

ANALISA HAMBATAN ANGIN DAN STABILITAS KAPAL SUPER CONTAINER 18.000 TEUS (MALACCA-MAX)

Aziz Abdurohman¹, Andi Trimulyono¹, Wilma Amirudin¹,

¹) Program Studi S1 Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Indonesia
Email : Azizabdurohman18@gmail.com

Abstrak

Angin dapat meniup kapal dari segala arah dan kadang-kadang dapat mempengaruhi lintasan yang direncanakan kapal, khususnya pada kecepatan rendah. Penelitian ini dibuat lima macam desain bentuk penyusunan peti kemas kemudian dianalisa hambatan udara dari 0°- 180° dengan rentan 45° seperti pengetesan pada terowongan angin serta analisa stabilitas. Perbedaan bentuk penyusunan dan jumlah peti kemas yang dimuat mengindikasikan perubahan besar hambatan angin serta stabilitas yang berbeda sehingga penulis disini ingin menganalisa efek masing-masing model terhadap hambatan udara dan stabilitas sehingga dapat diketahui model dengan efisiensi paling optimal dengan bantuan paket program *Computer Aided Design (CAD)*, *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dan *Maxsurf Hydromax*. Dalam analisa yang dilakukan menggunakan *software CFD ANSYS CFX* menunjukkan dari masing-masing model yang di analisa, terjadi perubahan bentuk aliran fluida, yang berpengaruh pula terhadap nilai hambatan yang dihasilkan. Kemudian penganalisaan yang dilakukan menggunakan *software Maxsurf Hydromax* untuk menunjukkan stabilitas dari masing-masing model akibat pemvariasian jumlah muatan peti kemas. Dari kelima variasi model tersebut, terlihat nilai hambatan terendah terjadi pada model empat dengan muatan 15744 TEUS *for-side streamlined* yaitu *coeffisien drag* sebesar 1.17, *coeffisien lift* sebesar 0.68, dan *coeffisien yaw moment* sebesar 0.07 terjadi efisiensi sebesar 30.78% untuk *coeffisien drag*, 29.92% untuk *coeffisien lift*, dan 40.74% untuk *coeffisien yaw moment* dari model satu dengan muatan 100% *non streamlined*. Sedangkan stabilitas paling baik didapat pada model empat dengan muatan 15744 TEUS *for-side streamlined* yaitu periode oleng sebesar 11.68 detik dan nilai *GZ* maksimal sebesar 5.25 meter terjadi peningkatan nilai *GZ* sebesar 15.74% dari model satu.

Kata kunci : *Malacca-Max*, Hambatan Angin, CFD

1. PENDAHULUAN

Industri kapal container telah berkembang pesat dan menjadi salah satu sektor pelayaran dunia yang utama dalam 40 tahun terakhir. Perkembangan teknologi mendorong untuk mengembangkan kapal jenis container, khususnya dalam segi ukuran kapal. Untuk memajukan perdagangan internasional dan perekonomian dunia maka dibuatlah kapal container dengan ukuran besar yakni kapal container dengan ukuran 18.000 teus dan sarat maksimal 21 meter yang dirancang khusus melewati perairan selat malaka, sehingga dinamakan *Malacca-Max*. Contoh kapal container *Malacca-Max* yang sudah ada yakni *Maersk Line Triple E Class*.

Namun dengan ukuran kapal yang besar haruslah diperhatikan efisiensi bahan bakar dan kinerja kapal karena pertimbangan ekonomi dan lingkungan. Banyak upaya yang dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar kapal bahkan beberapa persen.[1]

Angin biasanya tidak memainkan peran penting dalam desain struktur kapal tetapi memainkan peran penting dalam operasi kapal. Angin dapat meniup kapal dari segala arah dan kadang-kadang dapat mempengaruhi lintasan yang direncanakan kapal, khususnya pada kecepatan rendah. Hal inilah yang dapat menghambat pelayaran kapal dan mempengaruhi konsumsi bahan bakar yang digunakan. Terlebih ukuran kapal container *Malacca-Max* yang besar serta letak peti kemas yang berada di atas dek utama sangat mempengaruhi dari hambatan angin yang terjadi pada kapal.[2]

Dalam tugas akhir ini akan dilakukan analisa perhitungan hambatan angin dan stabilitas yang terjadi pada kapal super container *Malacca-Max*. Dengan membuat model kapal dan variasi konfigurasi peti kemas kemudian akan dilakukan analisa aliran udara yang terjadi dengan menggunakan metode CFD (*Computational Fluid Dynamic*) dan analisa stabilitas menggunakan *software Maxsurf*.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Container

Container atau peti kemas pada dasarnya dapat didefinisikan menurut kata peti dan kemas. Peti adalah suatu kotak berbentuk geometrik yang terbuat dari bahan-bahan alam (kayu, besi, baja, dll). Kemas merupakan hal-hal yang berkaitan dengan pengepakan atau kemasan. Jadi peti kemas adalah suatu kotak besar berbentuk empat persegi panjang, terbuat dari campuran baja dan tembaga atau bahan lainnya (aluminium, kayu/fiber glass) yang tahan terhadap cuaca. Digunakan untuk tempat pengangkutan dan penyimpanan sejumlah barang yang dapat melindungi serta mengurangi terjadinya kehilangan dan kerusakan barang serta dapat dipisahkan dari sarana pengangkutan dengan mudah tanpa harus mengeluarkan isinya. [3]

