



TUGAS AKHIR - ME184834

**DESAIN SISTEM KENDALI *HEADING* DAN *DIVING* PADA KAPAL SELAM
MENGUNAKAN SISTEM KONTROL PID
(*PROPORTIONAL, INTEGRAL, AND DERIVATIVE*)**

Muchammad Rifki Abdillah
NRP 04211640000069

Dosen Pembimbing

Ir. Agoes Ahmad Masroeri, M.Eng., D.Eng
Achmad Baidowi, S.T., M.T.

**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA**

2020

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”



TUGAS AKHIR – ME184834

**DESAIN SISTEM KENDALI *HEADING* DAN *DIVING* PADA
KAPAL SELAM MENGGUNAKAN SISTEM KONTROL PID
(*PROPORTIONAL, INTEGRAL, AND DERIVATIVE*)**

Muchammad Rifki Abdillah
NRP 04211640000069

Dosen Pembimbing
Ir. Agoes Ahmad Masroeri, M.Eng., D.Eng
Achmad Baidowi, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”



BACHELOR THESIS – ME184834

**DESIGN OF SUBMARINE HEADING AND DIVING CONTROL
SYSTEM USING PID CONTROLER (PROPORTIONAL,
INTEGRAL, AND DERIVATIVE)**

Muchammad Rifki Abdillah
NRP 04211640000069

Supervisor :
Ir. Agoes Ahmad Masroeri, M.Eng., D.Eng
Achmad Baidowi, S.T., M.T.

DEPARTEMENT OF MARINE ENGINEERING
Faculty of Marine Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

**DESAIN SISTEM KENDALI *HEADING* DAN *DIVING* PADA
KAPAL SELAM MENGGUNAKAN SISTEM KONTROL PID
(*PROPORTIONAL, INTEGRAL, AND DERIVATIVE*)**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Marine Electrical and Automation System (MEAS)

Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

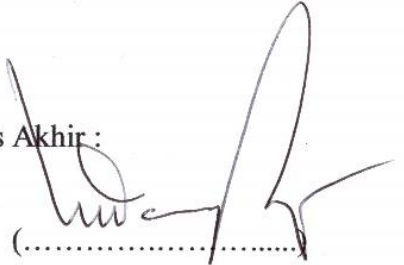
Oleh :

Muchammad Rifki Abdillah

NRP. 04211640000069

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

Ir. Agoes Achmad Masroeri, M.Eng., D.Eng
NIP. 1958 0807 1984 03 1004



(.....)

Achmad Baidowi, S.T., M.T.
NIP. -



(.....)

SURABAYA

Juli 2020

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

DESAIN SISTEM KENDALI *HEADING* DAN *DIVING* PADA KAPAL SELAM MENGGUNAKAN SISTEM KONTROL PID (*PROPORTIONAL, INTEGRAL, AND DERIVATIVE*)

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Marine Electrical and Automation System (MEAS)
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Penulis:

Muchammad Rifki Abdillah

NRP. 04211640000069

Disetujui Oleh,
Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan



Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph.D

NIP. 197903192008011008

SURABAYA

AGUSTUS, 2020

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DESAIN SISTEM KENDALI *HEADING* DAN *DIVING* PADA KAPAL SELAM MENGGUNAKAN SISTEM KONTROL PID (*PROPORTIONAL, INTEGRAL, AND DERIVATIVE*)

Nama Mahasiswa : Muchammad Rifki Abdillah
NRP : 0421164000069
Dosen Pembimbing 1 : Ir. Agoes Ahmad Masroeri, M.Eng., D.Eng.
Dosen Pembimbing 2 : Achmad Baidowi, S.T., M.T

ABSTRAK

Kapal selam merupakan sebuah wahana air yang mampu bergerak di bawah permukaan air sehingga dapat bergerak secara tiga dimensi baik pada bidang vertikal maupun horizontal. Dalam bermanuver kapal selam memiliki dua aktuator utama yang berupa *rudder* yang akan mengatur sudut *heading* kapal selam serta *hydroplane* yang akan mengatur sudut *diving* atau selam kapal. Kapal selam memiliki empat mode operasi utama yaitu *surface*, *snorkel*, *silent run*, serta mode pengejaran yang dimana membutuhkan kemampuan manuver (*maneuverability*) yang baik. Kemampuan manuver amat sangat dipengaruhi oleh metode dan konsep sistem kendali sehingga dibutuhkan desain sistem kendali manuver yang memiliki respon akurat. Pada penelitian ini akan menggunakan sistem kendali PID sebagai basisnya dimana sistem kendali PID membutuhkan model matematis yang benar-benar akurat agar didapatkan sistem kendali yang akurat pula. Simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) akan dilakukan untuk mendapatkan nilai koefisien hidrodinamis sehingga didapatkan model matematis yang benar-benar akurat. Selanjutnya akan dilakukan perancangan sistem kendali dengan konsep *closed loop – multi sensor*. Dari hasil simulasi ditunjukkan bahwa *settling time* yang dicapai pada sistem kendali *heading* dengan masukan 30° didapatkan data performansi kendali *closed loop – multi sensor* dengan *settling time* selama 177 detik, *delay time* selama 70.56 detik, serta tidak mengalami *overshoot* maupun *steady state error*. Pada sistem kendali *diving* dengan masukan 50 meter pada kecepatan 8 knot didapatkan data performansi kendali *closed loop – multi sensor* dengan *settling time* selama 225.45 detik, *delay time* selama 18.63 detik, *overshoot* sebesar 56.9 meter, serta *steady state error* sebesar 0.6%. Dari hasil simulasi pada sistem kendali *heading* dan *diving* dapat diketahui bahwa sistem kendali *closed loop – multi sensor* memiliki performa yang baik dan sesuai standard ini dibuktikan dengan nilai *settling time* yang lebih singkat dan nilai *overshoot* maupun *steady state error* yang lebih rendah. Sehingga dapat diketahui bahwa sistem kendali PID dengan konsep *closed loop – multi sensor* dapat menjadi referensi desain sistem kendali manuver kapal selam yang aktual dan responsif.

Kata Kunci : *Kapal Selam, Manuver, Heading, Diving, Kendali PID*

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DESIGN OF SUBMARINE HEADING AND DIVING CONTROL SYSTEM USING PID CONTROLLER (PROPORTIONAL, INTEGRAL, AND DERIVATIVE)

Student Name : Muchammad Rifki Abdillah
NRP : 04211640000069
Supervisor I : Ir. Agoes Ahmad Masroeri, M.Eng., D.Eng.
Supervisor II : Achmad Baidowi, S.T., M.T

ABSTRACT

The submarine is watercraft which capable move below the water surface, so it can move in three dimensions both vertically and horizontally. To maneuver submarine uses two main actuators, Rudder to control the heading angle of submarine and hydroplane to control pitch angle and depth of the submarine. surface, snorkel, silent run, and pursuit are four main operation mode of submarine that required good maneuverability. Submarine maneuverability very affected by control system. Submarine maneuverability is strongly influenced by the concepts and methods of the control system so that an accurate control system design is needed. in this research will use a based PID control system where it needs an accurate mathematical model. Computational fluid dynamic simulation will do to get an accurate hydrodynamic coefficient which affects to submarine, so from that coefficient we got accurate mathematical model. Furthermore, a control system design will be made with the concept of closed-loop - multi-sensor. From heading control system simulation with 30° heading reference the result is, the closed loop-multi sensor system reach set point at 177 seconds (settling time), delay time is 70.56 second, and overshoot or steady-state error doesn't occur. And from diving control system simulation with depth reference 50 meter, speed 8 knot and pitch angle 6° the result is, the closed loop – multi sensor system reach set point at 225.45 seconds (settling time), delay time is 18.63 second, overshoot occurs and reach 56.9 meter, and steady state error values of 0.6% from set point. From the simulation results on the heading and diving control system, it can be seen that the closed loop - multi sensor control system has good performance and is according to this standard as evidenced by the shorter settling time value and the lower overshoot and steady state error values. So it can be seen that the PID control system with the closed loop - multi sensor concept can be a reference for the actual and responsive submarine maneuver control system design.

Key Word : Submarine,Maneuver,Heading,Diving,PID Control

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya curahkan atas kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala karena atas segala limpahan rahmat, taufik dan hidayah-Nya maka penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **“Desain Sistem Kendali *Heading dan Diving* Pada Kapal Selam Menggunakan Sistem Kontrol PID (*Proportional, Integral, and Derivative*)**

Dalam proses penyusunan tugas akhir ini penulis mendapatkan banyak bantuan dan motivasi dari berbagai pihak dari awal pengerjaan hingga akhirnya terselesaikan. Maka dari itu penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada :

1. Ali Wahyudi dan Lilik Asmawati selaku orangtua penulis yang selalu memberikan bantuan baik dalam bentuk do'a, materi, maupun motivasi.
2. Bapak Ir. Agoes Achmad Masroeri, M.Eng., D.Eng dan Bapak Achmad Baidowi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis atas bimbingan ilmu dan arahnya kepada penulis
3. Bapak Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph.D selaku kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan, FTK, ITS.
4. Bapak A.A. Bagus Dinariyana Dwi P., S.T., MES., Ph.D selaku dosen wali selalu memberikan arahan dan motivasi selama penulis menempuh pendidikan dan perkuliahan.
5. Siska Dini Pratiwi dan Decha Julian Agustono selaku rekan penulis yang telah banyak banyak memberikan dukungan dan bantuan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
6. Seluruh teknisi, member dan grader Laboratorium Marine Electrical and Automation System (MEAS) yang telah memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis.
7. Kepada keluarga besar Voyage'16 yang telah menjadi keluarga yang selalu memberikan dukungan serta semangat selama menempuh perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat kepada para pembaca , bangsa dan negara.

Surabaya, Juli 2020

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	VII
LEMBAR PENGESAHAN.....	IX
ABSTRAK	XI
ABSTRACT	XIII
KATA PENGANTAR.....	XV
DAFTAR ISI.....	XVII
DAFTAR GAMBAR	XX
DAFTAR TABEL	XXIII
DAFTAR ISTILAH DAN SIMBOL.....	XXV
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian	2
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Kapal Selam (<i>Submarine</i>).....	5
2.2. Dinamika dan Stabilitas Kapal Selam	6
2.3. Model Matematis Dinamika dan Sistem Kendali Kapal Selam	8
2.3.1. Model Matematis Sistem Kendali <i>Heading</i>	8
2.3.2. Model Matriks <i>State Space</i> Sistem Kendali <i>Heading</i>	11
2.3.3. Model Matematis Sistem Kendali <i>Diving</i>	13
2.3.4. Model Matriks <i>State Space</i> Sistem Kendali <i>Diving</i>	16
2.4. Koefisien Hidrodinamis Kapal Selam	18
2.5. Sistem Kendali <i>Steering System</i> Kapal Selam.....	19
2.6. Sistem Kendali PID (<i>Proportional, Integral, and Derivative</i>).....	20
2.7. Metode Ziegler-Nichols.....	22
2.8. Performa Sistem Kendali Manuver Kapal Selam.....	23

2.9.	Standar Tes Manuver Pada Kapal Selam	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		29
3.1.	Alur Penelitian.....	29
3.2.	Studi Literatur.....	30
3.3.	Pemodelan Kapal Selam.....	30
3.4.	Penentuan Koefisien Hidrodinamis	31
3.5.	Perancangan Sistem Kendali PID <i>Heading</i> dan <i>Diving</i>	33
3.6.	Simulasi Desain Sistem Kendali <i>Heading</i> dan <i>Diving</i>	35
3.7.	Analisis Hasil Simulasi dan Performa Desain Sistem Kendali	36
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....		37
4.1.	Desain Model Kapal Selam	37
4.2.	Analisis Hasil Simulasi <i>Computational Fluid Dynamic</i> (CFD)	38
4.2.1.	Koefisien Hidrodinamis <i>Lateral</i>	40
4.2.2.	Koefisien Hidrodinamis <i>Longitudinal</i>	41
4.3.	Pemodelan Fungsi <i>State Space</i> Sistem Kendali <i>Heading</i>	41
4.4.	Pemodelan Fungsi <i>State Space</i> Sistem Kendali <i>Diving</i>	42
4.5.	Analisis Desain dan Model Aktuator Sistem Kendali	43
4.6.	Analisis Sistem Kendali <i>Heading</i>	46
4.6.1.	Analisis Sistem Kendali <i>Heading Open Loop</i>	46
4.6.2.	Analisis Sistem Kendali <i>Heading Closed Loop</i>	48
4.6.3.	Analisis Sistem Kendali <i>Heading Closed Loop-Multi Sensor</i>	50
4.6.4.	Analisis Perbandingan Sistem Kendali <i>Heading</i> pada <i>Setpoint Tetap</i>	53
4.6.5.	Analisis Perbandingan Sistem Kendali <i>Heading</i> pada <i>Setpoint Berubah (Horizontal Zig-Zag Manouver)</i>	54
4.7.	Analisis Sistem Kendali <i>Diving</i>	57
4.7.1.	Analisis Sistem Kendali <i>Diving Open Loop</i>	57
4.7.2.	Analisis Sistem Kendali <i>Diving Closed Loop</i>	59
4.7.3.	Analisis Sistem Kendali <i>Diving Closed Loop – Multi Sensor</i>	62

4.7.4. Analisis Perbandingan Sistem Kendali <i>Diving</i> pada <i>Setpoint</i> Tetap	64
4.7.5. Analisis Perbandingan Sistem Kendali <i>Diving</i> pada <i>Setpoint</i> Berubah (<i>Vertical Zig-Zag Manouver</i>)	66
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1. Kesimpulan	69
5.2. Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN A	XXVIII
LAMPIRAN B	XXX
LAMPIRAN C	XXXII
LAMPIRAN D	XXXIV
LAMPIRAN E	XLI
PROFIL PENULIS	XLVIII

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bentuk Kapal Selam Soryu Class	5
Gambar 2.2 Six Degree of Freedom (DOF) Pada Kapal Selam	6
Gambar 2.3 Kerangka Referensi ECRF dan GRF	7
Gambar 2.4 Gaya dan Koefisien Pada Sistem Kendali Heading	8
Gambar 2.5 Drift Angle Pada Saat Perubahan Heading Kapal	9
Gambar 2.6 Lokasi Poin Netral pada Badan Kapal	11
Gambar 2.7 Gaya dan Koefisien Pada Sistem Kendali Diving	13
Gambar 2.8 Lokasi Titik Kritis dan Netral	16
Gambar 2.9 Model Test Kapal Selam.....	18
Gambar 2.10 Simulasi CFD Kapal Selam pada Posisi Drift Angle	19
Gambar 2.11 Steering System pada Kapal Selam	20
Gambar 2.12 Sistem Kendali PID	21
Gambar 2.13 Grafik Step Responses Metode Pertama Zigler-Nichols	22
Gambar 2.14 Grafik Osilasi Berkelanjutan Sebelum Mencapai setpoint....	23
Gambar 2.15 Tingkat Stabilitas Gerak Manuver Kapal	24
Gambar 2.16 Kurva Respon dan Aspek Respon Transien	25
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 3.2 Rencana Garis (Lines Plan) Model Kapal Selam	31
Gambar 3.3 Model 3D Kapal Selam.....	31
Gambar 3.4 Simulasi CFD Diving 6° (Sumber : Sinaga,2016)	32
Gambar 3.5 Diagram Blok Open Loop.....	33
Gambar 3.6 Diagram Closed Loop.....	34
Gambar 3.7 Diagram Blok Closed Loop – Multi Sensor	35
Gambar 4.1 Desain Kapal Selam Tampak Samping dan Depan	37
Gambar 4.2 Desain Kapal Selam Tampak Atas, Haluan, dan Belakang	37
Gambar 4.3 Simulasi CFD pada Lambung (Hull)	38
Gambar 4.4 Simulasi CFD pada Rudder dan Stern Hydroplane	39
Gambar 4.5 Simulasi CFD pada Bow Hydroplane.....	39

Gambar 4.6 Diagram Blok Aktuator Rudder.....	44
Gambar 4.7 Diagram Blok Aktuator Hydroplane.....	44
Gambar 4.8 Grafik Respon Aktuator Rudder	45
Gambar 4.9 Grafik Respon Aktuator Hydroplane	45
Gambar 4.10 Diagram Blok Sistem Kendali Heading Open Loop	46
Gambar 4.11 Respon Sistem Kendali Heading Open Loop masukan 30° ...	46
Gambar 4.12 Grafik Respon Sistem Kendali Heading Open Loop masukan - 30°	47
Gambar 4.13 Diagram Blok Sistem Kendali Heading Closed Loop	48
Gambar 4.14 Grafik Respon Sistem Kendali Heading Closed Loop (30°)	48
Gambar 4.15 Grafik Respon Sistem Kendali Heading Closed Loop (10°)	.50
Gambar 4.16 Diagram Blok Sistem Kendali Heading Closed Loop-Multi Sensor	50
Gambar 4.17 Respon Sistem Kendali Heading Closed Loop-Multi Sensor (30°).....	51
Gambar 4.18 Grafik Sistem Kendali Heading Closed Loop-Multi Sensor (10°).....	52
Gambar 4.19 Diagram Blok Perbandingan Performa Sistem Kendali Heading	53
Gambar 4.20 Perbandingan Respon Sistem Kendali Heading	53
Gambar 4.21 Diagram Blok Pengujian Manuver Zig-Zag Horizontal	55
Gambar 4.22 Respon Sistem Kendali Dengan Setpoint Berubah (Horizontal Zig-Zag Maneuver)	55
Gambar 4.23 Diagram Blok Sistem Kendali Diving Open Loop.....	57
Gambar 4.24 Respon Sistem Kendali Diving masukan 50 meter	58
Gambar 4.25 Respon Sistem Kendali Diving masukan -50 meter	58
Gambar 4.26 Diagram Blok Sistem Kendali Diving Closed Loop	59
Gambar 4.27 Grafik Respon Sistem Kendali Diving Closed Loop (30 m)	.60
Gambar 4.28 Grafik Respon Sistem Kendali Diving Closed Loop (50 m)	.61
Gambar 4.29 Diagram Blok Sistem Kendali Diving Closed Loop – Multi Sensor	62

