

---

# ANALISA NUMERIK OLAH GERAK KAPAL SELAM DENGAN VARIASI BENTUK *AFTER BODY*

## NUMERICAL ANALYSIS OF SUBMARINE VESSEL MOTION WITH VARIOUS OF *AFTER BODY SHAPE*

**Putri Virliani, I Ketut Suastika dan Wasis Dwi Aryawan**  
Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya  
e-mail : pvirliani@yahoo.com

Diterima tanggal: 14 Desember 2016 ; Diterima setelah perbaikan: 7 Juli 2017 ; Disetujui tanggal: 6 Agustus 2017

### ABSTRAK

Olah gerak (*maneuver*) kapal selam yang baik diperlukan pada saat melakukan serangan maupun menghindari dari serangan musuh. Salah satu komponen teknologi kapal selam yang perlu dikembangkan untuk mencapai *maneuver* yang baik adalah komponen *hydroplane* yang tersusun pada bagian *after body* kapal selam. Kapal selam itu dapat melakukan olah gerak vertikal maupun horizontal dengan menggunakan sistem kendali gerak (*hydroplane*). Ukuran geometri dan bentuk lambung dari kapal selam mempengaruhi karakteristik *maneuver* kapal selam. Untuk mencapai karakteristik *maneuver* yang diinginkan diperlukan perancangan ulang sistem kendali *hydroplane*. Penelitian ini diawali dengan membuat variasi bentuk *after body* kapal selam dan kemudian memprediksi lintasan gerak melingkar kapal selam. Perhitungan gaya hidrodinamika dan momen dilakukan secara numerik dengan menggunakan *software Computational Fluid Dynamic* (CFD-ANSYS CFX). Hasil yang diperoleh dari ANSYS-CFX berupa gaya hambatan (*drag*) dan gaya angkat (*lift*) di mana hasil tersebut dimasukkan ke dalam persamaan gerak kapal selam dan diintegrasikan untuk mendapatkan kurva lintasan gerak melingkar (*turning circle*) kapal selam dengan menggunakan *software* MATLAB.

Kata kunci : Olah gerak, kapal selam, *after body*, persamaan gerak, CFD, MATLAB.

### ABSTRACT

*Good submarine vessel maneuvers are required when attacking or avoiding enemy attacks. One component of submarine technology that needs to be developed to achieve good maneuverability is the hydroplane components which are arranged on the after body of submarine. The submarine can perform vertical movement by using a motion control system (hydroplane). The size of the submarine geometry and shape hulls forward the submarine's maneuvering characteristics. To achieve the desired maneuvering characteristics is required. Firstly in this research, shape variations of after body of submarine are made. Secondly, the turning motion of the submarine is calculated. Calculation of hydrodynamic forces and moments numerically by using Computational Fluid Dynamic software (CFD-ANSYS CFX). The results obtained from ANSYS-CFX are the drag and lift force in which the results are incorporated into the submarine's equation of motion and integrated to obtain the turning circle curve by using MATLAB software.*

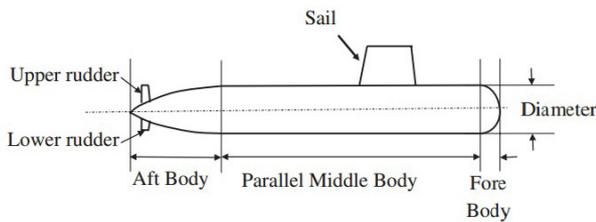
*Keywords: Maneuver, submarine vessel, after body, equation of motion, CFD, MATLAB.*

### PENDAHULUAN

Merupakan tantangan bagi desainer dalam merancang kapal selam agar dapat bermaneuver dengan baik dan tetap menjaga stabilitas kapal selam pada saat beroperasi. Dapat dilihat pada Gambar 1, bahwa salah satu aspek yang penting dalam meningkatkan stabilitas dan kinerja kapal selam adalah bentuk *after body* kapal selam yang terdiri dari susunan *after hydroplanes* dan *after rudders* (Renilson, 2015). Beberapa susunan

*hydroplanes* pada *after body* telah dikembangkan dan bahkan dipasang di beberapa kapal selam modern. *Hydroplanes* merupakan sebuah perangkat yang dapat bergerak berbentuk sayap-sayap pendek yang memiliki fungsi untuk mengontrol *pitch* kapal selam, selain itu juga untuk menentukan bagaimana kapal selam dapat bergerak naik atau menyelam (Burcher & Rydill, 1994). Renilson (2015) menjelaskan bahwa bentuk *after body* yang paling umum dikenal dengan bentuk *X-stern*. Susunan *X-stern* memiliki 2 pasang *surfaces control*

(*hydroplanes*) yang disusun pada 45° horizontal dan vertikal pada sumbu kapal selam. Dengan sudut ini memungkinkan untuk mendapatkan rentang yang lebih besar untuk masing-masing *surfaces control* dengan tidak melebihi batas maksimal lebar dan sarat kapal. Pemilihan lokasi dan ruang untuk *rudder* dan *hydroplanes* juga menentukan kemampuan kapal selam untuk menjaga atau merubah kedalaman kapal selam, semua memiliki dampak yang signifikan terhadap cara kapal selam berperilaku saat bermanuver (Burcher & Rydill, 1994).



Gambar 1. Geometri Kapal Selam (Renilson, 2015).  
Figure 1. Geometry of Submarines (Renilson, 2015)

Penelitian kapal selam ditandai dua peningkatan yang signifikan yaitu pertama oleh Jerman pada akhir perang dunia II ketika memproduksi type-21, merupakan penyempurnaan dari kapal selam tipe U (Gibson, 1931) dan yang kedua adalah oleh Angkatan Laut AS dengan Albacore yang dapat menyelam dengan kecepatan di atas 30 knot (Joubert, 2004).