Tabel 1. Dimensi Peti Kemas [4]

| | | 20' container | | 40' container | |
|--------------------|--------|---------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
| | | imperial | metric | imperial | metric |
| external dimension | length | 19' 10 ¹ / ₂ " | 6.058 m | 40' 0" | 12.192 m |
| | width | 8' 0" | 2.438 m | 8' 0" | 2.438 m |
| | height | 8' 6" | 2.591 m | 8' 6" | 2.591 m |
| internal dimension | length | 18' 8 ¹³ / ₁₆ " | 5.710 m | 39' 5 ⁴⁵ / ₆₄ " | 12.032 m |
| | width | 7' 8 ¹⁹ / ₃₂ " | 2.352 m | 7' 8 ¹⁹ / ₃₂ " | 2.352 m |
| | height | 7' 9 ⁵⁷ / ₆₄ " | 2.385 m | 7' 9 ⁵⁷ / ₆₄ " | 2.385 m |
| door aperture | width | 7' 8 ¹ / ₄ " | 2.343 m | 7' 8 ¹ / ₄ " | 2.343 m |
| | height | 7' 5 ³ / ₄ " | 2.280 m | 7' 5 ³ / ₄ " | 2.280 m |
| volume | | 1,169 ft ³ | 33.1 m ³ | 2,385 ft ³ | 67.5 m ³ |
| maximum gross mass | | 66,139 lb | 30,400 kg | 66,139 lb | 30,400 kg |
| empty weight | | 4,850 lb | 2,200 kg | 8,380 lb | 3,800 kg |
| net load | | 61,289 lb | 28,200 kg | 57,759 lb | 26,600 kg |

2.2. Container Ship

Container Ship adalah kapal yang berfungsi mengangkut barang yang sudah diatur di dalam peti-peti. Muatan peti kemas disamping di dalam palkah juga diletakkan di atas dek dengan pengikatan yang kuat, sehingga peti kemas tersebut tidak bergeser dari tempatnya semula pada saat berlayar. Dengan adanya muatan di atas geladak maka harus diperhatikan mengenai stabilitas kapal. Yang perlu diperhatikan ialah periode keolengan jangan sampai terlalu lincah, sebab membahayakan container yang ada di atas dek, lebih-lebih apabila sistem pengikatannya kurang sempurna. [5]

2.3. Super Container Malacca-Max

Kapal container malacca-max yang dibandingkan pada tahun 1999 dengan tiga ukuran kapal container lainnya yakni kapal panamax 4.500 teus, kapal ukuran 8.000 teus,

dan kapal suez-max 12.000 teus, menunjukkan bahwa kapal malacca-max menawarkan skala ekonomi sekitar 30 % diatas kapal panamax dan 16 % dengan kapal ukuran 8.000 teus. Penelitian ini dimulai dengan menelaah perkembangan kapal container dan pelayaran. Faktor lain yang mempengaruhi yakni parameter desain kapal, seperti tuntutan operasional pemilik, dan karakteristik jalur pelayaran. [6]

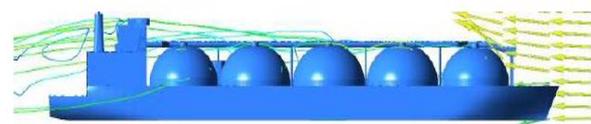


Gambar 1. Malacca-Max Triple E-Class

Bentuk lambung kapal *malacca-max* mempunyai koefisien block (cb) = 0,62. Kapal ini memiliki 26 block dari 40 ft *container*. Didalam ruang muat terdiri dari 20 *container* yang dimuat sejajar dan 24 baris *container* yang berada diatas *deck*. Sehingga total terdapat kapasitas penyimpanan 18.154 teus dengan 8 tingkatan *deck container*. Kapal *malacca-max* sendiri yang sudah ada yakni kapal *super container* Maersk Triple E Class buatan Daewoo Ship Building Korea, yang mempunyai ukuran panjang 400 m, lebar 59 m, dan tinggi sarat 14,5 m.

2.4. Hambatan Angin

Hambatan Angin (RA) adalah komponen hambatan akibat udara yang berhembus secara alami yang mungkin dari dari berbagai arah dan tidak dapat memprediksi dan mengontrolnya. Dalam hal ini bentuk kapal diatas permukaan air berpengaruh pada hambatan yang terjadi. Apalagi jika kapal beroperasi pada kecepatan rendah dan kecepatan angin tinggi maka efeknya akan sangat berpengaruh.



Gambar 2. Hambatan Angin Pada Kapal

Komponen hambatan ini menjadi pertimbangan tingginya bagian kapal diatas permukaan air seperti seperti kapal kontainer, kapal penumpang, dan kapal *Ro-Ro*. Selain ketinggian bagian kapal bentuk dari bagian kapal juga

berpengaruh pada hambatan angin ini, maka perlu diperhatikan agar bentuk bagian kapal diatas permukaan laut ini direncanakan seefisien dan *se-streamlined* mungkin demi memperkecil hambatan udara yang terjadi. Adapun rumus untuk mengetahui hambatan udara pada kapal :

1. Koefisien gaya gesek [7]

$$C_x = \frac{X}{\frac{1}{2} \rho_a V^2 R_{AVT}}$$

2. Koefisien gaya aksial

$$C_y = \frac{Y}{\frac{1}{2} \rho_a V^2 R_{AVL}}$$

3. Koefisien momen *yaw*

$$C_n = \frac{N}{\frac{1}{2} \rho_a V^2 R_{AVL} LOA}$$

| | |
|----------|---|
| X | = gaya gesek |
| Y | = gaya aksial |
| N | = momen <i>yaw</i> |
| AVT | = luas area kapal secara melintang (diatas permukaan air) |
| AVL | = luas area kapal secara memanjang (diatas permukaan air) |
| VR | = kecepatan angin |
| ρ_a | = massa jenis udara |
| LOA | = panjang kapal keseluruhan |

2.5. Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan kapal untuk kembali ke posisi semula setelah mengalami kemiringan akibat gaya yang berasal dari dalam maupun luar kapal. Prinsip dasar stabilitas dan olah gerak kapal menurut Taylor (1977) stabilitas dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu: 1) Keseimbangan stabil (Stable equilibrium), 2) Keseimbangan netral (Neutral equilibrium) dan 3) Keseimbangan tidak stabil (Unstable equilibrium). Untuk perhitungan olah gerak kapal harus dievaluasi dengan menyesuaikan standar kriteria olah gerak yang ada tergantung dari jenis kapal tersebut. Pada penelitian ini, standard olah gerak yang digunakan adalah standar kriteria umum untuk kapal kontainer menurut IMO.

2.6. Computational Fluid Dynamic (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) [8] merupakan salah satu cabang dari mekanika fluida yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk menyelesaikan dan menganalisa permasalahan yang berhubungan dengan aliran fluida. Tujuan dari CFD adalah untuk memprediksi secara akurat tentang aliran fluida, perpindahan panas, dan reaksi kimia dalam sistem yang kompleks, yang melibatkan satu atau semua fenomena di atas.