Gambar 4.30 Respon Sistem Kendali Diving Closed Loop – Multi Sensor (30 m)	62
Gambar 4.31 Respon Sistem Kendali Diving Closed Loop – Multi Sensor (50 m)	64
Gambar 4.32 Diagram Blok Perbandingan Performa Sistem Kendali Diving	65
Gambar 4.33 Perbandingan Respon Sistem Kendali Diving.....	65
Gambar 4.34 Diagram Blok Pengujian Manuver Zig-Zag Vertikal	67
Gambar 4.35 Diagram Blok Pengujian Manuver Zig-Zag Vertikal	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Notasi SNAME (Sumber: Fossen,2011).....	6
Tabel 2.2 Aturan Tuning Ziegler-Nhicol's Berdasar delay time dan waktu konstan	22
Tabel 2.3 Aturan Tuning Metode 2 Berdasar Pada Nilai Kritis dan Periode Kritis.....	23
Tabel 3.1 Spesifikasi Model Kapal Selam.....	30
Tabel 3.2 Variasi Simulasi CFD pada Model Kapal Selam	32
Tabel 3.3 Simulasi Sistem Kendali Heading	35
Tabel 3.4 Simulasi Sistem Kendali Diving	36
Tabel 3.5 Parameter Performa Sistem Kendali	36
Tabel 4.1 Koefisien Pada Model 3D Kapal Selam	38
Tabel 4.0.2 Fungsi Normalisasi Prime System I dan Prime System II	40
Tabel 4.3 Koefisien Hidrodinamis Lateral	40
Tabel 4.4 Koefisien Hidrodinamis Longitudinal	41
Tabel 4.5 Performa Sistem Kendali Heading Open Loop	47
Tabel 4.6 Performa Sistem Kendali Heading Open Loop (30°)	49
Tabel 4.7 Performa Sistem Kendali Heading Closed Loop (10°).....	49
Tabel 4.8 Performa Sistem Kendali Heading Closed Loop – Multi Sensor (30°).....	51
Tabel 4.9 Performa Sistem Kendali Heading Closed Loop – Multi Sensor (10°).....	52
Tabel 4.10 Performa Sistem Kendali Heading dengan Setpoint tetap	54
Tabel 4.11 Performa Sistem Kendali Heading dengan Setpoint Berubah....	56
Tabel 4.12 Performa Sistem Kendali Diving Open Loop	59
Tabel 4.13 Performa Sistem Kendali Diving Closed Loop	60
Tabel 4.14 Performa Sistem Kendali Diving Closed Loop	61
Tabel 4.15 Performa Sistem Kendali Diving Closed Loop – Multi Sensor .	63
Tabel 4.16 Performa Sistem Kendali Diving Closed Loop – Multi Sensor .	64
Tabel 4.17 Performa Sistem Kendali Diving dengan Setpoint tetap.....	66

Tabel 4.18 Performa Sistem Kendali Diving dengan Setpoint Berubah68

DAFTAR ISTILAH DAN SIMBOL

m = Massa kapal selam	$Z_{\dot{w}}$ = Turunan gaya <i>Heave</i> terhadap \dot{w}
u_o = <i>Service Speed</i> kapal selam	$Z_{\dot{q}}$ = Turunan gaya <i>Heave</i> terhadap \dot{q}
x_G = Letak titik berat pada sumbu x	$M_{\dot{w}}$ = Turunan momen <i>Pitch</i> terhadap \dot{w}
$Y_{\dot{v}}$ = Turunan gaya <i>sway</i> terhadap \dot{v}	$M_{\dot{q}}$ = Turunan momen <i>Pitch</i> terhadap \dot{q}
$Y_{\dot{r}}$ = Turunan gaya <i>sway</i> terhadap \dot{r}	I_y = Momen inersia terhadap sumbu y
$N_{\dot{v}}$ = Turunan momen <i>Yaw</i> terhadap \dot{v}	Z_w = Turunan gaya <i>Heave</i> terhadap w
$N_{\dot{r}}$ = Turunan momen <i>Yaw</i> terhadap \dot{r}	Z_q = Turunan gaya <i>Heave</i> terhadap q
Y_r = Turunan gaya <i>sway</i> terhadap r	M_w = Turunan momen <i>Pitch</i> terhadap w
Y_v = Turunan gaya <i>sway</i> terhadap v	M_q = Turunan momen <i>Pitch</i> terhadap q
N_v = Turunan momen <i>Yaw</i> terhadap v	W = Berat kapal Selam
Y_{δ} = Turunan gaya <i>sway</i> terhadap sudut <i>rudder</i>	Z_{δ} = Turunan gaya <i>Heave</i> terhadap sudut hydroplane
N_{δ} = Turunan momen <i>Yaw</i> terhadap sudut <i>rudder</i>	M_{δ} = Turunan momen <i>Heave</i> terhadap sudut hydroplane
\dot{v} = Turunan kecepatan <i>sway</i> terhadap waktu	\dot{w} = Turunan kecepatan <i>Heave</i> terhadap waktu
\dot{r} = Turunan kecepatan sudut <i>Yaw</i> terhadap waktu	\dot{q} = Turunan kecepatan sudut <i>Pitch</i> terhadap waktu
$\dot{\psi}$ = Turunan sudut <i>heading</i> terhadap waktu	$\dot{\theta}$ = Turunan sudut <i>Pitch</i> terhadap waktu
v = Kecepatan <i>sway</i>	\dot{z} = Turunan kedalaman terhadap waktu
r = Kecepatan sudut <i>Yaw</i>	q = Kecepatan sudut <i>Pitch</i>
ψ = Sudut <i>heading</i>	θ = Sudut <i>Pitch</i>
δ_R = Sudut defleksi <i>rudder</i>	z = Jarak sumbu z (Kedalaman)
δ_H = Sudut defleksi hydroplane	w = Kecepatan <i>Heave</i>
\overline{BG}_z = Jarak vertikal antara titik apung dan titik berat ($z_G - z_B$)	

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kapal selam merupakan kapal atau wahana air (*watercraft*) yang memiliki sistem penggerak mandiri yang dapat beroperasi di bawah permukaan air [1]. Karena kemampuannya untuk beroperasi serta menyelam dibawah permukaan laut, kapal selam banyak digunakan untuk berbagai tujuan khususnya pada bidang militer. Kemampuan kapal selam bergerak di bawah permukaan laut ini memberikan kelebihan taktis sehingga biasanya digunakan berbagai operasi militer seperti pengintaian maupun penyerangan [1]. Ketika beroperasi dan bergerak di permukaan maka kapal selam bergerak seperti kapal permukaan. Namun ketika beroperasi dibawah permukaan laut, berbeda dengan kapal permukaan yang hanya dapat bermanuver secara dua dimensi, kapal selam dapat bergerak dan bermanuver secara tiga dimensi.

Kapal selam sendiri memiliki empat mode operasi yaitu *surface* (permukaan), *snorkeling*, *silent run* dan pengejaran. Pada mode operasi *surface* atau permukaan kapal selam bergerak dan bermanuver seperti kapal permukaan lainnya. Pada mode operasi *snorkeling* seluruh badan kapal selam berada dibawah permukaan pada kedalaman tertentu dan menggunakan mesin diesel sebagai sistem propulsi dikarenakan udara masih bisa masuk melalui saluran *snorkel*. Sedangkan pada mode operasi *silent run* dan pengejaran kapal selam akan menggunakan propulsi elektrik, hal ini dikarenakan untuk menghindari deteksi sonar yang dilepaskan oleh kapal permukaan.

Pada saat beroperasi pada mode-mode operasi tersebut kapal selam membutuhkan kemampuan manuver yang baik sehingga kapal selam dapat beroperasi dengan baik dan akurat. Untuk melakukan manuver pada kapal selam maka sistem kendali akan mengatur sudut *rudder* dan *hydroplane*. *Rudder* akan digunakan untuk mengatur *heading* atau arah dari kapal sedangkan *hydroplane* atau disebut juga *stern plane* akan digunakan untuk mengatur *diving rate*. Pada sistem kendali kapal selam juga dapat melakukan *autopilot* sehingga sudut *heading* dan *diving* kapal selam akan dikendalikan secara otomatis. Kemampuan manuver kapal selam sendiri sangat amat dipengaruhi oleh sistem kendali serta metode kontrol yang dirancang pada kapal selam. Sehingga dibuthkan suatu sistem kontrol yang memiliki respon cepat dan tepat agar kapal selam memiliki kemampuan manuver yang benar-benar baik. Metode kontrol yang biasanya digunakan untuk melakukan kontrol *rudder* dan *hydroplane* pada kapal selam biasanya menggunakan sistem kontrol PID (*Proportional, Integral, and Derivative*). Metode kontrol ini dipilih karena kecepatan respon, keandalan, dan biaya yang murah [2].

Akan tetapi penggunaan metode kontrol PID juga memiliki beberapa kelemahan, seperti dibutuhkannya desain *plant* sistem kendali yang benar-benar akurat serta penyesuaian pengguna berupa *tuning* agar memiliki *output* dan *step responses* yang diinginkan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut maka desain sistem kendali manuver kapal selam harus memperhatikan koefisien hidrodinamis yang dapat mempengaruhi kemampuan manuver kapal selam. Koefisien hidrodinamis merupakan koefisien yang menentukan besar kecilnya gaya hidrodinamis yang diterima oleh kapal. Gaya hidrodinamis sendiri merupakan gaya yang diakibatkan tekanan aliran fluida pada badan kapal selam akibat gerakan dan kecepatan kapal selam [1]. Sehingga dalam desain sistem kontrol manuver dan gerakan kapal selam baik *heading* maupun *diving* harus memperhitungkan koefisien hidrodinamis yang berlaku agar benar-benar akurat agar kapal selam memiliki kemampuan manuver yang baik

. Hal inilah yang melatar belakangi pembuatan desain sistem kontrol manuver kapal selam baik *heading* maupun *diving* yang menggunakan metode kontrol PID serta memperhatikan koefisien-koefisien hidrodinamis yang berlaku dalam proses desain dan perancangannya sehingga didapatkan suatu sistem kendali yang akurat dan optimal. Perancangan desain sistem kendali *heading* dan *diving* ini diharapkan dapat meningkatkan kemampuan manuver serta keakuratan kontrol pada kapal selam.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam perancangan desain sistem kendali *heading* dan *diving* kapal selam ini antara lain:

1. Bagaimana desain dan cara kerja sistem kendali *heading* kapal selam yang berbasis sistem kendali PID?
2. Bagaimana desain dan cara kerja sistem kendali *diving* kapal selam yang berbasis sistem kendali PID?

1.3. Tujuan Penelitian

Berikut adalah tujuan penelitian pada desain sistem kendali *heading* dan *diving* kapal selam sebagai berikut:

1. Mendapatkan desain dan cara kerja sistem kendali *heading* kapal selam yang berbasis sistem kendali PID.
2. Mendapatkan desain dan cara kerja sistem kendali *diving* kapal selam yang berbasis sistem kendali PID.

1.4. Batasan Masalah

Berikut adalah batasan masalah pada penelitian ini:

1. Pada perancangan sistem kendali ini hanya akan berfokus pada maneuvering kapal pada dua sumbu derajat kebebasan yaitu *Yaw* dan *Pitch*.
2. Model kapal selam yang digunakan merupakan kapal selam dengan panjang 65 meter dimana dengan konfigurasi *rudder* dan *hydroplane cruciform (+)*
3. Jenis *rudder* dan *hydroplane* yang digunakan adalah *symmetrical with flap*.
4. Metode kontrol yang digunakan pada perancangan sistem kendali ini adalah menggunakan metode PID (*Proportional, Integral, dan Derivative*).

1.5. Manfaat Penelitian

Bagi Industri Perkapalan

1. Mendapatkan desain sistem kendali *heading* dan *diving* pada kapal selam yang akurat dan memiliki respon sesuai dengan standard.
2. Mendapatkan data simulasi koefisien hidrodinamis serta gaya hidrodinamis pada bagian *hull, rudder, dan hydroplane* kapal selam.

Bagi Akademisi

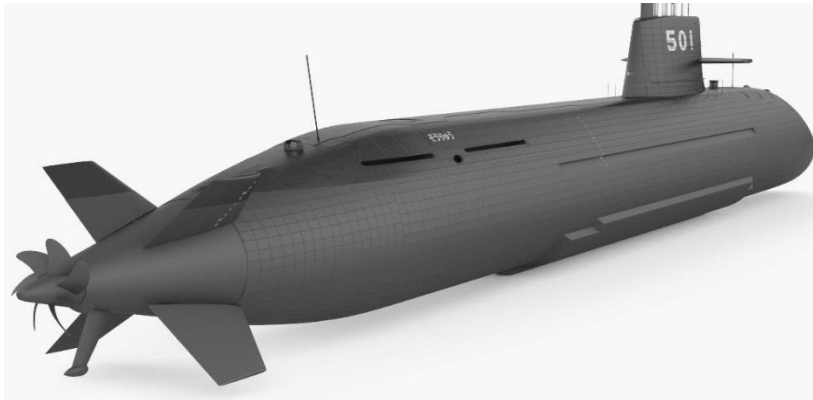
1. Mendapatkan desain sistem kendali yang akurat bagi kapal selam serta memperhitungkan gaya hidrodinamis.
2. Mengetahui desain dan data koefisien hidrodinamis berdasarkan hasil simulasi *hull, rudder, dan hydroplane* kapal selam.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kapal Selam (*Submarine*)

Kapal selam atau *submarine* merupakan sebuah kapal atau wahana air yang beroperasi dibawah permukaan air yang dilengkapi dengan propulsi mandiri [1]. Kapal selam (*Submarine*) berbeda dengan wahana bawah air (*Underwater Vehicle*) meskipun keduanya dapat beroperasi dibawah permukaan air. Pada wahana bawah air biasanya berukuran lebih kecil serta lebih ditujukan untuk kebutuhan riset dan penelitian,serta kepentingan komersial. Sedangkan kapal selam lebih banyak digunakan untuk berbagai operasi militer tertentu seperti pengintaian maupun penyerangan, Hal ini dikarenakan kapal selam memiliki kemampuan untuk melakukan penyerangan dan pengintaian tanpa terdeteksi oleh kapal permukaan.

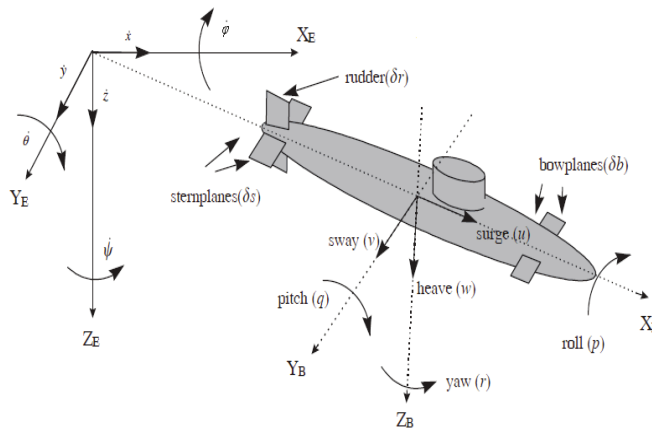


Gambar 2.1 Bentuk Kapal Selam *Soryu Class*
(Sumber : Hum3D,2018)

Kapal selam biasanya berbentuk silindris dengan yang pada bagian tengah atau *midship* terletak sebuah struktur vertikal yang berisi peralatan navigasi seperti pasif sonar radar, Sensor *Acoustic Device Countermeasures* (ACDs), perisokop, dan berbagai peralatan navigasi lainnya. Pada bagian struktur vertikal juga dilengkapi dengan *hydroplane* atau bisa disebut juga *stern plane* yang berfungsi untuk mengatur kedalaman serta sudut selam (*diving rate*) pada kapal selam. Pada bagian belakang terdapat propeller sebagai penggerak serta *control surface* berupa *rudder* untuk mengatur sudut *heading* serta *hydroplane* untuk mengatur sudut *diving* atau selam. Pada bagian dalam kapal selam dapat dibagi menjadi beberapa ruang utama yaitu ruang mesin (*Engine Room*), ruang AIP (*Air Independent Propulsion*), ruang kontrol (*Control Room*), dan ruang awak kapal (*Living Quarter*) [3].

2.2. Dinamika dan Stabilitas Kapal Selam

Berbeda dengan kapal permukaan yang hanya dapat bergerak dua dimensi pada kapal selam dapat bergerak secara tiga dimensi. Pada kapal selam terdapat dua *control surface* yaitu *rudder* yang berfungsi untuk mengatur gerakan horizontal atau sudut *heading* dari kapal selam dan *hydroplane* yang berfungsi untuk mengatur gerakan vertikal sudut *diving* atau selam dari kapal selam [4].



Gambar 2.2 Six Degree of Freedom (DOF) Pada Kapal Selam
(Sumber: Minghui Wang dkk,2013)

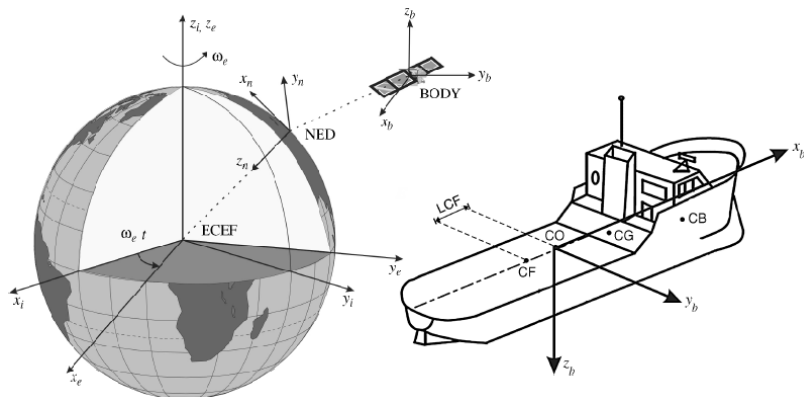
Sama dengan kapal permukaan kapal selam juga memiliki enam derajat kebebasan atau biasa disebut *six Degree Of Freedom* (DOF) ini terdiri dari *Surge*, *Sway*, *Roll*, *Pitch*, *Heave*, dan *Yaw*. Pada tabel 2.1 merupakan tabel notasi enam derajat kebebasan berdasarkan SNAME (*Society of Naval Architect and Marine Engineers*). Ilustrasi enam derajat kebebasan ini dapat dilihat pada Gambar 2.2.

Tabel 2.1 Notasi SNAME
(Sumber: Fossen,2011)

No	DOF (Degree of Freedom) / Derajat Kebebasan	Momen dan Gaya	Kecepatan Linear dan Sudut	Posisi dan Sudut Euler
1	Gerakan dalam arah x (<i>Surge</i>)	X	u	x
2	Gerakan dalam arah y (<i>Sway</i>)	Y	v	y
3	Gerakan dalam arah z (<i>Heave</i>)	Z	w	z
4	Rotasi terhadap sumbu x (<i>Roll</i>)	K	p	ϕ
5	Rotasi terhadap sumbu y (<i>Pitch</i>)	M	q	θ
6	Rotasi terhadap sumbu z (<i>Yaw</i>)	N	R	ψ

Pada kapal permukaan sendiri biasanya hanya akan mengontrol dua hingga tiga derajat kebebasan yaitu *Surge*, *Sway*, dan *Yaw*. Sistem kontrol yang berfokus pada tiga derajat kebebasan tersebut biasa disebut *Horizontal Plane Model* [1]. Sedangkan pada kapal selam juga akan mengontrol tiga derajat kebebasan yaitu *Surge* atau gerakan maju pada sumbu X, *Yaw* yaitu gerakan memutar pada sumbu horizontal, serta *Pitch* yaitu gerakan memutar pada sumbu vertikal. Sistem kontrol yang berfokus pada tiga derajat kebebasan ini biasa disebut dengan *Longitudinal Models* [1].

