



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisa *Leading Edge Protuberances* pada *Fully Submerged Hydrofoil* Terhadap Gaya Angkat dan Hambatan Kapal KH-017 Menggunakan Metode CFD

Muhammad Azizul Miftah¹⁾, Deddy Chrismianto¹⁾, Untung Budiarto¹⁾

Laboratorium Komputer

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

E-mail: muhammadazizulmiftah@gmail.com, deddychrismianto@yahoo.co.id, untungb@undip.ac.id

Abstrak

Gas buang hasil pembakaran mesin kapal berperan dalam pemanasan global. Konversi energi fosil menjadi energi terbarukan sudah mulai diterapkan oleh banyak negara. Solarboat adalah salah satu upaya untuk mengurangi emisi sisa pembakaran mesin kapal. Untuk memperoleh efisiensi energi yang baik, solarboat perlu dimodifikasi dengan melakukan penambahan *leading edge protuberances hydrofoil*. Penggunaan *leading edge protuberances hydrofoil* terinspirasi dari sirip paus bungkuk (*Megaptera novaengliae*) yang mampu bermanuver dengan baik meskipun memiliki ukuran tubuh yang besar. Penelitian ini memiliki tujuan memperoleh nilai hambatan paling kecil dan gaya angkat paling besar dari setiap variasi model *leading edge protuberances hydrofoil* dengan konfigurasi tandem. Metode yang digunakan untuk analisis adalah *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dengan menggunakan software *Tdyn 14.1.01*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa hambatan total terendah terdapat pada model 8M dengan *angle of attack* 3° yaitu sebesar 217,01 N atau mampu mengurangi hambatan hingga 28,52% di *froude number* 0,737. Model 4L memiliki *lift force* terbesar yaitu 3008,74 N atau 75,25% lebih besar dibandingkan nilai minimum *lift* pada *froude number* 0,921.

Kata Kunci : *leading edge protuberances*, KH-017, *hydrofoil*, hambatan, *lift force*, *CFD (Computational Fluid Dynamic)*

1. PENDAHULUAN

Dunia pelayaran kapal internasional tercatat pada tahun 2012 menyumbang 2.2% emisi gas CO₂ dari total emisi dan diperkirakan akan meningkat 50% sampai 250% pada tahun 2050 {Formatting Citation}. Emisi yang berlebihan akan mengakibatkan pemanasan global. Dalam rangka mengurangi emisi akibat pelayaran kapal dilakukan konversi energi dari energi fosil menjadi energi terbarukan.

Jepang menjadi salah satu negara yang menyelenggarakan kompetisi *solarboat* guna mendorong program penurunan emisi. *Solarboat* menjadi lebih ramah lingkungan karena menggunakan energi dari matahari sebagai sumber daya penggerak utama. Di dalam kompetisi *solarboat* sebuah kapal beradu kecepatan dan dituntut memiliki efisiensi energi

yang tinggi. Hambatan kapal menjadi faktor penting dalam menentukan energi yang dibutuhkan kapal. Untuk meningkatkan efisiensi energi sebuah kapal dapat dilengkapi dengan *hydrofoil*.

Beberapa tahun terakhir *leading edge protuberances* pada *airfoil* dan *hydrofoil* mulai diterapkan dalam teknologi modern. Menurut Fish et. al. *leading edge protuberances* memiliki bentuk menyerupai sirip paus bungkuk (*Megaptera novaengliae*) [2]. Penelitian yang dilakukan Miklosovic et. al pada skala model *hydrofoil* dengan variasi *leading edge protuberances* terbukti meningkatkan gaya angkat sebesar 6% dibandingkan *baseline hydrofoil* [3]. Hambatan total KMP.CATAMARAN tanpa *hydrofoil* menjadi berkurang sebesar 48,6% ketika dipasang *leading edge protuberances hydrofoil* pada badan kapal [4].

Tujuan dari penelitian ini adalah meningkatkan performa *solarboat* KH-017 dengan melakukan penambahan *leading edge protuberances hydrofoil*. Variasi dilakukan dengan *wavelength* 0,5c dan 0,25c serta variasi amplitudo 0,025c, 0,05c dan 0,12c pada *angle of attack* 3°, 3,5° dan 4° dianalisis pada kecepatan tertentu. Penentuan amplitudo dan *wavelength* pada model penelitian ini didasarkan pada nilai yang berkaitan dengan karakteristik paus bungkuk [5]. *Hydrofoil* akan dianalisis menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic (CFD)* untuk menentukan gaya angkat dan hambatan dari setiap desain *leading edge protuberances* sehingga dapat ditentukan desain yang memiliki gaya angkat paling besar dan hambatan paling kecil.

Penelitian ini merupakan pengembangan lebih lanjut dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya seperti dijelaskan pada tabel 1. Penelitian sebelumnya hanya berupa analisis pada karakteristik *foil*. Sedangkan dalam penelitian ini *leading edge protuberances hydrofoil* dipasang pada kapal *monohull* untuk dapat dilihat pengaruhnya terhadap hambatan dan gaya angkat.

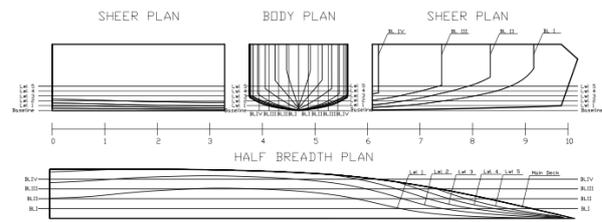
Tabel 1. Perbandingan Penelitian *Leading Edge Protuberances Hydrofoil*

Item	Miklosovic	Gagan	My Research
<i>Airfoil</i>	✓	-	-
<i>Hydrofoil</i>	-	✓	✓
<i>Experiment</i>	✓	-	-
<i>CFD</i>	-	✓	✓
<i>NACA 002</i>	✓	-	-
<i>NACA 63(2) - 615</i>	-	✓	✓
<i>Monohull</i>	-	-	✓
<i>Catamaran</i>	-	✓	-
<i>AoA < 3°</i>	✓	✓	-
<i>AoA 3° - 4°</i>	✓	-	✓
<i>AoA > 4°</i>	✓	-	-

2. METODE

2.1. Objek Penelitian

Kapal KH-017 menjadi objek penelitian dengan melakukan penambahan variasi *leading edge protuberances* pada *fully submerged hydrofoil*. Data kapal KH-017 berasal dari Tim Ksatria Hydros Universitas Diponegoro yang merancang *solarboat* untuk mengikuti kompetisi di Jepang. Pada gambar 1 menjelaskan *linesplan* dan tabel 2 menjelaskan data ukuran utama kapal KH-017.