Aplikasi dari CFD untuk penyelesaian masalah aliran pada propeller telah mengalami kemajuan cukup pesat pada akhir-akhir ini. Bahkan pada saat ini teknik CFD merupakan bagian dari proses desain dalam diagram spiral perancangan.

Computational Fluid Dynamics terdiri dari tiga elemen utama yaitu:

- Pre Processor
- Solver Manager
- Post Processor

Sebuah pemahaman yang baik diperlukan dalam menyelesaikan algoritma penyelesaian numerik. Terdapat tiga konsep matematika yang berguna dalam menentukan berhasil atau tidaknya algoritma:

- Konvergensi, merupakan properti metode numerik untuk menghasilkan solusi yang mendekati solusi eksakta sebagai grid spacing, ukuran kontrol volume atau ukuran elemen dikurangi mendekati nol.
- Konsisten, merupakan suatu skema numerik yang menghasilkan sistem persamaan aljabar yang dapat diperlihatkan ekuivalen dengan persamaan pengendali sebagai grid spasi mendekati nol.
- Stabilitas, yaitu penggunaan faktor kesalahan sebagai indikasi metode numerik. Jika sebuah teknik tidak stabil dalam setiap kesalahan pembulatan bahkan dalam data awal dapat menyebabkan osilasi atau divergensi.

3. METODE PENELITIAN

Pada tahapan awal dilakukan pengembangan metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini diawali dengan mengumpulkan data – data tentang kapal dan hambatan angin, serta mencari data – data primer yang akan digunakan dalam penelitian meliputi ukuran – ukuran utama kapal *super container malacca-max*. Data yang didapat dari berbagai referensi, yaitu buku – buku, majalah, artikel, jurnal, dan melalui internet mengenai hambatan angin kapal untuk *software* berbasis CFD. Hal – hal

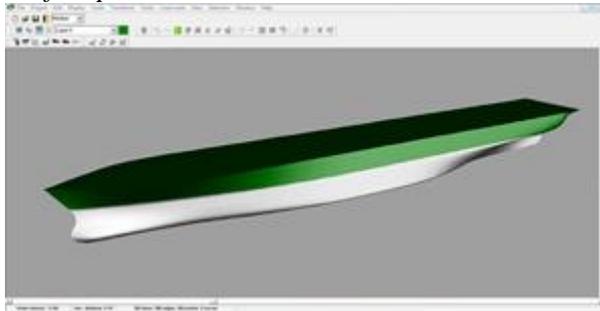
tersebut merupakan aspek dasar dan pedoman dalam menganalisa hambatan angin kapal *super container malacca-max* yang efisien guna mempertahankan kinerja atau operasi kapal di laut. Dari data – data yang didapatkan kemudian dilakukan modifikasi konfigurasi peti kemas.

4. PERHITUNGAN DAN ANALISA DATA

4.1. Pengolahan Data

4.1.1. Pemodelan Menggunakan Delfship

Dari data pengukuran tersebut di buat pemodelan *hullform* dengan menggunakan bantuan *software Delfship versi 3.1*. Berikut ini adalah hasil visualisasi desain pada *software Delfship*.



Gambar 4. Pemodelan Kapal Menggunakan *Software Delfship*.

4.1.2. Pemodelan Menggunakan Rhineros

Pembuatan model kapal menggunakan *software Rhineros* dimana model pada *software Delfship*, kemudian dimodelkan ulang dengan penambahan peti kemas dan bangunan atas. Pada *software* ini dilakukan pemvariasian model berupa bentuk konfigurasi dari peletakan peti kemas yang berada di atas dek. Berikut ini adalah hasil visualisasi desain pada *software Rhineros*.



Gambar 5. Pemodelan Kapal Menggunakan *Software Rhineros*.

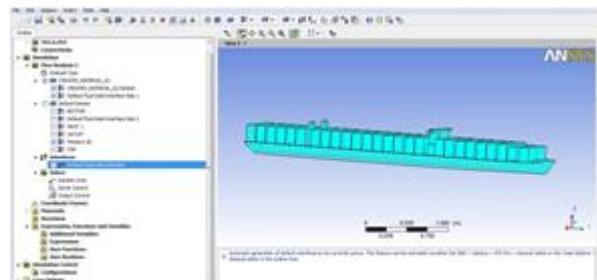
4.1.3. Simulasi Computational Fluid Dynamic

Langkah simulasi numerik pada ANSYS 14.0 pada dasarnya sama dengan jenis software lain yang berbasis Computational Fluid Dynamic. Pengujian ini menggunakan perhitungan solver Fluid Flow Analys (CFX). Secara garis besar langkah – langkah simulasi numerik pada solver ini dibagi menjadi beberapa tahapan antara lain:

- a. Geometry
- b. Mesh
- c. Setup

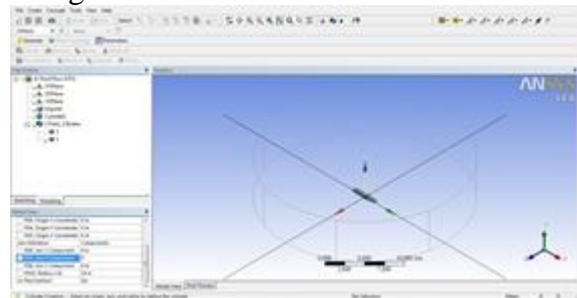
4.1.4. Tahap Geometry

Geometry merupakan langkah awal dimana pengecekan solid tidaknya model. Pada tahap ini juga dilakukan pembuatan domain fluida tempat pengujian. Pada tahap ini perintah yang digunakan adalah file > import external geometry file > enter file model > OK > generate. Pada Gambar 6 Model akan solid apabila muncul tanda balok.