Pada tabel 2.1 juga menjadi aturan lambang dalam melakukan analisis dan perhitungan terhadap gerakan dan gaya yang mempengaruhi pada kapal selam maupun kapal. Selain lambang tersebut *reference frame* atau kerangka referensi juga harus diperhatikan dalam melakukan analisis gerakan pada wahana air. *Reference frame* biasanya terbagi menjadi dua yaitu *Earth Centered Reference Frame* (ECRF) dan *Geographic Reference Frame* (GRF). Pada ECRF sistem kordinat menggunakan titik pusat bumi (*Earth-Fixed*) sebagai titik referensi. Sedangkan pada GRF merupakan sistem kordinat yang menggunakan posisi atau lokasi dan badan (*Body-Fixed*) dari wahana air sebagai titik pusat. Pada ECRF kordinat X_0, Y_0, Z_0 terletak pada pusat bumi sedangkan pada GRF titik kordinat terletak di badan kapal dan disimbolkan sebagai x_b, y_b, z_b . Manuver sebuah kapal dapat didefinisikan sebagai gerakan dari sistem kerangka badan relatif (*Body-Fixed*) terhadap siste kerangka bumi atau inersia (*Earth-Fixed*). Sehingga posisi serta orientasi wahana air dideskripsikan relative terhadap kerangka inersia atau *Earth Fixed* sedangkan gerakan dan kecepatan linear akan dideskripsikan relatif terhadap kerangka badan atau *Body-Fixed*. Ilustrasi *reference frame* atau kerangka referensi dapat dilihat pada gambar 2.3.

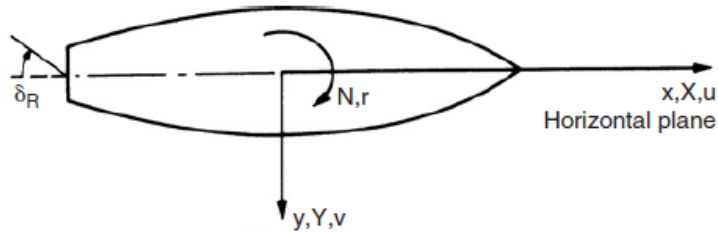


Gambar 2.3 Kerangka Referenensi ECRF dan GRF
(Sumber: Fossen,2011)

2.3. Model Matematis Dinamika dan Sistem Kendali Kapal Selam

2.3.1. Model Matematis Sistem Kendali *Heading*

Pada kapal selam sistem kendali dapat dibagi menjadi dua sistem yaitu sistem kendali *heading* yang berfungsi untuk mengatur sudut *heading* (*heading rate*) dan sistem kendali yang berfungsi untuk mengatur sudut *diving* atau selam (*diving rate*). Sistem kendali *heading* akan dipengaruhi oleh koefisien hidrodinamis pada saat kondisi kapal *Yaw*. Sistem kendali *heading* atau sudut *heading* hanya akan memperhatikan gerakan linear pada sumbu x dan y serta gerakan rotasi pada sumbu z. Gaya-gaya serta koefisien yang berlaku pada sistem kendali *heading* dapat dilihat pada gambar 2.4.



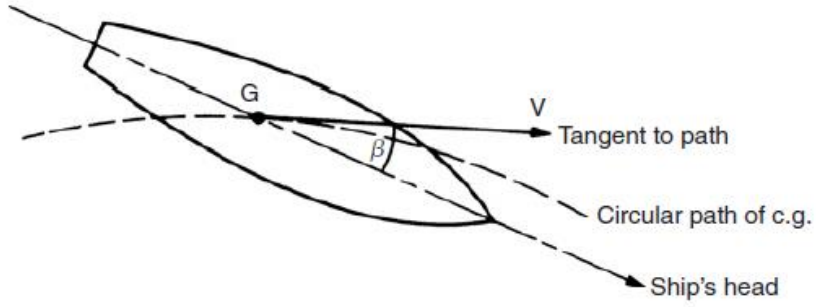
Gambar 2.4 Gaya dan Koefisien Pada Sistem Kendali *Heading*
(Sumber : Anthony F Molland, 2008)

Pada sistem kendali *heading* serta stabilitas kapal selam akan dipengaruhi beberapa koefisien yaitu gaya hidrodinamis dari samping (Y_v), momen gaya *Yaw* (N_v), dan kecepatan (v). Sehingga sistem kendali *heading* dapat dirumuskan menjadi persamaan berikut [4]:

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} = Y_v v + (Y_r - m)r + Y_{\delta_R} \delta_R \quad (2.1)$$

$$(I - N_{\dot{r}})\dot{r} = N_v v + N_r r + N_{\delta_R} \delta_R \quad (2.2)$$

Pada persamaan 2.1 merupakan persamaan gaya hidrodinamis pada sumbu horizontal (*sway*) sedangkan persamaan 2.2 merupakan persamaan momen gaya yang dihasilkan akibat gaya hidrodinamis pada sumbu z (*Yaw*). Secara berturut-turut v , r , m dan δ_R merupakan kecepatan radial kapal selam (*sway*), kecepatan sudut *heading* (*Yaw*), massa dari kapal, dan sudut *rudder*. Sedangkan Y dan N merupakan gaya hidrodinamis pada sumbu y (*sway*) dan momen gaya pada sumbu z (*Yaw*).



Gambar 2.5 Drift Angle Pada Saat Perubahan *Heading* Kapal
(Sumber : Anthony F Molland,2008)

Pada persamaan diatas menggambarkan gerakan kapal pada sumbu transversal dan gerakan sudut vertikal diabaikan karena diasumsikan kapal dalam kondisi kecepatan konstan. Persamaan 2.1 dan 2.2 dapat diubah menjadi persamaan non dimensional berikut:

$$(m' - Y'_v)\dot{v}' = Y'_v v' + (Y'_r - m')r' + Y'_{\delta_R} \delta'_R \quad (2.3)$$

$$(I' - N'_r)\dot{r}' = N'_v v' + N'_r r' + N'_{\delta_R} \delta'_R \quad (2.4)$$

Berdasarkan gambar 2.5 kecepatan radial non dimensional atau v' dapat dijabarkan menjadi persamaan $v' = \frac{\dot{y}}{V} = -\sin \beta$ dan kecepatan sudut *Yaw* non dimensional dapat dijabarkan menjadi persamaan $r' = \dot{\psi} \frac{L}{V} = \frac{L}{R}$ dimana R merupakan sudut kurvatur pada titik jalur tangen pada gambar 2.6 maka nilai Y'_{δ_R} dapat ditentukan. apabila koefisien Y'_v, N'_v dan lainnya merupakan turunan dari stabilitas dan stabilitas dari sebuah kapal dipengaruhi oleh gerakan atau *motion* dan dianggap tidak terdapat koreksi dari *rudder* dan apabila nilai Y'_{δ_R} disubstitusikan pada persamaan maka persamaan stabilitas dan kontrol menjadi sebagai berikut:

$$Y'_{\delta_R} = \frac{1}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^2} \frac{\partial Y}{\partial \delta_R} \quad (2.5)$$

$$(m' - Y'_v)\dot{v}' = Y'_v v' + (Y'_r - m')r' \quad (2.6)$$

$$(I' - N'_r)\dot{r}' = N'_v v' + N'_r r' \quad (2.7)$$

Sehingga apabila nilai dari Y'_{δ_R} disubstitusikan pada persamaan 2.6 dan 2.7 maka persamaan stabilitas dan kontrol akan menjadi persamaan berikut:

$$(m' - Y'_v) \left[\frac{(I' - N'_r)\ddot{r}' - N'_r \dot{r}'}{N'_v} \right] = Y'_v \left[\frac{(I' - N'_r)\dot{r}' - N'_r r'}{N'_v} \right] + (Y'_r - m')r' \quad (2.8)$$

$$(m' - Y'_v)(I' - N'_r)\ddot{r}' - [(m' - Y'_v)N'_r + (I' - N'_r)Y'_v]\dot{r}' + [N'_r Y'_v - (Y'_r - m')N'_v] - r' = 0 \quad (2.9)$$

Persamaan 2.8 dan 2.9 merupakan persamaan yang memiliki bentuk sama dengan persamaan 2.10 sehingga solusi untuk persamaan tersebut adalah persamaan 2.11:

$$\left[a \frac{d}{dt^2} + b \frac{d}{dt} + c \right] r = 0 \quad (2.10)$$

$$r' = r_1 e^{m_1 t} + r_2 e^{m_2 t} \quad (2.11)$$

Dimana persamaan 2.11 nilai m_1 dan m_2 merupakan nilai akar persamaan kuadrat sehingga dapat untuk mendapatkan nilai m_1 dan m_2 dapat menggunakan persamaan kuadrat $m = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$. Pada kapal atau kapal selam yang stabil maka seluruh gerakan osilasi akibat gelombang harus bernilai nol, sehingga nilai dari m_1 dan m_2 harus bernilai negatif. Dan nilai a dan b selalu bernilai positif pada sebuah kapal atau wahana air. Sehingga solusi kompleks persamaan untuk persamaan diferensial tidak dapat ditemukan. Maka nilai c harus lebih dari nol atau $c > 0$ untuk memenuhi kriteria stabilitas. Sehingga persamaan stabilitas adalah sebagai berikut:

$$N'_r Y'_v - N'_v (Y'_r - m') > 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{N'_r}{Y'_r - m'} > \frac{N'_v}{Y'_v} \quad (2.13)$$

Pada kondisi diatas mengalami penurunan stabilitas apabila *center pressure* pada kondisi *Yaw* harus lebih tinggi dibandingkan *center of pressure* pada kondisi *sway*. Kembali pada persamaan awal, untuk kondisi *steady turn* atau putaran *steady* maka nilai diferensial kecepatan *sway* kapal atau kecepatan radial kapal (\dot{v}) dan diferensial kecepatan sudut *Yaw* (\dot{r}) dianggap 0 maka akan menghasilkan persamaan berikut:

$$0 = Y'_v v' + (Y'_r - m') r' + Y'_{\delta_R} \delta'_R \quad (2.14)$$

$$0 = N'_v v' + N'_r r' + N'_{\delta_R} \delta'_R \quad (2.15)$$

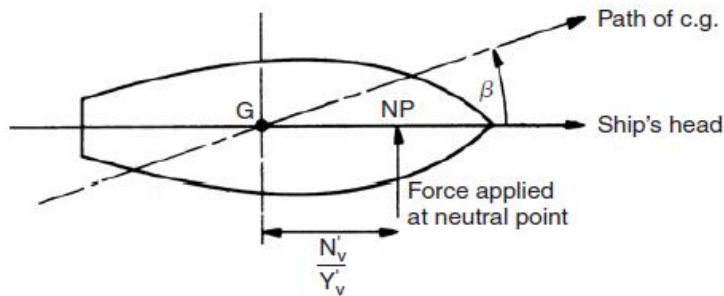
Maka dengan persamaan diatas didapatkan bahwa hubungan antara turunan kecepatan sudut *heading* (*Yaw*) atau \dot{r} dengan sudut defleksi *rudder* atau \dot{v} adalah sebagai berikut:

$$(N'_r r' + N'_{\delta_R} \delta'_R) Y'_v = (Y'_r - m) N'_v r' + Y'_{\delta_R} \delta'_R N'_v \quad (2.16)$$

$$[N'_r Y'_v - N'_v (Y'_r - m')] r' = [Y'_{\delta_R} N'_v - Y'_v N'_{\delta_R}] \delta'_R \quad (2.17)$$

$$\frac{r'}{\delta'_R} = \frac{Y'_{\delta_R} N'_v - Y'_v N'_{\delta_R}}{N'_r Y'_v - N'_v (Y'_r - m')} \quad (2.18)$$

Sehingga didapatkan persamaan kontrol dan stabilitas didapatkan sesuai dengan persamaan 2.18 dan penyebut pada persamaan tersebut yaitu sudut dari *rudder* menjadi syarat atau kriteria kestabilan. Maka jika merujuk pada gambar 2.5 maka untuk mencapai kestabilan nilai dari r'/δ_R haruslah bernilai negatif. Maka berdasarkan gambar 2.5 dan bentuk geometris dari kapal maka nilai Y'_{δ_R} atau diferensial gaya *sway* terhadap *rudder* bernilai positif serta N'_{δ_R} atau diferensial gaya turunan momen *Yaw* terhadap sudut *rudder* bernilai negatif. Nilai dari Y'_v atau diferensial gaya *sway* terhadap kecepatan juga harus bernilai negatif. Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai penyebut pada persamaan 2.18 haruslah bernilai positif.



Gambar 2.6 Lokasi Poin Netral pada Badan Kapal
(Sumber : Anthony F Molland,2008)

Selain itu salah satu hal terpenting pada sistem kontrol *heading* kapal atau wahana air sendiri adalah titik netral. Titik netral merupakan titik yang terletak dibagian tengah kapal dan berdekatan dengan titik *centre of gravity*. Titik netral apabila diberikan sebuah gaya maka tidak akan menimbulkan efek transien sehingga tidak menyebabkan perubahan sudut *heading* kapal sehingga *heading* kapal menjadi konstan. Titik netral biasanya terletak di depan titik *centre of gravity* dan dilambangkan sebagai ηL . Nilai titik netral adalah $1/3$ dari panjang titik gravitasi atau $1/6$ dari keseluruhan panjang kapal.

2.3.2. Model Matriks State Space Sistem Kendali Heading

Sistem kendali manuver *heading* pada kapal selam dapat dirumuskan dalam bentuk model matematis yang berbentuk matriks yang terdiri dari persamaan dinamika gerak kapal selam yang terdiri dari tiga derajat kebebasan (*surge, sway, dan Yaw*) serta persamaan kontrol permukaan sehingga dapat dibentuk dalam persamaan *state space*. Matriks Persamaan sistem kendali manuver kapal selam dapat dirumuskan dalam persamaan berikut [1] :

$$M\dot{v} + N(u_o)v = \tau \quad (2.19)$$

Dimana $M\dot{v}$ merupakan matriks inersia, $N(u_o)v$ merupakan matriks redaman serta τ merupakan matriks input kontrol. Persamaan tersebut

merupakan persamaan umum yang didalamnya berisi koefisien hidrodinamis kapal selam dan kontrol permukaan. Matriks inersia,redaman,serta input kontrol dapat dirumuskan sebagai berikut [1]:

$$M\dot{v} = \begin{pmatrix} m' - Y'_{\dot{v}} & m' x'_{g'} - Y'_{\dot{r}} & 0 \\ m' x'_{g'} - N'_{\dot{v}} & I'_z - N'_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

$$N(u_o)v = \begin{pmatrix} -Y'_v & m' u'_o - Y'_r & 0 \\ -N'_v & m' x'_{g'} - u'_o & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ v \\ \psi \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

$$\tau = \begin{pmatrix} -Y'_\delta \\ -N'_\delta \\ 0 \end{pmatrix} \delta_R \quad (2.22)$$

Untuk mendapatkan persamaan dalam bentuk *state space* pada persamaan sistem kendali *heading* dapat disusun ulang dalam persamaan 2.23 dan 2.24 dengan nilai \dot{x} dan y pada matriks 2.25 :

$$\dot{x} = Ax + Bu = Ax + B\delta_R \quad (2.23)$$

$$y = Cx + Du = C^T x + 0 \quad (2.24)$$

$$x = \begin{pmatrix} v \\ v \\ \psi \end{pmatrix}; y = \psi \quad (2.25)$$

Sehingga persamaan sistem kendali *heading* dapat disusun ulang sehingga sesuai dengan persamaan 2.24 dan 2.25 dengan melakukan operasi invers matriks sebagai berikut:

$$M\dot{v} + N(u_o)v = \tau \quad (2.26)$$

$$M\dot{v} + N(u_o)v = B \delta \quad (2.27)$$

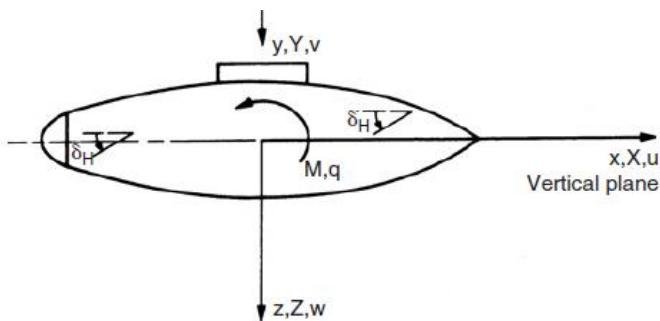
$$\dot{v} = M^{-1} - N(u_o)v + M^{-1} B \delta \quad (2.28)$$

Maka Matriks sistem kendali *heading* dalam bentuk *state space* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m' - Y'_{\dot{v}} & m' x'_{g'} - Y'_{\dot{r}} & 0 \\ m' x'_{g'} - N'_{\dot{v}} & I'_z - N'_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} - \begin{pmatrix} -Y'_v & m' u'_o - Y'_r & 0 \\ -N'_v & m' x'_{g'} - u'_o & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ v \\ \psi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m' - Y'_{\dot{v}} & m' x'_{g'} - Y'_{\dot{r}} & 0 \\ m' x'_{g'} - N'_{\dot{v}} & I'_z - N'_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -Y'_\delta \\ -N'_\delta \\ 0 \end{pmatrix} \delta_R \quad (2.29)$$

2.3.3. Model Matematis Sistem Kendali *Diving*

Selain sistem kendali *heading* kapal selam juga dilengkapi dengan sistem kendali *diving* atau sudut selam. Sistem kendali *diving* berfungsi manuver kapal selam untuk menyelam maupun menuju permukaan. Sistem kendali *diving* berfungsi untuk mengatur sudut selam atau *diving* pada kapal selam. Sistem kendali *diving* akan menggerakkan *hydroplane* atau *sternplane* sebagai aktuatornya. Sistem kendali *heading* akan dipengaruhi oleh koefisien hidrodinamis pada saat kondisi kapal *Pitch*. Sistem kendali *diving* atau sudut *diving* hanya akan memperhatikan gerakan linear pada sumbu z dan x serta gerakan rotasi pada sumbu y . Gaya-gaya serta koefisien yang berlaku pada sistem kendali *heading* dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Gaya dan Koefisien Pada Sistem Kendali *Diving*
(Sumber : Anthony F Molland, 2008)

Untuk mendapatkan persamaan matematis sistem kendali *diving* sebenarnya sama dengan sistem kendali *heading* akan tetapi memiliki sedikit perbedaan. Beberapa perbedaan tersebut adalah:

1. Kapal selam memiliki kestabilan yang lebih baik, Pada bagian depan maupun belakang kapal selam memiliki kestabilan yang lebih baik. Hal ini dikarenakan titik *Bouyancy* diatas titik *Centre of Gravity* sehingga kapal selam hanya mengalami gangguan pada saat kondisi trim.
2. Terdapat batasan atau limitasi untuk melakukan manuver pada kedalaman tertentu.
3. Kapal selam tidak stabil ketika mengalami gaya translasi pada sumbu z hal ini dikarenakan lambung kapal selam lebih bersifat *compressible* dibandingkan air.
4. Tidak mungkin untuk mempertahankan kesetimbangan antara gaya berat dengan gaya *buoyancy* hal ini dikarenakan bahan bakar serta kebutuhan kru selalu berkurang akibat dikonsumsi.

