



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Perancangan *Propeller* Tipe Kaplan-series pada Kapal Selam Komersial dengan Variasi Sudut *Rake* dan Jumlah Daun untuk Mengoptimalkan *Thrust*

Yudhistira Dwi Putra¹⁾, Ahmad Fauzan Zakki¹⁾, Andi Trimulyono¹⁾

¹⁾Laboratorium Perancangan Kapal dibantu Komputer

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*e-mail :yudhistiradwiputra@students.undip.ac.id

Abstrak

Oleh karena *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* pada kapal selam masih sangat mahal dibandingkan dengan bahan bakar konvensional. Sehingga biaya produksi dan operasi sangat mahal, juga menjadi batasan operasi pada kondisi *fully-submerged*. Perlu dirancang *propeller* yang paling optimal dengan *thrust* terbesar dan juga efisien. Kapal selam ini dirancang untuk kepentingan eksploitasi dan eksplorasi minyak lepas pantai. Kapal selam komersial yang sebelumnya telah dirancang, kini diaplikasikan dengan *propeller* kaplan dan *nozzle* dimaksudkan untuk meningkatkan *thrust*. Berdasarkan penelitian sebelumnya disarankan dalam perancangan *propeller* sebaiknya melibatkan badan kapal dalam simulasi. Oleh karena itu, badan kapal selam nantinya akan disimulasikan bersama dengan *propeller*. Dengan membedakan jumlah *blade* dan sudut *rake* dari tiap *propeller* diharapkan didapat *thrust* paling besar. *Blade* yang diuji terdiri dari 6, 8 dan 10 bilah. Sedangkan sudut *rake* yaitu 5° , 10° , dan 15° . Penelitian ini dilakukan dengan melakukan simulasi *Computational Fluid Dynamic*. Dengan persamaan *Reynold-Averaged Navier Stokes Equation* ditujukan untuk memperoleh hasil fluktuasi aliran turbulen pada material *incompressible* dengan *property* yang konstan. Dengan badan kapal yang memiliki nilai *Reynold number* 2.51×10^8 . Disimulasikan dengan aliran *turbulence model K-epsilon* secara *Steady-state*. Hasilnya menunjukkan *Propeller Ka1080* dengan sudut *rake* 15° memiliki *Thrust* dan *Torque* terbesar senilai 6090 kN dan 4905 kN.m dan *Ka680 rake* 15° memiliki efisiensi tertinggi mencapai 11,6 %.

Kata Kunci : Kapal selam, kaplan-series, sudut rake, thrust, CFD.

1. PENDAHULUAN

Kapal selam saat ini tidak hanya digunakan untuk kebutuhan militer. Salah satunya adalah untuk kepentingan produksi minyak dan gas di kutub utara [1]. Dengan semakin banyaknya sektor yang menggunakan kapal selam sebagai sarana operasi, tantangan dalam perancangan kapal selam semakin besar.

Kemampuan kapal selam untuk beroperasi dibawah kedalaman laut menjadikan kapal selam harus bergantung pada *Air-Independent Propulsion*, yang berarti tidak bergantung pada udara dari luar. Dari penelitian sebelumnya ditetapkan menggunakan *PEM Fuel Cells* [1] yang mana masih sangat mahal untuk diaplikasikan, untuk itu penelitian ini bertujuan mendapatkan

propeller yang memiliki *thrust* terbesar sehingga dapat menghemat penggunaan bahan bakar dan menambah *Bottom-time*.

Kapal selam membutuhkan gaya dorong terbesar saat dalam kondisi *Fully-submerged*[2]. Oleh karena itu pengujian dibatasi dalam kondisi *Fully-submerged*. Banyak penelitian yang menganalisis *propeller* secara terpisah dari badan kapal, namun penelitian sebelumnya mengungkap bahwa perancangan sebuah *propeller* harus memperhatikan *resistance test* dan efek lambung kapal itu sendiri[3].

Propulsi adalah salah satu faktor penentu performa *hydrodynamic* dari kapal selam[4]. Dengan banyaknya pilihan tipe *propeller*, dipilihlah *propeller* tipe Kaplan karena cenderung memiliki *thrust* yang lebih tinggi[5][6]. Jumlah

blade yang digunakan yaitu 6, 8, dan 10. Perbedaan ini bertujuan untuk mencari *thrust* terbesar. Sudut *rake* juga dibedakan kedalam 5°, 10° dan 15°.

Perancangan *propeller* ini mempertimbangkan badan kapal selam yang telah di dapatkan dari penelitian sebelumnya. *Hull form* dari penelitian sebelumnya diambil dan dimasukkan kedalam simulasi. Hambatan kapal sebelumnya telah didapatkan senilai 40,7 kN dengan kecepatan 8,2 Knots [1].

Terdapat penelitian lain yang membandingkan antara *B-Series* dan *Kaplan-Series*. Berdasarkan penelitian tersebut didapatkan *thrust* tertinggi menggunakan *propeller* Kaplan pada RPM 500.

Propeller Kaplan biasa dioperasikan dalam sebuah *nozzle*, sehinga dipilihlah tipe 19A sebagai *nozzle*. Sebagai *strut* penghubung *nozzle* dipilih *NACA foil* 0018. Dari penelitian sebelumnya *propeller* dengan *nozzle* memiliki *thrust* lebih tinggi[7][8].

Penelitian ini akan menyajikan sebuah simulasi *Computational Fluid Dynamics* pada *propeller* Kaplan-series untuk melihat perilaku yang dihasilkan akibat perubahan jumlah daun (6,8 dan 10) dan sudut *rake* (5°, 10°, dan 15°) terhadap performa *propeller* kapal selam meliputi gaya dorong (*Thrust*), torsi (*Torque*) dan efisiensi *propeller* (η_0).