Gambar 6. Model Solid

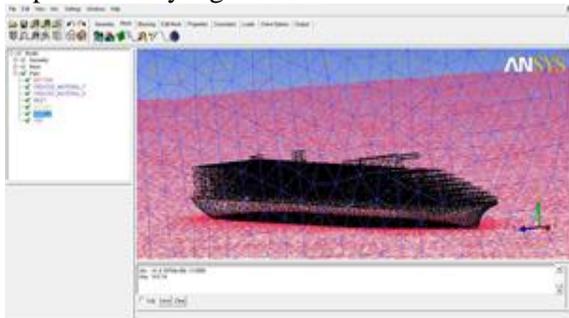
Langkah selanjutnya pembuatan boundary building pada Gambar 7 pada tahap ini langkah pertama yaitu pemilihan XY plan sebagai koordinat.



Gambar 7. Boundary Building Model Pada Tahap Geometry

4.1.5. Tahap Mesh

Setelah domain fluida terbentuk langkah selanjutnya adalah melakukan meshing pada model pada Gambar 8 Untuk itu lebih dahulu menentukan ukuran element yang akan kita gunakan. Namun perlu diingat bahwa semakin kecil elemen yang dibuat, maka jumlah element yang terbentuk semakin banyak sehingga waktu *running* akan semakin lama dan menghasilkan kapasitas file yang besar.



Gambar 8. Hasil Mesh

4.1.6. Tahap Set Up

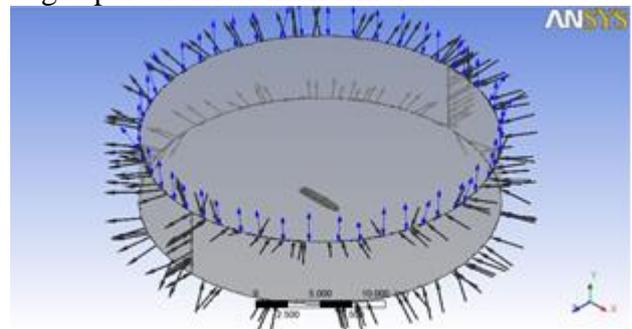
Setup adalah tahapan yang dilakukan setelah mesh berhasil dilakukan. Setup merupakan tahapan yang berisi tentang penentuan hal – hal yang berkaitan dengan simulasi. Pada tahap ini dibagi menjadi beberapa langkah, antara lain default domain, solver, pembuatan expression, dan lain-lain. Pada tahap setup ini adalah setup yang digunakan untuk memvalidasikan hasil uji coba model yang sudah ada [1]. dengan perhitungan CFD untuk model yang kemudian setup tersebut akan di adopsi untuk pengujian model bentuk konfigurasi peti kemas. Berikut adalah setup yang digunakan :

Tabel 2. Boundary Physics

| Domain - Default Domain | |
|-------------------------|--|
| Type | Fluid |
| Location | CREATED_MATERIAL 7 Materials Air at 25 C |
| Fluid Definition | Material Library |
| Morphology | Continuous Fluid Settings |

| | |
|--------------------------|------------------|
| Buoyancy Model | Non Buoyant |
| Domain Motion | Stationary |
| Reference Pressure | 1.0000e+00 [atm] |
| Heat Transfer Model | Isothermal |
| Fluid Temperature | 2.5000e+01 [C] |
| Turbulence Model | k epsilon |
| Turbulent Wall Functions | Scalable |

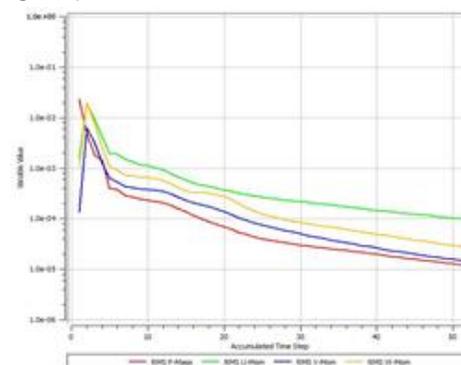
Disini juga ditentukan *solver control* simulasi. *Solver control* yang dipilih yaitu 0,0004. Sebagai nilai konvergensi untuk melihat tingkat error. Angka tersebut dipilih karena semakin kecil tingkat error, semakin bagus pula kualitas hasil simulasi.



Gambar 9. Domain pada Set Up

4.1.7. Tahap Solution

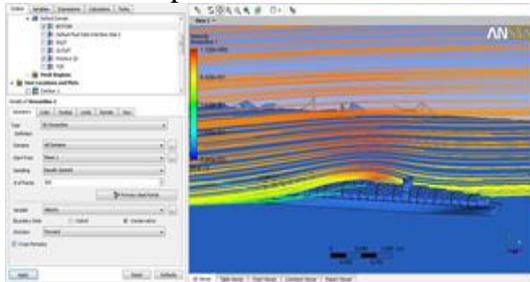
Setelah setup selesai di program, tahap selanjutnya adalah solution pada Gambar 10 Dalam tahap ini proses perhitungan (running) dilakukan berupa literasi dari persamaan dasar dinamika fluida pada CFD.



Gambar 10. Grafik Perhitungan (running)

4.1.8. Tahap Result

Setelah proses *running* atau simulasi selesai maka hasilnya dapat kita lihat di tahap solution pada Gambar 11. Pada tugas akhir ini hasil yang diinginkan berupa nilai *thrust force* model dan visualisasi aliran berupa 2 dimensi maupun 3 dimensi.



Gambar 11. Visualisasi Aliran

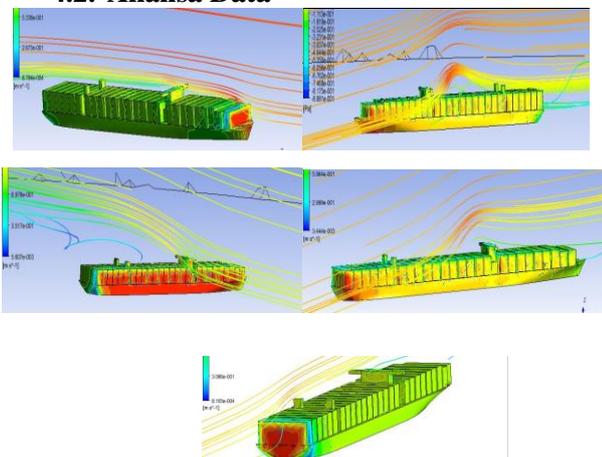
4.1.9. Perhitungan Force

Perhitungan force pada model dengan metode *Computational Fluid Dynamic* pada *post processor* (hasil running) diambil dari tahap *results* yaitu pada *function calculator*, *function* yang di inginkan yaitu *force*. *Location* merupakan pemilihan area yang ingin di ketahui nilainya . Kemudian dari data tersebut kita olah sehingga menjadi data yang matang.