Di Indonesia, beberapa penelitian tentang kinerja kapal selam juga telah dilakukan di kolam uji Laboratorium Hidrodinamika Indonesia BPPT Surabaya sejak tahun 2007 terutama dalam kaitannya dengan gaya-gaya hidrodinamika saat kapal selam bergerak dan bermanuver. (Erwandi *et al.*, 2012). Kemudian pada tahun 2015, Laboratorium Hidrodinamika Indonesia - BPPT Surabaya juga melakukan penelitian uji model fisik komponen *hydroplanes* untuk mengetahui gaya dan momen angkut kapal selam untuk desain lambung kapal selam tipe U-209 yang telah dimodifikasi (Utina, *et al.*, 2016).

Pada pengembangan desain kapal selam memiliki bentuk *after body* dengan susunan “+Stern”. Bentuk *after body* susunan ini terdiri dari komponen *rudder* yang tersusun secara vertikal dan *stern plane* yang tersusun secara horizontal, komponen tersebut tersusun saling tegak lurus pada bagian *after body* kapal selam. Efisiensi bentuk *after body* masih merupakan topik penelitian aktif untuk menginvestigasi kemampuan *maneuver* kapal selam. Ada beberapa *alternative* pengembangan bentuk *after body* kapal selam di

antaranya yaitu susunan “X-Stern” dan “Y-Stern”. Pada susunan “X-Stern”, komponen *hydroplane* tersusun saling menyilang menyerupai huruf X, sedangkan pada susunan Y-Stern, komponen *hydroplane* tersusun menyerupai huruf Y terbalik. Sehubungan dengan hal tersebut, penelitian ini difokuskan untuk memprediksi lintasan gerak melingkar kapal selam dengan bentuk *after body* susunan “+ Stern”, “X-Stern” dan “Y-Stern”.

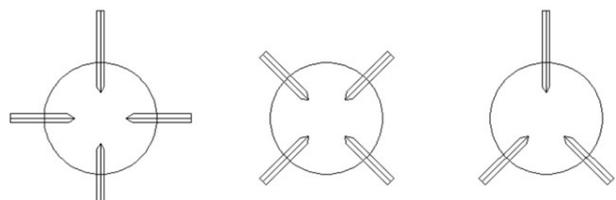
## BAHAN DAN METODE

Telah banyak penelitian tentang penggunaan CFD untuk menghitung *drag* (gaya hambatan) pada lambung kapal selam seperti yang dilakukan oleh Baker (2004). Pen *et al.* (2012) juga meneliti besarnya pengaruh hambatan sail terhadap lambung dan tentang standart persamaan gerak kapal selam.

Pada penelitian ini, langkah awal yang dilakukan adalah pembuatan gambar model 3d lambung kapal selam dengan dimensi yang disebutkan pada Tabel 1. Kemudian dilakukan simulasi numerik aliran *fluida* di sekitar kapal selam dengan menggunakan CFD-ANSYS CFX untuk mendapatkan nilai *drag* (gaya hambatan) dan *lift* (gaya angkat) kapal selam pada setiap variasi *after body* seperti pada gambar 2. Simulasi dilakukan pada sudut *rudder* 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°. Arah sudut *rudder* positif searah dengan jarum jam ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai *drag* dan *lift* yang akan digunakan sebagai input untuk menghitung *hydrodynamic derivatives* pada persamaan (1.1) sampai dengan (1.6). Kemudian untuk mengplot lintasan gerak melingkar kapal selam digunakan dengan menggunakan *software* Matlab.

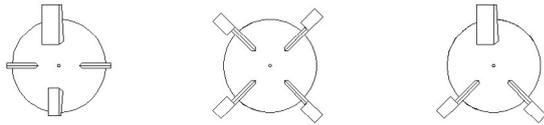
### Geometri Kapal Selam

Data kapal selam yang akan digunakan pada pengerjaan penelitian ini disebutkan pada Table 1.



Gambar 2. Skema susunan komponen *after body* kapal selam.

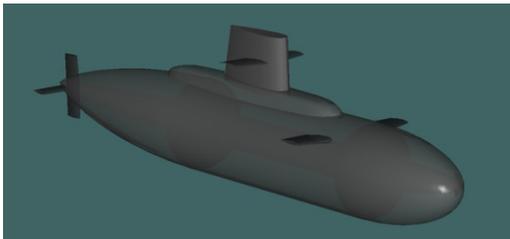
Figure 2. Schematic composition of submarine *after body* components



Gambar 3. Arah positif sudut rudder  
Figure 3. Positive direction of rudder angle

Tabel 1. Dimensi kapal selam  
Table 1. Dimensional of submarine

	Prototype
LOA	22,00 m
Diameter	3,00 m
Sarat	2,60 m
Kecepatan Maks	14 knot
Displacement - surfaced	113,90 ton
Displacement - submerged	129,30 ton
Volume - Surfaced	111,17 m <sup>3</sup>
Volume - submerged	126,14 m <sup>3</sup>



Gambar 4. Bentuk kapal selam.  
Figure 4. Submarine form.

