

**ANALISIS PENGGUNAAN *ASYMMETRIC PRE-SWIRL*
STATOR PADA *TWIN SCREW PROPELLER* UNTUK
PENINGKATAN EFISIENSI PROPULSI
KAPAL KMP BONTOHARU**

Disusun dan diajukan oleh:

**UMMI KALSUM. A.L
D33116313**



**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2021**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**ANALISIS PENGGUNAAN *ASYMMETRIC PRE-SWIRL*
STATOR PADA *TWIN SCREW PROPELLER* UNTUK PENINGKATAN
EFISIENSI PROPULSI KAPAL KMP BONTOHARU**

Disusun dan diajukan oleh:

UMMI KALSUM. A.L

D33116313

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 23 Februari 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

Andi Harys Muhammad, ST., MT., Ph.D.

NIP.196704042000031002

Muh. Iqbal Nikmatullah, ST., MT.

NIP.198701312019031007



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama Mahasiswa : Ummi Kalsum. A.L
NIM : D33116313
Program Studi : Teknik Sistem Perkapalan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulis saya yang berjudul:

Analisis Penggunaan Asymmetric Preswirl Stator Pada Twin Screw Propeller

Untuk Peningkatan Efisiensi Propulsi Kapal Kmp Bontoharu

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 23 Februari 2021

Yang membuat pernyataan,


METERAI
TEMPEL
K16DAH888855260
6000
TUAS RIBURUPIAH
Ummi Kalsum. A.L

ANALISIS PENGGUNAAN *ASYMETRIS PRE-SWIRL STATOR* PADA *TWIN SCREW PROPELLER* UNTUK PENINGKATAN EFISIENSI PROPULSI KAPAL KMP BONTOHARU

Ummi kalsum A.L. ¹⁾

Andi Haris Muhammad, ST, MT, Ph.D. ²⁾

M. Iqbal Nikmatullah, ST, MT. ²⁾

¹⁾ Mahasiswa Teknik Sistem Perkapalan FT-UH

²⁾ Dosen Teknik Sistem Perkapalan FT-UH

Email : ummikalsumal31@gmail.com

ABSTRAK

Organisasi Maritim Internasional (IMO) memperkenalkan Indeks Desain Efisiensi Energi (EEDI) untuk pembangunan kapal baru guna menanggapi kekhawatiran yang berkembang tentang pemanasan global dan menipisnya bahan bakar fosil. Banyak penelitian difokuskan untuk mengimplementasikan hal tersebut dengan meningkatkan bentuk lambung dan sistem propulsi guna menurunkan EEDI. Salah satunya dengan penggunaan ESD (*Energy saving device*). *Pre-swirl Stator* (PSS) merupakan salah satu jenis ESD yaitu semacam perangkat tambahan sistem propulsi kapal guna meningkatkan efisiensi propulsi kapal. Dengan membandingkan beberapa jenis ESD yang ada sejauh ini, sistem pre-swirl stator memiliki beberapa kelebihan, yaitu sistem *shaft* yang simple, biaya yang relative rendah, perolehan efisiensi yang besar, dan keandalan yang tinggi. PSS yang diletakkan di depan *propeller* dapat meningkatkan efisiensi propulsi dengan mengurangi kehilangan energi rotasi pada aliran baling-baling. Tujuan penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan PSS asimetris terhadap karakteristik *propeller* meliputi *thrust*, torsi dan rps, peningkatan efisiensi propulsi serta pengaruh variasi diameter dari PSS pada kecepatan konstan 6.618 m/s. Pada penelitian ini dilakukan variasi diameter stator yaitu $\frac{1}{2}DP$, $\frac{3}{4}DP$, DP , $1.1DP$, $1.2DP$. Jumlah stator sebanyak 4 buah pada masing-masing *propeller* dengan posisi 45° , 90° , 135° , dan 270° dengan desain sudut *pitch* masing-masing 7° , 10° , 8° , 4° . Metode pendekatan yang digunakan yaitu metode CFD. Hasil penelitian menunjukkan penambahan pre-swirl stator pada *propeller* kapal memiliki pengaruh dalam meningkatkan *thrust*/torsi dan mereduksi kecepatan rotasi *propeller*. Efisiensi propulsi optimum dicapai saat penggunaan $DS=1.1 DP$ yakni 6.64%.

Kata kunci: Pre-swirl stator, *Computational fluid dynamic*, Efisiensi propulsi.

ASYMMETRIC PRESWIRL STATOR ANALYSIS ON TWIN SCREW *PROPELLER* FOR INCREASING PROPULSION EFFICIENCY OF KMP BONTOHARU

Ummi kalsum A.L.¹⁾

Andi Haris Muhammad, ST, MT, Ph.D. ²⁾

M. Iqbal Nikmatullah, ST, MT. ²⁾

¹⁾ Student of Marine Engineering FT-UH

²⁾ Lecturers of Marine Engineering FT-UH

Email : ummikalsumal31@gmail.com

ABSTRACT

The International Maritime Organization (IMO) introduced the Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new shipbuilding to respond the growing concerns about global warming and depletion of fossil fuels. Much research has been focused on implementing that by improving the hull shape and propulsion system to reduce EEDI. One of which is by using ESD (Energy Saving Device). Pre-swirl stator (PSS) is a type of ESD, which is a kind of enhancement to the ship's propulsion system to increase the propulsion efficiency. By comparing several types of ESD that exist so far, the pre-swirl stator system has several advantages, namely a simple shaft system, relatively low cost, high efficiency gains, and high reliability. The PSS placed in front of the propeller can increase propulsion efficiency by reducing the loss of rotational energy in the flow of the propeller. The purpose of this study was to determine the effect of the addition of asymmetric PSS on propeller characteristics including thrust, torque and rps, the effect of PSS on increased propulsion efficiency and the effect of diameter variation of the PSS. In this study, variations of stator's diameter were used, namely $\frac{1}{2}DP$, $\frac{3}{4}DP$, DP , $1.1DP$, $1.2DP$. There are 4 stators on each propeller with a position of 45° , 90° , 135° , and 270° with a constant *pitch* angle design of 7° , 10° , 8° , 4° respectively. The approach method used was the CFD method. The results showed that the addition of pre-swirl stator to the ship's propeller had an effect on increasing thrust/torque and reducing the rotational speed of the propeller. Where the optimum propulsion efficiency is achieved when using $DS = 1.1 DP$ which is 5.64%.

Keywords: Pre-swirl stator, Computational fluid dynamic, Propulsion efficiency.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil ‘alamin, puji syukur kehadiran Allah subhanawata’ala atas rampungnya skripsi ini. Tidak sedikit kendala yang menghadang penyusun dalam menyelesaikan skripsi ini, namun berkat rahmat dan hidayah-Nya telah membimbing penyusun untuk terus berusaha menyelesaikan salah satu mata kuliah di departemen Teknik Sistem Perkapalan, Universitas Hasanuddin.

Ini merupakan persyaratan untuk menyelesaikan studi di departemen Teknik Sistem Perkapalan – Universitas Hasanuddin. Penyusun harus mengakui, skripsi ini masih sangat jauh dari sempurna, semua karena keterbatasan waktu dan pengetahuan serta kemampuan penyusun sebagai manusia biasa. Untuk itu penyusun mohon maaf atas semua kekurangan dan kesalahan yang terjadi di dalam penyusunan skripsi “Analisis Penggunaan *Asymmetric Pres-Swirl Stator* Pada *Twin Screw Propeller* Untuk Peningkatan Efisiensi Propulsi Kapal Kmp Bontoharu” ini, serta penyusun berharap masukan dan saran agar kedepannya penyusun dapat lebih baik lagi.

Dalam penyusunan skripsi ini, banyak pihak yang telah membantu penulis baik secara langsung maupun tidak langsung, secara moril maupun materil. Oleh sebab itu, penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada:

1. **Allah Subhanawata’alah**
2. **Ibu Hasnawati** dan **Bapak Amirullah Dg La’lang** selaku orang tua penulis yang senantiasa melangitkan doanya dan memberikan dukungan secara moril dan materil.
3. **Dr. Eng Faisal Mahmudin S.T., M.Eng.** selaku ketua Departemen Teknik Sistem Perkapalan.

4. **Andi Haris Muhammad, ST.,MT, Ph.D** selaku ketua Laboraturium Propulsi Teknik Sistem Perkapalan sekaligus dosen pembimbing yang senantiasa meluangkan waktunya untuk membantu penulis dengan memberikan bimbingan, kritik dan saran.
5. **Muhammad Iqbal Nikmatullah. S.T., M.T.** selaku dosen pembimbing yang senantiasa meluangkan waktunya untuk membantu penulis dengan memberikan bimbingan, kritik dan saran.
6. **Rahimuddin,ST.,MT., PhD** dan **Dr. Eng Faisal Mahmudin S.T., M.Eng.** selaku dosen penguji.
7. **Bapak/Ibu Dosen** Departemen Teknik Sistem Perkapalan yang telah memberikan bekal pengetahuan dan keterampilan.
8. **Ibu Uni** selaku Staf Administrasi Departemen Teknik Sistem Perkapalan yang telah membantu penulis dalam hal administratif.
9. **Teman-teman Anzyz16** yakni teman-teman seperjuangan sistem perkapalan 2016 yang selalu memberikan *support*-nya dan bantuannya untuk penulis serta ikut mewarnai masa-masa kuliah penulis.
10. **Saudari-saudari girls09** yakni **Sutyani, Idawati, Izdihar, Aisyah, Renil, Ika, Dilla dan Sofa** telah menjadi teman yang sangat baik untuk penulis dalam suka maupun duka.
11. **Saudara-saudari Cruizer16** yang ikut mewarnai dan kebersamaan masa-masa kuliah penulis.
12. **Senior-senior Ztringer14** yang senantiasa berbagi ilmu dan pengalamannya pada penulis dan kawan-kawan.
13. **Senior-senior angkatan 2014 dan 2015** khususnya **Yasir (SP'14), Prapaskah Esha Putra (SP'15), Alfian (SP'15)** yang senantiasa

membantu penulis dalam menyusun skripsi dengan memberikan bimbingan dan masukan. Serta kepada **Zukhra subagio (SP'14)**, **Fahrul (SP'14)**, **La ode sulaiman (SP'15)**, **Fajrin Syawal (SP'15)** dan **Muh.Samad (SP'15)** yang telah membantu penulis dalam menyusun kelengkapan map merah.