2. LATAR BELAKANG TEORI

2.1 Governing Equation

Sebagai landasan dalam penyelesaian kasus secara *Computational*, terdiri dari beberapa persamaan matematika yang mendasar, seperti persamaan kontinuitas, momentum dan kekekalan energi. *Solution methods* pada aplikasi ini disebut *Finite Volume Methods*. FVM adalah Teknik pembagian dari domain fluida yang dipecah kedalam bentuk lebih kecil, Persamaan yang digunakan akan menyelesaikan tiap kondisi pada masing-masing *control volume* secara berulang. Pada akhirnya didapatkan gambaran lengkap tentang suatu perilaku fluida dinamis yang diamati. Berikut adalah persamaan yang diselesaikan pada tiap *control volume* dalam simulasi:

A. Persamaan Kontinuitas

Untuk mengaplikasikan bentuk konservatif pada persamaan Navier-Stokes menggunakan *Finite Volume Method*, volume model yang dibatasi *Boundary* dianggap konstan pada ruang simulasi fluida dinamis. Persamaan Kontinuitas massa dalam bentuk konservasi (kekal) berdasarkan densitas yang tetap pada aliran *Incompressible* di jelaskan pada *Equation* (1). Dimana ρ adalah massa jenis, U adalah *Velocity vector* dan t adalah waktu[9].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (1)$$

B. Persamaan Momentum

Hukum Newton ke 2 diaplikasikan pada *Finite Volume Methods* pada model dengan aliran fluida. Ketika fluida bergerak, gaya pada elemen fluida sama dengan massa dikali dengan akselerasi dari elemen itu sendiri, seperti diekspresikan pada *Equation* (2)[9].

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \tau + S_M \quad (2)$$

C. Turbulence Model (*k-epsilon*)

Two-Equation model sudah sangat banyak digunakan, selain karena memiliki hasil numerik yang lebih akurat juga karena ini lebih terdepan(canggih). Dimana skala kecepatan dan panjang diselesaikan dengan persamaan terpisah, k adalah *turbulence kinetic energy* yang mana merupakan varian dari fluktuasi kecepatan. Memiliki dimensi L^2/T^2 . ϵ adalah disipasi *turbulence eddy* yang memiliki dimensi L^2/T^3 [9].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon + C_{\epsilon 1} P_{\epsilon b}) \quad (3)$$

D. Teori Hidrodinamis Propeller

Masing-masing *propeller* memiliki sifat-sifat *hydrodynamic* tersendiri. Dalam menganalisis *propeller* penulis meninjau karakteristik *Thrust* dan *Torque* serta Efisiensi. Berdasarkan penelitian sebelumnya penulis melakukan perhitungan sebagaimana pada *Equation* 4, 5, 6, dan 7 [10].

$$a. \text{ Thrust coefficient } Kt = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (4)$$

$$b. \text{ Torque coefficient } Kq = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (5)$$

$$c. \text{ Advance coefficient } J = \frac{V_a}{nD} \quad (6)$$

$$d. \text{ Propeller Efficiency } \eta_0 = \left(\frac{Kt}{Kq} \right) * (J/2\pi) \quad (7)$$

Kt = Koefisien Gaya Dorong

Kq = Koefisien Torsi

T = Gaya Dorong (N)

Q = Torsi (Nm)

ρ = Densitas Air (kg/m^3)

D = Diameter *Propeller* (m)

n = *Angular Velocity* (rev/s)

$V_a = \text{Velocity Advance (m/s)}$

3. SIMULASI

Simulasi dilakukan dengan metode *computational fluid dynamics*. Dengan persamaan *Reynold-Averaged Navier Stokes Equation* ditujukan untuk memperoleh hasil fluktuasi aliran turbulen pada material *incompressible* dengan properti yang konstan. Simulasi CFD dilakukan dengan kapal dalam kondisi *Fully-Submerged*. Dengan *Total Wetted Surface* 1910.3 m². Kapal selam dipasangkan pada masing-masing *propeller* yang telah dimodelkan dalam kolam percobaan. Dengan karakteristik air bermassa jenis 1025 Kg/m³ dan kinematik Viskositas 1.23 x 10⁻³ Kg/ms. serta *Reynold Number* 2.51 x 10⁸ (*turbulence*). Berikut beberapa parameter yang digunakan.

A. Parameter tetap

1. Badan kapal selam

Pada penelitian sebelumnya didapat bentuk badan kapal dan kriteria lainnya. Dengan ukuran utama tersebut dilakukan pemodelan kapal. Ukuran utama kapal sebagaimana yang tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. *Principal Dimension*

No	Item	Besaran	Satuan
1	<i>Length Overall</i>	71.3	m
2	<i>Maximum Height</i>	12.7	m
3	<i>Outerhull Diameter</i>	9.2	m
4	<i>Velocity</i>	8.2	knots
5	RPM	500	Rev/m
6	<i>Total Resistance</i>	40.7	kN
7	WSA	1910.7	m ²
8	<i>Reynold Number</i>	2.51 x 10 ⁸	

2. Kondisi air

Kondisi air disesuaikan dengan perairan tempat kapal selam akan dioperasikan dan telah diuji sebelumnya. Karakteristik air ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik fluida

Sifat	Besaran	Satuan
Density	1025	Kg/m ³
Viskositas Kinematis	1.20E-06	m ² /s
Viskositas Dinamis	1.23E-03	Kg/ms

B. Parameter Peubah

Didalam mencari *propeller* yang paling mumpuni untuk dioperasikan, dirancanglah beberapa model *propeller* tipe Kaplan. Tabel 3 menunjukkan masing variasi *propeller*. Dimana

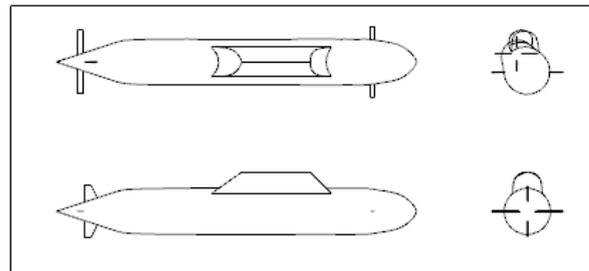
variasi difokuskan pada perbedaan jumlah daun dan sudut rake dari masing masing *propeller*.