Gambar 1. *Linesplan* KH-017

Tabel 2. Dimensi Kapal KH-017

No	Nama	Ukuran	Satuan
1	<i>Length Over All (LOA)</i>	3,20	m
2	<i>Length of Waterline (Lwl)</i>	3,18	m
3	<i>Breadth (B)</i>	0,60	m
4	<i>Draft (T)</i>	0,15	m
5	<i>Depth (H)</i>	0,40	m
6	<i>Service Speed (Vs)</i>	10	Knots
7	<i>Displacement</i>	0,175	Ton

2.2. Data Hidrostatik Kapal

Tabel 3 menunjukkan data hidrostatik kapal KH - 017 yang diperoleh dari *software Maxsurf Modeler*.

Tabel 3. Data Hidrostatik Kapal KH - 017

No	Nama	Ukuran	Satuan
1	<i>Displacement</i>	0,175	Ton
2	<i>Volume</i>	0,175	m ³
3	<i>Length of Waterline (Lwl)</i>	3,18	m
4	<i>Breadth (B)</i>	0,60	m
5	<i>Draft (T)</i>	0,15	m
6	<i>Waterplane Area (WPA)</i>	1,211	m ²
7	<i>LCF length</i>	1,247	m
8	<i>VCB</i>	0,085	m
9	<i>KB</i>	0,085	m
10	<i>Ton Per cm (TPC)</i>	0,012	Ton/cm

2.3. Perubahan Sarat Kapal

Perubahan sarat kapal dapat terjadi apabila displacement kapal bertambah atau berkurang. Gaya angkat yang bekerja dari bagian bawah kapal juga dapat menyebabkan terjadi perubahan sarat kapal. Berikut adalah persamaan untuk menghitung perubahan sarat kapal [6] :

$$\Delta H = \frac{w}{TPC} \quad (1)$$

Dimana ΔH adalah *heave* atau perubahan sarat kapal (cm), w adalah gaya angkat kapal dalam ton, dan TPC adalah beban yang dibutuhkan untuk mengubah sarat kapal sebesar 1 centimeter (Ton/cm).

2.4. Momen Inersia *Pitching* Kapal

Momen Inersia *Pitching* kapal dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut [7] :

$$I_{yy} = \frac{1}{g} \sum [w_i (x_i^2 + z_i^2)] \quad (2)$$

Dimana I_{yy} adalah momen inersia *pitching* kapal (kg.m^2), g adalah percepatan gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/s}^2$), w_i adalah berat tiap fraksi (ton), x_i adalah jarak memanjang dari titik berat tiap *section* ke titik berat kapal (m), dan z_i adalah jarak vertikal dari titik berat tiap *section* ke titik berat kapal (m).

2.5. Koreksi Sudut *Trim*

Perhitungan sudut *trim* kapal menggunakan persamaan berikut [8] :

$$\Delta\alpha = \frac{M}{\rho g A_2 w} \quad (3)$$

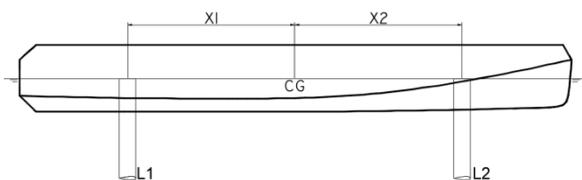
Dimana $\Delta\alpha$ adalah sudut *trim* kapal dalam derajat, M adalah momen *trim* (N.m), ρ adalah massa jenis fluida (1000 kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/s}^2$), $A_2 w$ adalah Momen inersia pada sumbu Y (kg.m^2).

2.6. Peletakan *Foil*

Analisa *equilibrium* kapal diperlukan untuk menentukan titik berat kapal sehingga dapat beroperasi pada kondisi setimbang. Maka dengan rumus berikut peletakan *foil* dapat ditentukan [9].

$$\begin{aligned} L_1 + L_2 &= w \\ L_1 X_1 &= L_2 X_2 \end{aligned} \quad (4)$$

Dimana L_1 adalah gaya angkat *foil* 1 (N), L_2 adalah gaya angkat *foil* 2 (N), X_1 adalah jarak antara *foil* 1 ke titik berat kapal dalam meter, dan X_2 jarak antara *foil* 2 ke titik berat kapal dalam meter.



Gambar 2. Peletakan *Foil* [9]

2.7. Ukuran *Foil*

Seri NACA 63(2)-615 digunakan sebagai *hydrofoil* yang akan dianalisis pada penelitian ini. Dengan dimensi *foil* seperti pada tabel 4.

Tabel 4. Ukuran *Foil*

No	Nama	Ukuran
1	Main Chord (c)	0,2 m
2	Span (b)	1 m

Seri NACA 63-012A digunakan sebagai *strut*. Dengan dimensi seperti pada tabel 5 [10] :

Tabel 5. Ukuran *Strut*

No	Nama	Ukuran
1	Main Chord (c)	0,1 m
2	Panjang <i>Strut</i>	0,45 m

2.8. Perhitungan Gaya Angkat Minimum

Gaya angkat minimum yang dibutuhkan agar badan kapal terangkat keluar dari air dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [11] :

$$L_o = \Delta \cdot g \quad (5)$$

Dimana L_o adalah gaya angkat minimum (N), Δ adalah *displacement* kapal (ton), dan g adalah percepatan gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/s}^2$).