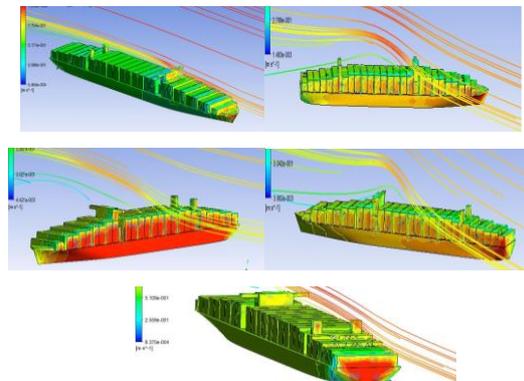


Gambar 13. Pengambilan Data

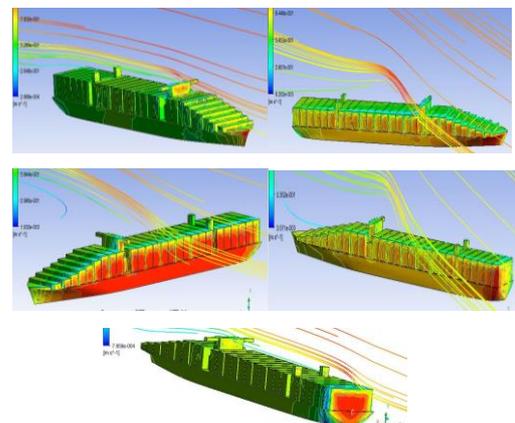
4.2. Analisa Data



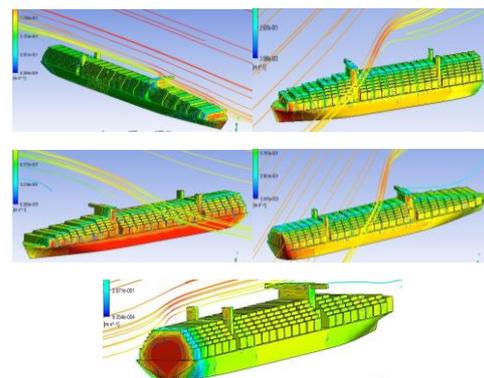
Gambar 14. *Streamline Velocity* pada Model 1 Kapal Muatan 1800 TEUS Sudut Datang Angin $0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}, 135^{\circ}, 180^{\circ}$



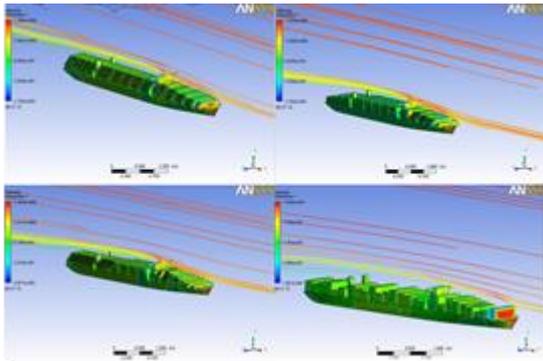
Gambar 15. *Streamline Velocity* pada Model 2 Kapal Muatan 16424 TEUS Sudut Datang Angin $0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}, 135^{\circ}, 180^{\circ}$



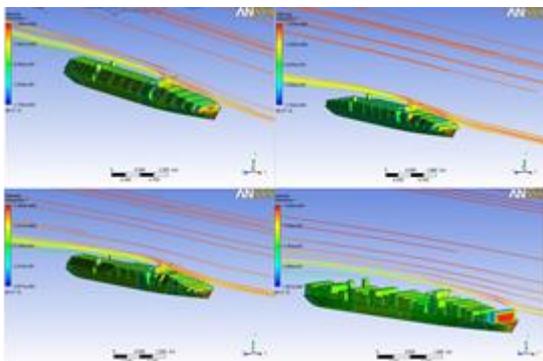
Gambar 16. *Streamline Velocity* pada Model 3 Kapal Muatan 16892 TEUS Sudut Datang Angin $0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}, 135^{\circ}, 180^{\circ}$



Gambar 17. *Streamline Velocity* pada Model 4 Kapal Muatan 15744 TEUS Sudut Datang Angin $0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}, 135^{\circ}, 180^{\circ}$



Gambar 19. *Streamline Velocity* pada Model Variasi 4.1, 4.2, 4.3, dan 4.4 Kapal Muatan 15744 TEUS Sudut Datang Angin 0° Kecepatan Angin 20 Knot



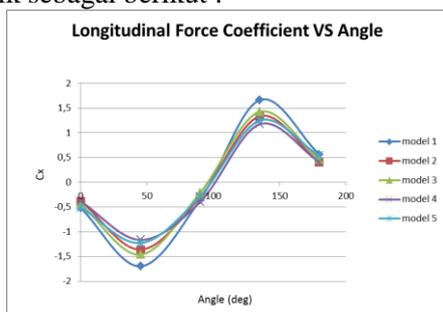
Gambar 20. *Streamline Velocity* pada Model Variasi 4.1, 4.2, 4.3, dan 4.4 Kapal Muatan 15744 TEUS Sudut Datang Angin 0° Kecepatan Angin 25 Knot

Dari hasil running simulasi pada Gambar 14 sampai dengan gambar 18 menunjukkan fenomena *Streamline velocity* dan *Pressure Contour* pada model yang berbeda. Dan pada model 1 mempunyai tekanan yang lebih besar di dibandingkan dengan model lain.