14. **Saudari Sutyani** yang telah menjadi teman yang sangat baik untuk penulis dan teman seperjuangan yang ikut membersamai penulis selalu dalam suka maupun duka, dan seseorang yang telah banyak menyumbangkan goresan indahnyanya untuk cerita penulis dimasa kuliahnya.
15. **Saudara Abd.Azis** yang telah menjadi teman yang selalu memasak penulis dan teman-teman makanan yang enak dan membantu dalam menyukseskan tersajinya konsumsi seminar.
16. **Saudara Aidil, Yusril serta saudari Idawati** yang menemani penulis di kampus sampai malam hari untuk menyelesaikan skripsi dan terima kasih atas traktiran *stick mozarellah*-nya yang enak.
17. **Teman-teman KKN Jeneponto 2** yang telah menjadikan cerita KKN penulis sangat berkesan.
18. **Teman-teman SMA** yang sampai saat ini masih membersamai penulis khususnya **saudari Yuyu, Indah, Yusti, Winda** dan saudara-saudari lain yang tidak disebutkan.
19. **Teman-teman Kerja Praktek yakni saudari Sutyani dan saudara afdhalas Ramadhan** yang membuat kerja praktek penulis menjadi sangat berkesan.

Akhirnya penyusun berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penyusun secara pribadi serta pada pembaca yang menjadikan skripsi ini sebagai acuan atau pedoman dalam pembelajaran ataupun dalam menyusun skripsi. Semoga Allah SWT senantiasa memberikan rahmat dan hidayah-Nya pada kita semua. Aamiin.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarokatuh.

Gowa, 09 Februari 2021

Penyusun

Ummi Kalsum. A.L

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	6
1.5 Manfaat Penelitian	7
1.6 Sistematika Penulisan	7
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Kapal Ferry	9
2.2 Twin Screw <i>Propeller</i>	9
2.3 <i>Propeller</i>	10
2.3.1 Geometri <i>Propeller</i>	11
2.3.2 Karakteristik <i>Open Water</i>	13
2.3.3 Karakteristik Baling-baling di Belakang Lambung	14
2.3.4 Parameter Aliran di Sekeliling <i>Propeller</i>	15
2.4 Pre-swirl Stator (PSS).....	18
2.5 Peningkatan Performa Propeler dengan PSS	19
2.6 Analisis Performa	21
2.7 Konsep CFD (Computational Fluid Dynamic).....	22

2.8 Simulasi CFD (Computational Fluid Dynamic).....	27
2.9 Evaluasi Nilai Hasil Simulasi CFD	32
2.9.1 Evaluasi Nilai Tahanan Model Kapal	32
2.9.2 Evaluasi Nilai Efisiensi <i>Open Water Test</i> dengan Grafik Wagenigen.....	36
2.9.3 <i>Grid Convergence Index</i> (GCI).....	37
BAB 3. METODE PENELITIAN	40
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	40
3.2 Studi Literatur	40
3.3 Pengumpulan Data.....	41
3.4 Pemodelan Struktur	42
3.5 Simulasi CFD.....	43
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	46
4.1 Gambaran Umum.....	46
4.2 Tahap Pelaksanaan.....	46
4.2.1 Tahap Pembuatan Model.....	46
4.2.2 Tahap Simulasi pada Software Ansys CFX	51
4.3 Evaluasi Nilai Hasil Simulasi CFD	57
4.3.1 Evaluasi Nilai Efisiensi <i>Open Water Test</i> dengan Grafik Wagenigen.....	57
4.3.2 Evaluasi Nilai Tahanan Model Kapal	58
4.3.3 Evaluasi Hasil Running CFD dengan <i>Grid Convergence Index</i> (GCI)	59
4.4 Data Hasil Simulasi	62
4.4.1 <i>Thrust, Torque</i> dan Rps.....	62
4.4.2 Efisiensi Propulsi.....	66
BAB 5. PENUTUP	70
5.1 Kesimpulan	70
5.2 Saran	71
DAFTAR PUSTAKA	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Propeller geometry</i>	12
Gambar 2.2 Contoh penerapan pre-swirl stator.....	18
Gambar 2.3 Bentuk dasar pre-swirl stator.....	18
Gambar 2.4 Pre-swirl stator asimetris.....	19
Gambar 2.5 <i>Velocity</i> dan gaya untuk <i>propeller</i> dan <i>propeller</i> dengan preswirl..	20
Gambar 2.6 Hasil <i>meshing</i> dan kondisi batas.....	31
Gambar 2.7 Interpretasi animasi hasil simulasi CFX.....	32
Gambar 2.8 Kurva <i>open water test</i>	37
Gambar 3.1 Diagram alur penelitian.....	45
Gambar 4.1 <i>Lines plan</i> Kapal Bontoharu	47
Gambar 4.2 Model lambung Kapal Bontoharu.....	48
Gambar 4.3 Model <i>propeller</i> Kapal Bontoharu.....	48
Gambar 4.4 Model lambung dan <i>propeller</i> Kapal Bontoharu.....	49
Gambar 4.5 Desain stator.....	49
Gambar 4.6 Variasi diameter stator.....	50
Gambar 4.7 Model stator pada <i>propeller</i> kapal.....	50
Gambar 4.8 <i>Boundary condition</i>	52
Gambar 4.9 Proses <i>meshing</i> pada Ansys CFX 18.1.....	54
Gambar 4.10 Hasil simulasi tahap <i>result</i> pada Ansys CFX 18.1.....	56
Gambar 4.11 Kurva perbandingan hasil simulasi kondisi <i>open water test</i> dengan Wageningen.....	57
Gambar 4.12 Kurva perbandingan perhitungan <i>thrust</i> dan tahanan hasil pendekatan dengan metode Holtrop dan simulasi CFD.....	58
Gambar 4.13 Resolusi <i>mesh fine level</i>	60
Gambar 4.14 Resolusi <i>mesh medium level</i>	60
Gambar 4.15 Resolusi <i>mesh coarse level</i>	60
Gambar 4.16 Grafik hubungan <i>thrust</i> dengan diameter PSS.....	63
Gambar 4.17 Grafik hubungan <i>torque</i> dengan diameter PSS.....	64
Gambar 4.18 Grafik hubungan diameter PSS dengan rps.....	65
Gambar 4.19 Hubungan penambahan diameter PSS dengan efisiensi.....	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Harga faktor bagian hambatan ($1+k_2$).....	33
Tabel 3.1 Data kapal.....	41
Tabel 3.2 Koefisien bentuk kapal.....	41
Tabel 3.3 Data <i>propeller</i>	41
Tabel 3.4 Data stator.....	42
Tabel 4.1 Validasi model lambung kapal dengan Maxsurf.....	47
Tabel 4.2 Rekapitulasi pembacaan Grafik Wageningen dan simulasi Ansys CFX.....	58
Tabel 4.3 Nilai <i>thrust</i> dan tahanan hasil pendekatan dengan Metode Holtrop dan simulasi CFD.....	59
Tabel 4.4 Perhitungan <i>discretization error</i>	61
Tabel 4.5 <i>Thrust</i> yang dihasilkan dari simulasi CFX.....	62
Tabel 4.6 Torsi yang dihasilkan dari simulasi CFX.....	64
Tabel 4.7 Rps yang dihasilkan dari simulasi CFX.....	66
Tabel 4.8 Efisiensi propulsi pada setiap kondisi.....	68
Tabel 4.9 Analisis performa penggunaan PSS.....	69

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

ESD	: <i>Energy Saving Device</i>
PSS	: <i>Pre-swirl Stator</i>
CFD	: <i>Computation Fluid Dynamic</i>
DP	: <i>Diameter Propeller (m)</i>
DS	: <i>Diameter Stator (m)</i>
T	: <i>Thrust (kN)</i>
Q	: <i>Torque (kNm)</i>
R	: <i>Resistance (kN)</i>
PE	: <i>Daya Efektif (kW)</i>
PD	: <i>Daya delivery (kW)</i>
RT	: <i>Tahanan Total (kN)</i>
η_p	: <i>Efisiensi Propeller</i>
η_D	: <i>Efisiensi Hidrodinamik</i>
V_s	: <i>Kecepatan Service (m/s)</i>
N	: <i>Jumlah Grid (elemen)</i>
KT	: <i>Koefisien thrust</i>
KQ	: <i>Koefisien Torsi</i>
J_s	: <i>Advance coefficient</i>
V_a	: <i>Kecepatan gerak maju (m/s)</i>
n	: <i>Kecepatan rotasi (rps)</i>
ρ	: <i>Kepadatan cairan (kg/m³)</i>
μ	: <i>Viskositas fluida (μ)</i>
t	: <i>Waktu (s)</i>
E_t	: <i>Energi Total (kJ)</i>
P	: <i>Tekanan (N/m²)</i>
Q	: <i>Heat Flux (kW/m²)</i>
Re	: <i>Bilangan Reynold</i>
Pr	: <i>Bilangan Prandtl</i>
C_b	: <i>Block coefficient</i>
C_p	: <i>Prismatic coefficient</i>

- Cm : *Midship coefficient*
Cw : *Waterline coefficient*
GCI : *Grid Convergence Index*
r : *Grid refinement factor*
h : *Mesh* atau jumlah *grid* yang representatif
 \emptyset : Variabel tujuan studi simulasi

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil simulasi dengan Ansys CFX 8.1(<i>Streamline</i>).....	76
Lampiran 2. Hasil simulasi dengan Ansys CFX 8.1 (<i>Contour</i>)	79
Lampiran 3. Desain model pre-swirl pada <i>propeller</i>	87
Lampiran 4. Perhitungan <i>engine matching</i>	89

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Organisasi Maritim Internasional (IMO) memperkenalkan Indeks Desain Efisiensi Energi (EEDI) untuk pembangunan kapal baru guna menanggapi kekhawatiran yang berkembang tentang pemanasan global dan menipisnya bahan bakar fosil. Sejak 2013, IMO telah memastikan bahwa EEDI harus dikurangi dari 10% menjadi 30% hingga 2015. Berdasarkan hal tersebut, banyak penelitian difokuskan untuk mengimplementasikan hal tersebut dengan meningkatkan atau mengefektifkan bentuk lambung dan sistem propulsi guna menurunkan EEDI.

Salah satu hal yang dapat dilakukan untuk penghematan bahan bakar pada kapal dapat dilakukan dengan penambahan ESD (*Energy saving device*). ESD yaitu semacam perangkat tambahan sistem propulsi kapal guna meningkatkan efisiensi propulsi kapal. Sejauh ini, ada beberapa *energy saving device* yang dikenal pada kapal yaitu *contra-rotating propellers*, *ducted propellers*, *pre-swirl stator* (PSS), dan sebagainya. *Contra-rotating propeller* dinyatakan menjadi *energy saving device* terbaik dalam memperoleh efisiensi. Namun, dalam penerapannya diperlukan biaya yang tinggi dan perawatan sistem poros yang sulit. Sementara untuk *vane wheel propeller*, potensi kerusakan pada daun besar karena diameter *blade vane wheel* yang lebih besar daripada diameter *propeller*, karenanya banyak kecelakaan yang dilaporkan. Begitupun dengan *ducted propeller*, efisiensi yang dihasilkan besar namun seiring dengan bertambahnya kecepatan kapal, *duct drag* meningkat dibandingkan dengan peningkatan gaya dorong ke depan [1].

