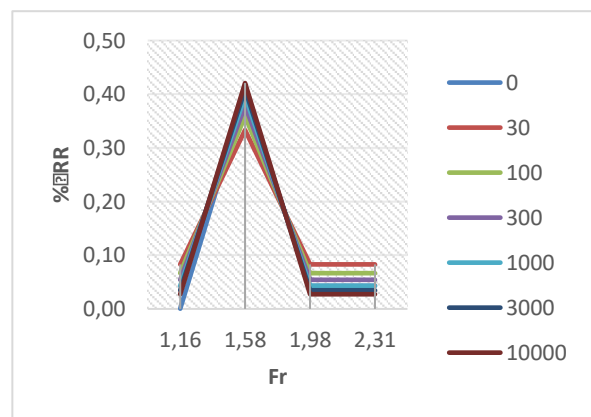
3.2.4 Pengaruh Kekasaran Biofouling Terhadap Aliran Air Disekitar Kapal Planing Model C

Hambatan residu kapal terdiri dari hambatan gelombang (RW) dan hambatan viskos (RVP), yang bersama-sama menentukan efisiensi hidrodinamis kapal. Berdasarkan analisis CFD Numeca pada kapal planing model C ($F_n 1,16-2,31$; kekasaran $0-10.000 \mu\text{m}$), nilai hambatan residu meningkat seiring kenaikan Froude number pada semua tingkat kekasaran. Namun, persentase peningkatan hambatan residu justru menurun saat kekasaran bertambah. Penurunan terbesar terjadi pada $k_s = 10.000 \mu\text{m}$, $F_n = 2,31$ dengan $-14,9\%$,



Gambar 10. Grafik Hambatan Residu Variasi Kekasaran Kapal Model C

Kontur tekanan dinamis menggambarkan distribusi tekanan pada lambung kapal saat bergerak di air. Terlihat bahwa permukaan kasar menghasilkan tekanan lebih tinggi di bagian depan dan tengah lambung dibanding permukaan halus. Peningkatan ini disebabkan oleh gangguan aliran laminar akibat kekasaran, yang meningkatkan tekanan lokal dan berpotensi menambah hambatan.



Gambar 11. Grafik Persentase Peningkatan Hambatan Residu Variasi kekasaran Kapal Planing Model C

Di area buritan, kontur tekanan pada permukaan kasar sedikit lebih rendah dibandingkan permukaan halus. Hal ini terjadi karena aliran turbulen akibat kekasaran membantu menurunkan tekanan di bagian belakang lambung. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya, yang juga menunjukkan pengaruh kekasaran permukaan terhadap distribusi tekanan dinamis pada lambung kapal[17].

3.2.5 Pengaruh Kekasaran Biofouling Terhadap Performa Kapal Planing

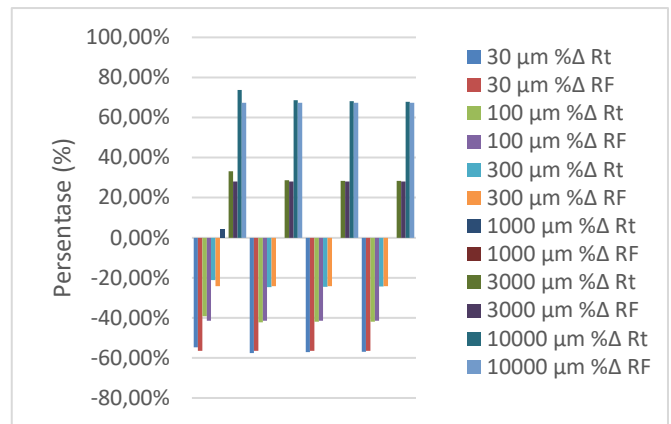
Analisis pada Tabel 3.8 menunjukkan bahwa peningkatan kekasaran permukaan akibat biofouling (Ks 0–10.000 μm) secara signifikan meningkatkan hambatan total (Rt) dan koefisien hambatan total (CT) pada semua Froude number (Fr).

Tabel 11. Pengaruh Kekasaran Biofouling terhadap Hambatan Total (Rt) pada Berbagai Kecepatan

Kekasaran (Ks)	Parameter	Fr 1.16	Fr 1.58	Fr 1.98	Fr 2.31
30 μm	% Δ Rt	-54.7%	-57.5%	-57.1%	-56.9%
	% Δ RF	-56.4%	-56.4%	-56.4%	-56.4%
100 μm	% Δ Rt	-39.2%	-42.3%	-42.0%	-41.9%
	% Δ RF	-41.5%	-41.5%	-41.5%	-41.5%
300 μm	% Δ Rt	-21.2%	-24.7%	-24.5%	-24.4%
	% Δ RF	-24.2%	-24.2%	-24.2%	-24.2%
1000 μm	% Δ Rt	+3.9%	0.0%	0.0%	0.0%
	% Δ RF	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3000 μm	% Δ Rt	+33.1%	+28.7%	+28.4%	+28.3%
	% Δ RF	+28.1%	+28.1%	+28.1%	+28.1%
10000 μm	% Δ Rt	+73.8%	+68.7%	+68.1%	+67.9%
	% Δ RF	+67.3%	+67.3%	+67.3%	+67.3%

Catatan: Nilai persentase dihitung terhadap kondisi dasar Ks=1000 μm , yang dalam perhitungan ini disetarakan dengan kondisi "bersih" (0 μm) untuk beberapa set data

Biofouling pada lambung kapal planing menurunkan efisiensi propulsi dengan meningkatkan hambatan total akibat kenaikan hambatan gesek (ΔC_f). Contohnya, pada Fr 1,58, RF naik 67,3% dari 491.729 N menjadi 822.465 N. Dampak ini terlihat di semua kecepatan, meningkatkan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional.