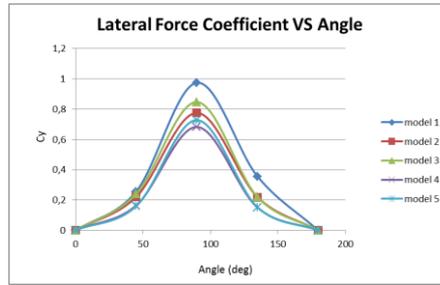
4.3. Pembahasan

4.3.1. Analisa Hamabatan Angin

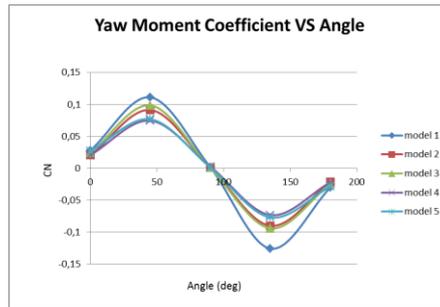
Dari hasil analisa diatas maka dapat dibuat grafik sebagai berikut :



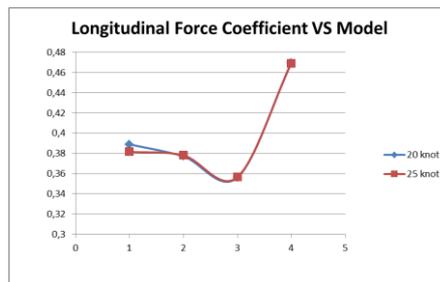
Gambar 21. Grafik Perbandingan Koefisien *Drag*



Gambar 22. Grafik Perbandingan Koefisien *Lift*



Gambar 23. Grafik Perbandingan Koefisien *Yaw Moment*



Gambar 23. Grafik Perbandingan Koefisien *Drag* Pada Model Variasi

Dari penyajian gambar dan grafik di atas pada gamba 14 sampai dengan gambar 18 dan pada gambar grafik 21 sampai gambar grafik 23 menunjukkan perbedaan nilai koefisien. Tanda (-) pada nilai koefisien menunjukkan arah ke belakang dan ke kiri kapal. Berikut kesimpulannya :

1. Nilai rata-rata koefisien terendah dihasilkan pada model 4 dengan muatan 87,46% dan *streamlined* pada bagian depan dan samping.
2. Nilai rata-rata koefisien tertinggi dihasilkan pada model 1 dengan muatan 100%.

4.3.2. Analisa Stabilitas

Stabilitas kapal dianalisa menggunakan *software Hydromax* dengan jenis analisa *large angle stability*. Sebelum analisa stabilitas dihitung, komponen *light weight tonnage* (LWT) dan komponen *dead weight tonnage* (DWT) harus diketahui. Posisi titik berat dari komponen tersebut harus dapat diperhitungkan hingga mendekati keadaan yang terdapat di dilapangan. Standar analisa stabilitas menggunakan ketentuan yang terdapat pada *International Maritime Organisation* (IMO). Standart stabilitas yang ditetapkan IMO adalah mengenai lengan stabilitas (GZ).

4.3.2.1. Perhitungan Stabilitas

Tabel 8. Hasil Analisa Standar IMO Model 1

| Code | IMO min | Model 1 | | | | | Status |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | |
| <i>All Ship</i> | | | | | | | |
| <i>Area 0°-30°</i> | 3,15 m.deg | 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 | Pass |
| <i>Area 0°-40°</i> | 5,15 m.deg | 97,38 | 97,38 | 97,38 | 97,38 | 97,38 | Pass |
| <i>Area 30°-40°</i> | 1,71 m.deg | 42,9 | 42,9 | 42,9 | 42,9 | 42,9 | Pass |
| <i>Max GFZ 30°/Grtr</i> | 0,2 m | 4,51 | 4,51 | 4,51 | 4,51 | 4,51 | Pass |
| <i>Angle of Max GZ</i> | 25 deg | 41 | 41 | 41 | 41 | 41 | Pass |
| <i>GFM0</i> | 0,15 m | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | Pass |
| <i>Severe Wind and Rolling</i> | 16,0 deg 80% 100% | 0,1 0,51 378,26 | 2,2 8,54 302,91 | 2,3 8,97 299,25 | 2,1 8,22 305,66 | 0,1 0,51 378,25 | Pass Pass Pass |
| <i>Container Ship >100</i> | | | | | | | |
| <i>Area 0°-30°</i> | 57,29 deg | 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 | 54,47 | Fail |
| <i>Area 0°-40°</i> | 57,29 deg | 97,38 | 97,38 | 97,38 | 97,38 | 97,38 | Pass |
| <i>Area 30°-40°</i> | 57,29 deg | 42,9 | 42,9 | 42,9 | 42,9 | 42,9 | Fail |
| <i>Max GFZ 30°/Grtr</i> | 1,0 m | 4,51 | 4,51 | 4,51 | 4,51 | 4,51 | Pass |
| <i>Angle of Max GZ</i> | 1,0 m | 4,51 | 4,51 | 4,51 | 4,51 | 4,51 | Pass |

Tabel 9. Hasil Analisa Standar IMO Model 2

| Code | IMO min | Model 2 | | | | | Status |
|-------------------------|------------|---------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | |
| <i>All Ship</i> | | | | | | | |
| <i>Area 0°-30°</i> | 3,15 m.deg | 59,31 | 59,31 | 59,31 | 59,31 | 59,31 | Pass |
| <i>Area 0°-40°</i> | 5,15 m.deg | 106,1 | 106,1 | 106,1 | 106,1 | 106,1 | Pass |
| <i>Area 30°-40°</i> | 1,71 m.deg | 46,79 | 46,79 | 46,79 | 46,79 | 46,79 | Pass |
| <i>Max GFZ 30°/Grtr</i> | 0,2 m | 4,98 | 4,98 | 4,98 | 4,98 | 4,98 | Pass |

| | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| <i>Angle of Max GZ</i> | 25 deg | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | Pass |
| <i>GFM0</i> | 0,15 m | 7,72 | 7,72 | 7,72 | 7,72 | 7,72 | Pass |
| <i>Severe Wind and Rolling</i> | 16,0 deg 80% 100% | 0,2 0,71 380,04 | 1,1 4,57 344 | 1,8 7,47 318,79 | 1,1 4,66 343,19 | 0,2 0,71 380,02 | Pass Pass Pass |
| <i>Container Ship >100</i> | | | | | | | |
| <i>Area 0°-30°</i> | 57,29 deg | 59,31 | 59,31 | 59,31 | 59,31 | 59,31 | Pass |
| <i>Area 0°-40°</i> | 57,29 deg | 106,1 | 106,1 | 106,1 | 106,1 | 106,1 | Pass |
| <i>Area 30°-40°</i> | 57,29 deg | 46,79 | 46,79 | 46,79 | 46,79 | 46,79 | Fail |
| <i>Max GFZ 30°/Grtr</i> | 1,0 m | 4,98 | 4,98 | 4,98 | 4,98 | 4,98 | Pass |
| <i>Angle of Max GZ</i> | 1,0 m | 4,98 | 4,98 | 4,98 | 4,98 | 4,98 | Pass |