Dengan membandingkan beberapa jenis *energy saving device* yang ada sejauh ini, sistem *pre-swirl stator* memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan ESD lainnya, yaitu sistem poros yang simple, biaya yang relatif rendah, perolehan efisiensi yang besar, dan keandalan yang tinggi. *Pre-swirl stator* yang diletakkan di depan *propeller* dapat meningkatkan efisiensi propulsi dengan mengurangi kehilangan energi rotasi pada aliran baling-baling [2].

Beberapa penelitian dilakukan untuk menguji PSS mulai dari penelitian dasar mengenai fenomena mekanisme perolehan efisiensi dengan stator simetris dengan metode analisis untuk tes model oleh KRISO group. Bentuk dasar dari PSS yaitu berupa bilah stator yang jumlahnya 6 bilah, diletakkan di depan *propeller*.

Selanjutnya muncul desain baru yaitu *asymmetric pre-swirl stator*. PSS ini terdiri dari 4 bilah stator di depan *propeller*. 3 bilah stator di *starboard side* dan 1 bilah stator di *port side* yang disebut dengan *starboard* stator ataupun sebaliknya, 1 bilah stator di *starboard side* dan 3 bilah stator di *portside* disebut *port* stator. Selain dengan 4 bilah stator, studi dengan jumlah stator yang berbeda juga dilakukan seperti 2 bilah pada *port side* dan 1 bilah pada *starboard side*, atau 3 bilah pada *port side* dan tanpa bilah di *starboard side*. Berdasarkan hasil percobaan ternyata 4 bilah stator memberikan efisiensi yang hampir sama dengan penggunaan 6 bilah stator [3]. Hal itu membuat stator asimetris memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan simetris stator seperti bobot yang ringan, ukuran yang lebih kecil, dan biaya instalasi yang lebih murah. Berdasarkan hasil dari beberapa penelitian, 3 bilah di sisi *port* dan 1 bilah di sisi *starboard*, secara efektif memulihkan kehilangan energi rotasi dengan memanfaatkan aliran tidak simetris di belakang kapal dan diperoleh efisiensi sebesar 5.6%. Jika diperhitungkan sudut

pitch yang optimum, lebih dari 5.6% perolehan efisiensi dapat dicapai dimana nilai perolehan ini hampir sama dengan penggunaan 6 bilah stator [1]. Sedangkan sebesar 10.3 % efisiensi kinerja baling-baling di peroleh pada HSVA PSS [4]. Alasan penggunaan stator asimetris yaitu akibat aliran yang asimetris di belakang lambung yang masuk ke *propeller*. Hal ini dengan memperhatikan kontur yang asimetri, dimana komponen kecepatan rotasi di sisi kanan dibatalkan oleh kecepatan tangensial yang diinduksi baling-baling [5].

Studi optimasi dari PSS pun banyak dilakukan. Empat bilah stator dipilih menjadi pilihan yang baik untuk studi optimasi. Sementara untuk diameter stator, pengaruh diameter stator *blade* (DS) diselidiki dengan menambah atau mengurangi diameter dari konfigurasi stator awal, yang sama dengan diameter baling-baling (DP). Ukuran bilah stator yang serupa dengan diameter baling-baling tampaknya lebih optimal [5]. Namun hasil penelitian berikutnya menunjukkan bahwa diameter yang lebih besar dari pada baling-baling akan menguntungkan karena mencegah terjadinya kavitasi *tip vortex* [6,7]. Perkiraan penghematan daya yang realistis karena pemasangan PSS adalah 4-5% ketika penekanan *hub vortex* disertakan [8]. Parameter desain lain yang diselidiki adalah posisi sudut bilah stator. Variasi sistematis posisi sudut dibuat dengan memutar bilah stator dari posisi semula yaitu diputar searah jarum jam dengan sudut 15° dan 30°. Nilai Q_n yang diprediksi cukup sensitif terhadap posisi sudut bilah stator terutama stator sisi *port* yang diputar ke bagian bawah dari posisi semula. Di sisi lain, tidak ada perbedaan praktis dalam nilai-nilai Q_n yang diprediksi dan dicatat ketika dirotasi [5]. Studi optimasi lainnya yaitu untuk sudut *pitch* stator. Tidak ada perbedaan yang signifikan yang dihasilkan dari perubahan sudut *pitch* tetapi beberapa perubahan yang nyata dalam aliran lokal

di belakang PSS dapat ditemukan. Bilah menghasilkan lebih banyak pengangkatan seiring dengan meningkatnya sudut *pitch*. Vortisitas ujung yang jauh lebih kuat dihasilkan dari keempat bilah PSS dan beberapa perubahan arah aliran akibat pengangkatan yang dihasilkan. Penambahan stator tentunya menimbulkan tahanan akibat adanya gesekan permukaan bilah stator dengan air yang melaluinya. Namun hal ini tidak sebanding dengan peningkatan efisiensi yang dihasilkan sehingga dapat diabaikan. Sebesar 6.9% rata-rata penambahan tahanan dan 11% peningkatan EHP [9]. Hal ini disebabkan oleh gesekan gesekan pada permukaan saluran. Untuk menghasilkan tahanan yang lebih kecil investigasi terhadap model bilah pun dilakukan [10].

Berbagai metode yang digunakan sejumlah besar penelitian tentang ESD baik secara eksperimental maupun komputasi. Optimasi hidrodinamika pre-swirl stator dengan CFD dan pengujian model [5], studi PSS menggunakan *lifting line theory* and CFD [11], pengembangan ESD dan perbandingan efisiensi *quasi-propulsive* yang diprediksi oleh metode ITTC 78 dan ITTC 99 yang dimodifikasi [12] dan investigasi mengenai *performa Asymmetric Pre-Swirl Stator* pada kapal kontainer dengan pengujian model dan CFD [9].

Berdasarkan uraian diatas *pre-swirl stator* atau lebih khususnya *Asymmetric pre-swirl stator* merupakan jenis ESD yang memiliki banyak kelebihan dari ESD lainnya untuk digunakan pada kapal guna meningkatkan efisiensi *propeller* yang secara tidak langsung mengurangi atau menghemat penggunaan bahan bakar. Pada penelitian ini, akan mengkaji dan menganalisis karakteristik dari penggunaan *asymmetric pre-swirl stator* pada kapal *twin screw propeller* dengan metode CFD dengan menggunakan aplikasi Ansys CFX.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, maka dapat dirumuskan permasalahan yang ada yaitu:

1. Bagaimana karakteristik *propeller* dari penambahan *asymmetric pre-swirl stator* pada *twin screw propeller*?
2. Bagaimana efisiensi propulsi yang dihasilkan dari penambahan *asymmetric pre-swirl stator* pada *twin screw propeller*?
3. Bagaimana pengaruh variasi diameter dari *asymmetric pre-swirl stator* pada *twin screw propeller* terhadap peningkatan efisiensi propulsi?

1.3 Batasan Masalah

Terkait masalah yang timbul maka perlu adanya pembatasan masalah agar sesuai dengan permasalahan dan tujuan yang di harapkan serta dapat mempermudah dalam melakukan analisa. Maka adapun batasan masalah yang dibahas sebagai berikut:

1. Kapal yang digunakan yaitu kapal Ferry Ro-Ro KMP Bontoharu 1050 GT.
2. Penelitian memperhitungkan pengaruh lambung kapal.
3. Menganalisa satu macam *propeller* yaitu *propeller* B-series dengan 4 daun dan jenis *twin screw propeller*.
4. Penelitian menggunakan komputer dengan software ANSYS CFX.
5. Analisa data dikerjakan dengan membandingkan parameter *propeller* sebelum dan setelah penambahan PSS.
6. Getaran *propeller* diabaikan.

7. Memvariasikan diameter stator yang digunakan yaitu dengan variasi diameter yaitu sebesar $\frac{1}{2}$ DP, $\frac{3}{4}$ DP, DP, 1.1 DP, 1.2 DP.
8. Jumlah stator sebanyak 4 buah pada masing-masing *propeller* dengan posisi 45° , 90° , 135° , dan 270° dengan desain sudut *pitch* yang konstan masing-masing 7° , 10° , 8° , 4° .
9. Validasi dilakukan hanya dengan membandingkan hasil simulasi CFD dengan perhitungan tahanan metode holtrop, karakteristik *propeller* dengan grafik Wagenigen serta menggunakan metode GCI (*Grid Convergence Index*) untuk menghitung *discretization error* hasil simulasi pada beberapa resolusi *mesh* tidak dengan hasil eksperimen/penelitian sebelumnya karena pemodelan pada software Ansys cukup kompleks.
10. Analisa biaya tidak diperhitungkan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini dilakukan yaitu sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui pengaruh penambahan *asymmetric pre-swirl stator* terhadap karakteristik *propeller* pada *twin screw propeller*.
2. Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh penambahan *asymmetric pre-swirl stator* pada *twin screw propeller* terhadap peningkatan efisiensi propulsi.
3. Untuk mengetahui pengaruh variasi diameter dari *asymmetric pre-swirl stator* pada *twin screw propeller* terhadap peningkatan efisiensi propulsi.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Sebagai referensi untuk penggunaan *pre-swirl stator* pada sistem propulsi kapal *twin screw propeller*.
2. Dapat menjadi referensi dalam penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan masalah ini.

1.6 Sistematika Penulisan

Secara garis besar penyusunan proposal skripsi dan pembaca memahami uraian dan makna secara sistematis, maka skripsi disusun pada pola berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab ini konsep dasar penyusunan skripsi yang meliputi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini diberikan penjelasan mengenai teori dasar yang digunakan dalam penyelesaian skripsi ini yaitu teori dasar mengenai karakteristik *propeller* dan parameter aliran *propeller*, peningkatan performa *propeller* dengan *pre-swirl stator*, prosedur analisis aliran, CFD (*computational fluid dynamic*), *twin screw propeller*, proses desain stator yang digunakan untuk menyelesaikan penelitian ini.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan tahapan-tahapan yang berupa proses yang dimulai dari mengidentifikasi masalah yang ada hingga hasil akhir yang diharapkan.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan penyajian data-data yang telah diperoleh, proses pengolahan data serta hasil pengolahan data.

BAB V : PENUTUP

Bab ini akan disajikan secara singkat kesimpulan yang diperoleh dari pembahasan dan juga memuat saran-saran bagi pihak yang berkepentingan untuk pengembangan penelitian lebih lanjut.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kapal Ferry

Kapal Ferry atau yang juga biasa dikenal dengan kapal penyebrangan adalah sebuah kapal transportasi jarak dekat yang memenuhi syarat-syarat pelayaran di laut yang digunakan untuk menyelenggarakan perhubungan tetap misalnya saja pelayaran antar pulau. Kapal Ferry memiliki peranan yang sangat penting dalam sistem pengangkutan terutama bagi kota-kota yang berada di pesisir pantai. Selain itu juga dengan adanya kapal Ferry memungkinkan anda untuk membuat transit secara langsung diantara kedua tempat tujuan anda dengan biaya yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan jembatan ataupun terowongan. Oleh karena itu kegunaan yang utama dari kapal Ferry ini adalah digunakan sebagai sarana penyebrangan termasuk dalam menyeberangkan kendaraan atau alat transportasi darat, misalnya saja seperti mobil, truk, dan lain sebagainya.