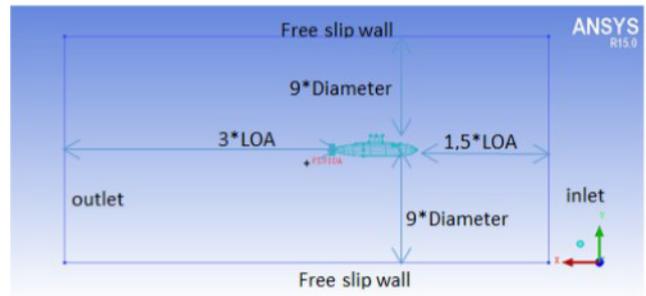
### Pengaturan Pemodelan pada ANSYS ICEM

Pembuatan domain yang terdiri dari: *inlet*, *outlet*, *wall*, *top*, dan *bottom*. Domain-domain tersebut berbentuk persegi panjang yang diberi *surface* dan membentuk balok yang mengelilingi model kapal selam dengan posisi *flow* domain yang disebutkan pada Table 2.

Tabel 2. Posisi *flow* domain  
Table 2. The position of the flow domain

<b>To inlet</b>	1,5*LOA	33 meter
<b>To Outlet</b>	3*LOA	66 meter
<b>To Up wall</b>	9*Diameter	27 meter
<b>To Bottom wall</b>	9*Diameter	27 meter
<b>Z – direction</b>	9*Diameter	27 meter

Pada Gambar 5, *inlet* merupakan bidang aliran masuk. Jarak dari model ke *inlet* ditetapkan tidak terlalu besar dari panjang model kapal selam, dan diposisikan di bagian depan model. Sedangkan *outlet* diletakkan dibelakang disesuaikan dengan kebutuhan analisis,



Gambar 5. Boundary Condition untuk simulasi CFD.  
Figure 5. Boundary Condition for CFD simulation.

dimana penelitian ini hanya untuk menghitung gaya-gaya kapal selam yang bekerja pada sumbu X,Y dan Z. Sehingga posisi *outlet* tidak perlu terlalu jauh dari model kapal selam dan hal ini akan meringankan proses eksekusi numerik.

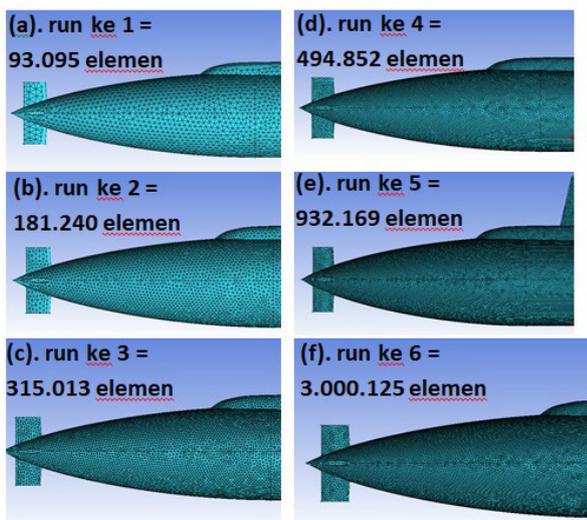
Setelah pemberian domain, tahap selanjutnya adalah proses pemberian *meshing* menggunakan *type unstructured mesh* yang semuanya berbentuk segitiga. *Type mesh* seperti ini dapat digunakan untuk bentuk yang kompleks (ITTC, 2011). Ukuran *meshing* diberikan dengan perbandingan antara model dengan domain. Lamanya durasi proses *meshing* tergantung pada ukuran *meshing* dan jumlah elemen yang dihasilkan. Semakin kecil ukuran *meshing*, maka akan semakin lama durasi proses yang diperlukan. Pada penelitian ini, ukuran *meshing* untuk part kapal selam dibuat sebesar 0,15. Untuk mengetahui hasil yang optimum, simulasi CFD dilakukan dengan menggunakan 6 variasi jumlah elemen dengan masing-masing variasi Visualisasi *meshing* dapat dilihat pada Gambar 6. (a)-(f).

Model yang telah di-*meshing* kemudian di-import untuk diatur kondisi batas (*boundary conditions*) yang sesuai untuk simulasi full viscous dengan jenis *fluida* yang digunakan adalah air pada temperature 25° dengan kekentalan  $8,93 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ . Pemodelan Pada tahap ini dilakukan pendefinisian batas (*boundary*) seperti yang telah dijelaskan pada Gambar 5. Pada batas *inlet* dimasukkan kecepatan kapal (7,196 m/s) dan pada batas *outlet* di-*setting* “*Static Pressure*” (0 Pa) (tekanan *outlet* dianggap statis). Batas *wall* di-*setting* “*Free Slip*” yang berarti dianggap tidak ada gesekan (*fluida* bebas bergerak). Pada batas *wall*, lokasi yang didefinisikan adalah *ground*, *top*, dan *wall*. Kemudian pada model kapal di-*setting* dengan “*No Slip*” yang berarti kecepatan *fluida* pada permukaan model kapal adalah nol.

Aliran *fluida* yang digunakan pada simulasi CFD ini menggunakan *Turbulent-SST* yang merupakan

pemodelan turbulensi dengan mengkombinasikan turbulen model *k-epsilon* untuk menangkap turbulen di luar area *boundary layer* dan *k-omega* untuk menangkap turbulen di dalam *boundary layer*. Pemodelan ini memiliki keakuratan yang tinggi untuk menangkap turbulen dalam *boundary layer* (Marshallsay & Eriksson, 2012).