Tabel 3. Variasi Model *Propeller*

No	Item	Besaran	Satuan
1	<i>Pitch Length</i>	4	m
2	<i>Blade Area Ratio</i>	0.8	
3	<i>Blade</i>	6,8,10	Unit
4	<i>Diameter</i>	4.123	m
5	<i>Rake</i>	5,10,15	Derajat
6	<i>Hub Diameter</i>	0.8	m

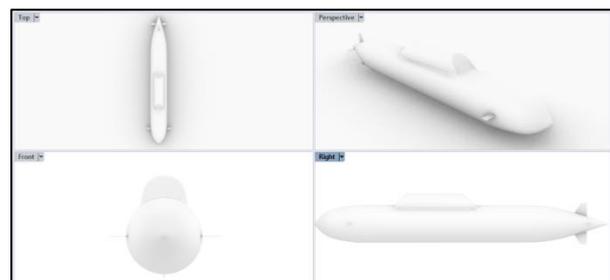
3.1. Pemodelan Geometri Kapal

Dengan merujuk pada *principal dimension* pada Tabel 1, dilakukan pembuatan *linesplan*. Gambar 1 adalah hasil pembuatan *linesplan*.



Gambar 1. *Linesplan* Kapal

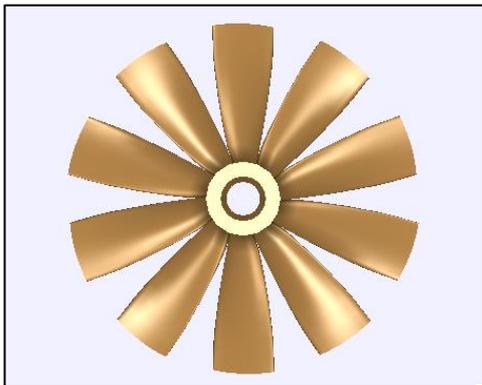
Berdasarkan *linesplan* maka dibuatlah geometri 3 dimensi menggunakan *software* 3D kapal. Model 3D seperti pada Gambar 2 digunakan untuk simulasi.



Gambar 2. Model Kapal 3 Dimensi

3.2. Pemodelan *Propeller*

Propeller yang dianalisis menggunakan tipe Kaplan-series. Variasi *propeller* sebagaimana disebutkan pada Tabel 2, dirancanglah *propeller* sebagaimana digambarkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Propeller Ka1080

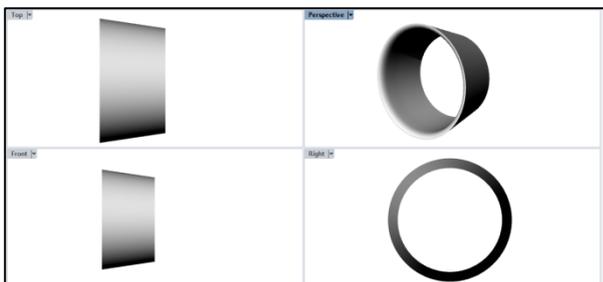
3.3. Dimensi Nozzle

Penelitian ini menggunakan *propeller* kaplan yang dipasangkan pada sebuah *nozzle* karena ingin mendapatkan *thrust* tertinggi, yaitu menggunakan *Nozzle 19A*. Menurut penelitian sebelumnya, *nozzle 19A* adalah *nozzel* yang paling mudah diaplikasikan dan memiliki kemampuan *hydrodynamic* yang mumpuni[10]. Telah diuji dibuktikan pula pada penelitian terdahulu pula bahwa penambahan *Energy Saving Device*, berupa *nozzle* dapat meningkatkan gaya dorong[11]. Penampang melintang dari *nozzle 19A* digambarkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Potongan penampang melintang Duct 19A[10]

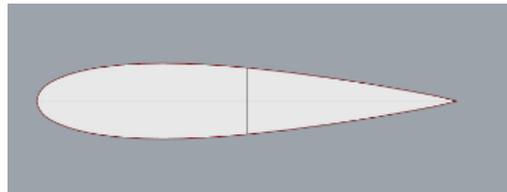
Berdasarkan potongan penampang melintang pada Gambar 4, dibuat model dengan menyesuaikan terhadap dimensi *propeller*. Gambar 5 merupakan hasil pemodelan *nozzle*.



Gambar 5. Geometry Model Duct 19A

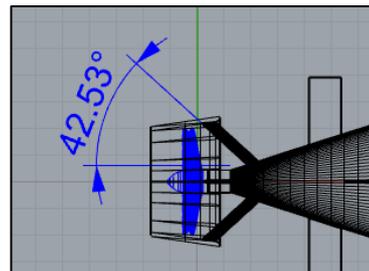
3.4. Strut

Menghubungkan antara *nozzle* dan badan kapal dibutuhkan sebuah konstruksi yang menggunakan profil. Terdapat banyak pilihan profil, pada penelitian kali ini di gunakan profil dari NACA *aerofoil* 0018. Gambar 6 adalah bentuk penampang melintang NACA *foil* 0018.