Kapal Ferry mempunyai kriteria tersendiri dalam perencanaannya, antara lain menyangkut stabilitas kapal, kebutuhan luas geladak, batasan atas panjang dan sarat air kapal serta kemampuan *maneuver*-nya.

2.2 Twin Screw Propeller

Berdasarkan jumlahnya *propeller* terbagi menjadi dua yakni, baling-baling tunggal (*single screw*) dan baling-baling ganda (*twin screw*). Baling-baling tunggal dipergunakan hampir pada semua bentuk dan tipe kapal karena lebih praktis dalam pemasangan dan perawatan yang lebih mudah. Jenis *single screw* ini kebanyakan menggunakan baling-baling putar kanan. Sementara itu, Baling-baling ganda pada

umumnya dipasang pada kapal tunda dan Ferry dengan pertimbangan adanya dua mesin yang sejenis (memiliki kapasitas yang sama) tetapi lebih kecil dari mesin tunggal sehingga dapat menghemat pemakaian ruang mesin. Selain itu jika salah satu mesin gagal maka operasional kapal tetap berjalan meskipun dengan kemampuan yang lebih rendah.

Kapal *Twin-screw propeller* meningkatkan efisiensi pendorong tanpa kehilangan kemampuan *maneuver*. Kapal ini dicirikan oleh pengaturan simetris dari baling-baling sekrup di setiap sisi bidang *longitudinal* dan berkenaan dengan kemudi tunggal yang ditempatkan di sepanjang bidang ini. Susunan baling-baling dan ukuran kemudi sedemikian sehingga diameter masing-masing baling-baling kurang dari jarak antara garis tengah poros baling-baling, tetapi jaraknya sama dengan atau kurang dari diameter ditambah ketebalan kemudi [13].

2.3 Propeller

Sebuah kapal yang bergerak mengalami gaya-gaya tahanan dari air dan udara yang harus diatasi dengan daya dorong yang dipasok oleh beberapa mekanisme penghasil tenaga dorong.

Baling-baling menghasilkan gaya dorong melalui produksi gaya angkat dengan putaran bilah. Hidrodinamika *propeller* merupakan bagian dari bidang yang lebih luas dari teori mengangkat permukaan, yang mencakup beragam aplikasi seperti pesawat terbang, perahu *hydrofoil*, kemudi kapal, dan lunas perahu layar.

Baling-baling umumnya terletak di dekat buritan kapal. Pilihan ini didasarkan pada pertimbangan efisiensi pendorong dan efisiensi hal-hal praktis seperti pengaturan mesin dan kerentanan terhadap kerusakan. Karena aliran di dekat

buritan tidak seragam, hal yang tidak terhindarkan konsekuensinya adalah pengembangan kekuatan getaran pada bilah baling-baling dan di lambung kapal. Keputusan tentang jumlah bilah dan bentuk garis besar *blade* sebagian besar dipengaruhi oleh kebutuhan untuk meminimalkan eksitasi ini [14].

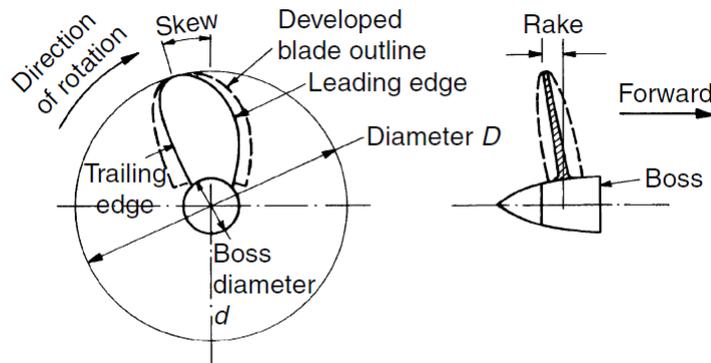
Pada umumnya propeler diletakkan pada kedudukan yang serendah mungkin di bagian belakang kapal untuk memaksimalkan gaya dorong yang akan dihasilkan. Sebuah Propeler harus mempunyai diameter sedemikian rupa, sehingga bila kapal dalam keadaan bermuatan penuh, propeler tersebut akan terbenam dengan memadai, sehingga dapat menghindari sejauh mungkin terjadinya fenomena terikutnya udara (*airdrawing*), dan pemacuan propeler (*racing*), ketika kapal mengalami gerakan angguk (*pitching*) [15].

2.3.1 Geometri Propeller

Geometri baling-baling diberikan dalam gambar teknis setelah konvensi khusus, atau dalam ribuan titik *offset* atau deskripsi permukaan *spline*, mirip dengan geometri kapal [16]. Geometri baling-baling kompleks biasanya ditandai oleh beberapa parameter yaitu:

1. Diameter baling-baling D
2. Diameter bos d
3. Bilah baling-baling nomor Z
4. *Pitch propeller* P

Secara umum geometri *propeller* meliputi:



Gambar 2.1 *Propeller geometry*

- a. *Blade* baling-baling ditempelkan pada *hub*, dan *hub* dipasang pada sebuah ujung poros baling-baling. Baling-baling berputar pada garis tengah poros. Arah rotasi (maju normal) bila dilihat dari belakang berputar kekanan searah jarum jam.
- b. *Blade edge* atau pinggir *blade* dalam hal ini dikenal dalam dua bagian, pinggir *blade* bagian depan disebut *leading edge (nose)* dan *edge* bagian belakang disebut *trailing edge (tail)*. Sedangkan pertemuan kedua pinggir *blade (leading edge dan trailing edge)* disebut *tip blade*. Pada titik *tip blade* diameter (D) atau radius ($R=D/2$) baling-baling diukur.
- c. *Blade surface* atau permukaan *blade* dalam hal ini dikenal pula dalam dua bagian, permukaan *blade* bagian belakang (*back*) didefinisikan sebagai permukaan *blade* berada dimana arah poros itu datang sedangkan permukaan yang lainnya disebut permukaan *blade* bagian depan (*face*), ketika kapal bergerak maju, masuknya aliran air melalui belakang baling-baling.
- d. *Propeller hub* umumnya berputar simetris agar tidak mengganggu aliran air bekerja. *Blade* baling-baling ditempelkan ke *hub* pada daerah *fillet* atau akar *blade* [17].

2.3.2 Karakteristik *Open Water*

Kekuatan dan momen yang dihasilkan oleh baling-baling dinyatakan dalam bentuk paling mendasar dalam karakteristik non-dimensi dimana secara umum untuk konfigurasi geometris tertentu. Istilah non-dimensi yang digunakan untuk mengekspresikan karakteristik kinerja umum adalah sebagai berikut:

$$\text{Thrust coefficient (KT)} = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\text{Torque coefficient (KQ)} = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\text{Advance coefficient (J)} = \frac{V_a}{nD} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\text{Cavitation number } (\sigma) = \frac{p_{0-e}}{1/2\rho V^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana,

ρ = Kepadatan cairan (kg/m^3)

n = Kecepatan rotasi (rps)

D = Diameter *propeller* (m)

T = *Thrust* (kN)

Q = Torsi (kNm)

V_a = Kecepatan gerak maju (m/s)

P_{0-e} = Tekanan statis fluida pada baling-baling

V = Kecepatan kapal (m/s)

Thrust propeller saat bekerja cukup jauh dari permukaan bebas tidak menyebabkan gelombang permukaan sehingga tergantung pada parameter berikut:

- a. Diameter (D).
- b. Kecepatan gerak maju (V_a).

- c. Kecepatan rotasi (n).
- d. Kepadatan cairan (ρ).
- e. Viskositas fluida (μ).
- f. Tekanan statis fluida pada baling-baling ($p_0 - e$) [18].

2.3.3 Karakteristik Baling-baling di Belakang Lambung

Karakteristik baling-baling di belakang lambung dihitung dengan menggunakan istilah efisiensi *relative-rotative* (η_r). Istilah ini yang diperkenalkan oleh *Froude*, dicatat untuk membedakan daya yang diserap oleh baling-baling saat bekerja di bidang aliran yang seragam pada kecepatan tertentu dan yang diserap saat bekerja di gelombang yang tidak seragam dan memiliki kecepatan rata-rata yang sama:

$$\eta_r = \frac{\text{Daya yang diserap pada kondisi open water dengan kecepatan } Va}{\text{Daya yang diserap pada gelombang yang tidak seragam dengan kecepatan rata-rata yang sama}} \dots(2.5)$$

Secara umum koreksi ditentukan oleh efisiensi ini. Parameter ini sangat kecil karena η_r umumnya mendekati satu, kecuali ada beberapa karakteristik yang tidak normal dari *wakefield* yakni berada pada kisaran $0.96 < \eta_r < 1.04$. Sebagai konsekuensi dari hubungan ini, efisiensi *behind-hull* (η_b) yaitu efisiensi baling-baling ketika bekerja di belakang lambung kapal, didefinisikan sebagai:

$$\eta_b = \eta_o \cdot \eta_r \dots \dots \dots (2.6)$$

$$\eta_b = \frac{\eta_r K_T J}{2\pi K_Q} \dots \dots \dots (2.7)$$

Pada tingkat yang lebih rinci masih banyak yang harus dipahami sifat interaksi antara baling-baling, sifat kecepatan induksi, interaksi dan *wakefield* yang beroperasi. Seperti yang diharapkan efek dari *mixed wakefield* yang menginduksi

c) Parameter Efisiensi Propulsi

Badan kapal sangat berpengaruh dalam efisiensi propulsi, ada beberapa parameter efisiensi yang harus di ketahui sebelum mendesain sebuah *propeller*, antara lain:

d) Parameter Efisiensi Badan Kapal (*Hull efficiency*, η_H)

Parameter efisiensi badan kapal ini merupakan perbandingan antara tenaga efektif (*effective towing power*, $PE = RT \times V$) dan power daya dorong *propeller* terhadap air (*thrust power*, $PT = T \times Va$) :

$$\eta_H = \frac{PE}{PT} = \frac{RT \times V}{T \times Va} = \frac{RT / T}{Va / V} = \frac{1-t}{1-w} \dots \dots \dots (2.10)$$

e) Parameter *Propeller* pada Air Terbuka (*Open Water Prop Efficiency*, η_o)