Maka berdasarkan perbedaan diatas maka dapat disimpulkan bahwa secara umum *hydroplane* berfungsi untuk mengarahkan kebawah maupun

keatas gaya pada kapal selam. Selain itu *hydroplane* juga harus mampu mengarahkan momen. Untuk mengarahkan gaya hidrodinamis maupun momen maka terdapat dua set *hydroplane* yang terletak di belakang dan depan kapal selam. Hal ini dilakukan agar menghasilkan gaya angkat yang maksimum.

Pada sistem kendali *heading* serta stabilitas kapal selam akan dipengaruhi beberapa koefisien yaitu gaya hidrodinamis *Heave* (Z_w),momen gaya *Pitch* (M_w),dan kecepatan *Heave* kapal (w).Dan δ_H merupakan sudut dari *hydroplane* dan sudut tersebut merupakan kombinasi efek dari *hydroplane* bagian belakang dan depan. Dan pada kondisi belokan *steady state* seluruh kecepatan dianggap konstan dan gaya yang berlaku pada arah sumbu z dianggap nol.Sehingga sistem kendali *diving* dapat di rumuskan menjadi persamaan berikut [4]:

$$wZ_w + qZ_q + mqu + \delta_H Z_{\delta_H} = 0 \quad (2.30)$$

$$wM_w + qM_q + \delta_H M_{\delta_H} - mgBG\theta = 0 \quad (2.31)$$

Pada persamaan diatas simbol w merupakan kecepatan *Heave* kapal atau kecepatan naiknya kapal selam, q merupakan kecepatan sudut *Pitch*, dan δ_H merupakan sudut dari *hydroplane*. Serta dibandingkan dengan persamaan arah stabilitas maka mqu merupakan nilai dari persamaan gaya sentrifugal dan $mgBG\theta$ merupakan persamaan stabilitas statis. Persamaan untuk momen gaya M_w, M_q dan M_{δ_H} sebanding dengan V^2 sedangkan nilai $mgBG\theta$ konstan pada seluruh kondisi kecepatan. Oleh karena itu nilai $mgBG\theta$ pada kondisi kecepatan tinggi sangatlah kecil sehingga dapat diabaikan. Maka pada kapal selam yang memiliki kecepatan lebih dari 10 knot dapat mengabaikan nilai koefisien stabilitas statis ($mgBG\theta$). Dengan mengeliminasi w pada kedua persamaan maka persamaan tersebut dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$\frac{q}{\delta_H} = \frac{(M_w Z_{\delta_H} - M_{\delta_H} Z_w)}{M_q Z_w - M_w (Z_q + mu)} \quad (2.32)$$

Seperti halnya permasalahan kapal permukaan kondisi yang diperlukan untuk stabilitas maka penyebut pada persamaan 2.22 harus bernilai positif. Maka dapat dirumuskan seperti persamaan 2.23 Persamaan 2.23 umumnya dikenal sebagai kriteria stabilitas pada kecepatan tinggi.

$$M_q Z_w - M_w (Z_q + mu) = 0 \quad (2.33)$$

Apabila kondisi tersebut memenuhi dan secara statis kapal selam dalam kondisi stabil,maka kapal selam akan stabil pada berbagai kondisi kecepatan.Namun apabila secara statis kapal selam dalam kondisi stabil akan tetapi kondisi diatas tidak terpenuhi maka kapal selam akan mengalami penyimpangan atau tidak stabil yang menyebabkan gerakan osilasi ketika

bergerak pada kecepatan diatas titik kritis. Apabila $q = d\theta/dt = \dot{\theta}$, maka turunan persamaan momen terhadap waktu adalah sebagai berikut:

$$\dot{w}M_w + \dot{q}M_q + \dot{\delta}_H M_{\delta H} - mgBGq = 0 \quad (2.34)$$

Pada kondisi *steady state* maka dapat dirumuskan bahwa $\dot{w} = q = \dot{\delta}_H = 0$ oleh karena itu nilai $q = 0$ apabila BG (Letak titik *Bouyancy* terhadap titik *Centre of Gravity*) bernilai positif. Dengan mensubstitusikan nilai $q = 0$ maka persamaan kendali *diving* menjadi berikut:

$$wZ_w + \delta_H Z_{\delta H} = 0 \quad (2.35)$$

$$wM_w + \delta_H M_{\delta H} - mgBG\theta = 0 \quad (2.36)$$

$$w = -\delta_H \frac{Z_{\delta H}}{Z_w} \quad (2.37)$$

$$\theta = \delta_H \left(M_{\delta H} - \frac{Z_{\delta H}}{Z_w} M_w \right) / mgBG \quad (2.38)$$

Apabila tingkat perubahan (*rate of change*) kedalaman memiliki nilai $= V(\theta - \frac{w}{V})$ dan apabila nilai w adalah kecil maka memiliki nilai $= V\theta - w$ maka dapat dirumuskan perbandingan nilai *depth rate* atau tingkat kedalaman sebagai berikut

$$\frac{\text{depth rate}}{\delta_H} = \left(uM_{\delta H} - uM_w \frac{Z_{\delta H}}{Z_w} + mgBG \frac{Z_{\delta H}}{Z_w} \right) / mgBG \quad (2.39)$$

Maka tingkat kedalaman akan bernilai 0 apabila sesuai dengan persamaan berikut

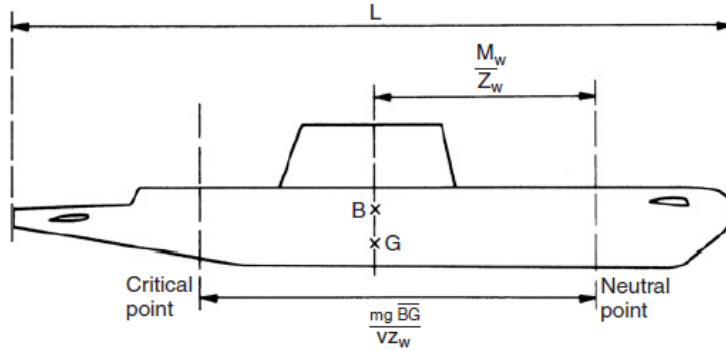
$$u = -(mgBG \frac{Z_{\delta H}}{Z_w}) / (M_{\delta H} - M_w \frac{Z_{\delta H}}{Z_w})$$

$$u = mgBG / (M_w - M_{\delta H} \frac{Z_w}{Z_{\delta H}}) \quad (2.40)$$

Nilai θ akan bernilai nol apabila *hydroplane* harus memiliki sesuai persamaan 2.31:

$$\frac{M_{\delta H}}{Z_{\delta H}} = \frac{M_w}{Z_w} \quad (2.41)$$

Namun apabila nilai θ bukan lah maka persamaan tingkat kedalaman atau *depth rate* akan berubah menjadi $\delta_H Z_{\delta H} / Z_w$. Dan rasio nilai M_w / Z_w mendefinisikan posisi titik netral. Titik netral pada kontrol kedalaman ini sama dengan titik netral pada kontrol *heading* yang terletak didepan titik pusat gravitasi (*centre of gravity*). Apabila gaya bekerja pada titik netral akan menyebabkan perubahan kedalaman namun tidak mengalami perubahan sudut *Pitch*. Titik netral serta titik kritikal pada kapal selam dapat diilustrasikan oleh gambar 2.8.



Gambar 2.8 Lokasi Titik Kritis dan Netral
(Sumber : Anthony F Molland,2008)

2.3.4. Model Matriks *State Space* Sistem Kendali *Diving*

Sama dengan sistem kendali *heading* kapal selam, sistem kendali manuver kedalaman atau *diving* pada kapal selam dapat dirumuskan dalam bentuk model matematis yang berbentuk matriks yang terdiri dari persamaan dinamika gerak kapal selam serta persamaan kontrol permukaan sehingga dapat dibentuk dalam persamaan *state space*. Apabila pada persamaan sistem kendali *heading* terdiri dari tiga derajat kebebasan (*surge*, *sway*, dan *yaw*) sedangkan pada sistem kendali *diving* juga terdiri dari tiga derajat kebebasan (*surge*, *Heave*, dan *Pitch*) dimana *surge* dapat dieliminasi. Sehingga matriks persamaan sistem kendali kedalaman atau *diving* dapat dirumuskan pada persamaan berikut:

$$M\dot{w} + N(u_o)w + G\eta = \tau \quad (2.46)$$

$$M\dot{w} + N(u_o)w = \tau \quad (2.47)$$

Dimana $M\dot{w}$ merupakan matriks inersia, $N(u_o)w$ merupakan matriks redaman, $G\eta$ merupakan matriks faktor sudut *Pitch*, serta τ merupakan matriks input kontrol. Karena matriks $G\eta$ merupakan faktor sudut *Pitch* sehingga dapat dimasukkan pada matriks $N(u_o)w$ sehingga didapatkan persamaan 2.47. Persamaan tersebut merupakan persamaan umum yang didalamnya berisi koefisien hidrodinamis kapal selam dan kontrol permukaan. Matriks inersia, redaman, serta input kontrol dapat dirumuskan sebagai berikut [1]:

$$M\dot{w} = \begin{pmatrix} m' - Z'_w & -m'x'_g - Z'_q & 0 & 0 \\ -m'x'_g - Z'_q & I'_y - M'_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix} \quad (2.48)$$

$$N(u_o)w = \begin{pmatrix} -Z'_w & -(m' - X'_u)u'_o - Z'_q & 0 & 0 \\ (Z'_w - X'_u)u'_o - M'_w & m'x'_g u'_o - M'_q & W\overline{BG}_z \sin \theta & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & u'_o & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ q \\ \theta \\ Z \end{pmatrix} \quad (2.49)$$

$$\tau = \begin{pmatrix} -Z_\delta \\ -M_\delta \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \delta_H \quad (2.50)$$

Sama seperti sistem kendali *heading* untuk mendapatkan persamaan dalam bentuk *state space* pada persamaan sistem kendali *diving* atau kedalaman dapat disusun ulang dalam persamaan 2.23 dan 2.24 dengan nilai \dot{x} dan y pada matriks 2.51 :

$$x = \begin{pmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{pmatrix}; y = z \quad (2.51)$$

Sehingga persamaan sistem kendali *diving* dapat disusun ulang sehingga sesuai dengan persamaan 2.24 dan 2.25 dengan melakukan operasi invers matriks sebagai berikut:

$$M\dot{w} + N(u_o)w = \tau \quad (2.52)$$

$$M\dot{w} + N(u_o)w = B \delta \quad (2.53)$$

$$\dot{w} = M^{-1} - N(u_o)w + M^{-1} B \delta \quad (2.54)$$

Maka Matriks sistem kendali *diving* dalam bentuk *state space* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m' - Z'_w & -m'x'_g - Z'_q & 0 & 0 \\ -m'x'_g - Z'_q & I'_y - M'_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} - \begin{pmatrix} -Z'_w & -(m' - X'_u)u'_o - Z'_q & 0 & 0 \\ (Z'_w - X'_u)u'_o - M'_w & m'x'_g u'_o - M'_q & \overline{BG}_z \sin \theta & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & u'_o & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ q \\ \theta \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m' - Z'_w & -m'x'_g - Z'_q & 0 & 0 \\ -m'x'_g - Z'_q & I'_y - M'_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -Z_\delta \\ -M_\delta \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \delta_H \quad (2.55)$$

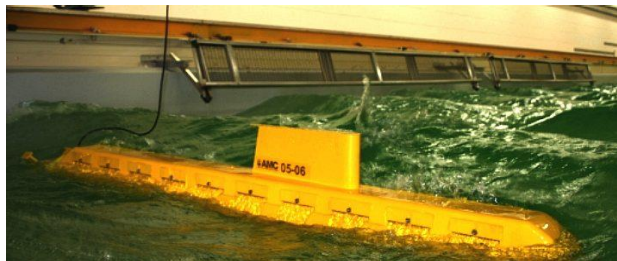
2.4. Koefisien Hidrodinamis Kapal Selam

Untuk mendesain suatu sistem kendali atau kontrol manuver pada wahana laut baik kapal permukaan maupun kapal selam maka harus memperhitungkan *hydrodynamic force* atau gaya hidrodinamis yang bekerja atau mengenai kapal ataupun kapal selam. Gaya hidrodinamis merupakan gaya yang ditimbulkan akibat tekanan hidrodinamis pada badan kapal akibat Bergeraknya kapal pada kecepatan tertentu [1]. Apabila sistem kendali manuver suatu kapal atau kapal selam tidak memperhitungkan gaya hidrodinamis akan menyebabkan tidak akuratnya sistem kendali tersebut serta rendahnya performa sistem kendali.

Gaya hidrodinamis sangat dipengaruhi oleh desain bentuk dari benda yang terkena gaya hidrodinamis maka setiap benda memiliki koefisien hidrodinamis yang berbeda sesuai desain bentuknya. Sehingga untuk membuat sistem kendali bagi wahana laut baik permukaan maupun kapal selam diperlukan menghitung beberapa koefisien hidrodinamis yaitu [5]:

1. Lambung atau badan kapal (*hull*).
2. Badan kapal yang ikut tercelup (*appendage*).
3. Kontrol Permukaan seperti *rudder* dan *hydroplane*.

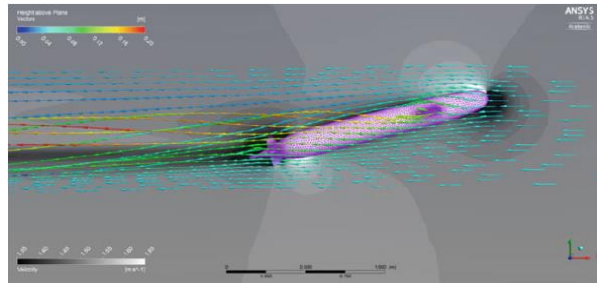
Untuk mendapatkan nilai koefisien hidrodinamis masing-masing bagian tersebut salah satu metode terbaik yang dapat dilakukan dengan pembuatan model dan dilakukan *towing test*. Metode *model test* ini merupakan metode yang paling akurat untuk mendapatkan koefisien hidrodinamis pada kapal selam. Hal ini dikarenakan *model test* menggunakan model yang telah disesuaikan dengan bentuk aslinya serta dilakukan pengujian diberbagai mode kecepatan serta berbagai kondisi [5]. Namun metode ini merupakan metode yang membutuhkan biaya yang cukup besar serta membutuhkan waktu yang lama untuk melakukan *model test*.



Gambar 2.9 Model Test Kapal Selam
(Sumber: Australian Maritime College, 2018)

Selain metode *model test* metode simulasi menggunakan *software* CFD (*Computational Fluid Dynamic*) dapat digunakan untuk mendapatkan nilai koefisien-koefisien hidrodinamis pada kapal selam. Metode simulasi CFD merupakan simulasi yang digunakan untuk mengetahui aliran fluida

yang mengalir atau mengenai sebuah benda sehingga didapatkan nilai-nilai seperti gaya hidrodinamis, bentuk aliran dan lainnya. Metode CFD ini dapat digunakan untuk mendapatkan koefisien hidrodinamika pada bagian-bagian kapal atau kapal selam secara akurat. Hal ini dikarenakan pada metode simulasi CFD ini simulasi aliran fluida disesuaikan dengan kondisi nyata dan model yang digunakan dibuat dengan bentuk dan ukuran yang sama dengan aslinya sehingga menghasilkan koefisien hidrodinamis yang akurat.



Gambar 2.10 Simulasi CFD Kapal Selam pada Posisi Drift Angle
(Sumber: Martin Renilson, 2018)

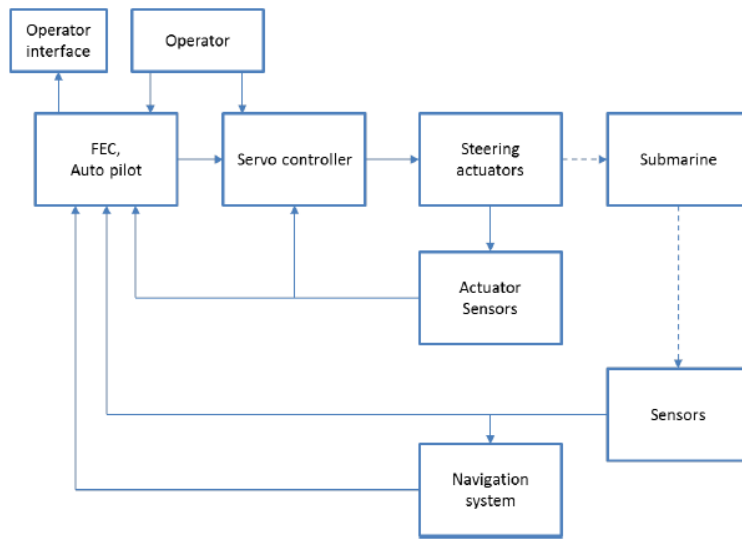
Pada metode simulasi CFD pada tahap awal akan dilakukan pembuatan model kapal selam dengan ukuran yang sama dengan ukuran asli kapal selam. Seluruh bagian baik *hull*, *appendage*, dan *control surface* akan dibuat sesuai dengan bentuk dan ukuran aslinya sehingga didapatkan nilai koefisien hidrodinamis yang akurat. Selanjutnya akan dilakukan simulasi aliran pada bagian *hull*, *appendage*, dan *control surface* dengan berbagai variasi kecepatan, sudut masuk, serta kondisi aliran. Maka dari hasil simulasi didapatkan koefisien-koefisien hidrodinamis kapal selam yang akurat. Gambar 2.10 merupakan contoh simulasi pada seluruh bagian kapal selam pada kondisi *heading*

2.5. Sistem Kendali *Steering System* Kapal Selam

Pada sistem kendali manuver atau *steering system* kapal selam dapat dibagi menjadi dua sub sistem utama yaitu sistem kendali *heading* yang akan mengatur *heading* atau arah dari kapal selam dan sistem kendali *diving* atau kedalaman yang akan mengatur kedalaman dari kapal selam. Sistem kendali manuver atau *steering system* kapal selam memiliki beberapa aktuator yaitu [5]:

1. *Propeller* berfungsi untuk memberikan gaya dorong atau *thrust* serta mengatur kecepatan kapal selam.
2. *Ballast Tank*, *Compensation Tank*, dan *Trim Tank* berfungsi untuk mengatur stabilitas serta kedalaman pada kapal selam.
3. *Rudder* berfungsi untuk mengatur sudut *heading* pada kapal selam.
4. *Stern and Bow Hydroplane* yang berfungsi untuk mengatur sudut selam dan kedalaman pada kapal selam.