2.9. Gaya Angkat Variasi Model *Foil*

Nilai *lift* awal pada variasi model *foil* terlebih dahulu ditentukan agar dapat mengangkat badan kapal keluar dari air. Apabila telah memenuhi syarat yaitu nilai L_i lebih besar dari L_o maka dapat dilakukan analisis menggunakan CFD. Persamaannya adalah sebagai berikut [11] :

$$L_i = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_l \quad (6)$$

Dimana L_i adalah gaya angkat variasi model *foil* (N), ρ adalah massa jenis fluida (1000 kg/m^3), v adalah kecepatan kapal (m/s), S adalah permukaan *foil* (m^2), dan C_l adalah koefisien *lift* pada *angle of attack* 0° .

2.10. Nilai Sarat Baru

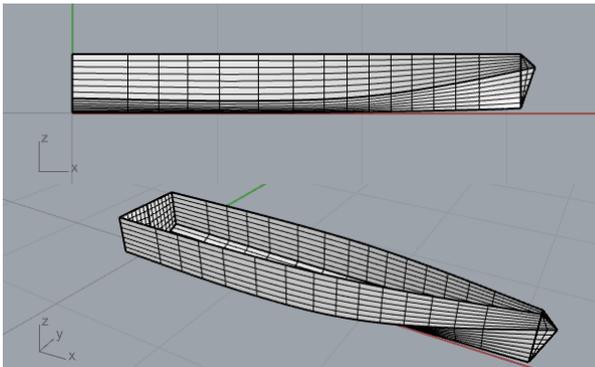
Kapal akan mengalami perubahan sarat setelah mendapatkan gaya angkat. Perubahan sarat kapal dihitung menggunakan persamaan berikut [11] :

$$T_i = T_o - \Delta H \quad (7)$$

Dimana, T_i adalah nilai sarat baru (cm), T_o adalah sarat awal (cm), dan ΔH adalah *heave* kapal (cm).

2.11. Desain Model Kapal KH-017

Model kapal KH-017 dibuat menggunakan *software Rhinoceros v6.0*. Kemudian diperkecil dengan skala 1 : 4. *Export* file kedalam format *.acis* setelah itu *import* file pada *software CFD Tdyn 14.1.0*.



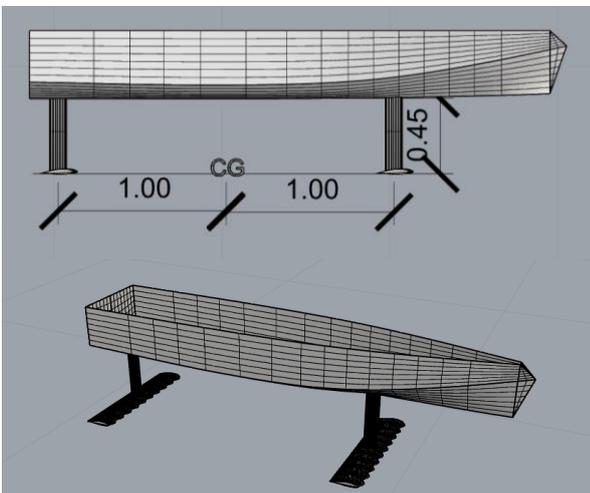
Gambar 3. Model Kapal *Original* tanpa *Hydrofoil*

Gambar 3 merupakan desain *original* kapal KH-017 tanpa dilengkapi *hydrofoil*. Sedangkan gambar 4 merupakan desain kapal yang telah dilakukan modifikasi dengan meletakkan *foil* pada bagian bawah badan kapal.

Foil dipasang menggunakan konfigurasi *tandem* untuk memperoleh distribusi gaya angkat yang merata antara *foil* depan dan belakang [12]. Hasil perhitungan letak *foil* dengan menggunakan persamaan (4) dijelaskan pada tabel 6.

Tabel 6. Posisi Peletakan *Foil*

Model	Letak <i>foil</i> dari LCG (m)	
	Aft	Front
Tandem	-1	1



Gambar 4. Model Kapal dengan *Foil*

2.12. Variasi Model

Hambatan dan gaya angkat dianalisis dengan variasi kecepatan kapal sesuai tabel 7.

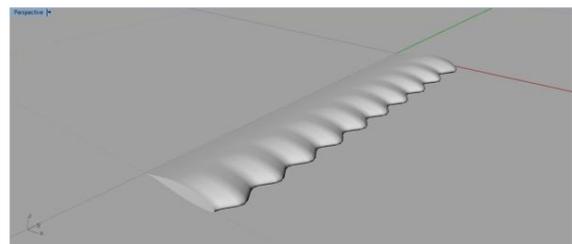
Tabel 7. Variasi Kecepatan Kapal

Fr	V	
	m/s	Knot
0,737	4,115	8
0,829	4,630	9
0,921	5,144	10

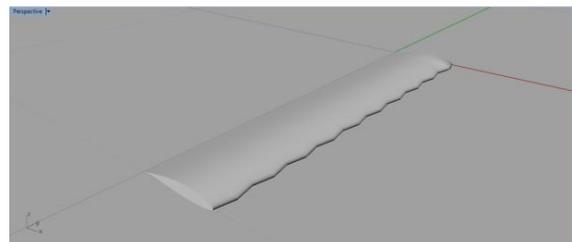
Variasi juga dilakukan pada *leading edge foil* dengan nilai *wavelength* dan amplitudo terhadap *chord foil* seperti pada tabel 8 kemudian dilakukan ilustrasi seperti pada gambar 5 hingga 10.