Untuk validasi hasil simulasi CFD dilakukan dengan membandingkan data eksperimen. Hasil simulasi dikatakan memiliki kinerja sangat bagus jika nilai MAPE berada di bawah 10%, dan memiliki kinerja



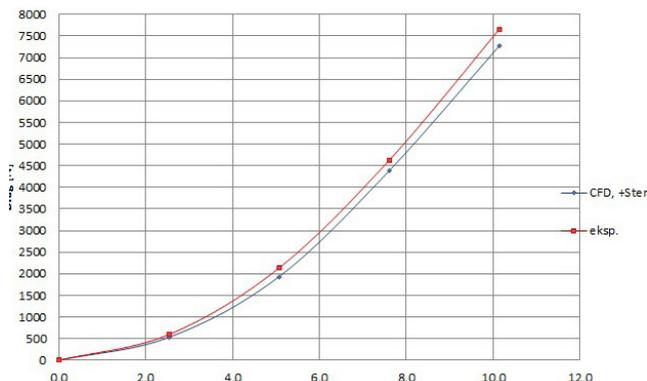
Gambar 6 (a)-(f). Hasil proses *meshing*  
Figure 6 (a) - (f). The result of the *meshing* process

bagus jika nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) berada di antara 10% dan 20% (Makridakis, 1999).

### Simulasi olah gerak kapal selam

Perbedaan utama antara studi manuver kapal selam dan manuver kapal permukaan adalah bahwa kapal selam dapat ber*maneuver* di enam derajat kebebasan, di mana terdiri dari 3 (tiga) derajat kebebasan untuk arah gerak translasi pada sumbu -x,-y, dan -z yang disebut *surge* (gerak kapal selam lurus ke depan dan belakang), *sway* (gerak pergeseran kapal selam dari kiri ke kanan) dan *heave* (gerakan kapal selam menekan ke atas dan kebawah sesuai dengan keadaan) dan 3 (tiga) derajat kebebasan untuk gerak rotasi terhadap sumbu -x, -y dan -z disebut *roll* (gerak oleng ke kanan dan ke kiri), *pitch* (gerak angguk kapal selam) ( $\alpha$ ) dan *yaw* (gerak memutar sisi bagian kapal selam agar dapat dikemudikan) ( $\beta$ ). Titik awal pada kapal selam mengacu pada titik pusat gravitasi secara longitudinal (*Longitudinal Center of Gravity*) dan titik ini *fix* tidak

seperti kapal permukaan (Fossen, 2011). Seperti yang ditunjukkan pada gambar 7, bahwa titik acuan berada pada *center line* di mana titik pusat gravitasi secara melintang diasumsikan. Nilai positif menuju ke arah



Gambar 7. Standart koordinat kapal selam (Mackay, 2003).  
Figure 7. Submarine coordinate standards (Mackay, 2003)

sepanjang sumbu aksis positif, dan rotasi positif searah dengan arah putar jarum jam.

Persamaan umum dari gerak kapal selam pada 6-DOF (*Degree of Freedom*) akan terdiri dari tiga persamaan pertama untuk gerak translasi dan tiga persamaan ke dua untuk gerak rotasi, yaitu dapat dituliskan sebagai berikut :

*Surge* (gerakan osilasi translasional arah sumbu x):  
Keterangan notasi:

$$m[\ddot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X_{hydrostatic} + X_{|u|u}|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr \dots (1.1) + X_{rr}rr + X_{prop}$$

- m : massa kapal selam
- $\ddot{u}$  : percepatan linear pada sumbu x
- $\dot{r}$  : percepatan angular pada sumbu z
- $\dot{q}$  : percepatan angular pada sumbu y
- u : kecepatan linear pada sumbu x
- v : kecepatan linear pada sumbu y
- w : kecepatan linear pada sumbu z
- p : kecepatan angular sumbu x
- q : kecepatan angular sumbu y
- r : kecepatan angular sumbu z
- $X_{-(|u|u)}$  : *drag*
- $X_{\dot{u}}$  : *added mass* untuk gerak *surge*
- $X_{wq}$  : *added mass* untuk gerak *surge*
- $X_{qq}$  : *added mass* untuk gerak *surge*
- $X_{vr}$  : *added mass* untuk gerak *surge*
- $X_{rr}$  : *added mass* untuk gerak *surge*
- $X_{prop}$  : *added mass* untuk gerak *surge*
- Sway* (gerakan osilasi translasional arah sumbu y):

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] \\ = Y_{hydrostatic} + Y_{|v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur \\ + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r \quad \dots\dots(1.2)$$

Keterangan notasi:

- $v \dot{\quad}$  : percepatan linear pada sumbu y
- $p \dot{\quad}$  : percepatan angular pada sumbu x
- $Y_{\quad}(|v|v)$  : gaya drag untuk gerak sway
- $Y_{\quad}(r|r)$  : gaya drag untuk gerak pitch
- $Y_{\quad}v \dot{\quad}$  : added mass untuk gerak sway
- $Y_{\quad}r \dot{\quad}$  : added mass untuk gerak sway
- $Y_{ur}$  : added mass untuk gerak sway
- $Y_{wp}$  : added mass untuk gerak sway
- $Y_{pq}$  : added mass untuk gerak sway
- $Y_{uv}$  : body lift force dan fin lift
- $Y_{\quad}(uu\delta_r)$  : fin lift force

Heave (gerakan osilasi translasional arah sumbu z):

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] \\ = Z_{hydrostatic} + Z_{|w|w}|w| + Z_{q|q}|q| + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} \\ + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{uu\delta_s}u^2\delta_s \quad \dots\dots\dots(1.3)$$

Keterangan notasi:

- $Z_{\quad}(|w|w)$  : gaya drag untuk gerak heave
- $Z_{\quad}(q|q)$  : gaya drag untuk gerak pitch
- $Z_{\quad}w \dot{\quad}$  : added mass untuk gerak heave
- $Z_{\quad}q \dot{\quad}$  : added mass untuk gerak heave
- $Z_{uq}$  : added mass untuk gerak heave
- $Z_{vp}$  : added mass untuk gerak heave
- $Z_{rp}$  : added mass untuk gerak heave
- $Z_{uw}$  : body lift force dan fin lift
- $Z_{uu\delta_s}$  : fin lift force