Pada gambar 2.11 merupakan ilustrasi sederhana sistem kendali *steering system* pada sebuah kapal selam. Titik-titik pada skema *steering system* tersebut menunjukkan *feedback* yang diberikan kepada *plant control*. Pada skema tersebut dapat lihat operator dapat memilih antara autopilot atau manual untuk melakukan manuver pada kapal selam. Pada kontrol manual biasanya operator akan menggunakan *joystick* sebagai input untuk kontrol servo (*servo controller*). Untuk menyetir atau mengubah manuver dari kapal selam biasanya dibutuhkan nilai dari berbagai sensor yang ada pada kapal selam yang ditampilkan pada sebuah layar atau *operator interface*.



Gambar 2.11 *Steering System* pada Kapal Selam
(Sumber: Erik Lind,2014)

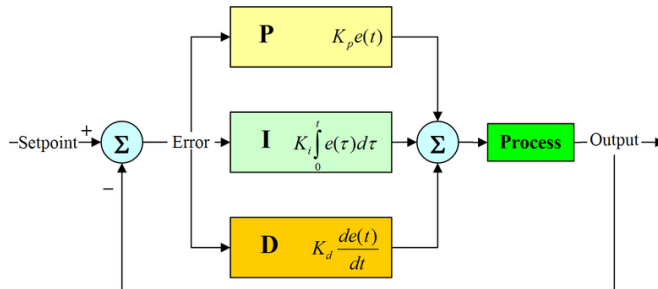
Sistem navigasi pada sistem kendali manuver dan *steering system* pada kapal selam merupakan sistem navigasi modern dengan yang akan memberikan data posisi berupa posisi *heading* maupun kordinat lokasi maupun berbagai data sehingga dapat memberikan input pada autopilot. Selain sistem navigasi sensor maupun aktuator akan memberi input pada FEC (*Front End Computer*) Autopilot sehingga kapal selam dapat melakukan manuver maupun perjalanan sesuai dengan data yang telah diinput.

2.6. Sistem Kendali PID (*Proportional,Integral,and Derivative*)

Sistem kendali PID (*Proportional,Integral,and Derivative*) adalah sistem kendali yang banyak digunakan diberbagai bidang baik industri hingga maritim, hal ini dikarenakan sistem kendali PID memiliki respon yang cepat serta memiliki biaya yang murah. Dan sistem kendali PID merupakan sistem kendali *feedback controller* yang paling umum digunakan. Sistem kendali PID dapat dituliskan dalam persamaan fungsi waktu sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.77)$$

Sistem kendali PID terdiri dari tiga kontroler yaitu proporsional (K_p), integral (K_i) dan derivatife (K_d). Berikut penjelasan ketiga kontrol tersebut[6]:



Gambar 2.12 Sistem Kendali PID
(Sumber: Silverstar,2006)

1. Kontrol Proporsional

Kontrol Proporsional berfungsi untuk koreksi nilai kesalahan saat ini dan memiliki output atau luaran sebanding/proporsional dengan besarnya sinyal kesalahan. Kontrol proporsional ini hanya berlaku sebagai *gain* atau penguat saja tanpa memberikan efek dinamik kepada kinerja kontroler. Akan tetapi jenis kontrol ini mampu memperbaiki respon transien khususnya *rise time* dan *settling time*. Dan kontrol proporsional ini bertanggung jawab atas nilai kesalahan (*error*) saat ini.

2. Kontrol Integral

Kontrol Integral berfungsi untuk menghasilkan respon sistem yang memiliki nilai *error steady state* nol. Kontrol integral ini dapat memperbaiki sekaligus menghilangkan respon *steady-state*. Luaran atau output dari kontrol ini adalah hasil penjumlahan terus menerus dari perubahan masukannya dan apabila sinyal *error* tidak mengalami perubahan maka *output* akan dijaga seperti sebelum terjadinya perubahan pada *input*. Dan kontrol integral ini bertanggung jawab atas nilai kesalahan (*error*) sebelumnya.

3. Kontrol Derivatif

Kontrol derivatif bersifat mendahului dan sama halnya dengan operasi derivative. Karena bersifat mendahului kontrol jenis ini dapat menghasilkan koreksi yang signifikan sebelum timbulnya kesalahan atau *error* menjadi sangat besar, sehingga kontrol derivatife memiliki fungsi untuk mengantisipasi timbulnya *error* dan memberikan aksi yang bersifat korektif agar mencapai kestabilan. Dan kontrol derivatif ini bertanggung jawab atas kemungkinan nilai kesalahan (*error*) mendatang.

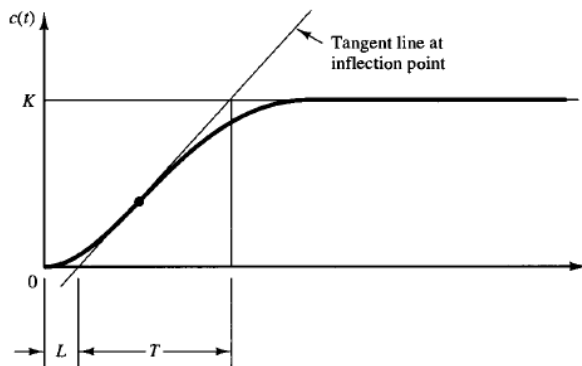
2.7. Metode Ziegler-Nichols

Untuk mendapatkan sistem kendali yang sesuai dengan kebutuhan maka diperlukan proses *tuning* yaitu suatu proses menentukan parameter atau nilai kontroler agar memiliki output yang sesuai dengan yang dibutuhkan. Proses *tuning* suatu sistem kontrol dapat mengoptimalkan sistem proses dan meminimalisir kesalahan atau *error* antara *setpoint* dengan variabel proses. Salah satu metode *tuning* sistem kendali adalah metode Ziegler-Nichols.

Metode Ziegler-Nichols merupakan metode sistem kendali PID dengan pendekatan eksperimental. Metode ini dimaksudkan untuk mencapai *step responses* tanpa terjadi osilasi dan gangguan pada suatu sistem kendali baik siklus tertutup (*closed loop*) maupun siklus terbuka (*open loop*). Metode pertama yang merupakan *tuning* pada siklus terbuka (*open loop*) yang berdasar pada tingkat reaksi (R) serta *transport delay* (T_d) [2], selain itu juga bisa menggunakan waktu delay atau *delay time* (L) dan waktu konstan (T) [7]. *Delay time* dan waktu konstan dapat digambarkan dengan garis tangen (*tangent line*) yang ditarik pada grafik *step responses*. Aturan *tuning* sistem kendali PID metode pertama dapat dilihat pada tabel 2.2 dan gambar 2.15 berikut:

Tabel 2.0.2 Aturan *Tuning* Ziegler-Nichols Berdasar *delay time* dan waktu konstan
(Sumber: Katsuhiko Ogata, 2011)

Jenis Kontrol	K_p	T_i (K_p/K_i)	T_d (K_d/K_p)
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

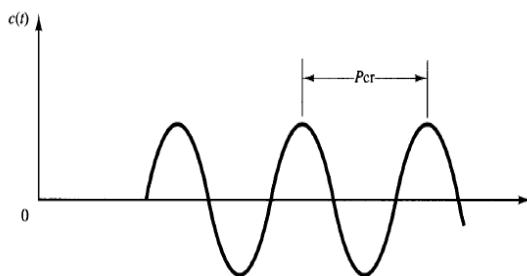


Gambar 2.13 Grafik *Step Responses* Metode Pertama Ziegler-Nichols
(Sumber : Katsuhiko Ogata, 2011)

Metode kedua ini terdiri *tuning* pada konsep siklus tertutup (*closed loop*) yang berdasar *ultimate gain* (K_U) dan *ultimate period* (T_u) untuk memperbaiki *step response* sistem kendali [2]. Atau dapat juga menggunakan *critical gain* atau nilai kritis (K_{cr}) dan periode kritis (P_{cr}) [7]. Pada metode kedua ini *tuning* berfungsi agar menghilangkan osilasi yang berkelanjutan pada grafik *step responses* sehingga mempercepat tercapainya set poin. disini nilai kritis merupakan amplitudo dari gelombang dan periode kritis merupakan waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu gelombang osilasi. Aturan *tuning* sistem kendali PID metode kedua dapat dilihat pada tabel 2.3 dan diilustrasikan pada gambar 2.14.

Tabel 2.3 Aturan *Tuning* Metode 2 Berdasar Pada Nilai Kritis dan Periode Kritis.
(Sumber : Katsuhiko Ogata,2011)

Jenis Kontrol	Kp	Ti (Kp/Ki)	Td (Kd/Kp)
P	$0.5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

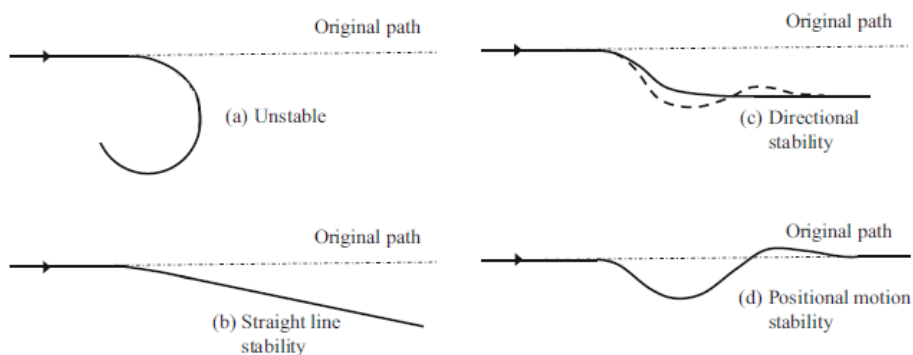


Gambar 2.14 Grafik Osilasi Berkelanjutan Sebelum Mencapai *setpoint*.
(Sumber : Katsuhiko Ogata,2011)

2.8. Performa Sistem Kendali Manuver Kapal Selam

Konsep dasar dari sistem kendali manuver pada kapal selam memiliki banyak kesamaan dengan sistem kendali manuver kapal permukaan. Perbedaan utama sistem kendali kapal selam dengan kapal permukaan adalah kapal selam dapat bermanuver pada ke enam derajat kebebasan yaitu *surge, sway, roll, Pitch, Heave, dan Yaw*. Terdapat empat tingkat atau level stabilitas gerak pada saat kapal selam bermanuver, tingkat stabilitas gerak ini sangat dipengaruhi performa atau kemampuan sistem kendali manuver kapal selam. Berikut adalah empat tingkat atau level stabilitas gerak pada saat kapal selam bermanuver serta ilustrasinya pada gambar 2.15:

1. Tidak Stabil (*Unstable*) yaitu apabila kapal tidak dapat mempertahankan arah maupun *heading* yang diinginkan.
2. Stabilitas Garis Lurus (*Straight Line Stability*) yaitu apabila kapal tetap bergerak lurus namun mengalami perubahan *heading* apabila mengalami gangguan.
3. Stabilitas Direksional (*Directional Stability*) yaitu apabila kapal tetap bergerak lurus dan mempertahankan *heading* awal atau arah haluan namun pada jalur yang berbeda dari jalur awal.
4. Stabilitas Gerak Posisional (*Positional Motion Stability*) yaitu apabila kapal dapat mempertahankan baik *heading* atau arah haluan serta jalurnya meskipun mengalami gangguan.



Gambar 2.15 Tingkat Stabilitas Gerak Manuver Kapal
(Sumber : Martin Renilson,2018)

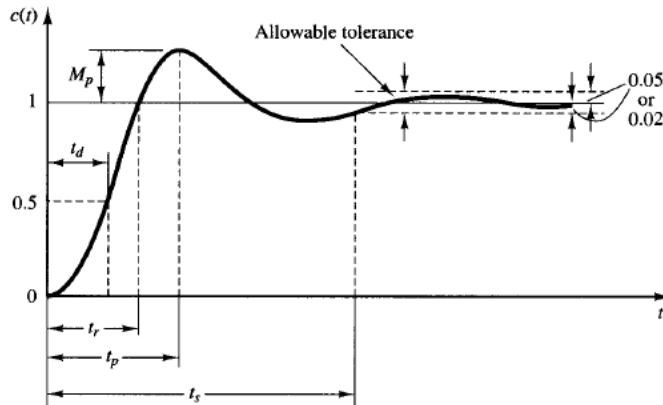
Selain stabilitas gerak manuver suatu sistem kendali performa suatu sistem kendali juga dapat dilihat dari respon transien dari suatu *plant* sistem kendali yang dikontrol pada *setpoint* tertentu. Respon transien dapat menunjukkan osilasi sebelum mencapai *setpoint*. Aspek aspek pada respon transien tersebut dapat diilustrasikan dengan gambar 2.16. Respon transien pada suatu sistem kendali terdiri dari beberapa aspek yaitu:

1. *Delay Time* (t_d) merupakan waktu yang dibutuhkan untuk respon mencapai separuh dari nilai akhir atau *setpoint* pada saat pertama kalinya.
2. *Rise Time* (t_r) merupakan waktu yang dibutuhkan untuk respon untuk meningkat dari 10% hingga mencapai 90%,5% hingga 95%,atau dari 0% hingga 100% dari nilai akhir atau *setpoint*.
3. *Peak Time* (t_p) merupakan waktu yang dibutuhkan untuk respon mencapai titik puncak pertama.
4. *Maximum Percent Overshoot* (M_p) merupakan nilai puncak maksimum dari kurva respon yang diukur pada nilai akhir atau *setpoint*. Nilai ini dapat menunjukkan tingkat kestabilan dari sistem.

Apabila nilai *final steady-state* berbeda dengan nilai akhir atau *setpoint* maka dapat dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (2.51)$$

5. *Settling Time* (t_s) merupakan waktu yang dibutuhkan kurva respon untuk mencapai serta tetap pada nilai akhir atau *setpoint* dengan nilai toleransi tertentu yang berkisar 2 – 5%.



Gambar 2.16 Kurva Respon dan Aspek Respon Transien
(Sumber : Katsuhiko Ogata,2010)

2.9. Standar Tes Manuver Pada Kapal Selam

Kapal selam merupakan kapal khusus yang membutuhkan kemampuan manuver atau olah gerak yang baik hal ini dikarenakan kapal selam biasanya digunakan pada operasi militer. Berbeda dengan kapal permukaan kapal selam mampu bermanuver baik secara horizontal maupun vertikal. Sehingga untuk mengetahui kemampuan manuver dari kapal selam maka perlu dilakukan pengujian pada kedua kemampuan manuver baik vertikal maupun horizontal. Pada manuver *horizontal* dapat dilakukan pengujian dengan *Zig-Zag* Manuver dengan pengambilan sudut yang telah dipilih sebelumnya. Berikut merupakan prosedur pengujian *heading* berupa *Zig-Zag* manuver [12]:

1. Kondisi awal harus pada kecepatan yang konstan dan sudut *rudder* 0° ,
2. Belokkan *rudder* sebesar 30° selanjutnya tunggu hingga kapal selam mencapai sudut *heading* 30° .
3. Selanjutnya belokkan *rudder* sebesar -30° tunggu hingga kapal selam mencapai sudut *heading* -30° atau kondisi awal *heading* kapal selam.
4. Ulangi mulai langkah nomor 2.

Dari hasil pengujian manuver *Zig-Zag* dapat diketahui performa manuver kapal selam pada bidang horizontal atau *heading* manuver. Beberapa performa penilaian kemampuan manuver *heading* kapal selam yang baik adalah sebagai berikut [12]:

1. Nilai *overshoot* yang rendah
2. Respon waktu yang singkat untuk mencapai sudut *heading* diinginkan.
3. Periode waktu perubahan sudut *rudder* positif menuju negatif yang singkat.
4. Kemampuan mempertahankan posisi *heading* yang telah dicapai.

Selain pengujian manuver *heading* maka perlu dilakukan pengujian manuver kedalaman atau manuver pada bidang vertikal. Pengujian manuver kedalaman dapat dilakukan dengan *diving test* atau *depth change test* dan *vertical zig-zag test*. Berikut merupakan prosedur pengujian *diving* atau *depth change test* [13]:

1. Pengujian dilakukan pada kondisi *periscope depth* atau seluruh badan kapal selam telah berada dibawah permukaan air. Kapal selam telah pada kondisi *pitch* atau *angle of attack* yang telah ditentukan.
2. Selanjutnya dipilih kedalaman yang akan digunakan sebagai kedalaman referensi atau *setpoint* biasanya berkisar 10 – 50 meter. Kedalaman 50 meter dipilih karena merupakan kedalaman yang dapat dilakukan mode operasi *silent run*.
3. Selanjutnya kapal selam akan bermanuver menuju kedalaman target pada kecepatan yang ditentukan biasanya pada kecepatan operasional.
4. Selanjutnya dihitung waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kedalaman target.

Berikut merupakan prosedur pengujian *vertical zig-zag test* [13]:

1. Kondisi awal kapal selam pada kedalaman yang telah ditentukan terlebih dahulu, serta Kecepatan dan sudut *pitch* dari kapal selam telah ditentukan terlebih dahulu.
2. Belokkan *hydroplane* pada sudut positif yang telah ditentukan hingga kapal selam mencapai sudut *pitch* positif (menuju kedalaman) telah ditentukan.
3. Kapal selam akan bergerak dengan kecepatan konstan menuju kedalaman referensi atau yang telah ditentukan.
4. Setelah kapal selam mencapai kedalaman referensi, belokkan sudut *hydroplane* pada sudut negatif yang telah ditentukan hingga kapal selam pada sudut *pitch* negatif (menuju ke permukaan) yang telah ditentukan.

5. Kapal selam akan bergerak dengan kecepatan konstan menuju kedalaman referensi yang telah ditentukan. Dan dapat diulangi pada langkah kedua.
6. Selanjutnya dilakukan penghitungan waktu yang dibutuhkan kapal selam mencapai kedalaman referensi yang ditentukan serta rentang waktu menuju kedalaman referensi satu ke kedalaman referensi lainnya.

Dari hasil pengujian manuver *diving test* atau *depth change test* serta vertikal *Zig-Zag* dapat diketahui performa manuver kapal selam pada bidang vertikal atau *diving* manuver. Beberapa performa penilaian kemampuan manuver *diving* kapal selam yang baik adalah sebagai berikut [13]:

1. Nilai *overshoot* yang rendah
2. Respon waktu yang singkat untuk mencapai kedalaman diinginkan (≤ 5 menit)
3. Periode waktu perubahan sudut *hydroplane* positif menuju negatif yang singkat.
4. Rentang menuju kedalaman satu dengan yang lain yang singkat
5. Kemampuan mempertahankan posisi kedalaman yang telah dicapai.