Gambar 12. Persentase Kekasaran Biofouling Terhadap Performa Kapal Planing Model C

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik Hidrodinamika Kapal Planing Model C menunjukkan hubungan dinamis antara kecepatan dengan performa, dimana hambatan total meningkat hingga 300% pada Fr 2.31 dibandingkan Fr 1.16. Kapal mengalami transisi dari kondisi bow down (-2.1°) ke trim positif (+3.2°) dengan kemampuan *self-regulation* pada kecepatan tinggi untuk meminimalkan hambatan meskipun WSA meningkat 296%.
2. Pengaruh Kekasaran Biofouling bersifat *non-linier*, dimana kekasaran ringan (30-300 μm) justru mengurangi hambatan hingga 56.4% akibat efek tripping boundary layer, sedangkan kekasaran berat ($\geq 1000 \mu\text{m}$) meningkatkan hambatan total hingga 67.9% dengan peningkatan koefisien gesek mencapai 908%.
3. Perubahan Pola Aliran akibat biofouling ditandai dengan redistribusi tekanan dinamis (meningkat di haluan, menurun di buritan) dan reduksi energi gelombang meskipun terjadi peningkatan disipasi energi. Fenomena unik terlihat pada penurunan persentase hambatan residu dari 4,88% menjadi 6,32% pada Fr 2,31.
4. Dampak terhadap Performa menunjukkan bahwa biofouling berat menurunkan efisiensi propulsi secara drastis, memerlukan tambahan daya hingga 67.3% untuk mempertahankan kecepatan yang sama, yang berimplikasi pada peningkatan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional secara signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mohamad Ayob, Ahmad F., Ahmad F. Mohamad Ayob, Tapabrata Ray, and Warren Smith. "A hydrodynamic preliminary design optimization framework for high speed planing craft." *Journal of Ship Research* 56, no. 01 (2012): 35-47
- [2] IMO, "MEPC.207(62) Guidelines for the control and management of ships' biofouling to minimize the transfer of invasive aquatic specie Annex 26, 1–25.," 2011.
- [3] Ketchum, B. H. Factors Influencing the Attachment and Adherence of Fouling Organisms. In W. H. Institution, *Marine Fouling and its Prevention Wisconsin: George Banta Publishing Company.* (1952): 230.
- [4] A. Farkas, N. Degiuli, and I. Martić, "An investigation into the effect of hard fouling on the ship resistance using CFD," *Applied Ocean Research*, vol. 100, no. March, 2020, doi: 10.1016/j.apor.2020.102205
- [5] A. Kurniawan Yusim, "Studi Eksperimental Pengaruh Pertumbuhan Biofouling Pada Lambung Kapal Terhadap Skin Friction Drag," 2016.
- [6] A. F. Molland, S. R. Turnock, and D. A. Hudson, *Ship Resistance and Propulsion*, Second. Cambridge University Press, 2017. doi: 10.1017/9781316494196.
- [7] J. Nikuradse, "Laws of flow in rough pipes [English translation of Stromungsgesetze in rauhen Rohren]. VDI-Forschungsheft 361. Beilage zu 'Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens' [Translation from NACA Technical Memorandum 1292]," *Laws of flow in rough pipes*, vol. 14, no. 8, pp. 399–405, Aug. 1933, doi: 10.1063/1.1715007.
- [8] F. Hama, "Boundary-layer characteristics for smooth and rough surfaces.," *Transactions - The Society of Naval Architects and Marine Engineers* 62, 333–358., 1954.
- [9] D. J. Taunton, D. A. Hudson, and R. A. Sheno, "Characteristics of A series of high speed hard chine planing hulls - Part 1: Performance in calm water," *Trans. R. Inst. Nav. Archit. Part B Int. J. Small Cr. Technol.*, vol. 152, no. 2, 2010, doi: 10.3940/rina.ijst.2010.b2.96.
- [10] M. P. Schultz, "Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering," *Biofouling*, vol. 23, no. 5, pp. 331–341, 2007, doi: 10.1080/08927010701461974.
- [11] C. Hirsch, *Numerical Computation of Internal & External Flow*, 2nd ed. Burlington: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [12] J. E. Bardina, P. G. Huang, and T. J. Coakley, "Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development. 110446, pp. 8–20, 1997.
- [13] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994, doi: 10.2514/3.12149
- [14] Y. K. Demirel, S. Song, O. Turan, and A. Incecik, "Practical added resistance diagrams to predict fouling impact on ship performance," *Ocean Engineering*, vol. 186, no. April, p. 106112, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106112.
- [15] B. Niebles Atencio and V. Chernoray, "A resolved RANS CFD approach for drag characterization of antifouling paints," *Ocean Engineering*, vol. 171, no. November 2018, pp. 519–532, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.11.022.
- [16] ITTC, "9.1.0 Practical Guidelines for Ship CFD Applications," *ITTC – Recommended Procedures and Guidelines ITTC*, pp. 1–8, 2011.
- [17] S. Song, Y. K. Demirel, and M. Atlar, "An investigation into the effect of biofouling on the ship hydrodynamic characteristics using CFD," *Ocean Engineering*, vol. 175, no. January, pp. 122–137, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.056.
- [18] Schlichting, H., & Gersten, K. *Boundary-Layer Theory*. Springer, 2017.
- [19] Flack, K. A., Schultz, M. P., & Barros, J. M. On the drag associated with surface roughness in turbulent boundary layers. *Physics of Fluids*, 17(3), 035103,(2005).
- [20] Schultz, M. P. Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. *Biofouling*, 20(5–6), 331–341,(2004)