Tabel 8. Variasi Model *Foil*

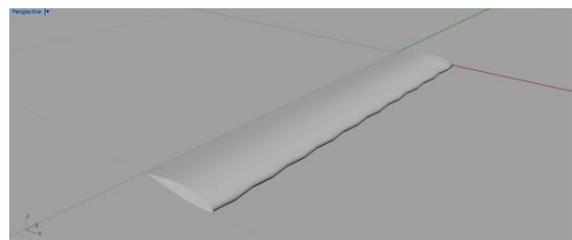
Model	Wavelength	Amplitudo	Angle of Attack
8L	0,25c	0,12c	3°, 3,5°, 4°
8M	0,25c	0,05c	3°, 3,5°, 4°
8S	0,25c	0,025c	3°, 3,5°, 4°
4L	0,5c	0,12c	3°, 3,5°, 4°
4M	0,5c	0,05c	3°, 3,5°, 4°
4S	0,5c	0,025c	3°, 3,5°, 4°



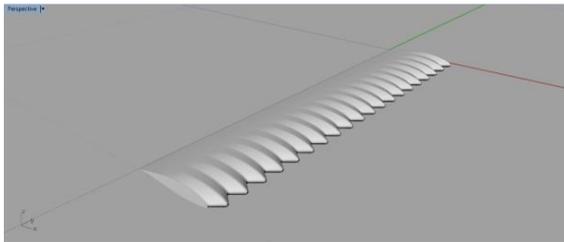
Gambar 5. Model 4L *Wavelength* 0,5c dan Amplitudo 0,12c



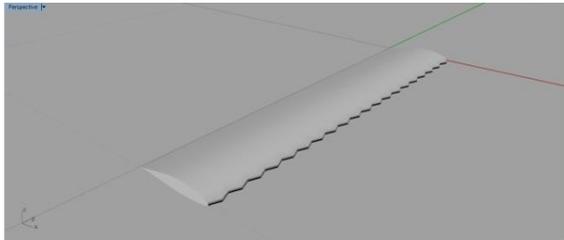
Gambar 6. Model 4M *Wavelength* 0,5c dan Amplitudo 0,05c



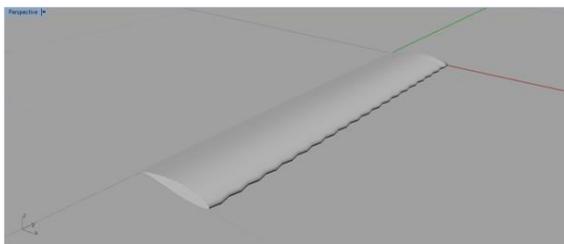
Gambar 7. Model 4S *Wavelength* 0,5c dan Amplitudo 0,025c



Gambar 8. Model 8L Wavelength 0,25c dan Amplitudo 0,12c



Gambar 9. Model 8M Wavelength 0,25c dan Amplitudo 0,05c

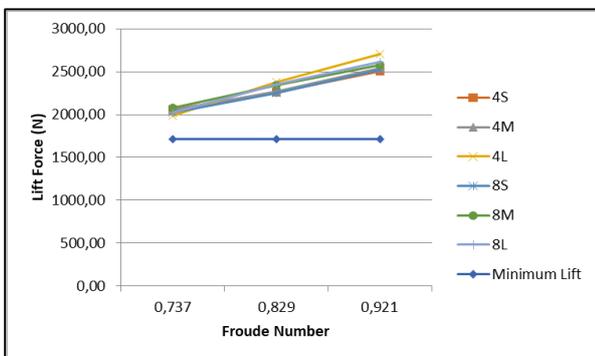


Gambar 10. Model 8S Wavelength 0,25c dan Amplitudo 0,025c

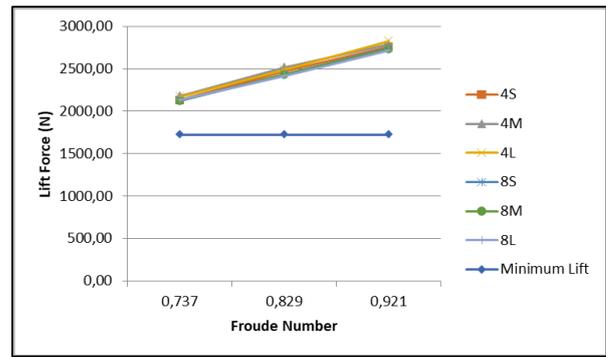
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Lift Force dan Trim Moment Kapal

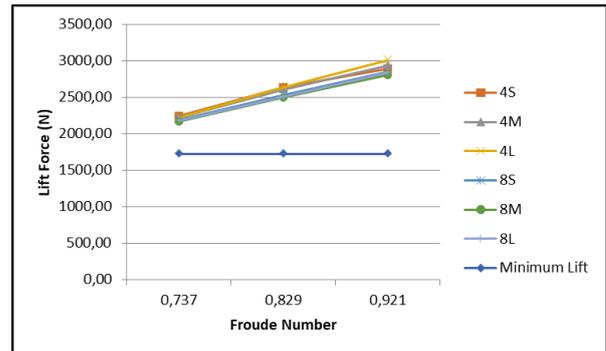
Nilai hambatan *hydrofoil* diperoleh melalui dua tahap *running* menggunakan *software CFD*. Tahap *running* pertama untuk mendapatkan nilai *lift force* serta nilai *trim moment*. Gambar 11, 12, dan 13 menunjukkan nilai *lift* hasil analisis masing – masing variasi model.