Model baling-baling yang bekerja akan diperoleh spesifik gaya-gaya pada saat *openwater test*. Untuk memenuhi hukum kesamaan, maka setiap pengujian, setiap harga putaran (n) dan kecepatan (Va) dapat diukur besar harga Gaya dorong (T) dan Torsi (Q).

f) Parameter Relatif Rotatif (*Relative Rotative Efficiency*, η_R)

Laju aliran air yang melewati *propeller* apabila berada di belakang kapal tidak konstan tetapi alirannya berotasi/memutar (*rotational flow*), oleh karena itu jika dibandingkan dengan *propeller* yang bekerja pada air terbuka maka efisiensi *propeller*-nya dipengaruhi oleh faktor η_R , (yang dikenal dengan *relative rotative efficiency*).

g) Parameter *Propeller* di Belakang Kapal η_B

Perbandingan daya dorong yang diberikan *propeller* ke air P_T , dengan tenaga yang ada di *propeller* P_D , merupakan efisiensi *propeller* yang bekerja di belakang kapal.

$$\eta_B = \frac{P_T}{P_D} = \eta_o \times \eta_R \dots \dots \dots (2.11)$$

h) Parameter Efisiensi Propulsi (*Propulsive Efficiency*, η_D)

Parameter propulsi efisiensi merupakan perbandingan antara *effective power* P_E dengan power yang ada pada *propeller* P_D :

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} = \frac{P_E}{P_T} \times \frac{P_T}{P_D} \dots \dots \dots (2.12)$$

Nilai efisiensi propulsi ini akan tinggi jika *propeller* bekerja pada *wake* yang homogen.

i) Parameter Efisiensi Poros (*Shaft Efficiency*, η_S)

Shaft efficiency ini tergantung pada kelurusan poros, dan pelumasan pada bantalan poros dan *reduction gear box*. Parameter efisiensi ini sama dengan perbandingan PD dan power break PB yang keluar dari *main engine*.

$$\eta_s = \frac{P_D}{P_B} \dots \dots \dots (2.13)$$

Biasanya nilai parameter efisiensi poros ini berkisar 0,985 atau mulai dari 0.96 s/d 0.995.

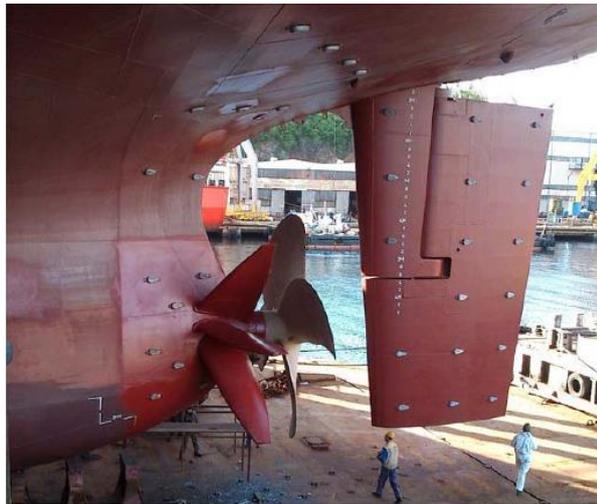
j) Parameter Efisiensi Total (*Total Efficiency*, η_T)

Efisiensi total ini merupakan perbandingan power efektif P_E dengan *power brake* P_B .

$$\eta_T = \frac{P_E}{P_B} = \frac{P_E}{P_D} \times \frac{P_D}{P_B} [17] \dots \dots \dots (2.14)$$

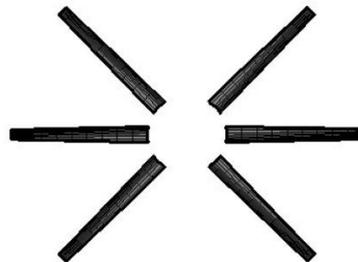
2.4 Pre-swirl Stator (PSS)

PSS merupakan perangkat tambahan yang diletakkan di depan *propeller* dapat meningkatkan efisiensi propulsi dengan mengurangi kehilangan energi rotasi pada aliran baling-baling [1].



Gambar 2.2 Contoh penerapan PSS [20]

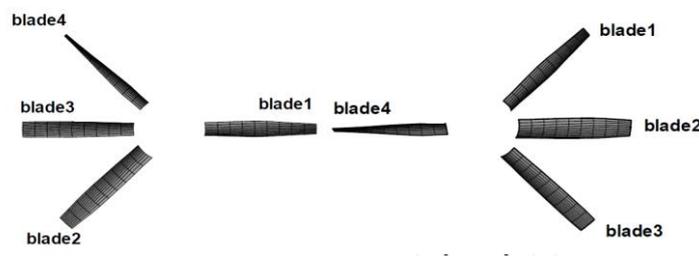
Dari sudut pandang hidrodinamik, perbedaan antara kombinasi baling-baling pra-stator dan baling-baling kontra-putar adalah kecil. *Pre-swirl stator* adalah baling-baling depan yang putarannya nol [5].



Gambar 2.3 Bentuk dasar *pre-swirl stator* [1]

Pada penelitian ini digunakan *asymmetric pre-swirl stator* yang terdiri dari 3 bilah di sisi *port* dan 1 bilah di sisi *starboard*, secara efektif memulihkan kehilangan energi rotasi dengan memanfaatkan aliran tidak simetris di belakang kapal.

Asymmetric pre-swirl stator terdiri dari 4 bilah stator di depan *propeller*. 3 bilah stator di *starboard side* dan 1 bilah stator di *portside* yang disebut dengan *starboard stator* ataupun sebaliknya, 1 bilah stator di *starboard side* dan 3 bilah stator di *portside* disebut *port stator*. Berdasarkan hasil percobaan ternyata 4 bilah stator memberikan efisiensi yang hampir sama dengan 6 bilah stator [1]. Hal itu membuat asimetris stator memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan simetris stator seperti bobot yang ringan, ukuran yang lebih kecil, dan biaya instalasi yang lebih murah.



Gambar 2.4 *Asymmetric pre-swirl stator*: (a) *Port Stator*, (b) *Starboard Stator* [1]

2.5 Peningkatan Performa Propeler dengan PSS

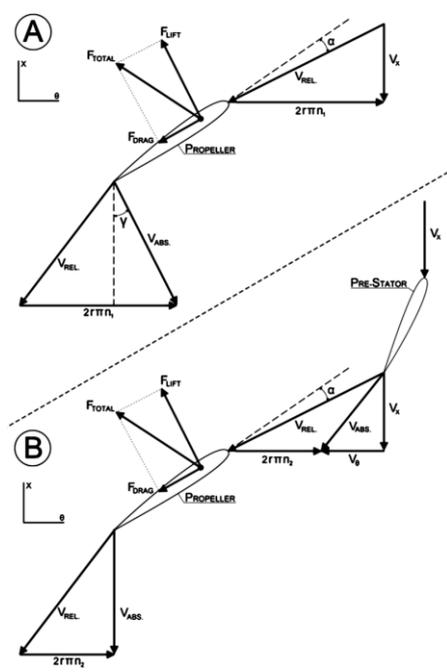
Prinsip kerja PSS adalah peningkatan kinerja baling-baling dengan mereorientasi total vektor gaya melalui *pre-swirl*. Efek dari PSS yaitu berupa baling-baling berputar pada laju rotasi konstan tertentu. Di gambar 1 (a), skema bagian *blade* yang representatif diberikan, di mana demi kemudahan komponen kecepatan yang diinduksi diabaikan. Bagian ini mengalami *angle of attack* tertentu, yang menghasilkan vektor gaya total yang bekerja pada *blade*. Di belakang baling-baling, VABS memiliki komponen dalam arah tangensial. Komponen ini menciptakan kerugian energi kinetik rotasi, yang disebut sebagai pusaran. Pada

dasarnya, komponen tangensial dari gaya memberi akselerasi pada fluida yang tidak berkontribusi pada propulsi kapal.

Dengan memasang pre-stator di depan baling-baling, laju rotasi baling-baling sementara dapat dikurangi selama mengalami *angle of attack* efektif yang sama, mengabaikan penyimpangan kecil dalam kecepatan aksial. Vektor gaya total yang bekerja pada baling-baling tetap tidak berubah. Vektor gaya total dapat didekomposisi menjadi suatu gaya dalam arah aksial, mewakili gaya dorong, T , dan dalam arah tangensial, mewakili kekuatan tangensial. Mengalikan gaya tangensial dengan jari-jari lokal *blade* yaitu bagian yang memberikan torsi Q .

Pada Gambar 1 (B), baling-baling dapat menghasilkan daya dorong yang sama pada tingkat rotasi yang lebih rendah dan karenanya mengkonsumsi lebih sedikit daya. Idealnya, aliran di belakang baling-baling tidak mengandung *swirl* lagi [21].

$$\eta_{\text{Blade efficiency}} = \frac{KT}{KQ} = \frac{T \cdot D}{Q} \dots \dots \dots (2.15)$$



Gambar 2.5 Velocity & gaya untuk (A) Propeller, (B) Propeller dengan PSS [21].

Berdasarkan gambar (2.5) dijelaskan bahwa dengan pengaplikasian *pre-swirl stator*, kecepatan rotasi dapat direduksi dan *thrust propeller* dapat ditingkatkan.

2.6 Analisis Performa

Kita dapat mempertimbangkan setiap perangkat *pre-swirl* yang melekat pada lambung. Efek ESD akan serupa dengan yang didapatkan pada buritan-lambung yang optimal dalam hal ini. Untuk mencapai keuntungan keseluruhan, efisiensi kinerja baling-baling di belakang kapal harus ditingkatkan dengan ESD yang dipasang, yang dapat dihitung menggunakan:

$$\eta_p = \frac{TV_s}{2\pi nQ} = \frac{KT}{KQ} \times \frac{J_s}{2\pi} \dots\dots\dots (2.16)$$

Peningkatan η_p diperlukan, tetapi tidak mencukupi. Biasanya, efisiensi hidrodinamik keseluruhan dapat dinyatakan sebagai:

$$\eta_D = \frac{PE}{PD} = \frac{RT V_s}{2\pi nQ} = \frac{TV_s RT}{2\pi nQ T} = \eta_D (1-t) \dots\dots\dots (2.17)$$

Persamaan ini dapat menjelaskan kesulitan dalam merancang ESD yang efektif ke lambung. ESD pada prinsipnya harus meningkatkan efisiensi hidrodinamika keseluruhan dengan RT yang diambil dari *bare hull case*. Seperti dijelaskan sebelumnya, PSS yang dirancang biasanya dapat meningkatkan efisiensi baling-baling dengan meningkatkan aliran dan dorongan yang diperlukan yang biasanya juga akan meningkat dan akan menghasilkan peningkatan faktor deduksi dorong. Oleh karena itu, desain PSS yang baik akan memiliki keseimbangan yang baik antara kedua aspek ini.