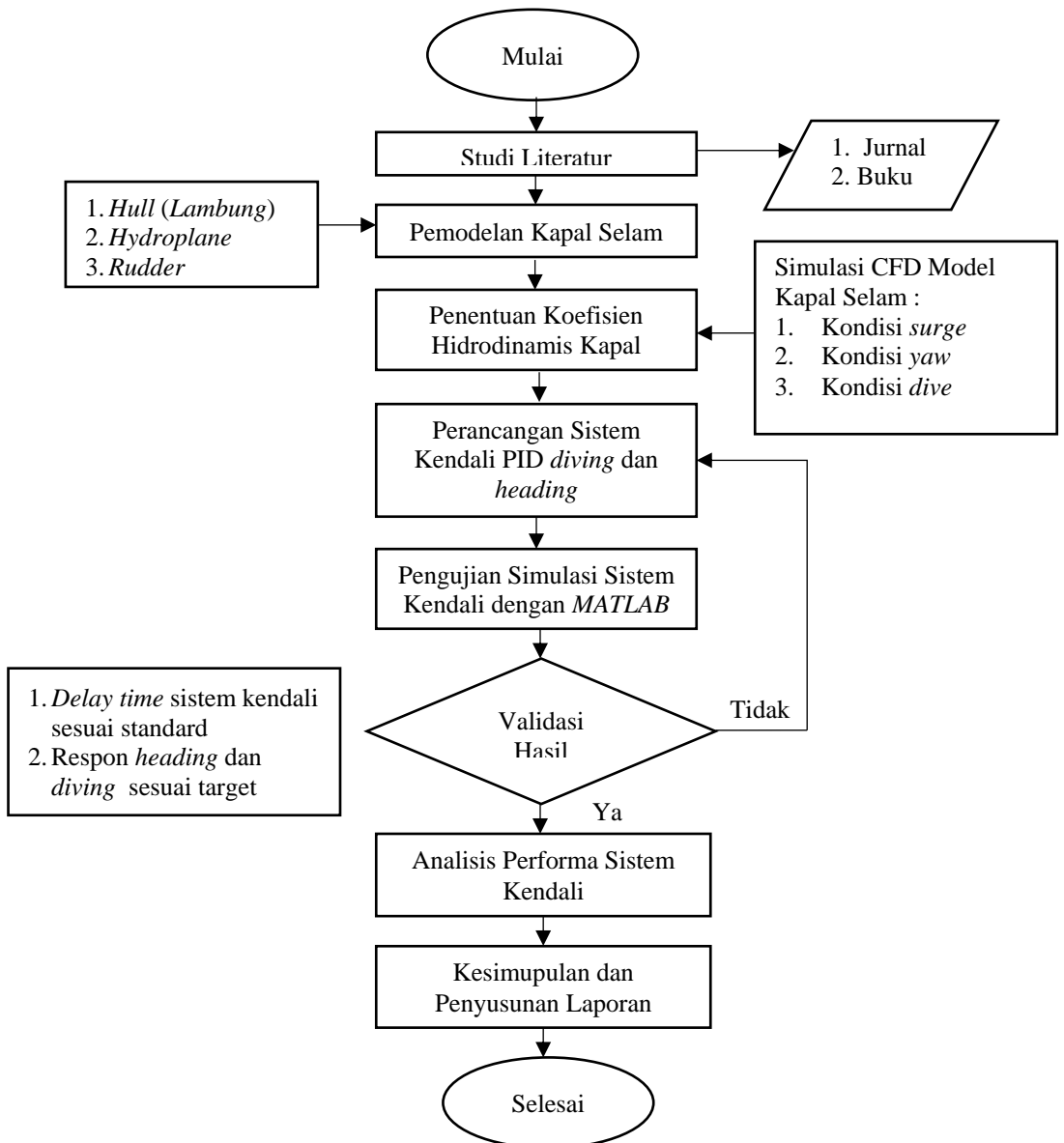
Selain itu performa kemampuan manuver dari kapal selam sendiri sangat amat ditentukan oleh pihak *owner*. Sehingga standard mengenai respon waktu, *overshoot* akan sangat dipengaruhi keinginan dari pihak *owner*.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Alur Penelitian

Dan berikut merupakan diagram alir penelitian desain sistem kendali *heading* dan *diving* pada kapal selam dengan menggunakan sistem kendali PID:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2. Studi Literatur

Tahap awal dalam desain sistem kendali manuver *heading* dan *diving* kapal selam ini adalah melakukan studi literatur. Pada tahap studi literatur terdiri dari proses penelitian mengenai desain sistem kendali pada kapal selam selain desain sistem kendali juga dilakukan penelitian mengenai koefisien hidrodinamis pada kapal selam yang akan menjadi dasar dalam pembuatan sistem kendali manuver kapal selam. Literatur yang digunakan dalam proses studi literatur ini dapat berasal dari berbagai sumber yaitu buku, jurnal, serta tugas akhir yang berhubungan dengan sistem kendali manuver pada kapal selam. Luaran dari studi literatur adalah berupa konsep dasar serta desain sistem kendali PID pada kapal selam yang berdasar pada *hydrodynamic force*.

3.3. Pemodelan Kapal Selam

Pada tahap ini akan dilakukan pembuatan model kapal selam secara tiga dimensi. Model kapal selam yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan desain lambung kapal selam tipe *soryu class* yang telah dimodifikasi pada bagian haluan. Kapal selam *soryu class* dipilih karena desain kapal selam ini merupakan salah satu kapal selam paling modern saat ini serta banyak digunakan sebagai referensi berbagai desain kapal selam saat ini.

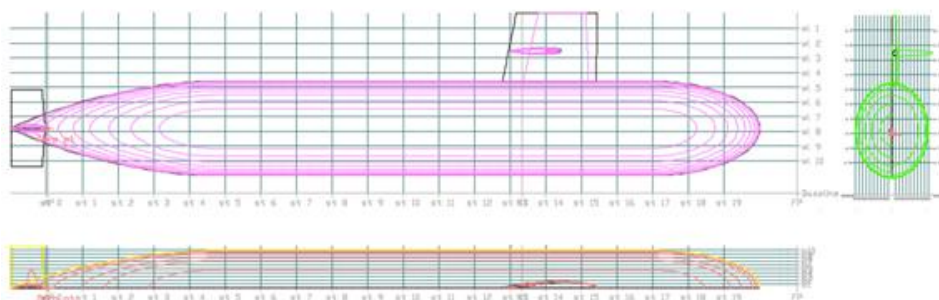
Model kapal selam akan menggunakan desain lambung atau *hull* dari kapal selam *soryu class* yang pada bagian depan kapal selam dilakukan modifikasi dan pada bagian buritan atau *stern* akan dilakukan modifikasi konfigurasi *rudder* dan *hydroplane* yang awalnya berkonfigurasi *X-form* (X) menjadi berkonfigurasi *Cruciform* (+). Serta pada bagian haluan juga dilakukan modifikasi. Berikut merupakan tabel ukuran utama serta spesifikasi serta dimensi dari model kapal selam yang digunakan:

Tabel 3.1 Spesifikasi Model Kapal Selam

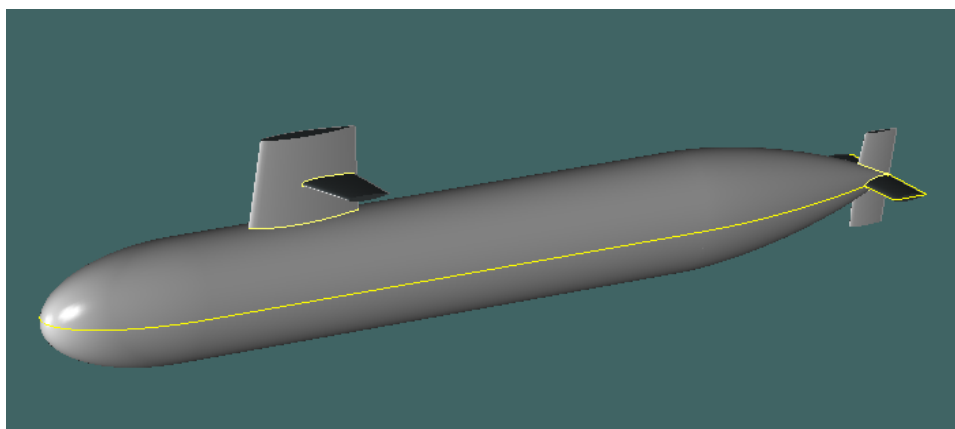
Spesifikasi Model Kapal Selam		
Panjang	65	meter
Diamter Terluar	6.4	meter
Kecepatan Max	21	knot
Kecepatan Snorkling	4	knot
Kecepatan Silent Run	10	knot
Kedalaman Snorkling	15	meter
Kedalaman Max	200	meter

Pembuatan model kapal selam akan menggunakan *software Maxsurf Modeller* dan *Rhinoceros*. Pembuatan Model akan berfokus pada bagian

lambung (*hull*), Kemudi (*rudder*) serta kontrol permukaan yaitu *hydroplane* atau *stern plane*. Pada tahap awal pembuatan model dapat dilakukan dengan penentuan kordinat serta penentuan station sehingga didapatkan *lines plan* dari model kapal selam. Selanjutnya akan dilakukan modifikasi pada bagian lambung (*hull*) sehingga sesuai dengan desain lambung kapal selam *soryu class*. Berikut adalah rencana garis (*lines plan*) serta desain 3D model kapal selam yang akan digunakan dapat dilihat pada gambar 3.2 – 3.3.



Gambar 3.2 Rencana Garis (*Lines Plan*) Model Kapal Selam



Gambar 3.3 Model 3D Kapal Selam

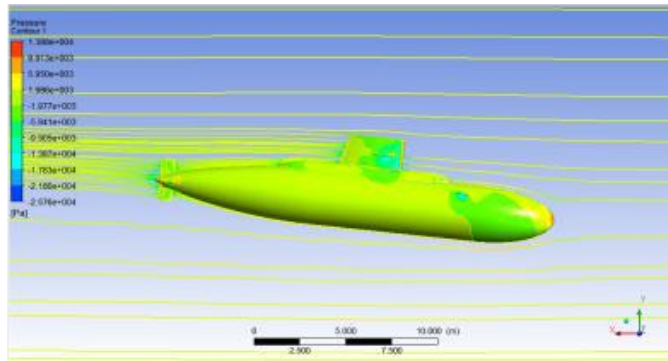
3.4. Penentuan Koefisien Hidrodinamis

Pada tahap selanjutnya merupakan penentuan koefisien hidrodinamis dari model kapal selam yang telah dibuat. Koefisien hidrodinamis merupakan salah satu hal terpenting dalam pembuatan sistem kendali hal ini dikarenakan koefisien hidrodinamis menunjukkan besar tekanan atau *pressure* aliran air yang mengenai lambung maupun kemudi kapal. sehingga desain sistem kendali manuver kapal selam harus memperhatikan koefisien tersebut agar respon dari sistem kendali benar-benar akurat dan sesuai *setpoint* yang ditentukan.

Untuk mendapatkan nilai koefisien hidrodinamis akan menggunakan metode simulai *software* CFD (*Computational Fluid Dynamic*). Model 3D dari kapal selam yang telah dibuat selanjutnya akan dilakukan simulasi CFD menggunakan *software* *Numeca Fan Marine*. Simulasi akan dilakukan dengan tiga variasi kondisi seperti kecepatan serta sudut *heading* dan *diving* kapal selam. Pada gambar 3.4 merupakan contoh simulasi CFD pada kapal selam denan sudut 6° . Berikut adalah beberapa variasi kondisi yang akan dilakukan simulasi CFD dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3.2 Variasi Simulasi CFD pada Model Kapal Selam

Variasi Simulasi	Variasi Sudut	Kecepatan
Kondisi <i>Surge</i>	0	10 Knot
Kondisi <i>Yaw</i>	$10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$	10 Knot
Kondisi <i>Pitch</i>	6°	6,8,12 Knot



Gambar 3.4 Simulasi CFD *Diving* 6°
(Sumber : Sinaga,2016)

Simulasi akan dilakukan pada lambung (*hull*), kemudi (*rudder*), serta *Hydroplane* untuk mendapatkan nilai koefisien hidrodinamis masing-masing bagian tersebut. Nilai dari koefisien hidrodinamis tersebut selanjutnya akan dimasukkan dalam persamaan matematis sistem kendali *heading* maupun *diving* untuk mendapat bentuk *state-space* dan menjadi dasar dalam perancangan desain sistem kendali *heading* dan *diving* kapal selam.

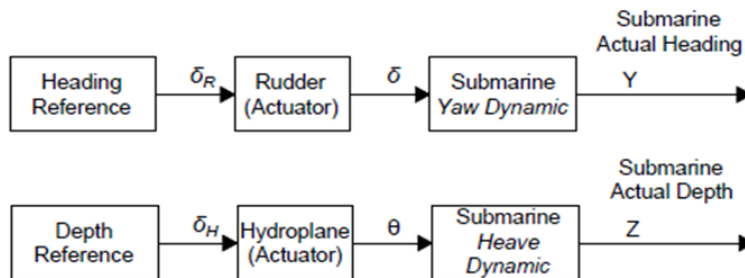
Pengambilan variasi berupa sudut *heading* $10^\circ, 20^\circ$ dan 30° merupakan sudut *heading* yang biasanya diambil dalam pengujian manuver *heading* kapal selam selain itu sudut tersebut biasa digunakan pada saat kapal selam beroperasi dalam kondisi *snorkeling* dan *silent run*. Sedangkan sudut *diving* 6° merupakan sudut operasional kapal selam saat melakukan penyelaman atau *diving*. Nilai sudut ini diambil karena mempertimbangkan stabilitas dari kapal selam dan gaya hidrodinamis yang berlaku.

Pada simulasi CFD kecepatan yang diambil pada kondisi *heading* dan *surge* atau gerak lurus adalah 10 knot. Kecepatan ini diambil karena kecepatan tersebut merupakan kecepatan dinas rata-rata kapal selam pada saat kondisi *snorkeling* dan horizontal manuver atau manuver *heading*. Sedangkan pada kondisi *diving* dilakukan simulasi pada tiga variasi kecepatan 6,8,dan 12 knot. Ketiga kecepatan ini merupakan kecepatan yang digunakan kapal selam untuk menyelam pada kedalaman tertentu. Kecepatan ini biasanya digunakan pada saat perubahan posisi *snorkeling* menuju *diving* atau menyelam pada kedalaman tertentu saat mode operasi *silent run* atau pengejaran.

3.5. Perancangan Sistem Kendali PID *Heading* dan *Diving*

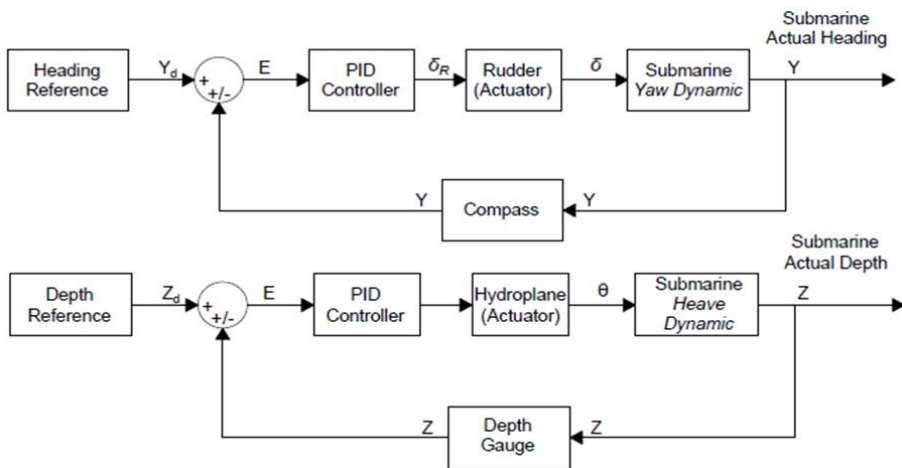
Nilai koefisien-koefisien hidrodinamis yang didapat melalui simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) maupun rumus empiris selanjutnya akan digunakan untuk perancangan desain sistem kendali manuver kapal selam. Koefisien-koefisien hidrodinamis akan disusun dalam bentuk fungsi *state space* yang akan mewakili dinamika kapal selam baik pada pada kondisi *yaw* maupun kondisi *heave*. Perancangan desain sistem kendali akan menggunakan *software MATLAB*. Sistem kendali *heading* maupun *diving* akan menggunakan konsep sistem kendali autopilot.

Pada perancangan sistem kendali *heading* dan *diving* yang berbasis PID kontrol ini akan dibuat menjadi tiga jenis sistem kendali yaitu *open loop*, *closed loop*, serta *closed loop – multi sensor*. Pada sistem kendali *heading* dan *diving* nilai *setpoint* merupakan nilai dari sudut *heading* dan kedalaman dari kapal selam. Pada desain sistem kendali *open loop* nilai *setpoint* akan diteruskan pada *rudder* maupun *hydroplane* sebagai aktuator yang selanjutnya akan diteruskan pada blok *state space* yang mewakili dinamika kapal selam sehingga didapatkan nilai *heading* aktual kapal selam. *Heading* aktual kapal selam tersebut tidak diumpan balikkan sehingga tidak dapat mempertahankan pada nilai *setpoint* yang telah ditentukan, diagram blok *open loop* dapat dilihat pada gambar 3.5.



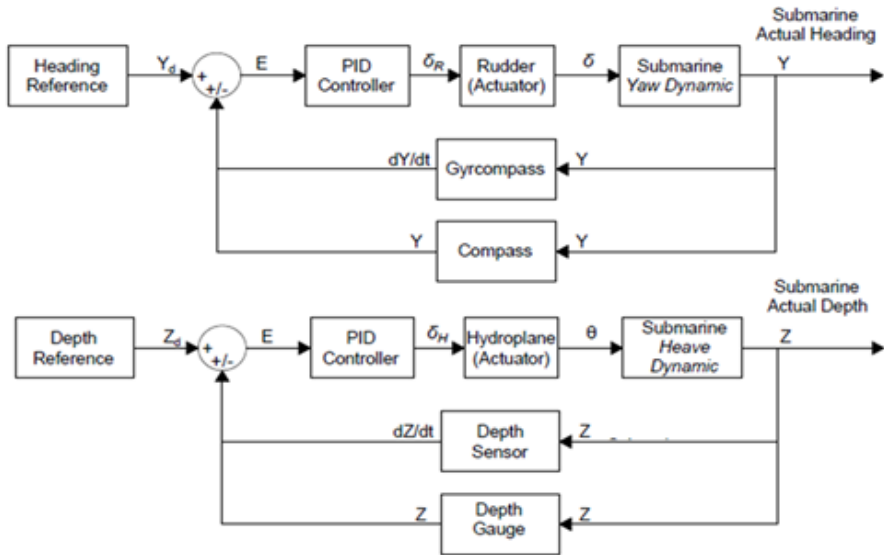
Gambar 3.5 Diagram Blok *Open Loop*

Pada desain sistem kendali *closed loop* nilai *heading* dan *diving* referensi akan diteruskan pada *summing point* dan selanjutnya diteruskan menuju PID kontrol untuk menggerakkan aktuator berupa *rudder* untuk kendali *heading* dan *hydroplane* untuk kendali *diving*. Gerakan aktuator tersebut akan diteruskan pada dinamika kapal selam sehingga didapatkan nilai *heading* aktual dan kedalaman aktual. Selanjutnya *feedback* dari sistem kendali yang berasal dari kompas maupun *depth gauge* akan diteruskan pada PID kontrol serta *summing point* untuk dilakukan koreksi apabila terjadi error atau nilai referensi tidak tercapai. Kompas serta *depth gauge* akan menjadi koreksi terhadap nilai dari sistem kendali terhadap *setpoint* yang telah ditentukan. Desain diagram blok sistem kendali *closed loop* dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Diagram *Closed Loop*

Pada desain sistem kendali *closed loop* – *multi sensor* sama seperti sistem kendali *closed loop* nilai referensi *heading* dan kedalaman akan diteruskan pada *summping point* menuju PID kontrol yang selanjutnya menggerakkan aktuator berupa *rudder* dan *hydroplane* yang selanjutnya akan diteruskan pada dinamika kapal selam sehingga didapatkan nilai *heading* aktual dan kedalaman aktual. Selanjutnya *feedback* dari sistem yang berasal dari kompas dan *depth gauge* akan diteruskan pada *summing point* untuk dilakukan koreksi. Selain itu pada sistem kendali *closed loop* - *multi sensor ini* terdapat *gyrocompass* dan *depth sensor* yang berfungsi sebagai tambahan sensor yang akan mendeteksi perubahan sudut *heading* dan kedalaman sehingga sistem lebih cepat mencapai *setpoint* dan tidak memiliki nilai error yang besar. Desain diagram blok sistem kendali *closed loop* - *multi sensor* dapat dilihat pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Diagram Blok *Closed Loop – Multi Sensor*

3.6. Simulasi Desain Sistem Kendali *Heading* dan *Diving*

Selanjutnya pada tahap ini akan dilakukan simulasi pada desain sistem kendali *heading* maupun *diving* yang telah dibuat. Pada desain sistem kendali *heading* maupun *diving* akan dilakukan dua simulasi yaitu pada *setpoint* tetap dan *setpoint* berubah atau *horizontal zig-zag maneuver*. Berikut merupakan detail pengujian pada masing-masing desain sistem kendali *heading* dapat dilihat pada tabel 3.3 sedangkan sistem kendali *diving* dapat dilihat pada tabel 3.4.