Gambar 11. Lift Force at Angle of Attack 3°



Gambar 12. Lift Force at Angle of Attack 3,5°



Gambar 13. Lift Force at Angle of Attack 4°

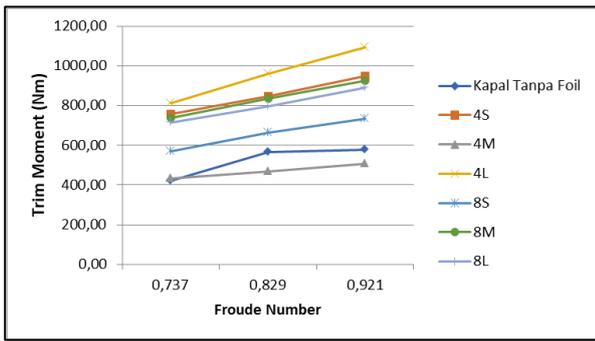
Persamaan (5) digunakan untuk menentukan *minimum lift force* (L_0) yaitu sebesar 1716,75 N. Badan kapal direncanakan agar dapat keluar dari air sepenuhnya. Sehingga perhitungan *lift force* pada setiap variasi model *leading edge protuberances hydrofoil* harus memenuhi syarat $L_i > L_0$ terlebih dahulu agar dapat dipastikan *foil* tersebut mampu mengangkat badan kapal keluar dari air sesuai prinsip kerja *hydrofoil* yaitu mengurangi hambatan kapal dengan cara menghasilkan gaya angkat sehingga *wetted surface area* berkurang yang berpengaruh pada hambatan. Apabila telah memenuhi syarat $L_i > L_0$ dapat dilakukan proses analisis menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic*.

Berdasarkan gambar 11, 12 dan 13 diperoleh nilai *lift* tertinggi berada pada model 4L untuk setiap *angle of attack*. Nilai 2709,79 N pada *angle of attack* 3°. Nilai 2820,90 N pada *angle of attack* 3,5°. Pada *angle of attack* 4° dengan nilai sebesar 3008,74 N. Masing-masing hasil tersebut berada pada *froude number* 0,921.

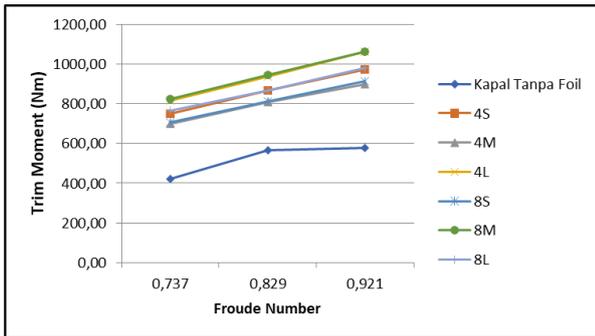
Sedangkan pada *froude number* yang sama, *lift force* terendah adalah model 4S pada *angle of attack* 3° dengan nilai 2508,16 N. Untuk model *angle of attack* 3,5° nilai *lift* terendah adalah 2718,05 N pada model 8L. Model 8M pada *angle of attack* 4° dengan nilai 2809,07 N.

Nilai *lift force* pada setiap variasi model *leading edge protuberances hydrofoil* lebih besar dibandingkan dengan *minimum lift force* agar badan kapal dapat terangkat dari air [11]. *Lift*

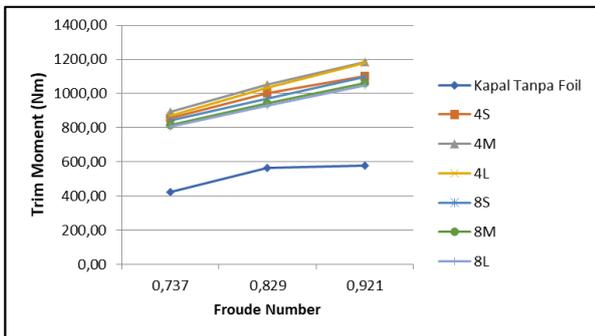
force dibutuhkan untuk menghitung nilai *heave* sehingga dapat diketahui sarat baru kapal.



Gambar 14. *Trim Moment at Angle of Attack 3°*



Gambar 15. *Trim Moment at Angle of Attack 3,5°*



Gambar 16. *Trim Moment at Angle of Attack 4°*

Gambar 14, 15, dan 16 menunjukkan nilai *trim moment* dari hasil analisis masing – masing variasi model.

3.2. Nilai *Heave* Kapal

Data *lift force* pada gambar 11, 12, dan 13 dilakukan perubahan satuan menjadi ton dengan cara berikut [6]:

$$w = \frac{L_i}{g} \quad (8)$$

Dimana *w* adalah *lift force* dalam satuan ton, L_i adalah *lift force* dalam satuan kN, dan *g* adalah percepatan gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Model 4L *angle of attack* 4° pada *froude number* 0,921 dilakukan ilustrasi perhitungan berikut.

$$w = \frac{3,008}{9,81}$$

$$w = 0,307 \text{ ton}$$

Kemudian dilakukan perhitungan menggunakan persamaan (1).

$$\Delta H = \frac{0,307}{0,012}$$

$$\Delta H = 25,56 \text{ cm}$$

Mengacu pada ilustrasi perhitungan *heave* model 4L *angle of attack* 4° pada *froude number* 0,921 maka dapat diperoleh nilai *heave* untuk semua variasi model tiap *froude number* yang dijelaskan dalam tabel 9, 10, dan 11.

Tabel 9. Nilai *Heave* pada *Angle of Attack* 3°

Model	<i>Heave</i> (cm)		
	<i>Fr</i> 0,737	<i>Fr</i> 0,829	<i>Fr</i> 0,921
8L	17,17	19,96	22,21
8M	17,67	19,89	21,92
8S	17,19	19,08	21,44
4L	16,86	20,22	23,02
4M	17,44	19,30	21,58
4S	17,45	19,19	21,31

Tabel 10. Nilai *Heave* pada *Angle of Attack* $3,5^\circ$

Model	<i>Heave</i> (cm)		
	<i>Fr</i> 0,737	<i>Fr</i> 0,829	<i>Fr</i> 0,921
8L	18,09	20,49	23,09
8M	18,04	20,66	23,22
8S	18,00	20,65	23,27
4L	18,40	21,15	23,96
4M	18,49	21,39	23,70
4S	18,13	20,98	23,47