Roll (gerakan osilasi rotasional arah sumbu x):

$$I_x\dot{p} + (I_x - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \quad \dots\dots\dots(1.4) \\ = K_{hydrostatic} + K_{p|p}|p| + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{prop}$$

Keterangan notasi:

- $I_x$  : moment inersia massa pada sumbu x
- $I_y$  : moment inersia massa pada sumbu y
- $I_z$  : moment inersia massa pada sumbu z
- $K_{\quad}(p|p)$ : gaya drag untuk gerak roll
- $K_{\quad}p \dot{\quad}$  : added mass untuk inersia gerak roll

Pitch (gerakan osilasi rotasional arah sumbu y):

$$I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] \\ = M_{hydrostatic} + M_{w|w}|w| + M_{q|q}|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} \\ + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uu\delta_s}u^2\delta_s \quad \dots\dots(1.5)$$

Keterangan notasi:

- $M_{\quad}ww$  : gaya drag untuk gerak heave
- $M_{\quad}qq$  : gaya drag untuk gerak pitch
- $M_{\quad}w \dot{\quad}$  : added mass momen inersia untuk gerak pitch
- $M_{\quad}q \dot{\quad}$  : added mass momen inersia untuk gerak pitch
- $M_{uq}$  : added mass momen inersia untuk gerak pitch
- $M_{vp}$  : added mass momen inersia untuk gerak pitch
- $M_{rp}$  : added mass momen inersia untuk gerak pitch
- $M_{uw}$  : body dan lift moment
- $M_{uu\delta_s}$ : fin lift moment

Yaw (gerakan osilasi rotasional arah sumbu z):

$$I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] \\ = N_{hydrostatic} + N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur \\ + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r \quad \dots\dots\dots(1.6)$$

Keterangan notasi:

- $N_{vv}$  : gaya drag untuk gerak sway
- $N_{rr}$  : gaya drag untuk gerak yaw
- $N_{\quad}v \dot{\quad}$  : added mass momen inersia untuk gerak yaw
- $N_{\quad}r \dot{\quad}$  : added mass momen inersia untuk gerak yaw
- $N_{ur}$  : added mass momen inersia untuk gerak yaw
- $N_{wp}$  : added mass momen inersia untuk gerak yaw
- $N_{vp}$  : added mass momen inersia untuk gerak yaw
- $N_{pq}$  : added mass momen inersia untuk gerak yaw
- $N_{uv}$  : added mass momen inersia untuk gerak yaw
- $N_{uu\delta_r}$  : fin lift moment

Persamaan di atas disederhanakan dalam bentuk matriks sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & m z_G & -m y_G \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 & -m z_G & 0 & m x_G - Y_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & m - Z_{\dot{w}} & m y_G & -m x_G - Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & -m z_G & m y_G & I_x - K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ m z_G & 0 & -m x_G - M_{\dot{w}} & 0 & I_y - M_{\dot{q}} & 0 \\ -m y_G & -m z_G - N_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y \\ \sum y \\ \sum y \\ \sum x \\ \sum u \\ \sum u \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(1.7)$$

Untuk mendapatkan nilai kecepatan kapal selam, posisi kapal selam dan lintasan kapal dalam fungsi waktu, maka persamaan 1.7 dapat diselesaikan dengan menggunakan integrasi numerik. Pada penelitian ini, integrasi numerik diselesaikan dengan metode Euler dengan persamaan yang ditulis pada persamaan (1.8).

$$x = x + (\dot{x} \times \text{time step}) \quad \dots\dots\dots(1.8)$$

Jumlah step sebanyak 1000 dan time step 0,1 pada integrasi numerik dengan MATLAB untuk ketiga variasi bentuk after body kapal selam.

Untuk mendapatkan nilai tersebut di setiap *time step* dituliskan persamaan sebagai berikut :

$$\dot{x}_n = f(x_n, u_n) \dots\dots\dots (1.9)$$

Di mana  $x$  merupakan *state vector* kapal selam:

$$x = [u \ v \ w \ p \ q \ r \ x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \dots\dots (1.10)$$

Dan  $u_n$  merupakan *input vector* :

$$u_n = [\delta_s \ \delta_r \ X_{prop} \ K_{prop}] \dots\dots\dots (1.11)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

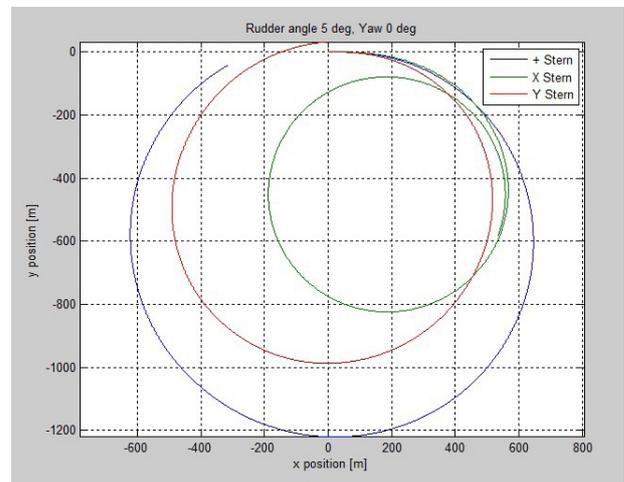
Pada penelitian ini dilakukan analisa *grid independence*, dimana jumlah elemen yang optimal ditentukan dengan cara memvariasikan jumlah elemen pada saat *meshing*, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Bila perubahan jumlah elemen sudah tidak mempengaruhi hasil atau nilai akhir iterasi, maka dipilih elemen yang paling rendah untuk dipergunakan sebagai acuan dalam proses eksekusi pemrograman (Oberkamp & Trucano, 2002). Hasil analisa *grid independence* model kapal selam juga ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Variasi jumlah elemen  
Table 3. Variation the number of elements