Sementara metode alternatif untuk menganalisis performa perolehan kecepatan konstan yaitu dengan menggunakan performa *propeller* di belakang kapal tanpa ESD sebagai referensi [4].

$$\begin{aligned} \eta_{ESD} &= \frac{n_0 Q_{B0} T_{B0} T_{B1}}{n_1 Q_{B1} T_{B0} T_{B1}} \\ &= \frac{T_{B1} n_0 Q_{B0} T_{B0}}{T_{B0} n_1 Q_{B1} T_{B1}} \\ &= \Delta\eta_{Prop. efficiency} \Delta\eta_{interaction} \dots \dots \dots (2.18) \end{aligned}$$

$$\eta_{ESD} = \frac{n_0 Q_{B0}}{n_1 Q_{B1}} \dots \dots \dots (2.19)$$

Dimana,

$$\begin{aligned} \Delta\eta_{Prop. efficiency} &= \frac{n_0 T_{B1} Q_{B0}}{n_1 T_{B0} Q_{B1}} \\ &= \Delta\eta_{Bladeloading} \Delta\eta_{Bladeefficiency} \dots \dots \dots (2.20) \end{aligned}$$

Kuantitas dalam definisi ini dengan subskrip 0 menunjukkan konfigurasi tanpa ESD, sedangkan yang dengan subskrip 1 mewakili konfigurasi dengan ESD [21].

2.7 Konsep CFD (Computational Fluid Dynamic)

Computational fluid dynamics biasanya disingkat CFD, adalah cabang fluida mekanika yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk menyelesaikan dan menganalisis masalah yang terlibat dalam aliran fluida, perpindahan panas, perpindahan massa dan yang terkait fenomena melalui pemodelan matematika (persamaan diferensial parsial), metode numerik (diskritisasi dan teknik solusi), alat perangkat lunak (*solvers, pre- and post-processing utilities*). CFD sangat berguna untuk menyelesaikan dasar-dasar persamaan yang memodelkan gerakan aliran. Persamaan yang digunakan dalam perhitungan CFD yaitu didasarkan pada

persamaan Navier-stokes dimana mayoritas persamaan ini tidak punya solusi analitis. Untuk alasan ini, digunakan analisis numerik dengan CFD. Tujuan dari CFD ini adalah untuk menyelesaikan perkiraan (secara numerik) aliran persamaan dasar yang solusinya memberi kita gerakan dan karakteristik lain dari aliran. Teknik-teknik ini mematahkan domain spasial dan waktu untuk mencapai solusi [22]. Pemakaian CFD secara umum dapat dipakai untuk memprediksi:

1. Aliran suatu fluida beserta distribusi suhunya
2. Transfer massa
3. Perubahan fasa seperti pada proses melting, pengembunan dan pendidihan
4. Reaksi kimia seperti oksidasi
5. Gerakan mekanis seperti piston, *fan* dan *propeller* pada kapal
6. Tegangan dan tumpuan pada benda *solid*
7. Gelombang electromagnet

Persamaan dasar yang digunakan pada persamaan Navier-stokes dalam perhitungan aliran fluida yaitu menggunakan persamaan energi, momentum dan kontinuitas. Persamaan Navier-stokes ini ditemukan oleh G.G. Stokes di Inggris dan M. Navier di Perancis sekitar tahun awal tahun 1800 [23]. Adapun persamaan-persamaannya adalah sebagai berikut:

1. Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots(2.21)$$

2. Persamaan Momentum

Momentum ke arah sumbu X

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (2.22)$$

Momentum ke arah sumbu Y

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (2.23)$$

Momentum ke arah sumbu Z

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (2.24)$$

3. Persamaan Energi

$$\frac{\partial(E_r)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_r)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_r)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_r)}{\partial z} = -\frac{\partial(pu)}{\partial x} - \frac{\partial(pv)}{\partial y} - \frac{\partial(pw)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{Re_r} \left(\frac{\partial}{\partial x} (U\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz}) \right) \dots \dots \dots (2.25)$$

Dengan:

x = Koordinat Sumbu X

y = Koordinat Sumbu Y

z = Koordinat Sumbu Z

u = Komponen Kecepatan U (m/s)

v = Komponen Kecepatan V (m/s)

w = Komponen Kecepatan W (m/s)

t = Waktu (s)

ρ = Densitas (kg/m³)

Et = Energi Total (kJ)

p = Tekanan (N/m²)

q = Heat Flux (kW/m²)

Re = Bilangan *Reynold*

Pr = Bilangan *Prandtl*

Pada dasarnya CFD mengganti persamaan-persamaan diferensial parsial dari kontinuitas, momentum, dan energi dengan persamaan-persamaan aljabar. Persamaan yang asalnya kontinu (memiliki jumlah sel tak terhingga) dirubah menjadi model diskrit (jumlah sel terhingga) dengan menggunakan 3 macam teknik solusi numerik yaitu beda hingga (*finite difference*), elemen hingga (*finite element*) dan metode spectral.

- a. Metode Beda Hingga bekerja dengan mengganti suatu persamaan differensial dengan syarat batas menjadi sebuah sistem persamaan linier yang dilakukan dengan mendiskretisasi daerah asal dan mengubah turunan pada persamaan.
- b. Metode Elemen Hingga adalah suatu metode yang membagi benda yang akan dianalisa, menjadi beberapa bagian dengan jumlah hingga (*finite*). Bagian-bagian ini disebut elemen yang dihubungkan dengan nodal (*node*). Kemudian dibangun persamaan matematika yang menjadi representasi benda tersebut. Proses pembagian benda ini disebut *meshing*.
- c. Metode *Spectral* adalah formulasi dari metode elemen hingga yang menggunakan *polinomial Piecewise*. Metode Spektral lebih memilih fungsi – fungsi basis polinomial berdimensi tinggi yang tidak seragam. Dengan derajat kebebasan yang lebih sedikit per *node*, dapat berguna untuk mendeteksi kelemahan kecil. Non-keseragaman *node* membantu membuat matriks massa diagonal, yang menghemat waktu dan memori komputer. Namun, Metode *Spectral* kesulitan dalam pemodelan geometri yang kompleks.

Aspek penting dari segala jenis simulasi pada aliran fluida disekitar badan kapal adalah metode yang digunakan untuk memodelkan hubungan udara/air. Navier-stokes sebagai teknik pemecahan CFD sekarang banyak digunakan untuk berbagai jenis permasalahan aliran fluida. Dalam bentuk yang paling umum, gerak fluida diatur oleh sistem kesetimbangan Navier-Stokes tiga dimensi yang bergantung pada waktu. Persamaan Navier-Stokes mendefinisikan seluruh aliran fluida satu fasa. Persamaan ini menyatakan bahwa perubahan dalam momentum (percepatan) partikel – partikel fluida bergantung hanya kepada gaya viskos tekanan internal dan gaya viskos tekanan eksternal yang bekerja pada fluida.

Persamaan Navier-Stokes dapat diinterpretasikan sebagai penjumlahan dari 4 (empat) gaya: *gravitational body force*; *pressure gradient forces*; *viscous forces*; dan *inertial force* [24].

1. *Gravitational body force* adalah seluruh gaya yang bekerja pada fluida tanpa adanya kontak fisik secara langsung dan terdistribusi secara merata dalam volume fluida.
2. *Pressure gradient forces* atau gradien tekanan adalah kuantitas fisik yang menjelaskan ke arah mana dan pada tingkat mana tekanan meningkat paling cepat di sekitar lokasi tertentu.
3. *Viscous forces* atau viskositas adalah ukuran kekentalan suatu fluida yang menunjukkan besar kecilnya gesekan internal fluida. Viskositas fluida berhubungan dengan gaya gesek antar lapisan fluida ketika satu lapisan bergerak melewati lapisan yang lain.

4. *Inertial force* atau kelembaman adalah kecenderungan semua benda fisik untuk mempertahankan keadaannya atau menolak perubahan terhadap keadaan geraknya.

CFD terdiri dari metode-metode yang menyelesaikan persamaan bidang dasar yang sesuai dengan syarat batas oleh pendekatan yang melibatkan sejumlah besar elemen (matematika sederhana). Pendekatan ini mengarah secara otomatis ke sejumlah besar hal yang tidak diketahui.

2.8 Simulasi CFD (Computational Fluid Dynamic)

CFD menerapkan perhitungan yang dikhususkan pada fluida beserta perilakunya mulai dari aliran fluida, *heat transfer* dan reaksi kimia yang terjadi pada fluida. Atas prinsip-prinsip dasar mekanika fluida, konservasi energi, momentum dan hukum kekekalan massa, perhitungan CFD dapat dilakukan. Secara sederhana proses perhitungan CFD dapat diawali dengan mendefinisikan suatu model menjadi elemen-elemen kecil. Setiap elemen yang terbentuk akan dikontrol dengan menggunakan konsep persamaan dinamika fluida. Seperti pada persamaan matematis lainnya, persamaan dinamika fluida memerlukan variabel inputan untuk mendapatkan suatu nilai hasil. CFD memanfaatkan kondisi batas (*boundary condition*) pada domain fluida sebagai variabel inputan guna menjalankan persamaan tersebut. Sebagai contoh, ketika suatu model yang akan dianalisis melibatkan temperatur maka perhitungan yang dilakukan akan menggunakan persamaan energi atau konversi dari energi tersebut. Sehingga dapat dikatakan bahwa inisialisasi awal dari persamaan dinamika fluida adalah *boundary condition*.

Pada proses penyelesaian masalah dengan menggunakan CFD-Ansys CFX terdapat tiga tahap yang harus dilalui, yaitu: *Pre-processor*, *Flow Solver (Solution)*, dan *Post-Processor*.