Tabel 11. Nilai *Heave* pada *Angle of Attack* 4°

Model	<i>Heave</i> (cm)		
	<i>Fr</i> 0,737	<i>Fr</i> 0,829	<i>Fr</i> 0,921
8L	18,54	21,33	24,06
8M	18,38	21,17	23,86
8S	18,63	21,46	24,22
4L	18,90	22,38	25,56
4M	18,83	22,12	24,95
4S	19,00	22,37	24,59

3.3. Nilai Sarat Baru

Untuk menentukan nilai sarat baru dapat menggunakan data nilai *heave* kemudian dilakukan perhitungan berdasarkan persamaan (7). Berikut adalah ilustrasi perhitungan sarat baru model 4L *angle of attack* 4° pada *froude number* 0,921.

$$T_i = T_o - \Delta H \quad (7)$$

$$T_i = 15 \text{ cm} - 25,56 \text{ cm}$$

$$T_i = -10,56 \text{ cm}$$

Tabel 12. Sarat Baru pada *Angle of Attack* 3°

Model	Sarat (cm)		
	Fr 0,737	Fr 0,829	Fr 0,921
8L	-2,17	-4,96	-7,21
8M	-2,67	-4,89	-6,92
8S	-2,19	-4,08	-6,44
4L	-1,86	-5,22	-8,02
4M	-2,44	-4,30	-6,58
4S	-2,45	-4,19	-6,31

Tabel 13. Sarat Baru pada *Angle of Attack* 3,5°

Model	Sarat (cm)		
	Fr 0,737	Fr 0,829	Fr 0,921
8L	-3,09	-5,49	-8,09
8M	-3,04	-5,66	-8,22
8S	-3,00	-5,65	-8,27
4L	-3,40	-6,15	-8,96
4M	-3,49	-6,39	-8,70
4S	-3,13	-5,98	-8,47

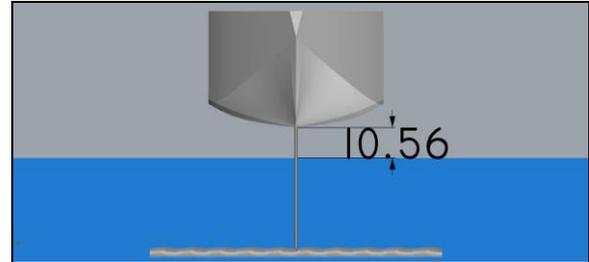
Tabel 14. Sarat Baru pada *Angle of Attack* 4°

Model	Sarat (cm)		
	Fr 0,737	Fr 0,829	Fr 0,921
8L	-3,54	-6,33	-9,06
8M	-3,38	-6,17	-8,86
8S	-3,63	-6,46	-9,22
4L	-3,90	-7,38	-10,56
4M	-3,83	-7,12	-9,95
4S	-4,00	-7,37	-9,59

Pada tabel 12, 13 dan 14 sarat baru bernilai negatif karena nilai *heave* lebih besar dari sarat awal sehingga badan kapal terangkat dari dalam air. Hanya *foil* dan *strut* yang masih terendam dalam air. Nilai sarat baru diukur dari *baseline* kapal. Jika bernilai negatif maka sarat baru terletak di sepanjang *strut* bukan pada badan

kapal. Ukuran *strut* dijelaskan seperti pada tabel 5.

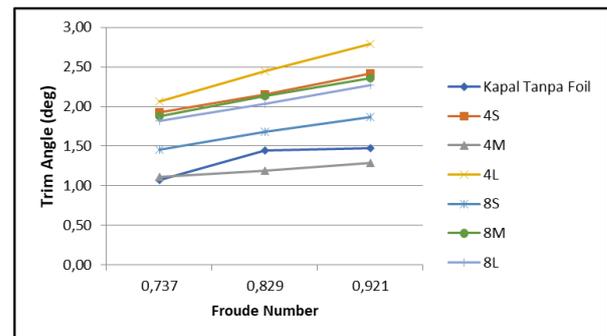
Foil dan *strut* tidak akan keluar dari air secara keseluruhan apabila nilai sarat baru tidak melebihi panjang *strut*. Sehingga kapal tetap dalam kondisi *foilborne* dan tidak mengalami *stall*.



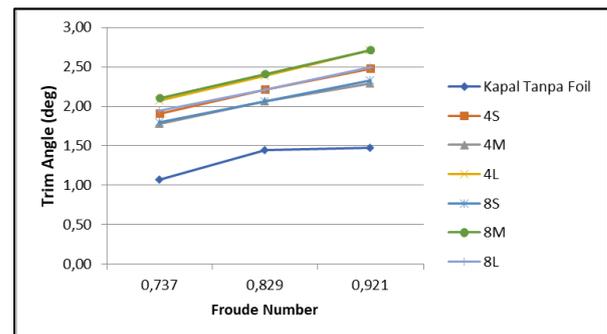
Gambar 17. Ilustrasi *Heave* Model 4L *Angle of Attack* 4° *Froude Number* 0,921

3.4. Trim Angle Kapal

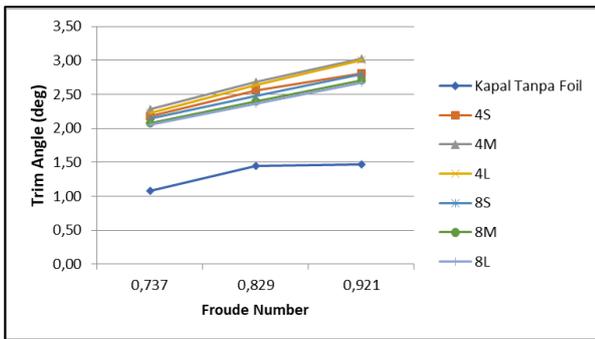
Trim angle diperoleh dengan mengolah data nilai *trim moment* menggunakan persamaan (3).