Run ke -	Jumlah Elemen	Drag [N]	Selisih [%]
1	93.095	9.046,66	-
2	181.240	7.095,2521,57	
3	315.013	6.691,095,70	
4	494.852	6.577,601,70	
5	932.169	6.528,560,75	
6	3.000.125	6.543,010,22	

Dari Tabel 3. menunjukkan bahwa hasil dari berbagai variasi jumlah elemen *meshing* telah memenuhi kriteria *grid independence*, hal tersebut ditunjukkan oleh nilai deviasi terkecil yang kurang dari 2% antara jumlah elemen 932.169 dengan jumlah elemen 3.000.125. Maka untuk melakukan perhitungan CFD selanjutnya digunakan jumlah elemen sebesar 932.169.

Selain dilakukan analisa *grid independence*, nilai *drag* yang didapat dari simulasi CFD juga harus divalidasi untuk memastikan bahwa metode dan hasil dari simulasi CFD sudah benar. Pada penelitian ini validasi yang digunakan yaitu dengan membandingkan hasil simulasi CFD dengan hasil eksperimen. Data



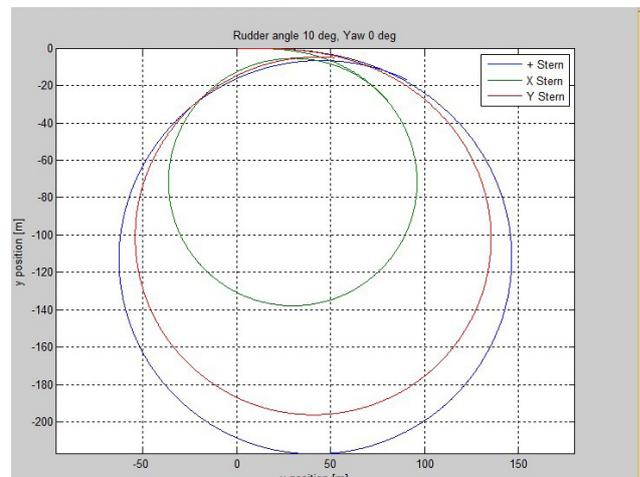
Gambar 8. Data *drag* hasil simulasi CFD untuk susunan + Stern dan eksperimen.

Figure 8. Data *drag* hasil simulasi CFD untuk susunan + Stern dan eksperimen.

eksperimen pada penelitian ini menggunakan data penelitian uji tarik *resistance* model kapal selam mini yang telah dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika Indonesia - BPPT (Erwandi *et al.*, 2012). Model eksperimen uji tarik kapal selam yang digunakan adalah dengan bentuk *after body* +Stern. Perhitungan *drag* pada simulasi CFD dilakukan dengan variasi kecepatan 2 knot, 4 knot, 6 knot dan 8 knot.

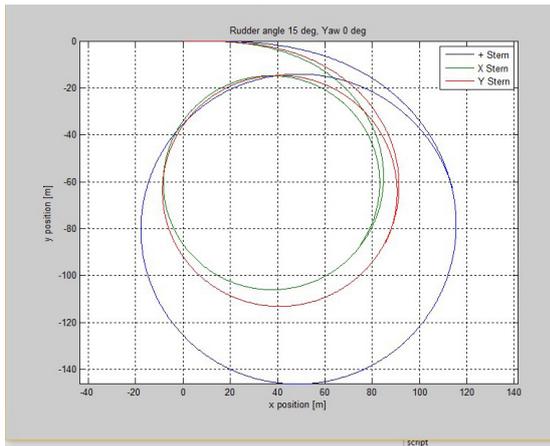
Dari gambar 8. kurva hasil simulasi CFD dengan eksperimen mempunyai kecenderungan yang sama. Untuk perhitungan *drag* pada simulasi CFD mulai dari angka *reynold* 2.00E+07 titik kurva bergeser ke bawah menunjukkan selisih nilai *drag* dengan eksperimen berada dibawah 10%. Nilai *Mean Absolute Percentage Error* adalah sebesar 2,8 %, sehingga permodelan dapat dikatakan memiliki kinerja yang sangat bagus.

Kurva lintasan gerak melingkar (*turning circle*) kapal selam dari hasil integrasi numerik dapat dilihat



Gambar 9. *Turning circle* (sudut rudder 5°)

Figure 9. *Turning circle* (rudder angel 5°)

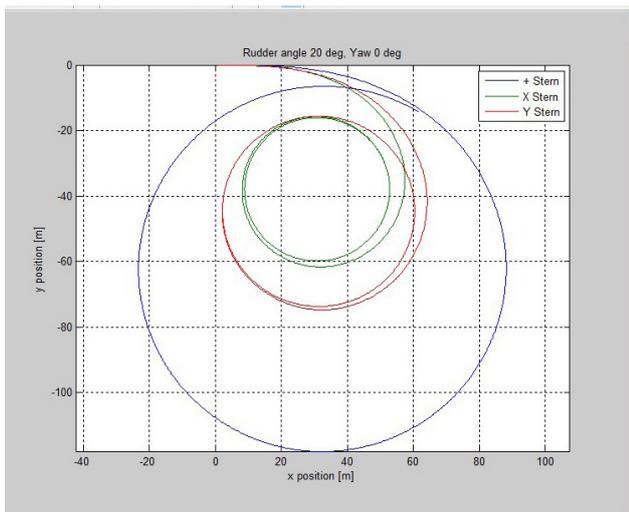


Gambar 10. *Turning circle* (sudut rudder 10°)  
 Figure 10. *Turning circle* (rudder angle 10°)