Tabel 10. Hasil Analisa Standar IMO Model 3

| Code | IMO min | Model 3 | | | | | Status |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | |
| <i>All Ship</i> | | | | | | | |
| <i>Area 0°-30°</i> | 3,15 m.deg | 59,05 | 59,05 | 59,05 | 59,05 | 59,05 | Pass |
| <i>Area 0°-40°</i> | 5,15 m.deg | 105,53 | 105,53 | 105,53 | 105,53 | 105,53 | Pass |
| <i>Area 30°-40°</i> | 1,71 m.deg | 46,48 | 46,48 | 46,48 | 46,48 | 46,48 | Pass |
| <i>Max GFZ 30°/Grtr</i> | 0,2 m | 4,93 | 4,93 | 4,93 | 4,93 | 4,93 | Pass |
| <i>Angle of Max GZ</i> | 25 deg | 42 | 42 | 42 | 42 | 42 | Pass |
| <i>GFM0</i> | 0,15 m | 7,62 | 7,62 | 7,62 | 7,62 | 7,62 | Pass |
| <i>Severe Wind and Rolling</i> | 16,0 deg 80% 100% | 0,1 0,56 378,46 | 1,1 4,18 341,68 | 2 7,51 310,52 | 1,1 4,2 341,57 | 0,1 0,56 378,47 | Pass Pass Pass |
| <i>Container Ship >100</i> | | | | | | | |
| <i>Area 0°-30°</i> | 57,29 deg | 59,05 | 59,05 | 59,05 | 59,05 | 59,05 | Pass |
| <i>Area 0°-40°</i> | 57,29 deg | 105,53 | 105,53 | 105,53 | 105,53 | 105,53 | Pass |
| <i>Area 30°-40°</i> | 57,29 deg | 46,48 | 46,48 | 46,48 | 46,48 | 46,48 | Fail |
| <i>Max GFZ 30°/Grtr</i> | 1,0 m | 4,93 | 4,93 | 4,93 | 4,93 | 4,93 | Pass |
| <i>Angle of Max GZ</i> | 1,0 m | 4,93 | 4,93 | 4,93 | 4,93 | 4,93 | Pass |

Tabel 11. Hasil Analisa Standar IMO Model 4

| Code | IMO min | Model 4 | | | | | Status |
|-------------------------|------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | |
| <i>All Ship</i> | | | | | | | |
| <i>Area 0°-30°</i> | 3,15 m.deg | 61,77 | 61,77 | 61,77 | 61,77 | 61,77 | Pass |
| <i>Area 0°-40°</i> | 5,15 m.deg | 110,88 | 110,88 | 110,88 | 110,88 | 110,88 | Pass |
| <i>Area 30°-40°</i> | 1,71 m.deg | 49,1 | 49,1 | 49,1 | 49,1 | 49,1 | Pass |
| <i>Max GFZ 30°/Grtr</i> | 0,2 m | 5,25 | 5,25 | 5,25 | 5,25 | 5,25 | Pass |
| <i>Angle of Max GZ</i> | 25 deg | 42,5 | 42,5 | 42,5 | 42,5 | 42,5 | Pass |
| <i>GFM0</i> | 0,15 m | 8,04 | 8,04 | 8,04 | 8,04 | 8,04 | Pass |

| | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| <i>Severe</i> | 16,0 deg | 0,2 | 1 | 0,9 | 0,8 | 0,2 | Pass |
| <i>Wind and Rolling</i> | 80% | 0,65 | 3,94 | 3,37 | 3,05 | 0,65 | Pass |
| | 100% | 382,39 | 349,21 | 354,83 | 357,99 | 382,39 | Pass |
| <i>Container Ship >100</i> | | | | | | | |
| <i>Area 0°-30°</i> | 57,29 deg | 61,77 | 61,77 | 61,77 | 61,77 | 61,77 | Pass |
| <i>Area 0°-40°</i> | 57,29 deg | 110,88 | 110,88 | 110,88 | 110,88 | 110,88 | Pass |
| <i>Area 30°-40°</i> | 57,29 deg | 49,1 | 49,1 | 49,1 | 49,1 | 49,1 | Fail |
| <i>Max GFZ 30°/Grtr</i> | 1,0 m | 5,25 | 5,25 | 5,25 | 5,25 | 5,25 | Pass |
| <i>Angle of Max GZ</i> | 1,0 m | 5,25 | 5,25 | 5,25 | 5,25 | 5,25 | Pass |