Gambar 6. Penampang melintang *aerofoil* NACA 0018

Mempertimbangkan bentuk badan kapal dan aliran *propeller* serta putaran *propeller assembly*, maka *strut* dibuat miring 42.53° . Hal ini bertujuan agar *strut* tidak bertabrakan dengan *propeller*. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Kemiringan *Strut* terhadap badan kapal

3.5. Meshing

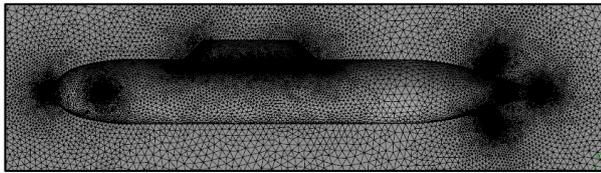
Tahap selanjutnya setelah geometri selesai adalah diskretisasi geometri, dimana domain analisis di pecah menjadi elemen-elemen. Elemen-elemen ini nantinya akan mempengaruhi perhitungan. Strategi diskretisasi harus seakurat mungkin untuk dapat mewakili geometri dari *propeller* dan badan kapal. Pada *Domain Propeller* diberikan ukuran yang lebih kecil sebaliknya, pada fluida lebih besar. Tabel 4 menunjukkan kriteria apa saja yang digunakan selama tahap *meshing*.

Tabel 4. *Criteria Mesh*

No	Parameter	Criteria
1	Type Mesh	Unstructured
2	Element Shape	Tetrahedrons
3	Sizing	Fine
4	Sizing Function	Curvature
5	Target Sjewness	0.5
6	Smoothing	High
7	Sizing on	50 mm
	Rotating Domain	
8	Total Element	+ - 2000000

Hasil dari *meshing* dapat dilihat pada gambar 8. Area-area kritisal yang memiliki *pressure* tinggi dan bentuk yang ekstrim dilakukan

meshing yang lebih akurat agar mendapatkan hasil yang lebih akurat.



Gambar 8. Hasil Meshing

3.6. Seawater Properties

Simulasi CFD untuk kasus ini menggunakan *seawater properties* yang sama dengan penelitian terhadap badan kapal yang telah dilakukan. Merujuk pada penelitian sebelumnya sebagaimana telah ditunjukkan pada Tabel 2.

3.7. Setup Simulasi

Simulasi menggunakan CFD mengikuti kriteria dari jurnal-jurnal terdahulu. Untuk kasus *propeller* perlu dibuat 2 *Domain Boundary* yaitu domain fluida dan domain *propeller*. Simulasi kali ini menggunakan analisis secara *Steady-state*.

3.7.1. Fluid Domain

Domain fluida ditentukan ukuran berdasarkan standar ITTC untuk simulasi Fluida Dinamis. Dimensi dari domain fluida memiliki ukuran sebagaimana tertera pada Tabel 5[12] :

Tabel 5. Ukuran Kolam Pengujian

No	Jarak dari Lambung ke	Jarak	Besaran
1	Boundary-Sisi	1Lpp	71.3 m
2	Boundary-Inlet	1Lpp	71.3 m
3	Boundary-Outlet	3Lpp	204.9 m

Berdasarkan penelitian sebelumnya *Domain Boundary* diatur sedemikian rupa agar dapat mewakili kondisi fisik aslinya. Hal ini dilakukan untuk mendapat hasil yang sesuai. *Set up* pada domain sesuai dengan Tabel 6.

Tabel 6. Setting Domain Fluida

No	Domain Setting	Option
1	Type	Fluid
2	Material	Water
3	Morphology	Continuous Fluid
4	Bouyancy model	Non-Bouyant
5	Domain Motion	Stationary
6	Reference Pressure	1 atm
7	Turbulence Model	K-epsilon
8	Turbulent wall function	Scalable

Didalam domain fluida ini terdapat beberapa *boundary*. *Boundary* tersebut yaitu *boundary inlet*, *outlet*, sisi dan *hullwall*.

a. Boundary – Inlet

Boundary-Inlet diartikan sebagai batasan air masuk. Tabel 7 adalah *setting* dari *boundary* ini.

Tabel 7. Boundary Setting

No	Boundary Setting	Option
1	Type	Velocity-Inlet
2	Flow Regime	Subsonic
3	Velocity	4.218 m/s
4	Mass and	Normal speed
5	momentum Turbulence	Medium Intensity

b. Boundary – Outlet

Boundary-Outlet diartikan sebagai batasan air keluar. Tabel 8 adalah *setting* dari *boundary* ini.

Tabel 8. Boundary Setting

No	Boundary Setting	Option
1	Type	Pressure-Outlet
2	Flow Regime	Subsonic
3	Relative Pressure	0 Pa

c. Boundary – Sisi

Boundary ini dipilih sebagai *opening* agar tidak ada air yang bergesekan dengan *boundary*. Ini menggambarkan kondisi *Open Water*. Tabel 9 adalah *setting* dari *boundary* ini.

Tabel 9. Boundary Setting

No	Boundary Setting	Option
1	Type	Opening
2	Flow Regime	Subsonic
3	Relative Pressure	0 Pa

d. Boundary – Hullwall

Bentuk *hull* pada simulasi di definisikan sebagai dinding yang memiliki gesekan terhadap aliran air. Tabel 10 adalah *setting* dari *boundary* ini.

Tabel 10. *Boundary Setting*

No	Boundary Setting	Option
1	Type	wall
2	Wall-Option	No-slip Wall
3	Roughness	Smooth wall

e. Boundary-Interface

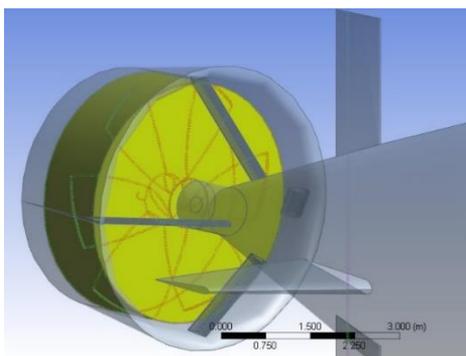
Domain *interface* merupakan penghubung antar *Static Domain* dan *Rotating Domain*. Berikut Tabel 11 merupakan *setting* dari *boundary interface*.

Tabel 11. *Boundary Setting*

No	Boundary Setting	Option
1	Type	Fluid-Fluid
2	Interface Option	General
3	Frame change Option	Connection Frozen Rotor
4	Pitch Angle	360

3.7.2. Propeller Domain

Berdasarkan penelitian sebelumnya dibuatlah domain *propeller* berbentuk tabung berjari 0,0001 m dari *propeller*. Jarak ini diusahakan seminimum mungkin. Domain ini diberi kecepatan sudut sesuai putaran *propeller* dan searah jarum jam. Sebagaimana digambarkan pada Gambar 9.