Gambar 18. *Trim Angle* at *Angle of Attack* 3°



Gambar 19. *Trim Angle* at *Angle of Attack* 3,5°

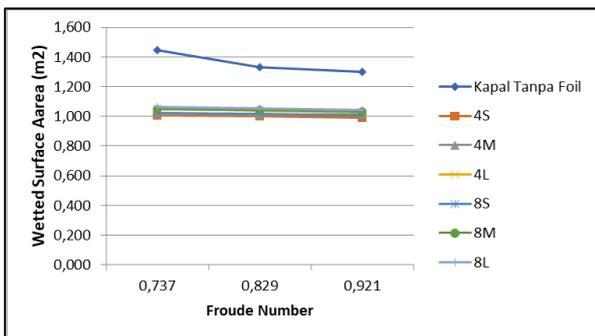


Gambar 20. Trim Angle at Angle of Attack 4°

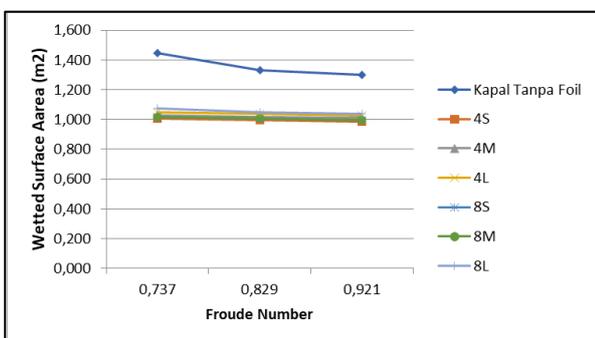
Gambar 18, 19, dan 20 menunjukkan kondisi *equilibrium* ketika kapal berada dalam sarat baru dan nilai *trim* diaplikasikan pada *longitudinal center of floatation* (LCF). Kapal tidak lagi dalam kondisi lurus 180° namun mengalami *trim* sesuai hasil perhitungan.

3.5. Wetted Surface Area

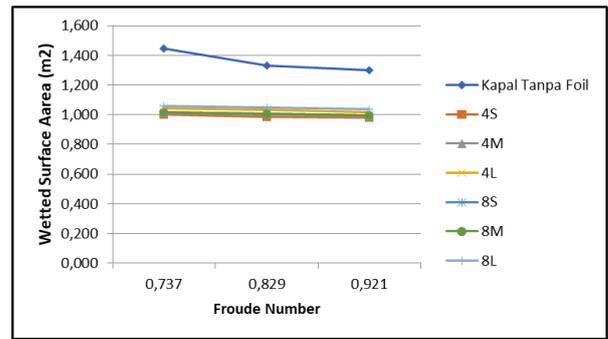
Wetted surface area berbanding terbalik dengan nilai *lift force*. Semakin besar nilai *lift force* maka akan semakin kecil *wetted surface area*.



Gambar 21. Wetted Surface Area at Angle of Attack 3°



Gambar 22. Wetted Surface Area at Angle of Attack 3,5°

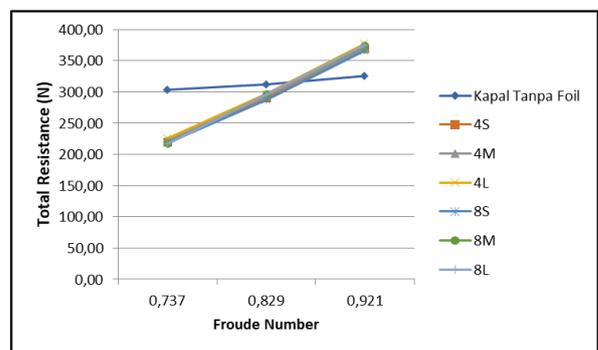


Gambar 23. Wetted Surface Area at Angle of Attack 4°

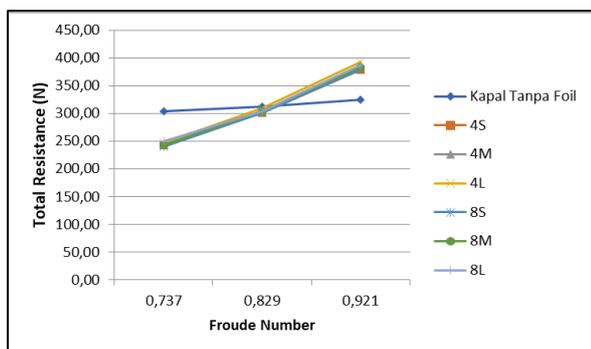
Wetted surface area nilainya akan menurun seiring dengan kenaikan nilai *lift* pada tiap *froude number*. Gambar 21, 22, dan 23 menunjukkan bahwa *wetted surface area* pada kapal *original* tanpa *hydrofoil* lebih besar dibandingkan model variasi pada tiap *froude number*. Kapal *original* tanpa *hydrofoil* dianalisis pada kondisi *equilibrium* untuk mendapatkan nilai *wetted surface area*.

3.6. Hambatan Total Kapal

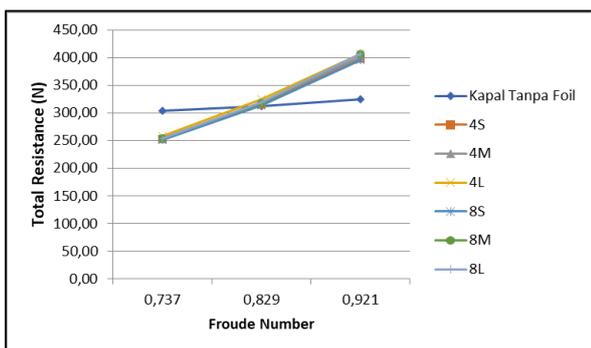
Gambar 24, 25 dan 26 menunjukkan penurunan nilai hambatan total kapal saat dipasang *hydrofoil*. Penurunan terbesar terjadi pada *angle of attack* 3° yaitu sebesar 28,52% untuk model 8M pada *froude number* 0,737 dibandingkan hambatan total kapal *original* tanpa *hydrofoil*.