Tabel 3.3 Simulasi Sistem Kendali *Heading*

Simulasi <i>Heading</i> Referensi Tetap		
No	Desain Sistem Kendali <i>Heading</i>	Sudut <i>Heading</i>
1.	<i>Open Loop</i>	30°
		-30°
2.	<i>Closed Loop</i>	30°
		10°
3.	<i>Closed Loop – Multi Sensor</i>	30°
		10°
Simulasi <i>Heading</i> Referensi Berubah		
No	Desain Sistem Kendali <i>Heading</i>	Sudut <i>Heading</i>
1.	<i>Closed Loop</i>	30°
		-30°
2.	<i>Closed Loop – Multi Sensor</i>	30°
		-30°

Tabel 3.4 Simulasi Sistem Kendali *Diving*

Simulasi <i>Diving</i> Referensi Tetap		
No	Desain Sistem Kendali <i>Diving</i>	Kedalaman <i>Diving</i>
1.	<i>Open Loop</i>	50 m
		-50 m
2.	<i>Closed Loop</i>	30 m
		50 m
3	<i>Closed Loop – Multi Sensor</i>	30 m
		50 m
Simulasi <i>Diving</i> Referensi Berubah		
No	Desain Sistem Kendali <i>Diving</i>	Kedalaman <i>Diving</i>
1.	<i>Closed Loop</i>	50 m
		-50 m
2.	<i>Closed Loop – Multi Sensor</i>	50 m
		-50 m

3.7. Analisis Hasil Simulasi dan Performa Desain Sistem Kendali

Pada tahap akhir dilakukan simulasi desain sistem kendali *heading* dan *diving* kapal selam dibuat sebelumnya. Desain sistem kendali akan disimulasikan menggunakan *software MATLAB* dan *Simulink* untuk mengetahui respon, *delay time*, *rise time*, *settling time* dan berbagai parameter performa sistem kendali. Apabila performa sistem kendali seperti respon dan *delay time* sistem kendali belum mencapai target atau tidak sesuai dengan standard yang ada maka akan dilakukan kembali koreksi dan perancangan kembali desain sistem kendali. Berikut merupakan parameter performa sistem kendali yang akan diuji dan menjadi dasar apakah desain sistem kendali diterima atau tidak dapat dilihat pada tabel 3.5.

Tabel 3.5 Parameter Performa Sistem Kendali

No	Parameter Performa	Satuan	
		<i>Heading</i>	<i>Diving</i>
1	<i>Rise Time</i>	Detik (s)	Detik (s)
2	<i>Peak Time</i>	Detik (s)	Detik (s)
3	<i>Delay Time</i>	Detik (s)	Detik (s)
4	<i>Settling Time</i>	Detik (s)	Detik (s)
5	<i>Maximum Overshot</i>	Derajat (°)	Meter (m)
6	<i>Steady State Error</i>	Derajat (°)	Meter (m)

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Desain Model Kapal Selam

Desain model kapal selam yang digunakan merupakan desain kapal selam yang pada bagian lambung atau *hull* menggunakan desain lambung menggunakan lambung kapal selam *soryu class*. Pada bagian haluan dilakukan modifikasi sehingga pada bagian haluan sedikit berbentuk melengkung. Modifikasi pada bagian haluan dibuat sedikit berbentuk melengkung bertujuan agar mampu mengurangi *friction* atau gesekan lambung terhadap air sehingga mengurangi tahanan atau *resistance* yang diterima lambung kapal selam. Serta pada bagian buritan yaitu dilakukan modifikasi konfigurasi *rudder* dan *hydroplane* yang awalnya berkonfigurasi *X-form* (X) menjadi berkonfigurasi *Cruciform* (+), modifikasi ini bertujuan agar memperbesar gaya yang dihasilkan oleh *rudder* maupun *stern hydroplane*. Selain itu sistem kontrol yang digunakan lebih sederhana dan mudah dikendalikan dibandingkan konfigurasi *X-Form*. Serta memiliki detail spesifikasi sesuai dengan Tabel 3.1.



Gambar 4.1 Desain Kapal Selam Tampak Samping dan Depan



Gambar 4.2 Desain Kapal Selam Tampak Atas, Haluan, dan Belakang

Desain awal model kapal selam dan pembuatan *lines plan* akan menggunakan *software Maxsurf Modeller* sehingga didapatkan awal desain 3D yang dapat dilihat pada gambar 3.2. Selanjutnya desain 3D awal serta *lines plan* yang telah disempurnakan dengan *software Rhinoceros* sehingga didapatkan model yang benar-benar detail dan sesuai sehingga didapatkan data yang valid saat dilakukan simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*).

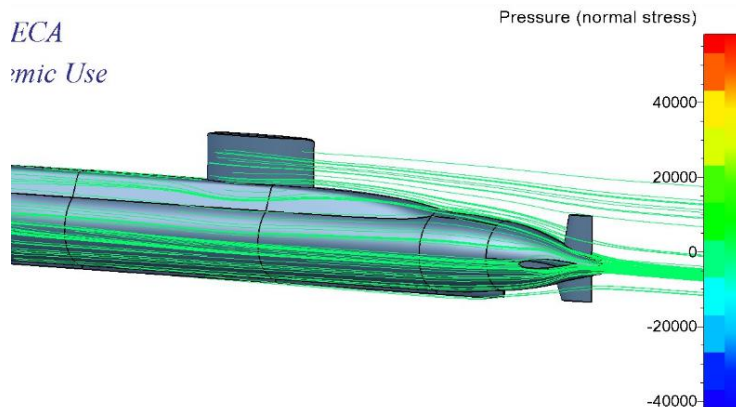
Dari model 3D kapal selam yang telah dibuat dan disempurnakan dengan *software Rhinoceros* selanjutnya diinput pada *software Solidwork* dan sehingga melalui model 3D kapal selam tersebut dapat diketahui koefisien-koefisien yang mempengaruhi manuver kapal selam seperti *displacement*, titik apung, titik gravitasi dan momen inersia. Berikut adalah nilai-nilai yang didapatkan pada *software Solidwork* yang dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Koefisien Pada Model 3D Kapal Selam

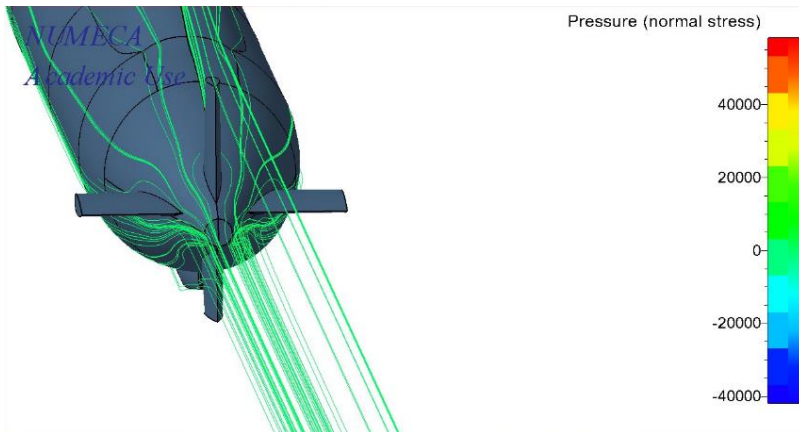
No	Koefisien	Nilai	Satuan
1	<i>Displacement</i> (∇)	1895	m^3
2	Distance CB to AP (X_{AP})	33.9	m
3	Wet Surface Area (W_s)	1342	m^3
4	Centre of Gravity (C_G)	3.28	m
5	Centre of Bouyancy (C_B)	3.68	m
6	Inertia X axis (I_{xx})	12764281.61	Kg/ m^3
7	Inertia Y axis (I_{yy})	42948328.22	Kg/ m^3
8	Inertia Z axis (I_{zz})	43586310.31	Kg/ m^3

4.2. Analisis Hasil Simulasi *Computational Fluid Dynamic* (CFD)

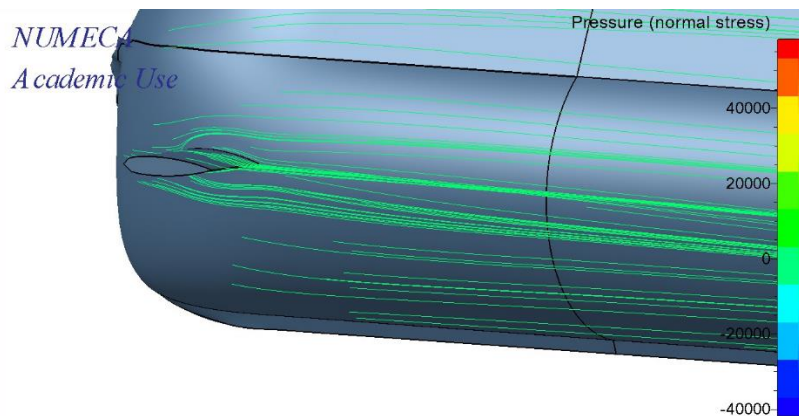
Untuk mendapatkan nilai koefisien hidrodinamis pada bagian lambung (*hull*) dan kontrol permukaan (*rudder* dan *stern hydroplane*) maka dilakukan simulasi *computational fluid dynamic* (CFD) menggunakan *software Numeca Fan Marine* pada model 3D yang telah dibuat. Simulasi ini dilakukan agar mendapatkan nilai koefisien hidrodinamis yang akan berpengaruh pada sistem kendali manuver kapal selam. Simulasi CFD pada bagian *hull* (*lambung*), *rudder*, dan *hydroplane* akan dilakukan pada beberapa variasi kecepatan serta sudut *heading* dan sudut *pitch* kapal selam seperti yang tertera pada tabel 3.2 Dapat dilihat pada gambar 4.3 merupakan simulasi pada *hull*, gambar 4.4 simulasi pada *rudder*, serta gambar 4.5 simulasi pada *hydroplane*.



Gambar 4.3 Simulasi CFD pada Lambung (*Hull*)



Gambar 4.4 Simulasi CFD pada *Rudder dan Stern Hydroplane*



Gambar 4.5 Simulasi CFD pada *Bow Hydroplane*

Hasil simulasi CFD merupakan nilai gaya dan momen pada bagian lambung (*hull*) dan kontrol permukaan (*rudder dan hydroplane*) pada berbagai variasi kecepatan dan sudut *pitch* maupun *yaw*. Nilai gaya dan momen yang telah didapatkan selanjutnya disusun dalam bentuk grafik sehingga dapat dilakukan analisis regresi secara polynomial linear sehingga didapatkan nilai linear koefisien-koefisien hidrodinamis yang mempengaruhi pada saat kondisi *heading* dan kondisi *diving* [1]. Dikarenakan desain sistem kendali merupakan desain sistem kendali autopilot maka perlu dilakukan perubahan atau normalisasi nilai koefisien hidrodinamis yang masih berbentuk dimensional menjadi non dimensional menggunakan konsep *Prime System* [1]. Konsep *Prime Sytem* dipilih karena lebih sesuai untuk wahana air yang memiliki kecepatan cukup tinggi sehingga sangat sesuai untuk pemodelan manuver sebuah kapal selam [1]. Berikut merupakan tabel fungsi normalisasi *Prime System* dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Fungsi Normalisasi *Prime System I* dan *Prime System II*

Unit	Prime System I	Prime System II
Panjang	L	L
Massa	$1/2 \rho L^3$	$1/2 \rho L^2 T$
Momen Inersia	$1/2 \rho L^5$	$1/2 \rho L^4 T$
Kecepatan Linear	U	U
Kecepatan Angular	U/L	U/L
Percepatan Linear	U^2/L	U^2/L
Percepatan Angular	U^2/L^2	U^2/L^2
Gaya	$1/2 U^2 L^2$	$1/2 U^2 L T$
Momen	$1/2 U^2 L^3$	$1/2 U^2 L^2 T$

Dari hasil simulasi menggunakan *software Numeca Fan Marine* didapatkan nilai-nilai serta koefisien hidrodinamis yang mempengaruhi manuver kapal selam baik secara vertikal dan horizontal. Koefisien hidrodinamis hasil simulasi CFD dapat dibagi menjadi dua koefisien hidrodinamis yaitu koefisien hidrodinamis yang berpengaruh pada manuver horizontal atau *heading (Lateral Dynamic Stability Coefficient)* dan koefisien hidrodinamis yang berpengaruh pada manuver vertikal (*Longitudinal Dynamic Stability Coefficient*).

4.2.1. Koefisien Hidrodinamis *Lateral*

Koefisien hidrodinamis pada manuver horizontal atau dapat disebut dengan Koefisien hidrodinamis *lateral* merupakan gaya hidrodinamis, momen dan nilai-nilai yang mempengaruhi manuver kapal selam pada bidang horizontal atau pada kondisi *heading*. Koefisien hidrodinamis *lateral* terdiri dari gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja dan mempengaruhi kapal selam serta *rudder* pada kondisi tiga derajat kebebasan yaitu *surge*, *yaw*, dan *sway* [1]. Berikut merupakan data koefisien hidrodinamis *lateral* yang telah normalisasi dalam bentuk non-dimensional menggunakan fungsi *Prime System* yang dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Koefisien Hidrodinamis *Lateral*

Koefisien	Nilai	Koefisien	Nilai
Y'_r	$0.365 \cdot 10^{-3}$	N'_r	$-1.458 \cdot 10^{-3}$
Y'_v	$-28.279 \cdot 10^{-3}$	N'_v	$0.725 \cdot 10^{-3}$
Y'_r	$8.975 \cdot 10^{-3}$	N'_r	$-4.526 \cdot 10^{-3}$
Y'_v	$-65.425 \cdot 10^{-3}$	N'_v	$-16.708 \cdot 10^{-3}$
$Y'_{\delta R}$	$4.280 \cdot 10^{-3}$	$N'_{\delta R}$	$-1.796 \cdot 10^{-3}$

4.2.2. Koefisien Hidrodinamis Longitudinal

Koefisien hidrodinamis pada manuver vertikal dapat disebut juga sebagai koefisien hidrodinamis *longitudinal* adalah gaya hidrodinamis, momen, serta nilai-nilai yang mempengaruhi kemampuan manuver kapal selam pada bidang vertikal atau biasa disebut *diving*. Koefisien hidrodinamis *longitudinal* terdiri dari gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja dan mempengaruhi kapal selam serta *hydroplane* pada kondisi tiga derajat kebebasan yaitu *surge*, *heave*, dan *pitch* [1].

Berbeda dengan koefisien hidrodinamis *lateral* yang dipengaruhi oleh *rudder*, koefisien hidrodinamis *longitudinal* dipengaruhi oleh *hydroplane* yang ada pada bagian buritan (*stern hydroplane*) maupun bagian haluan (*bow hydroplane*). Gaya hidrodinamis yang bekerja pada kedua *hydroplane* sangat amat berpengaruh pada kemampuan manuver *diving* kapal selam. Hal ini dikarenakan kedua *hydroplane* harus dapat menjaga posisi dan stabilitas kapal selam saat pada kedalaman tertentu [1]. Berikut merupakan data koefisien hidrodinamis *longitudinal* yang telah dinormalisasi dalam bentuk non-dimensional menggunakan fungsi *Prime System* yang dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Koefisien Hidrodinamis Longitudinal

Koefisien	Nilai	Koefisien	Nilai
Z'_q	$-0.315 \cdot 10^{-3}$	M'_q	$-1.121 \cdot 10^{-3}$
Z'_w	$-16.244 \cdot 10^{-3}$	M'_w	$-0.746 \cdot 10^{-3}$
Z'_q	$-8.654 \cdot 10^{-3}$	M'_q	$-4.362 \cdot 10^{-3}$
Z'_w	$-22.052 \cdot 10^{-3}$	M'_w	$4.856 \cdot 10^{-3}$
$Z'_{\delta S}$	$-4.115 \cdot 10^{-3}$	$M'_{\delta S}$	$-1.956 \cdot 10^{-3}$
$Z'_{\delta B}$	$-0.728 \cdot 10^{-3}$	$M'_{\delta B}$	$0.424 \cdot 10^{-3}$
X'_u	$-0.513 \cdot 10^{-3}$	BG_z	$325 \cdot 10^{-3}$

4.3. Pemodelan Fungsi State Space Sistem Kendali Heading

. Dikarenakan desain sistem kendali yang dibuat merupakan desain sistem kendali autopilot maka dibuatlah model dinamika kapal selam pada kondisi *heading* dalam bentuk fungsi *state space*. Sehingga setelah didapatkan nilai koefisien hidrodinamis *lateral* yang mempengaruhi kemampuan sistem kendali *heading*, maka dapat dilakukan penyusunan fungsi *state space* yang merupakan nilai dari dinamika kapal selam pada kondisi *yaw* atau pada kondisi *heading*. Selain berisi nilai koefisien hidrodinamis fungsi *state space* juga berisi nilai dari massa, kecepatan dan titik gravitasi dari kapal selam.