Gambar 9. *Rotating Domain*

Domain pada *propeller* ini diatur sebagaimana pada Tabel 12. *Setting* ini meliputi beberapa kriteria yang telah ditentukan.

Tabel 12. *Domain Setting*

No	Domain Setting	Option
1	Type	Fluid
2	Material	Water
3	Morphology	Continuous Fluid
4	Bouyancy model	Non Bouyant
5	Domain Motion	Rotating
6	Angular Velocity	500 RPM
7	Rotation Axis	Global X
8	Turbulence Model	k-epsilon
9	Turbulent wall function	scalable

a. Boundary-Interface

Boundary-Interface adalah antar muka antara dua domain. Domain tersebut antara lain *Static Domain* yaitu fluida dan *Rotating Domain* yaitu *propeller*. Tabel 13 merupakan penggambaran *setting* untuk *boundary* ini.

Tabel 13. *Boundary Setting*

No	Boundary Setting	Option
1	Type	Fluid-Fluid
2	Interface Option	General
3	Frame change Option	Connection Frozen Rotor
4	Pitch Angle	360

b. Boundary-Propeller Wall

Boundary-Propeller wall yaitu kondisi batas pada bilah *propeller* yang di definisikan sebagai *rotating wall*. *Boundary* ini memiliki *roughness* dan bersifat *noslip*. Tabel 4 merupakan pendefinisian *boundary* ini pada simulasi.

Tabel 14. *Boundary Setting*

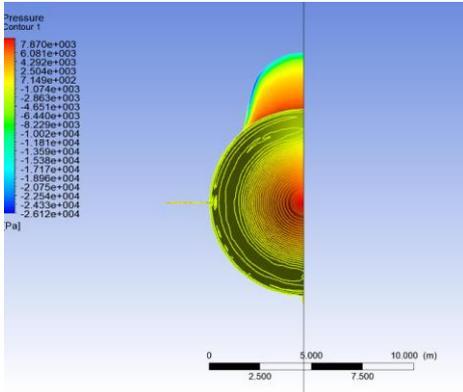
No	Boundary Setting	Option
1	Type	Wall
2	Frame Type	Rotating
3	Wall Option	No-slip wall
4	Wall Roughness	Smooth wall

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Beberapa validasi perlu dilakukan setelah simulasi selesai. Hal ini dikarenakan simulasi melibatkan badan kapal secara langsung, maka perlu dilakukan validasi terlebih dahulu apakah model lambung kapal valid dengan penelitian sebelumnya.

4.1. Validasi Lambung Kapal

Kapal selam ini terlebih dahulu sudah di uji total hambatannya. Nilai hambatan dicari melalui metode numerik pada *CFD*. Hasil dapat dilihat pada Gambar 10 berikut :



Gambar 10. *Contour Pressure* pada *CFD*

Hasil simulasi untuk mencari hambatan menunjukkan hasil yang logis. Dimana terdapat beberapa titik stagnasi yang mengalami *pressure* paling tinggi. Sejalan dengan Hukum Bernoulli yaitu semakin tinggi *pressure* maka kecepatan semakin rendah. Pada daerah itu terjadi *Boundary layer*. Titik inilah yang menjadi acuan dalam melakukan diskretisasi. Ada 2 sumber hambatan pada kapal selam yaitu *Form Resistance* dan *Friction Resistance*[1].

$$R_t = R_{form} + R_{friction} \quad (8)$$

Hasil dari simulasi didapatkan nilai hambatan total. Tabel 15 menunjukkan perbandingan hasil dari penelitian sebelumnya dengan hasil yang baru didapat.

Tabel 15. Hasil Perhitungan dan Simulasi R_t

No	Rt Nilai Referensi	Rt Nilai Model
1	40700 N	41796 N
2	Persentase Error	2.69%

Perbedaan hambatan kapal masih dalam batas toleransi yaitu dibawah 5%. Model kapal ini dianggap valid untuk dilakukan percobaan.

4.2. Validasi Proses Simulasi

Simulasi menggunakan *CFD* memang menghemat banyak biaya jika dibandingkan dengan pengujian *towing tank* namun simulasi ini harus memenuhi kondisi fisik asli. Oleh karena itu

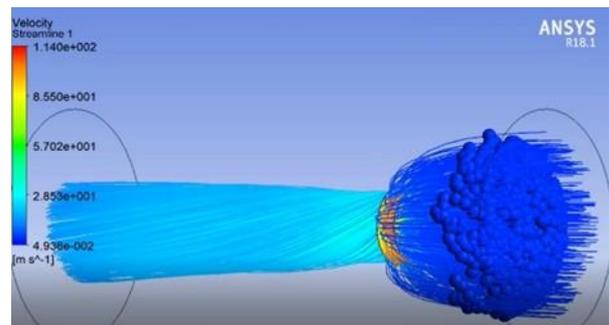
dilakukan terlebih dahulu validasi apakah simulasi yang dilakukan dapat merepresentasikan kondisi fisik aslinya.

Validasi menggunakan tabel Wageningen B-series untuk *propeller B-Series* karena *propeller* Kaplan belum ada grafik Empirisnya. Penulis memvalidasi proses yang dilakukan terhadap suatu luaran yang telah diuji dengan kondisi fisik[13]. Berikut Tabel 16 adalah dimensi dan kriteria model *propeller B-series* guna memvalidasi proses simulasi.

Tabel 16. Dimensi *Propeller B-series*

No	Item	Besaran	Satuan
1	<i>Pitch Length</i>	4.8	m
2	<i>Blade Area Ratio</i>	0.8	
3	<i>Blade</i>	6	Unit
4	Diameter	4	m
5	<i>Angular Velocity</i>	8.3333	Rev/sec
6	<i>Velocity</i>	4.218	m/s

Simulasi dengan pengaturan diatas menghasilkan aliran seperti yang di gambarkan pada Gambar 11.