4. Tahap *Pre-Processor*

Merupakan tahap dimana data diinput mulai dari pembuatan domain serta pembuatan kondisi batas atau *boundary condition*. Ditahap ini juga sebuah benda atau ruangan yang akan dianalisa dibagi-bagi dengan jumlah *grid* tertentu atau sering juga disebut dengan *meshing*. Secara umum, tahap ini terdiri dari:

- a. Pemodelan kapal
- b. Pembuatan domain fluida
- c. Pemodelan kondisi batas
- d. Optimasi model yang optimum
- e. Pemihan jumlah *grid* yang optimum

Data yang diperlukan pada batas tergantung dari tipe kondisi batas dan model fisik yang dipakai (turbulensi, persamaan energi, multifasa, dll). Data yang diperlukan pada kondisi batas merupakan data yang sudah diketahui atau data yang dapat diasumsikan. Tetapi asumsi data yang dipakai harus diperkirakan mendekati yang sebenarnya. Input data yang salah pada kondisi batas akan sangat berpengaruh pada hasil simulasi. Dibawah ini beberapa kondisi batas pada Ansys CFX :

a. *Velocity Inlet*

Kondisi batas *velocity inlet* digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran dan besaran skalar lainnya pada sisi masuk aliran. Kondisi batas ini hanya digunakan untuk aliran *incompressible*.

b. *Mass Flow Inlet*

Nilai tekanan *gauge* digunakan sebagai tebakan awal oleh CFX, selanjutnya akan dikoreksi sendiri sejalan dengan proses iterasi. Metode spesifikasi arah aliran dan turbulen sama dengan kondisi batas *velocity inlet*.

c. *Pressure Inlet*

Data tekanan total (*absolute*), tekanan *gauge*, temperatur, arah aliran dan dari nilai tekanan operasi dan tekanan *gauge*. Metode spesifikasi arah aliran dan turbulensi sama dengan kondisi batas *velocity inlet*.

d. *Pressure Outlet*

Pola aliran ini harus dimasukkan nilai tekanan statik, temperatur aliran balik (*backflow*) dan besaran turbulen aliran balik kondisi batas yang dipakai pada sisi keluar fluida dan data tekanan pada sisi keluar dapat di ketahui nilai sebenarnya.

e. *Outflow*

Kondisi batas ini digunakan apabila data keluar pada sisi keluar tidak diketahui sama sekali pada sisi keluar di ekstrapolasi dari data yang ada pada aliran sebelum mencapai sisi keluar.

f. *Pressure Far-Field*

Kondisi batas ini untuk memodelkan aliran kompresibel *free-stream* yang mempunyai dimensi yang sangat panjang jarak antara *inlet* dan *outlet* jauh. Besaran yang dimasukan adalah tekanan *gauge* bilangan *Mach*, temperatur aliran arah aliran dan besarnya turbulensi pada sisi keluar.

g. Dinding (*wall*)

Kondisi batas ini digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran. Kondisi batas ini digunakan juga sebagai pembatas antara daerah fluida (cair dan gas) dan padatan.

h. *Symmetry* dan *Axis*

Pada panel kondisi batas untuk kedua kondisi batas ini tidak ada input data yang diperlukan. Kondisi batas simetri digunakan apabila model geometri kasus yang bersangkutan dan pola aliran pada model tersebut simetri. Kondisi batas ini juga dapat digunakan untuk memodelkan dinding tanpa gesekan pada aliran viskos. Sedangkan kondisi batas axis digunakan sebagai garis tengah (*centerline*) untuk kasus 2D axisymmetry.

g. *Periodic*

Kondisi batas ini hanya dapat digunakan pada kasus yang mempunyai medan aliran dan geometri yang periodik, baik secara translasi atau rotasi.

h. *Cell Zone : Fluid*

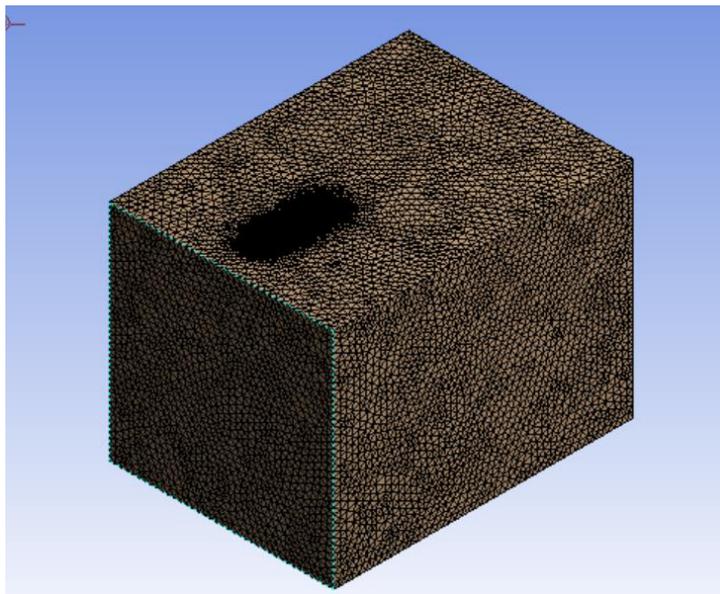
Kondisi batas ini digunakan pada kontinum model yang didefinisikan sebagai fluida. Data yang dimasukkan hanya material fluida, didefinisikan sebagai media berpori.

i. *Cell Zone : Solid*

Data yang dimasukkan hanya material padatan didefinisikan *heat generation rate* pada kontinum solid. Sedangkan kondisi batas ini digunakan pada kontinum model yang didefinisikan sebagai padatan.

j. *Porous Media*

Kondisi batas ini digunakan dengan cara mengaktifkan pipihan *porous zone* pada panel fluida. *Porous zone* merupakan pemodelan khusus dari zona fluida selain padatan dan fluida. Digunakan untuk memodelkan aliran yang melewati media berpori dan tahanan yang terdistribusi, misalnya *packed beds, filter papers, perforated plates, flow distributors, tube banks*.



Gambar 2.6 Hasil *meshing* dan kondisi batas

5. Tahap *Flow Solver (Solution)*

Pada tahap ini dilakukan proses penghitungan data-data input dengan persamaan yang terlibat secara *iteratif*. Artinya penghitungan dilakukan hingga hasil menuju *error* terkecil atau hingga mencapai nilai yang konvergen. Pada tahap ini dilakukan perhitungan secara numerik untuk menyelesaikan masalah dengan CFD. Secara umum tahap ini terdiri dari:

- a. Penentuan kondisi batas
- b. Pemilihan jenis fluida

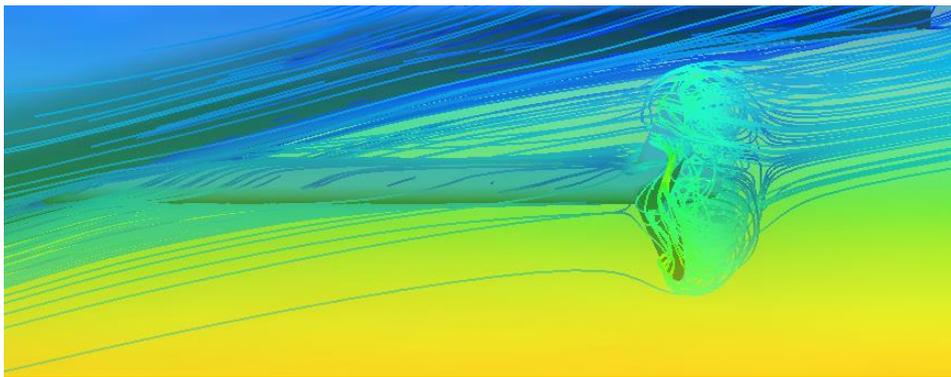
- c. Penentuan kecepatan model
- d. Pemilihan jumlah iterasi yang optimum
- e. Penentuan batas konvergensi yang optimum

6. Tahap *Post Processor*

Tahap *Post-Processor* merupakan tahap yang digunakan untuk menganalisis, visualisasi dan mempresentasikan hal interaktif sesuai dengan kasus yang sedang ditinjau. Hasil perhitungan diinterpretasikan ke dalam gambar, grafik bahkan animasi dengan pola warna tertentu. Secara umum tahap ini terdiri dari:

- a. Perhitungan besar hambatan kapal
- b. Perhitungan distribusi kecepatan disekitar badan kapal
- c. Perhitungan distribusi tekanan disekitar badan kapal

Berikut contoh hasil perhitungan Ansys CFX yang telah diinterpretasikan :



Gambar 2.7 Interpretasi animasi hasil simulasi CFX

2.9 Evaluasi Nilai Hasil Simulasi CFD

2.9.1 Evaluasi Nilai Tahanan Model Kapal

Untuk memastikan atau mengevaluasi keakuratan hasil running software Ansys CFX R18.1 dapat dilakukan dengan pendekatan perhitungan tahanan kapal.

Adapun pendekatan yang dilakukan menggunakan metode holtrop, dengan proses perhitungan sebagai berikut:

1. Perhitungan Hambatan Gesek (Rf)

Harga Koefisien gesek (formula ITTC 1957)

$$C_f = 0,075 / (\log_{10} R_n - 2)^2 \dots\dots\dots(2.26)$$

a. Panjang bagian kapal yang mengalami hambatan langsung (*Length of Run*), LR ditentukan dengan formula ;

$$LR = Lwl. \{ 1 - C_p + [0,06.C_p.\%LCB] / (4.C_p - 1) \} \dots\dots\dots(2.27)$$

b. Harga faktor lambung (1 + k₁) ditentukan dengan formula ;

$$(1+k_1) = C_{13}(0,93+C_{12}(B/LR)^{0,92497}(0,95-c_p)^{0,521448}(1c_p+0,025Lcb)^{0,6906})$$

$$c_{12} = (T/L)^{0,2328446}$$

$$c_{13} = 1 + 0.003C_{stern} \dots\dots\dots(2.28)$$

c. Menghitung luas bidang basah (S)

$$S = L(2T + B)\sqrt{C_M} \left(0.453 + 0.4425C_B + (-0.2862C_M) + \left(-0.003467 \frac{B}{T} \right) + 0.3696C_{WP} \right) + 2.38 \frac{ABT}{C_B} \dots\dots\dots(2.29)$$

Harga Hambatan gesek (Rf) ditentukan dengan formula ;

$$R_F = C_F \times 0.5 \times \rho \times S \times V_s^2 \dots\dots\dots(2.30)$$

2. Perhitungan bagian tambahan (R_{AP})

a. Harga faktor bagian hambatan (1+k₂)

Tabel 2.1 Harga faktor bagian hambatan (1+k₂)

Bagian	Faktor
Konvensional <i>stern</i> dan kemudi	1,5
Kemudi dan <i>skeg</i>	2,8

Kemudi kembar	3
<i>Y Braket</i>	2
<i>Skeg</i>	3
<i>Shaft Bossing</i>	2
<i>Shell Bossing</i>	4
<i>Shaft telanjang</i>	2,8
Sirip Bilga	2,7
<i>Dome</i>	1,4
Lunas Bilga	

Harga hambatan bagian tambahan (R_{AP})

$$R_{AP} = \rho/2 \cdot V_s^2 \cdot A_s(1+k_2)eq \cdot C_f \dots \dots \dots (2.31)$$