Gambar 24. Total Resistance at Angle of Attack 3°

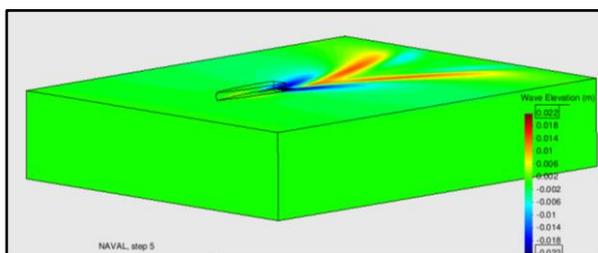


Gambar 25. Total Resistance at Angle of Attack 3,5°

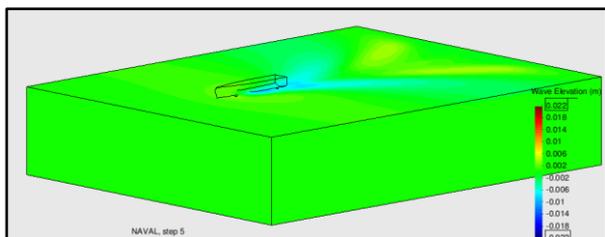


Gambar 26. Total Resistance at Angle of Attack 4°

3.7. Pola Gelombang



Gambar 27. Pola Gelombang Model Kapal Original tanpa Hydrofoil pada Fr 0,737



Gambar 28. Pola Gelombang Model 8M Angle of Attack 3° pada Fr 0,737.

Model 8M dengan *angle of attack* 3° pada *froude number* 0,737 memiliki hambatan yang paling kecil dibandingkan dengan model lainnya pada setiap *froude number*. Pada gambar 27 dan 28 terlihat perbandingan pola gelombang antara model 8M dan model kapal *original* tanpa *hydrofoil*. Pola gelombang yang terbentuk oleh model *original* tanpa *hydrofoil* cenderung lebih ekstrem pada rentang nilai *wave elevation* yang

sama jika dibandingkan dengan pola gelombang model 8M. Hal ini dapat terjadi karena badan kapal model *original* tanpa *hydrofoil* yang terendam di dalam air lebih besar. Sehingga hambatan total yang dihasilkan oleh model kapal *original* tanpa *hydrofoil* juga lebih tinggi dibandingkan model 8M.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan beberapa variasi yang dilakukan, model 4L menghasilkan nilai *lift* terbesar di *froude number* 0,921 pada *angle of attack* 4° yaitu sebesar 3008,74 N. Lebih besar 75,25% dibandingkan nilai *minimum lift*. Sedangkan model 8M di *froude number* 0,921 pada *angle of attack* 4° memiliki nilai *lift* terendah yaitu sebesar 2809,07 N.

Model 8M memiliki hambatan total terendah dibandingkan model yang lain. Model 8M pada *angle of attack* 3° di *froude number* 0,737 berhasil mengurangi hambatan total sebesar 28,52% dari hambatan total kapal *original* tanpa *hydrofoil*. Sedangkan pada *froude number* dan *angle of attack* yang sama, model 4L memiliki hambatan total tertinggi namun tetap mampu mengurangi hambatan total kapal *original* tanpa *hydrofoil* sebesar 25,73%.

Kapal KH-017 terbukti efektif berkurang hambatannya apabila dipasang *foil* dengan variasi *leading edge protuberances hydrofoil* 8M atau model dengan *wavelength* 0,25c dan amplitudo 0,05c pada *angle of attack* 3° serta *froude number* 0,737.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IMO, "Third IMO Greenhouse Gas Study 2014," London, 2014.
- [2] F. E. Fish, P. W. Weber, M. M. Murray, and L. E. Howle, "The Tubercles on Humpback Whales' Flippers: Application of Bio-Inspired Technology," *Integrative and Comparative Biology*, vol. 51, no. 1, pp. 203–213, 2011.
- [3] D. S. Miklosovic, M. M. Murray, L. E. Howle, and F. E. Fish, "Leading-Edge Tubercles Delay Stall on Humpback Whale (Megaptera novaeangliae) Flippers," *Physics of Fluids*, vol. 16, no. 5, pp. 1–5, 2004.
- [4] G. Wisnu, D. Chrismianto, and M. Iqbal, "Analisa Leading Edge Protuberances pada Fully Submerged Hydrofoil Terhadap Gaya Angkat dan Hambatan pada Kapal Katamaran Menggunakan Metode CFD," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 7, no. 2,

- pp. 1–9, 2019.
- [5] H. Johari, “Effects of Leading-Edge Protuberances on Airfoil Performance,” *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, vol. 45, no. 11, 2007.
 - [6] B. Barrass and C. R. Derrett, *Ship Stability for Masters and Mates*. Oxford: Butterworth Heinemann, 2006.
 - [7] R. Bhattacharyya, *Dynamics of Marine Vehicles*. New York: John Wiley & Son, 1978.
 - [8] C. Yang and R. Löhner, “Calculation of Ship Sinkage and Trim Using a Finite Element Method and Unstructured Grids,” *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, vol. 16, no. 3, pp. 217–227, 2002.
 - [9] A. S. Slamet and K. Suastika, “Kajian Eksperimental Pengaruh Posisi Perletakan Hydrofoil Pendukung Terhadap Hambatan Kapal,” *Jurnal Teknik ITS*, vol. 1, 2012.
 - [10] K. Suastika and Apriansyah, “Effects of Stern-Foil Submerged Elevation on the Lift and Drag of a Hydrofoil Craft,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018.
 - [11] O. M. Faltinsen, *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
 - [12] K. I. Matveev and I. I. Matveev, “Tandem Hydrofoil System,” *Ocean Engineering*, vol. 28, no. 2, pp. 253–261, 2000.