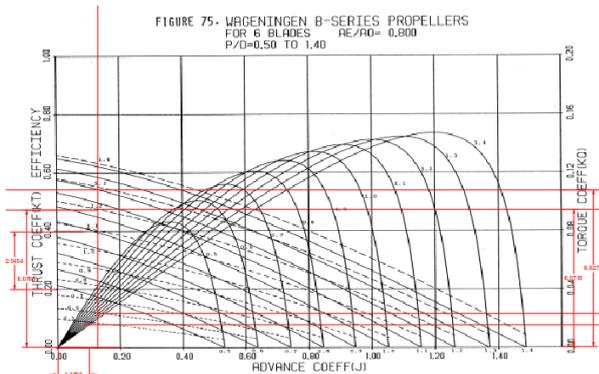
Gambar 11. *Streamline Velocity* aliran pada *propeller*

Berikut perhitungan manual untuk mencari nilai *thrust* :

$$J = \frac{v_a}{nD} \quad (9)$$

- v_a = Kecepatan kapal bergerak((Knots).
- n = *Angular Velocity* (Rev/s)
- D = Diameter *Propeller* (m)

$$J = \frac{4,218}{8.3 \times 4} = 0.13$$



Gambar 12. Grafik Perhitungan *Thrust* dan *Torque*[13]

Didapatkan nilai :

$$K_T = 0.497$$

$$K_Q = 0,096$$

$$T_{perhitungan} = K_t \rho n^2 D^4 \quad (10)$$

K_t = Koefisien gaya dorong

K_q = Koefisien torsi

ρ = Densitas air laut (104.48)

$$Q_{perhitungan} = K_q \rho n^2 D^5 \quad (11)$$

Perhitungan *thrust* didapatkan sebagaimana tertera pada Tabel 17. Hasil yang didapat telah dibandingkan antara hasil simulasi dan perhitungan empiris.

Tabel 17. Validasi Nilai *Thrust*

No	<i>Thrust</i> Perhitungan	<i>Thrust</i> CFD
1	8486728 N	8911810 N
2	Persentase Error	3.8 %

Perhitungan torsi didapatkan sebagaimana tertera pada Tabel 18. Hasil tersebut telah dibandingkan antara hasil simulasi dan perhitungan empiris.

Tabel 18. Validasi Nilai *Torque*

No	<i>Torque</i> Perhitungan	<i>Torque</i> CFD
1	6869382 Nm	6745710 Nm
2	Persentase Error	1,8 %

Perbedaan antara perhitungan dan simulasi kurang dari 5%, maka simulasi dianggap valid. Simulasi dapat diaplikasikan dalam mencari *thrust* dan *torque* pada *propeller* Kaplan.

4.3. Hasil *Thrust* dan *Torque Propeller*

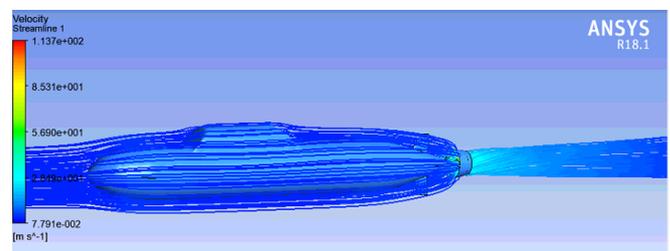
Dari simulasi yang telah dilakukan terhadap 9 *propeller* didapatkan hasil *mesh*. Hasil tersebut dirangkum sebagaimana tertera pada tabel 19 berikut.

Tabel 19. Hasil Diskretisasi Model

No	<i>Propeller</i>	<i>Element</i>
1	Ka680-5	2040053
2	Ka680-10	2018683
3	Ka680-15	2033120
4	Ka880-5	2017159
5	Ka880-10	2018005
6	Ka880-15	2286649
7	Ka1080-5	2012042
8	Ka1080-10	2011560
9	Ka1080-15	2077026

Jumlah *element* mempengaruhi hasil 9 simulasi, maka simulasi dilakukan dengan kriteria *mesh* yang sama dan jumlah *mesh* yang identik. Diharapkan hasil ini dapat menunjukkan variasi mana yang memiliki nilai *thrust* tertinggi.

Gambar 13 melihat hasil simulasi disertai badan kapal. Aliran terpengaruh oleh badan kapal sehingga kecepatan air di depan *propeller* berbeda dengan kecepatan aliran awalnya.

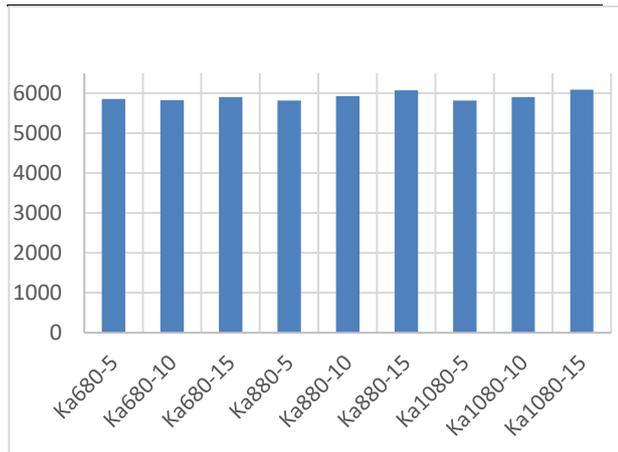


Gambar 13. *Velocity Streamline* pada simulasi dengan badan kapal

Dari hasil simulasi didapatkan nilai *thrust* seperti pada Tabel 20 dan *torque* tertera pada Tabel 21. Perbedaan antara variasi model *propeller* dapat dilihat signifikansi pada Gambar 14 dan Gambar 15.