Tabel 12. Hasil Analisa Standar IMO Model 5

| Code | IMO min | Model 5 | | | | | Status |
|-------------------------------|------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | |
| <i>All Ship</i> | | | | | | | |
| <i>Area 0°-30°</i> | 3,15 m.deg | 61,7 | 61,7 | 61,7 | 61,7 | 61,7 | Pass |
| <i>Area 0°-40°</i> | 5,15 m.deg | 110,58 | 110,58 | 110,58 | 110,58 | 110,58 | Pass |
| <i>Area 30°-40°</i> | 1,71 m.deg | 48,872 | 48,872 | 48,872 | 48,872 | 48,872 | Pass |
| <i>Max GFZ 30°/Grtr</i> | 0,2 m | 5,22 | 5,22 | 5,22 | 5,22 | 5,22 | Pass |
| <i>Angle of Max GZ</i> | 25 deg | 42,5 | 42,5 | 42,5 | 42,5 | 42,5 | Pass |
| <i>GFM0</i> | 0,15 m | 8,04 | 8,04 | 8,04 | 8,04 | 8,04 | Pass |
| <i>Severe</i> | 16,0 deg | 0,2 | 0,8 | 1 | 0,7 | 0,2 | Pass |
| <i>Wind and Rolling</i> | 80% | 0,67 | 3,27 | 3,89 | 2,93 | 0,67 | Pass |
| | 100% | 381,72 | 356,35 | 350,49 | 359,56 | 381,72 | Pass |
| <i>Container Ship >100</i> | | | | | | | |
| <i>Area 0°-30°</i> | 57,29 deg | 61,7 | 61,7 | 61,7 | 61,7 | 61,7 | Pass |
| <i>Area 0°-40°</i> | 57,29 deg | 110,58 | 110,58 | 110,58 | 110,58 | 110,58 | Pass |
| <i>Area 30°-40°</i> | 57,29 deg | 48,87 | 48,87 | 48,87 | 48,87 | 48,87 | Fail |
| <i>Max GFZ 30°/Grtr</i> | 1,0 m | 5,22 | 5,22 | 5,22 | 5,22 | 5,22 | Pass |
| <i>Angle of Max GZ</i> | 1,0 m | 5,22 | 5,22 | 5,22 | 5,22 | 5,22 | Pass |

Tabel 13. Hasil Analisa Standar IMO Model Variasi

| Code | IMO min | Model Variasi | | | | Status |
|-------------------------------|------------|---------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | |
| <i>All Ship</i> | | | | | | |
| <i>Area 0°-30°</i> | 3,15 m.deg | 61,78 | 60,17 | 60,8 | 57,59 | Pass |
| <i>Area 0°-40°</i> | 5,15 m.deg | 110,88 | 108,16 | 108,92 | 103,03 | Pass |
| <i>Area 30°-40°</i> | 1,71 m.deg | 49,1 | 48 | 48,12 | 45,44 | Pass |
| <i>Max GFZ 30°/Grtr</i> | 0,2 m | 5,25 | 5,13 | 5,13 | 4,81 | Pass |
| <i>Angle of Max GZ</i> | 25 deg | 42,5 | 42,5 | 42,5 | 41,5 | Pass |
| <i>GFM0</i> | 0,15 m | 8,04 | 7,84 | 7,88 | 7,46 | Pass |
| <i>Container Ship >100</i> | | | | | | |
| <i>Area 0°-30°</i> | 57,29 deg | 61,78 | 60,17 | 60,8 | 57,59 | Pass |
| <i>Area 0°-40°</i> | 57,29 deg | 110,88 | 108,16 | 108,92 | 103,03 | Pass |

| | | | | | | |
|-------------------------|-----------|------|------|-------|-------|------|
| <i>Area 30°-40°</i> | 57,29 deg | 49,1 | 48 | 48,12 | 45,44 | Fail |
| <i>Max GFZ 30°/Grtr</i> | 1,0 m | 5,25 | 5,13 | 5,13 | 4,81 | Pass |
| <i>Angle of Max GZ</i> | 1,0 m | 5,25 | 5,13 | 5,13 | 4,81 | Pass |

Dari penyajian tabel di atas pada tabel 8 sampai dengan tabel 12 menunjukkan perbedaan nilai stabilitas berdasarkan standar IMO. Nilai stabilitas paling baik didapat pada model empat dengan muatan 15744 TEUS *for-side streamlined* yaitu periode oleng sebesar 11.68 detik dan nilai *GZ* maksimal sebesar 5.25 meter terjadi peningkatan nilai *GZ* sebesar 15.74% dari model satu.

5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan percobaan dan simulasi yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Dari kelima variasi model tersebut, terlihat nilai hambatan terendah terjadi pada model empat dengan muatan 15744 TEUS *for-side streamlined* yaitu *coeffisien drag* sebesar 1.17, *coeffisien lift* sebesar 0.68, dan *coeffisien yaw moment* sebesar 0.07 terjadi efisiensi sebesar 30.78% untuk *coeffisien drag*, 29.92% untuk *coeffisien lift*, dan 40.74% untuk *coeffisien yaw moment* dari model satu dengan muatan 100% *non streamlined*.
2. Nilai stabilitas paling baik didapat pada model empat dengan muatan 15744 TEUS *for-side streamlined* yaitu periode oleng sebesar 11.68 detik dan nilai *GZ* maksimal sebesar 5.25 meter terjadi peningkatan nilai *GZ* sebesar 15.74% dari model satu.
3. Dan nilai hambatan terendah terjadi pada model 4.3 dengan muatan 87.46% *for-side streamlined* yaitu *coeffisien drag* sebesar 0,35.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Andersen, IMV, 2012, *Wind Force on Container Ships*, DTU Mechanical Engineering, Glasgow
- [2] Paco, A., Soares, G C., Wnek, A D., Zhou, X Q., 2010, *Numerical and experimental analysis of the wind forces acting on LNG Carrier*, Center for Marine and Engineering (CENTEC), Lisbon.
- [3] Angga, C., Munir, R., 2011, *PENGEMBANGAN ALGORITMA GREEDY UNTUK OPTIMALISASI PENATAAN PETI KEMAS PADA KAPAL PENGANGKUT*, Teknik Informatika ITB, Bandung.
- [4] Schumacher Cargo Logistics (2011) : *Cargo Shipping Container Sizes*, <http://www.schumachercargo.com/shipping-container-sizes.html>, pada 1 Maret 2015
- [5] Wahyudi, Amhar, 2015, *Studi Perancangan Sistem Penggadingan Kontruksi Ruang Muat Kapal Super Container 18.000 TEUS (Malacca-Max)*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Perkapalan, UNDIP : Semarang
- [6] Scholtens, Marco., Waals, Frans., Wijnolst, Niko., 1999, *MALACCA-MAX The Ultimate Container Carrier*, Delft University Press, Delft
- [7] Fujiwara, T., Nimura, T., Ueno, M., 2001, *An estimation method of wind forces and moments acting on ships*, National Maritime Research Institute, Japan
- [8] Huda, Nurul, 2013, *Analisa pengaruh Energy Saving Device pada Propeller dengan Metode CFD*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Perkapalan, UNDIP: Semarang