3. Perhitungan hambatan akibat gelombang

a. Besar sudut *enterance*

$$iE = 38 \text{ degrees } (^{\circ})$$

b. Harga koefisien λ

$$\lambda = 1,446C_p - 0,03L/B \text{ (untuk } L/B < 12) \dots \dots \dots (2.32)$$

c. Harga koefisien C_1

$$C_1 = 2223105 \cdot (T/B)^{1,07961} / (90 - \alpha)^{1,37565} \dots \dots \dots (2.33)$$

d. Harga koefisien C_3 (Reduksi haluan gembung)

$$C_3 = 0,56 \cdot ABT^{1,5} / (B \cdot T(0,31\sqrt{ABT} + T_f - h_b)) \dots \dots \dots (2.34)$$

e. Harga koefisien C_2

Ditentukan dengan formula,

$$C_2 = 1 / [e^{1,89 \cdot \sqrt{C_3}}] \dots \dots \dots (2.35)$$

f. Harga Koefisien M_1

$$M_1 = [0,0140407(Lwl/T)] - [1,75254 \cdot (\nabla^{1/3}/Lwl)] - [4,49323 \cdot (B/Lwl)] \\ [1,73014 - (0,7067 \cdot C_p)] \dots \dots \dots (2.36)$$

g. Harga Koefisien M_2

$$m_2 = c_{15}c_p^2 \exp(-0.1Fn^{-2}) \dots\dots\dots(2.37)$$

Harga hambatan akibat gelombang (Rw),

$$Rw = C_1.C_2.P_5.\nabla.\rho.g.e^{(M_1 / Fn^{0.9})+(M_2 \cos(\lambda / Fn^2))} \dots\dots\dots(2.38)$$

4. Perhitungan hambatan akibat adanya haluan gembung(RB)

a. Harga koefisien darurat haluan gembung (PB)

$$PB = \frac{0,56 (ABT)^{1/2}}{TF - 1,5HB} \dots\dots\dots(2.39)$$

b. Harga bilangan foude akibat ketenggelaman haluan gembung

$$Fni = V_s / \sqrt{g / (TF - HB - 0,25\sqrt{ABT} + 0,15.V_s^2)} \dots\dots\dots(2.40)$$

$$FnT = V / \sqrt{2gA_T / (B + BC_{WP})} \dots\dots\dots(2.41)$$

Harga koefisien korelasi model (C_A)

$$C_A = (0.105K_s^{1/3} - 0.005579) / L^{1/3} \dots\dots\dots(2.42)$$

$$C_A = \{0,006 / (Lw1 + 100)^{0,16}\} - 0,00205 + \{0,0 \sqrt{Lwl / 7,5} .Cb^4 .C_2 .(0,04 - C_4)\} \dots\dots\dots(2.43)$$

Harga hambatan akibat adanya haluan gembung (RB)

$$RB = 0,11 \cdot \rho \cdot g \cdot \left[\frac{ABT^{2/3}}{e^{(3/Pb)}} \right] \cdot \left[\frac{Fni^3}{(1 + Fn)^2} \right] \dots\dots\dots(2.44)$$

5. Menghitung nilai tahanan transom

$$R_{TR} = 0.5\rho V^2 A_T C_6 \dots\dots\dots(2.45)$$

6. Menghitung nilai tahanan angin

$$R_A = 1/2 \rho V^2 S C_A \dots\dots\dots(2.46)$$

7. Perhitungan hambatan total (R_T)

Harga hambatan total ditentukan dengan formula ;

$$R_{Total} = R_F(1+k1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \dots\dots\dots(2.47)$$

Setelah menghitung nilai tahanan kemudian dihitung nilai *thrust* dari kapal dengan menggunakan persamaan hubungan tahanan dengan *thrust*.

$$T = \frac{R}{1-t} \dots\dots\dots (2.48)$$

Dimana,

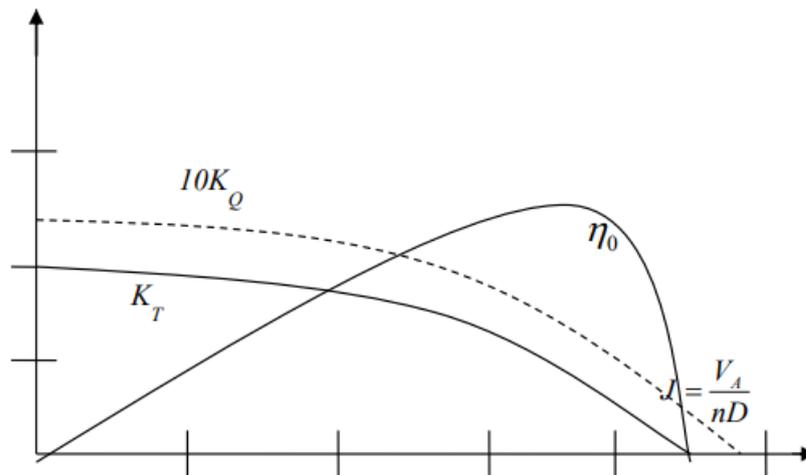
$$W = 0.70 \times C_p - 0.3 + 0.3 \times \left(0.4 - \frac{a}{B}\right) \dots\dots\dots (2.49)$$

$$t = k \times w \dots\dots\dots (2.50)$$

2.9.2 Evaluasi Nilai Efisiensi *Open Water Test* dengan Grafik Wagenigen

Daya dorong suatu propeler yang bekerja tergantung pada parameter-parameter seperti diameter propeler (D), besarnya *pitch* (P/D), jumlah dan bentuk daun propeler (Z), kecepatan (Va), kecepatan putaran (n), densitas fluida (ρ), viskositas fluida (μ). Dari hasil sesuai persamaan diatas dapat dibuat diagram KT, KQ dan J. Dalam penggunaan *Computational Fluid Dynamic* diperlukan untuk mendapatkan nilai *thrust* dan torsi. *Thrust* dan torsi pada propeler berguna sebagai beban yang bekerja pada *propeller*.

Penggambaran karakteristik beban Propeler dapat ditampilkan dengan grafik oleh beberapa koefisien dalam bentuk ukuran yang disebut dengan kurva *open water test*. Diagram memberikan *torque* dan *thrust* sebagai fungsi kecepatan. Karakteristik propeler terdiri dari koefisien *thrust* (KT), koefisien *torque* (KQ), dan koefisien *advanced* (J) yang persamaannya ditunjukkan pada persamaan (2.1) sampai persamaan (2.4) [25].



Gambar 2.8 Kurva *open water test*

2.9.3 *Grid Convergence Index (GCI)*

Untuk mengevaluasi nilai yang dihasilkan dari metode numerik dalam hasil komputasi dengan *full scale*, konsep dari *Grid Convergence Index (GCI)* digunakan [26].

Grid Convergence Index (GCI) dinyatakan sebagai persentase kesalahan pada perkiraan kumpulan eror dimana solusi konvergensi numerik kemungkinan besar berada. Perkiraan kesalahan dengan GCI dapat digunakan dengan dua solusi *mesh*, tapi untuk mendapatkan perkiraan eror yang lebih baik digunakan tiga solusi *mesh*.

Grid Convergence Index (GCI) yaitu berupa perkiraan diskritisasi kesalahan (*Discretization error*) [27]. Dalam analisis numerik, fisika komputasi, dan simulasi, kesalahan diskritisasi (*Discretization error*) adalah kesalahan yang dihasilkan dari fakta bahwa fungsi variabel dari variable kontinu diwakili di komputer dengan sejumlah evaluasi yang terbatas, misalnya pada *grid*. *Discretization error* biasanya dapat dikurangi dengan menggunakan *grid* dengan jumlah elemen yang lebih

banyak. *Discretization error* merupakan sumber utama kesalahan dalam metode perbedaan hingga dan metode pseudo-spektral dalam fisika komputasi.

Langkah-langkah perhitungan *discretization error* dengan metode GCI dapat dihitung melalui persamaan (2.49) sampai dengan persamaan (2.57) [28]. Dalam menentukan *cell*, *mesh* atau jumlah *grid* yang representatif (h) untuk tiga dimensi dihitung dengan persamaan (3.1).

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{1/3} \dots\dots\dots(2.49)$$

Dimana ΔV_i adalah volume dan N adalah jumlah total dari *cell* untuk komputasi. Kemudian menentukan tiga set *grid* yang sangat berbeda dimana penambahan jumlah elemen harus masif, 1.5x -2x dari jumlah elemen sebelumnya.

Untuk mendapatkan variabel ϕ (Variabel tujuan studi simulasi), simulasi dijalankan. Nilai Faktor penyempitan *grid*, $r = h_{\text{coarse}}/h_{\text{fine}}$, harus lebih dari 1.3 dimana nilai ini diambil berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan. Lalu menentukan nilai p (perkiraan urutan keakuratan metode komputasi) dimana $h_1 < h_2 < h_3$ dan $r_{21} = h_2/h_1, r_{32} = h_3/h_2$.

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} |\ln|\epsilon_{32}/\epsilon_{31}| + q(p)| \dots\dots\dots(2.50)$$

$$q(p) = \ln \left| \frac{r_{21}^{p-s}}{r_{32}^{p-s}} \right| \dots\dots\dots(2.51)$$

$$s = 1 \cdot \text{sign}(\epsilon_{32}/\epsilon_{21}) \dots\dots\dots(2.52)$$

Dimana $\epsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2$, $\epsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1$, ϕ_k menunjukkan solusi dari k^{th} *grid*. Perlu diperhatikan bahwa $q(p) = 0$ untuk $r = \text{const}$. Persamaan (3) dapat diselesaikan menggunakan titik iterasi yang tetap. Nilai absolut dalam Persamaan (3a) diperlukan untuk memastikan ekstrapolasi menuju $h = 0$. Nilai negatif dari $\epsilon_{32}/\epsilon_{21} < 0$ merupakan indikasi konvergensi osilasi. Jika memungkinkan, persentase

kejadian konvergensi osilasi juga harus dilaporkan. Perlu dicatat bahwa jika $\varepsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2$, $\varepsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1$ "sangat dekat" dengan nol, prosedur di atas tidak bekerja. Ini mungkin indikasi konvergensi osilasi atau dalam situasi yang jarang yang menunjukkan bahwa solusi "tepat" telah tercapai. Dalam kasus seperti itu, jika memungkinkan, kalkulasi dengan penyempitan *grid* tambahan harus dilakukan. Selanjutnya menghitung nilai ekstrapolasi dari:

$$\phi_{ext}^{21} = (r_{21}^p \phi_1 - \phi_2) / (r_{21}^p - 1) \dots \dots \dots (2.53)$$

$$\phi_{ext}^{32} = (r_{32}^p \phi_2 - \phi_3) / (r_{32}^p - 1) \dots \dots \dots (2.54)$$

Setelah itu menghitung perkiraan kesalahan, bersama dengan urutan p, dimana:

Perkiraan error relatif,

$$e_a^{21} = \left[\frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right] \dots \dots \dots (2.55)$$

Dan nilai relatif ekstrapolasi error,

$$e_{ext}^{21} = \left[\frac{\phi_{ext}^{12} - \phi_1}{\phi_{ext}^{12}} \right] \dots \dots \dots (2.56)$$

Kemudian untuk menghitung *index fine-grid convergence* digunakan persamaan:

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1.25 e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \dots \dots \dots (2.57)$$

Pada bab ini telah dijelaskan teori-teori dan persamaan yang akan digunakan dalam penelitian. Selanjutnya metode yang digunakan dan proses pengerjaannya akan dijelaskan pada bab berikutnya.