Tabel 20. Hasil Nilai *Thrust Force*

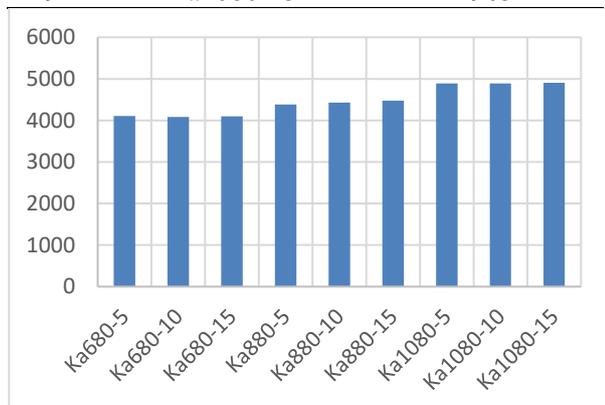
No	Propeller	Force (kN)
1	Ka680-5	5855
2	Ka680-10	5822
3	Ka680-15	5904
4	Ka880-5	5819
5	Ka880-10	5929
6	Ka880-15	6069
7	Ka1080-5	5817
8	Ka1080-10	5903
9	Ka1080-15	6090



Gambar 14. Grafik Gaya Dorong (kN)

Tabel 21. Hasil Nilai *Torque*

No	Propeller	Torque (kN.m)
1	Ka680-5	4108
2	Ka680-10	4083
3	Ka680-15	4098
4	Ka880-5	4383
5	Ka880-10	4427
6	Ka880-15	4474
7	Ka1080-5	4886
8	Ka1080-10	4888
9	Ka1080-15	4905



Gambar 15. Grafik Torsi (kN.m)

Efisiensi *propeller* juga diperhitungkan guna mencari *propeller* paling efisien [10]. Perhitungan

efisiensi menggunakan rumus seperti tertera pada *Equation 9*.

$$\eta_0 = \frac{T \cdot Va}{2 \cdot n \cdot \pi \cdot Q} \quad (12)$$

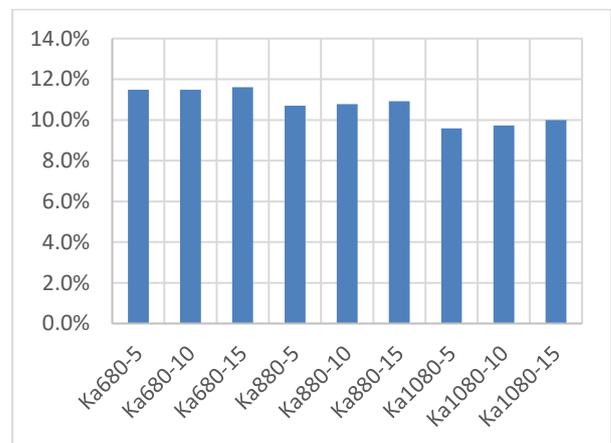
Hasil dari perhitungan efisiensi tertinggi pada *propeller* Ka680 sudut *rake* 15° dituliskan sebagai berikut :

$$\eta_0 = \frac{(5904390 \times 0.1019) \times 4.218}{2 \times 8.3 \times 3.14 \times 4098230 (0.1019)} = 0,116$$

Tabel 22 menampilkan nilai efisiensi tiap *propeller* yang diuji. Signifikansi antar masing masing *propeller* dapat dilihat pada gambar 14.

Tabel 22. Nilai Efisiensi *Propeller*

Propeller	Efisiensi
Ka680-5	11.5%
Ka680-10	11.5%
Ka680-15	11.6%
Ka880-5	10.7%
Ka880-10	10.8%
Ka880-15	10.9%
Ka1080-5	9.6%
Ka1080-10	9.7%
Ka1080-15	10.0%



Gambar 16. Grafik Efisiensi Propeller

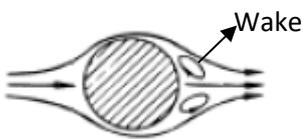
Hasil efisiensi sesuai dengan penelitian sebelumnya dimana semakin sedikit jumlah daun maka efisiensi akan semakin baik. Dari hasil ini penulis menemukan bahwa seiring pertambahan *Rake* nilai efisiensi cenderung naik.

4.4. Pembahasan

Setelah melakukan *running* terhadap model pada *software*, maka didapatkan hasil. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa :

1. Pengaruh akibat penambahan sudut *rake*.

Sudut *rake* 5°, 10°, dan 15° cenderung menimbulkan peningkatan pada gaya dorong, torsi dan efisiensi propeller. Semakin meningkatnya nilai sudut *rake* maka jarak antara badan kapal dan propeller akan semakin bertambah (*Propeller Clearance*)[14]. Pertambahan jarak ini mengakibatkan aliran yang tiba di daun propeller berbeda. Aliran yang melalui badan kapal akan mengalami hambatan, ketika mencapai ujung badan kapal hambatan akan seketika hilang dan terjadilah turbulensi, dan menimbulkan *wake*. *Wake* ini akan berangsur menghilang seiring menjauhi badan kapal. Gambar 17 merupakan ilustrasi dari *wake* yang timbul setelah melalui objek.



Gambar 17. Ilustrasi *Wake* Pada Aliran Melalui Objek.

Namun, terjadi anomali pada Ka680 dengan *rake* 5°, yang mana lebih tinggi dari segi *thrust* dan *torque* dibanding Ka680 *rake* 10°.