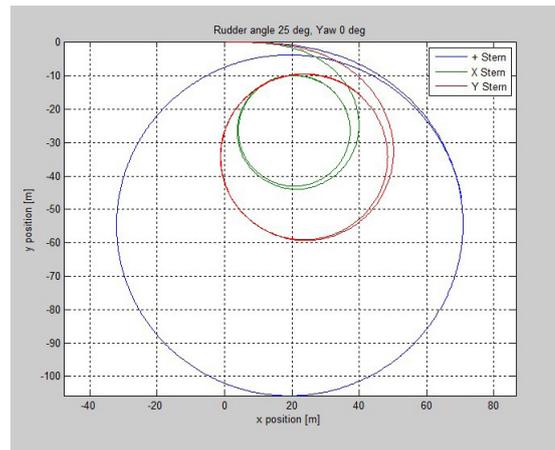
pada Gambar 9 - 15. Dari kurva *turning circle* dapat diketahui nilai *tactical diameter* yang merupakan jarak dari jalur awal ke sumbu y ketika kapal selam telah berbelok 180°.

Kriteria standart untuk nilai *tactical diameter* pada *turning circle* dikatakan memenuhi standart jika nilai *tactical diameter* dibawah 5x panjang kapal yaitu pada penelitian ini adalah sebesar 110 meter (IMO, 2002).

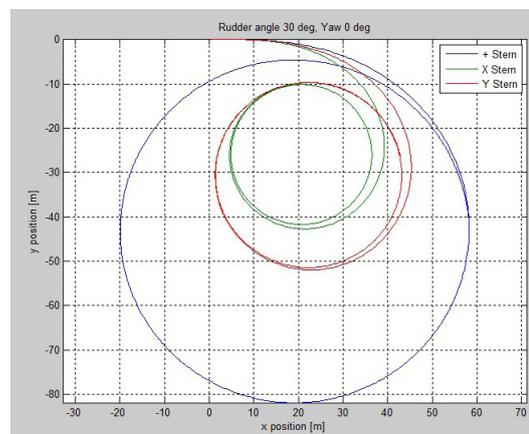
Pada Gambar 16, menunjukkan bahwa bahwa lintasan *turning circle* kapal selam pada saat *rudder* dibelokkan 35° searah jarum jam, kapal selam mini dengan *after body* susunan +*Stern* memiliki nilai *tactical diameter* sebesar 62 meter, untuk kapal selam mini dengan *after*



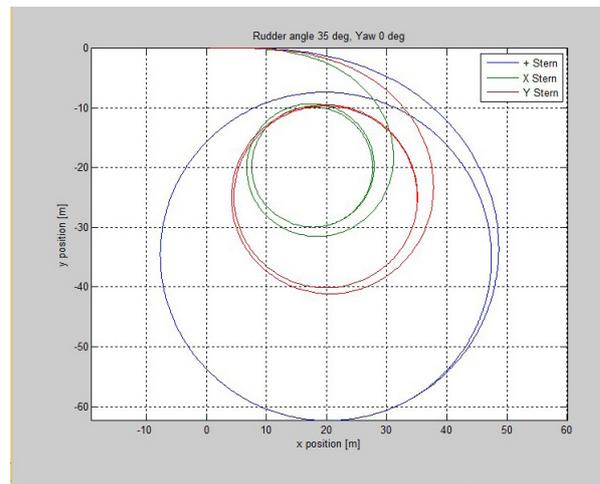
Gambar 11. *Turning circle* (sudut rudder 15°)  
 Figure 11. *Turning circle* (rudder angle 15°)



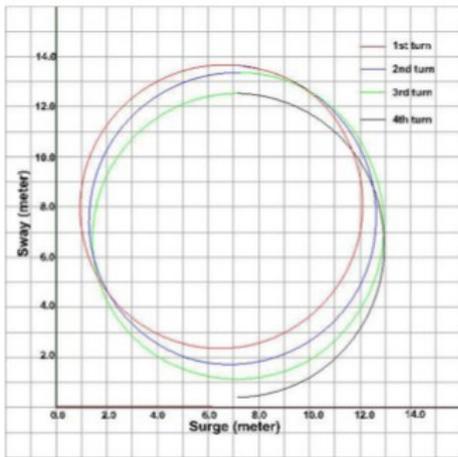
Gambar 12. *Turning circle* (sudut rudder 20°)  
 Figure 12. *Turning circle* (rudder angle 20°)



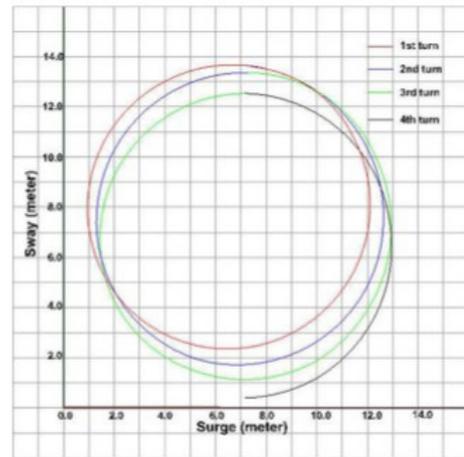
Gambar 13. *Turning circle* (sudut rudder 25°)  
 Figure 13. *Turning circle* (rudder angle 25°)



Gambar 14. *Turning circle* (sudut rudder 30°)  
 Figure 14. *Turning circle* (rudder angle 30°)



Gambar 15. Turning circle (sudut rudder 35°)  
Figure 15. Turning circle (rudder angle 35°)



Gambar 16. Turning circle hasil eksperimen dengan sudut rudder 35° dan skala 1:7 (Erwandi et al., 2012)  
Figure 16. Turning circle experimental results with rudder angle 35° and scale 1: 7 (Erwandi et al., 2012)

body susunan X-Stern memiliki nilai tactical diameter sebesar 32 meter dan untuk kapal selam mini dengan

Tabel 4. Nilai tactical diameter untuk semua variasi bentuk after body

Table 4. Tactical value of diameter for all variations of after body shape

Tactical diameter	+ Stern [m]	X-Stern [m]	Y-Stern
rudder 5°	1210	810	986
rudder 10°	217	138	196
rudder 15°	146	69	113
rudder 20°	118	62	75
rudder 25°	106	44	59
rudder 30°	82	43	52
rudder 35°	62	32	41

after body susunan Y-Stern memiliki nilai tactical diameter sebesar 41 meter. Waktu yang diperlukan untuk berputar melingkar untuk kapal selam dengan after body susunan + Stern yaitu 120 detik, untuk after body susunan X-Stern membutuhkan waktu 30 detik dan untuk after body susunan Y-Stern membutuhkan waktu 50 detik.

Untuk nilai tactical diameter pada Gambar 10 sampai dengan gambar 16 dapat dirangkum pada Tabel 4.

Untuk kapal selam bentuk after body +Stern telah dilakukan uji maneuver gerak melingkar di tangki maneuver Laboratorium Hidrodinamika Indonesia-BPPT (Erwandi et al., 2012). Kurva turning circle hasil eksperimen ditampilkan pada Gambar 16.

Dari Gambar 16, dapat diketahui untuk nilai tactical diameter hasil eksperimen sebesar 11 meter untuk

ukuran model (77 meter untuk skala 1:1). Jika dibandingkan dengan hasil integrasi numerik pada penelitian ini, nilai tactical diameter untuk rudder 35° memiliki selisih sebesar 19%.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Dapat disimpulkan nilai tactical diameter terkecil dihasilkan oleh kapal selam dengan after body susunan X-Stern, sehingga dapat dikatakan bahwa kapal selam dengan after body susunan X-Stern ini memiliki kinerja olah gerak kapal yang optimum. Hal ini diketahui dari kapal selam dengan after body X-Stern ini mampu memenuhi kriteria standart International Maritime Organization (IMO) mulai dari sudut rudder terkecil 15° sampai dengan sudut maksimum rudder 35°.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Putri Virliani mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia atas program beasiswa Pascasarjana Dalam Negeri tahun 2015-2017.

## DAFTAR PUSTAKA

- Baker C. (2004). *Estimating Drag Forces on Submarine Hull*, Defence Research and Development Canada, DRDC Atlantic CR 2004-125, Canada.
- Burcher, R., & Rydill, L. (1994), *Concepts in Submarine Design*, Cambridge University Press. ISBN 0-521-41681-7.
- Erwandi, dkk. (2012). Desain dan Uji Hidrodinamika Kapal Selam Mini Berbobot 133 Ton, *Prosiding InSINas*

2012, hal. 1-6.

- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, New York: John Wiley & Sons Ltd. ISBN 0-471-94113-1.
- Fossen, T. I. (2011). *Hand Book of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. eISBN 9781119994121.
- Gibson, R. H. (1931). *The German Submarine War 1914-1918*, Richard Smith and Company, New York.
- ITTC. (2011), The Specialist Committee on Computational Fluid Dynamics. *Proceedings of 26th ITTC, vol.II*, page 337-377.
- Joubert, P. N. (2004). *Some Aspect of Submarine Design..* Part 1. Hydrodynamics, Department of Defence science and Technology Organization, Australia.
- Mackay, M. (2003). *Wind Tunnel Experiments with a Submarine Afterbody Model*, Technical Memorandum, Defence Research and Development Canada.
- Makridakis, S., & Wheelwright, S. C. (1999). *Metode dan Aplikasi Peramalan*, Binarupa Aksara, Jakarta.
- Marshallsay, P. G., & Eriksson, A. M. (2012). *Use of Computational Fluid Dynamics as a Tool to Assess the Hydrodynamic Performance of a Submarine*, 18th Australasian Fluid Mechanics Conference, Launceston, Australia.
- Moonesun, M., & Charmdooz, P. (2012). *General Arrangement and Naval Architectural Aspects in Midget Submarines*, 4<sup>th</sup> International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications, Shah Alam, Malaysia.
- Oberkamp, W. L., & Trucano, T. G. (2002). *Verification and Validation in Computational Fluid Dynamic*, Progres in Aerospace Sciences Volume 38 Pp.209-272, Pergamon elsvier.
- Organization, I. M. (2002). *IMO Resolution MSC 137 (76)*. London: IMO Publishing.
- Pan, Y. C., Zhang, H. X., & Zhou, Q. D. (2012). Numerical Prediction of Submarine Hydrodynamic coefficient using CFD Simulation, *Journal of Hydrodynamics volume 24*, Pp 840-847, Science direct, Elsvier.
- Renilson, M. (2015). *Submarine Hydrodynamics*, Springer Briefs in Applied Sciences and Technology. ISBN 978-3-319-16183-9.
- Utina, M. R., Syaful, A., & Ali, B. (2016), Numerical and Experiment Investigation of Lift Performance Over Hydroplane of Submarine, *Journal of Subsea and Offshore Science and Engineering*, Vol.5.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Pearson Education.
- Zhang, H., Xu, Y., & Cai, H. (2010). Using CFD Software to Calculate Hydrodynamic Coefficients, *Journal of Marine Science and Application*, Vol.9. page : 149-155.