2. Pengaruh akibat penambahan jumlah daun.

Didapati hasil bahwa meningkatnya jumlah daun dari 6, 8 dan 10 bilah beriringan dengan meningkatnya *torque* yang cukup signifikan. Kenaikan torsi ini tidak diiringi dengan kenaikan *thrust* yang setara. Bahkan pada beberapa propeller didapati terjadi penurunan *thrust* seiring kenaikan jumlah daun. Dapat dilihat pada *Equation (9)*, nilai efisiensi pada sebuah propeller merupakan perbandingan antara koefisien *thrust* (K_t) dibagi koefisien *torque* (K_q). Oleh karena kenaikan torsi lebih besar maka nilai efisiensi akan berkurang seiring penambahan jumlah daun. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian terdahulu dimana semakin tinggi jumlah daun maka efisiensi propeller menurun dan konsumsi bahan bakar akan meningkat[15].

3. Efisiensi Propeller

Efisien hasil pengujian yang diuji sangat rendah, hal ini dikarenakan beberapa faktor salah satunya adalah putaran propeller. Semakin tinggi putaran propeller maka nilai J akan semakin rendah. Ini berhubungan dengan nilai K_t (Koefisien gaya dorong) dan K_q (Koefisien torsi). Dimana K_t dan K_q akan semakin tinggi apabila J semakin rendah. Pada akhirnya *thrust* dan torsi akan semakin tinggi ketika K_t dan K_q semakin tinggi. Tidak mengherankan apabila gaya dorong

tertinggi dicapai pada efisiensi yang rendah. Juga hasil yang menunjukkan semakin tinggi putaran propeller maka semakin rendah efisiensi[16]. Oleh karena simulasi dilakukan pada putaran cukup tinggi yaitu 500 RPM, tidak heran efisiensi jadi sangat rendah. Kondisi ini tergambarkan dari hasil pengujian dan juga referensi terdahulu[10].

5. KESIMPULAN

Parameter investigasi yang telah ditinjau dalam penelitian dengan metode *computational fluid dynamics* pada propeller kapal selama menunjukkan karakteristik *propeller*. Dimana kenaikan sudut *rake* cenderung meningkatkan gaya dorong, torsi dan efisiensi. Ditemukan pula bahwa kenaikan jumlah daun *propeller* menunjukkan konsistensi kenaikan pada nilai torsi dan penurunan pada nilai efisiensi. Sedangkan gaya dorong, cenderung tidak homogen. Fenomena yang terjadi variatif, ada gaya dorong yang naik dan turun terhadap kenaikan jumlah daun. Diantara seluruh *propeller* yang diuji, *propeller* Ka1080 dengan sudut *rake* 15° adalah *propeller* dengan gaya dorong dan torsi tertinggi senilai 6090 kN dan 4905 kN.m. Disisi lain *propeller* dengan efisiensi tertinggi adalah Ka680 *rake* 15° dengan efisiensi mencapai 11,6% pada putaran 500 rev/menit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Carlberg, "Concept design of a commercial submarine." Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Marine Technology, 2011.
- [2] M. Moonesun, A. Mahdian, Y. M. Korol, M. Dadkhah, and M. M. Javadi, "Concepts in submarine shape design," *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, vol. 34, no. 1, hal. 100-104, Januari 2016.
- [3] F. Force and D. C. Strain, "Optimization Design and Hydrodynamic Test on Propeller Mini Submarine," *Science and Engineering*, vol. 27, hal 1-12, Januari 2016
- [4] V. Bertram, "Submarine Hull Design." Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2011.
- [5] A. Trimulyono and K. Kiryanto, "Analisa Efisiensi Propeller B-Series Dan Kaplan Pada Kapal Tugboat Ari 400 Hp Dengan Variasi Jumlah Daun Dan Sudut *Rake* Menggunakan CFD," *KAPAL*, vol. 12, no. 2, hal. 112–120, Juni 2015.
- [6] A. Z. Zain, B. A. Adietya, and M. Iqbal,

- “Analisa Perbandingan Propeller Berdaun 4 Pada Kapal Trimaran Untuk Mengoptimalkan Kinerja Kapal Menggunakan Metode CFD,” *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 6, no. 1, hal 178-188, Januari 2018.
- [7] I. Ichwansyah, “Analisa Peningkatan Thrust Akibat Penerapan Energy Saving Device pada Kapal Perintis 500 DWT Menggunakan Metode CFD (Computation Fluid Dynamic),” *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 7, no. 3, hal. 1-8, Agustus 2019.
- [8] P. Mertes and H.-J. Heinke, “Aspects of the design procedure for propellers providing maximum bollard pull,” *Ciencia y Tecnologia de Buques*, vol. 8, no. 2, hal. 1-9, 2015.
- [9] I. Ansys, “ANSYS advanced analysis techniques guide,” *Ansys Help*, 2007.
- [10] J. Carlton, *Marine propellers and propulsion*, Burlington: Butterworth-Heinemann, 2007.
- [11] P. B. Setyabudi, D. Chrismianto, and G. Rindo, “Analisa Nilai Thrust dan Torque Propeller Tipe B-Series pada Kapal Selam Midget 150m dengan Variasi Skew Angle dan Blade Area Ratio (Ae/Ao) Menggunakan Metode CFD,” *KAPAL*, vol. 13, no. 3, hal. 109–118, 2016.
- [12] ITTC, “Guidelines. 2011,” *Pract. Guidel. Sh. CFD Appl.*, vol. 20, pp. 395–429, 2011.
- [13] M. M. Barnitsas, D. Ray, and P. Kinley, “KT, KQ and efficiency curves for the wageningen b-series propellers,” University of Michigan, Mei 1981.
- [14] C. W. Dekanski, “Design and analysis of propeller blade geometry using the PDE method,” University of Leeds, 1993.
- [15] K. B. Yeo, R. Sabatly, W. Y. Hau, and C. M. Ong, “Effects of Marine Propeller Performance and Parameters Using CFD Method,” *J. Appl. Sci.*, vol. 14, no. 22, hal. 3083–3088, 2014.
- [16] M. Z. A. Z. Abidin and S. W. Adji, “Analisa Performance Propeller B-Series dengan Pendekatan Structure dan Unstructure Meshing,” *Jurnal Teknik ITS*, vol. 1, no. 1, hal. G241--G246, 2012.