Berikut merupakan nilai matriks inersia, matriks redaman, matriks input kontrol, setelah dimasukkan nilai koefisien hidrodinamis *lateral*. Serta nilai perhitungan dinamika kapal selam dalam kondisi *yaw* atau pada kondisi *heading*, dimana dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$M\dot{v} = \begin{pmatrix} 0.04528 & 0.787 & 0 \\ 0.76801 & 0.00218 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (2.56)$$

$$N(u_o)v = \begin{pmatrix} -0.0654 & -0.00803 & 0 \\ 0.0167 & -0.79205 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ r \\ \psi \end{pmatrix} \quad (2.57)$$

$$\tau = \begin{pmatrix} -0.00428 \\ 0.00179 \\ 0 \end{pmatrix} \delta_R \quad (2.58)$$

Pada matriks redaman nilai dari kecepatan dinas pada kapal selam adalah 1. Hal ini dikarenakan kecepatan dinas atau *service speed* dilakukan normalisasi sehingga berbentuk non dimensional dengan fungsi $u'_o = \frac{u_o}{U}$. Dimana nilai U merupakan kecepatan aliran air pada kondisi *surge* dan *sway*, karena nilai kecepatan air dianggap memiliki nilai yang sama dengan kecepatan dinas sehingga bernilai 1. Setelah dilakukan operasi invers pada matriks inersia, redaman, dan kontrol permukaan berikut merupakan nilai fungsi *state space* pada kondisi *yaw* atau *heading* :

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.02146 & -1.0068 & 0 \\ -0.08435 & 0.04771 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ r \\ \psi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0,002298 \\ -0,005569 \\ 0 \end{pmatrix} \delta_R \quad (2.59)$$

$$\psi = (0 \quad 0 \quad 1) \begin{pmatrix} v \\ r \\ \psi \end{pmatrix} \quad (2.60)$$

4.4. Pemodelan Fungsi *State Space* Sistem Kendali *Diving*

Sama seperti desain sistem kendali manuver *heading*, sistem kendali *diving* juga merupakan desain sistem kendali dengan konsep autopilot sehingga dinamika kapal selam kondisi *diving* dibentuk dalam bentuk fungsi *state space*. Sehingga setelah didapatkan nilai koefisien hidrodinamis *longitudinal* yang mempengaruhi kemampuan manuver *diving* kapal selam, maka dapat dilakukan penyusunan fungsi *state space* yang mewakili nilai dari dinamika kapal selam pada kondisi *diving*. Pada pemodelan fungsi *state space* ini sudut *pitch* atau sudut serang (*angle of attack*) dari kapal selam yang diambil adalah 6 derajat. Sudut ini diambil biasanya pada perubahan mode operasi dari *snorkeling* menuju mode *silent run* dan pengejaran. Serta mempertimbangkan stabilitas dari kapal selam.

Pada fungsi *state space* sistem kendali *diving* memiliki nilai yang berbeda pada setiap kecepatan, pada persamaan dibawah merupakan nilai matriks inersia, matriks redaman, matriks input kontrol, setelah dimasukkan nilai koefisien hidrodinamis *longitudinal* pada kecepatan 8 knot. Serta nilai perhitungan dinamika kapal selam dalam kondisi *pitch* atau pada kondisi *diving*. dimana dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$M\dot{w} = \begin{pmatrix} 0.03045 & -0.63865 & 0 & 0 \\ -0.63865 & 0.00184 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix} \quad (2.60)$$

$$N(u_o)w = \begin{pmatrix} -0.2205 & 0.0056 & 0 & 0 \\ 0.02058 & -0.06433 & -0.01691 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 4.112 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{pmatrix} \quad (2.61)$$

$$\tau = \begin{pmatrix} 0.004115 \\ 0.001956 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \delta_H \quad (2.62)$$

Setelah dilakukan operasi invers pada matriks inersia, redaman serta input kontrol maka didapatkan fungsi *state space* untuk kondisi *diving* atau *pitch* dengan sudut yang telah ditentukan. Berikut merupakan nilai fungsi *state space* pada kondisi *diving* atau *pitch* yang dapat dilihat pada persamaan berikut:

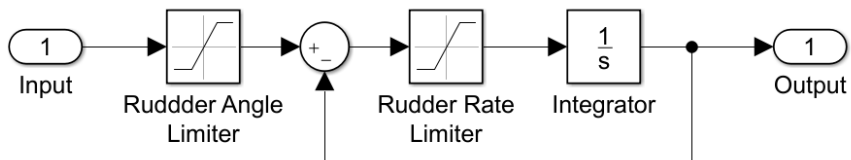
$$\begin{pmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0321 & 1.0074 & 0.0265 & 0 \\ 0.03301 & 0.0385 & 0.0013 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 4.112 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -0.00308 \\ -0.00659 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \delta_H \quad (2.63)$$

$$z = (0 \ 0 \ 0 \ 1) \begin{pmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{pmatrix} \quad (2.64)$$

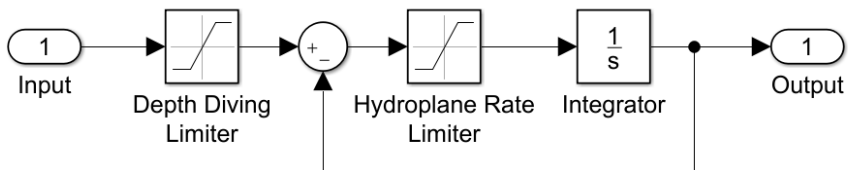
4.5. Analisis Desain dan Model Aktuator Sistem Kendali

Pada desain sistem kendali *heading* dan *diving* terdapat dua jenis aktuator, yaitu *rudder* dan *hydroplane*. *Rudder* berfungsi sebagai aktuator atau penggerak serta pengatur sudut *heading* kapal. Sedangkan *hydroplane* berfungsi sebagai aktuator atau penggerak serta pengatur sudut *pitch* serta *diving* dan kedalaman kapal selam.

Konsep model aktuator pada desain sistem kendali ini digunakan model aktuator Van Amerongen. Model aktuator Van amerongen dipilih karena model aktuator ini merupakan model aktuator desain sistem kontrol autopilot manuver pada kapal permukaan, kapal selam, maupun wahana air lainnya [10], sehingga sangat sesuai untuk perancangan desain sistem kendali ini. Selain itu model aktuator jenis ini memiliki kelebihan seperti lebih adaptif serta akurat dibandingkan model aktuator jenis lain. Dapat dilihat pada gambar 4.6 merupakan diagram blok aktuator dari *rudder* yang terdiri dari pembatas sudut *rudder* (*rudder angle limiter*), pembatas kecepatan *rudder* (*rudder rate limiter*) serta *integrator*. sedangkan pada gambar 4.7 merupakan diagram blok aktuator dari *hydroplane* yang terdiri dari pembatas kedalaman (*depth limiter*), pembatas kecepatan dan sudut *hydroplane*, serta *integrator*.



Gambar 4.0.6 Diagram Blok Aktuator *Rudder*

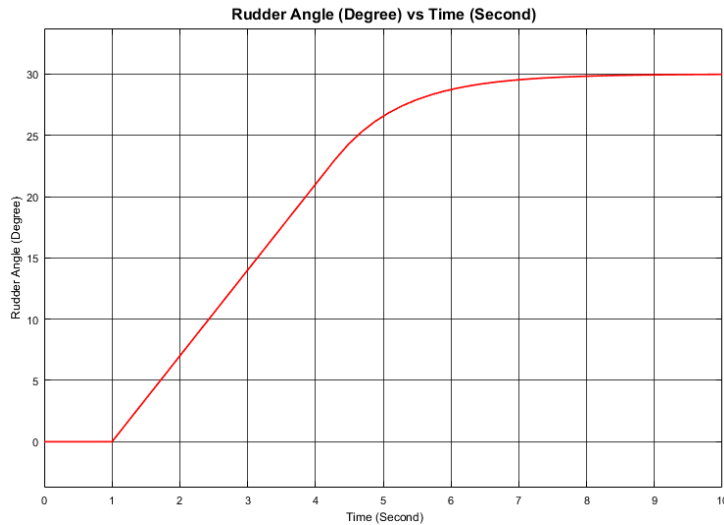


Gambar 4.7 Diagram Blok Aktuator *Hydroplane*

Nilai batasan sudut dari *rudder* adalah dari 35° hingga -35° , berbeda dengan *hydroplane* yang memiliki batasan sudut dari 40° hingga -40° , namun pada operasionalnya sudut *hydroplane* yang digunakan berkisar 6° hingga 10° . Dan nilai kedalaman maksimum yang dapat dicapai oleh kapal selam adalah 200 meter. Sedangkan batasan kecepatan untuk *rudder* dan *hydroplane* masing-masing adalah $4.0^\circ/\text{detik}$ dan $3.3^\circ/\text{detik}$. Nilai batasan dari sudut *rudder* dan *hydroplane* merupakan nilai yang didapatkan dari batas sudut yang mampu dicapai oleh kontrol permukaan. Sedangkan nilai batas kecepatan *rudder* maupun *hydroplane* merupakan nilai rata-rata kecepatan kontrol permukaan pada kapal selam yang sangat dipengaruhi kemampuan pompa hidrolis yang menggerakkan *rudder* maupun *hydroplane*.

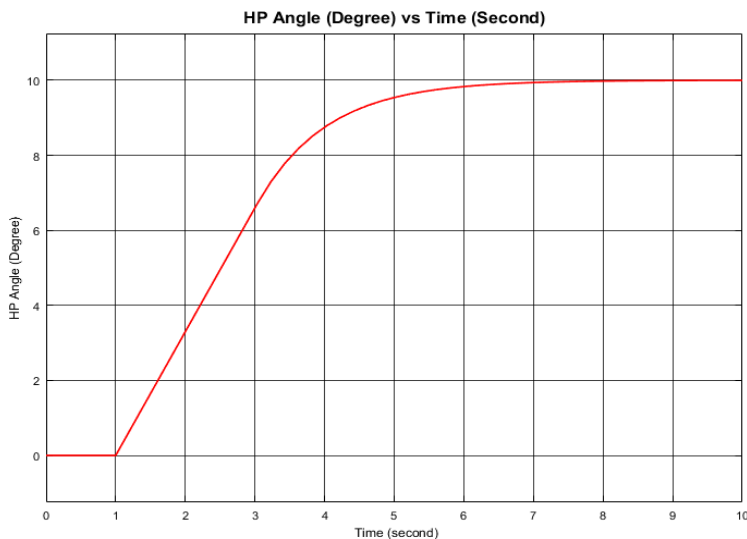
Setelah dilakukan perancangan diagram blok pada *MATLAB*, selanjutnya dapat dilakukan simulasi untuk mengetahui respon dari aktuator yang telah dibuat setelah terhadap input atau nilai *setpoint*. Dapat dilihat pada gambar 4.8 merupakan hasil simulasi pada *rudder* yang diberikan input atau sinyal *step* sebesar 30° dengan waktu *step* yang ditentukan pada detik pertama.

Dibutuhkan waktu 7.82 detik untuk mencapai nilai *setpoint* 30° dan selanjutnya dapat mempertahankan nilai pada *setpoint*.



Gambar 4.8 Grafik Respon Aktuator *Rudder*

Selanjutnya dapat dilihat pada gambar 4.9 merupakan hasil simulasi pada aktuator *hydroplane* yang diberikan input sudut atau *setpoint* sebesar 10°. Pada grafik ditunjukkan dibutuhkan waktu 8.4 detik untuk mencapai nilai *setpoint* 10° dan selanjutnya dapat mempertahankan nilai pada *setpoint*. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa aktuator *rudder* maupun *hydroplane* dapat mencapai sudut yang ditentukan serta dapat mempertahankan nilai *setpoint* yang ditentukan



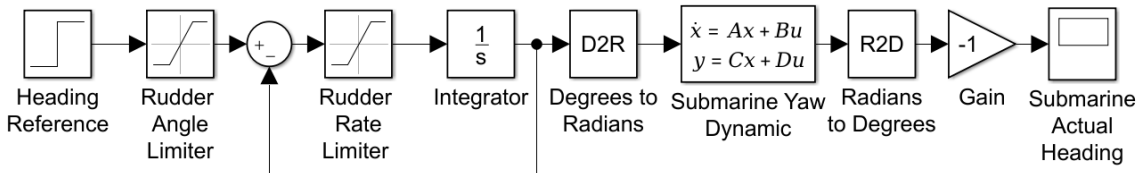
Gambar 4.9 Grafik Respon Aktuator *Hydroplane*

4.6. Analisis Sistem Kendali *Heading*

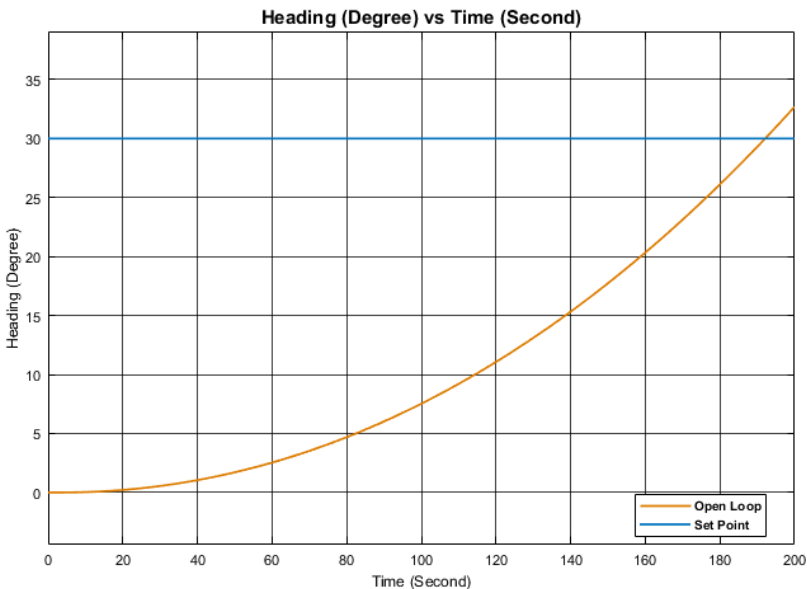
Performa dari sistem kendali *heading* sangat mempengaruhi kemampuan manuver dari kapal selam pada bidang horizontal, sehingga perlu dilakukan simulasi untuk mengetahui performa dari sistem kendali yang telah dibuat. Desain sistem kendali *heading* yang terdiri sistem kendali *open loop*, *closed loop*, dan *closed loop-multi sensor* selanjutnya akan dibuat diagram bloknnya pada software *MATLAB* dan dilakukan simulasi untuk mengetahui performa masing-masing sistem kendali.

4.6.1. Analisis Sistem Kendali *Heading Open Loop*

Pada gambar 4.10 diagram blok sistem kendali *open loop* atau siklus terbuka dapat dilihat sistem kendali *open loop* nilai *heading* referensi atau sudut referensi (δ_R) akan diteruskan pada aktuator, yaitu *rudder* sehingga didapatkan nilai sudut aktual dari *rudder* (δ). Nilai sudut aktual *rudder* selanjutnya diteruskan menuju blok *state-space* yang mewakili dinamika kapal selam pada kondisi *yaw* sehingga didapatkan nilai sudut *heading* aktual dari kapal selam. Pada desain sistem kendali *open loop* ini sudut *heading* aktual kapal selam tidak di umpan balikkan.

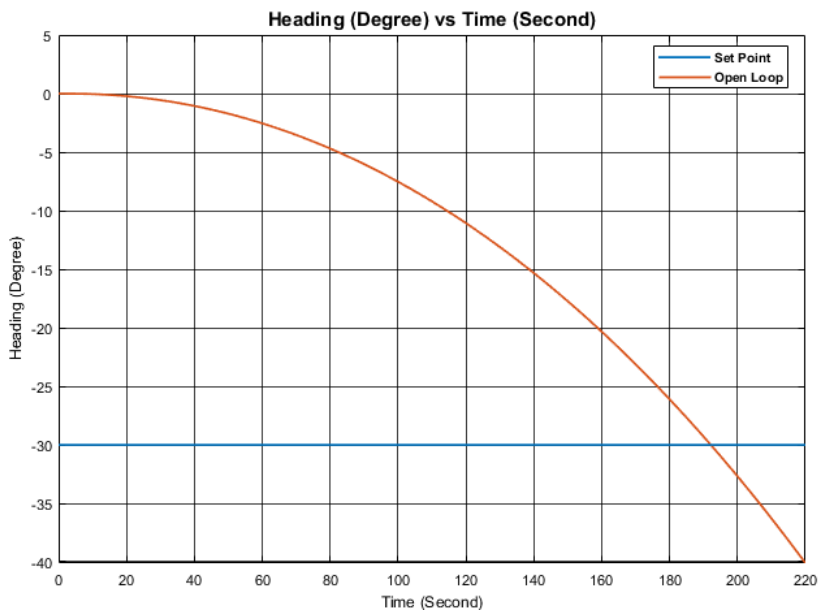


Gambar 4.10 Diagram Blok Sistem Kendali *Heading Open Loop*



Gambar 4.11 Respon Sistem Kendali *Heading Open Loop* masukan 30°

Simulasi dilakukan dengan masukan nilai sudut *heading* 30° dan -30° untuk mengetahui performa sistem kendali *heading* dengan masukan sudut *heading* positif maupun negatif, serta mengetahui apakah fungsi *state space* yang dibuat telah sesuai. Pada gambar 4.11 dan 4.12 ditunjukkan nilai grafik respon sistem kendali *heading* dengan masukan sudut *heading* positif dan sudut *heading* negatif. Dengan nilai sudut *rudder* positif kapal selam akan bergerak ke arah kanan sedangkan nilai sudut *rudder* negatif kapal selam akan bergerak ke arah kiri. Hal ini menunjukkan bahwa fungsi *state space* yang mewakili dinamika kapal selam dalam kondisi *yaw* sudah sesuai. Dari hasil simulasi ditunjukkan untuk mencapai nilai *setpoint* dibutuhkan waktu 192.12 detik. *Rise time* dan *delay time* dari sistem kendali *open loop* berturut-turut adalah 86.78 detik dan 157.373 detik. Selain itu sistem kendali *heading open loop* ini kapal selam tidak dapat mempertahankan pada sudut *heading* yang telah ditentukan karena tidak ada umpan balik (*feedback*) dari *plant*. Performa dari sistem kendali *heading open loop* dapat dilihat pada tabel 4.5



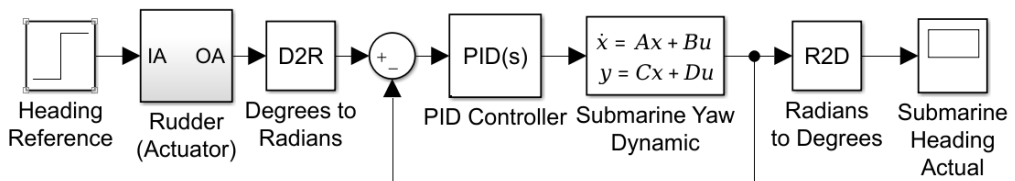
Gambar 4.12 Grafik Respon Sistem Kendali *Heading Open Loop* masukan -30°

Tabel 4.5 Performa Sistem Kendali *Heading Open Loop*

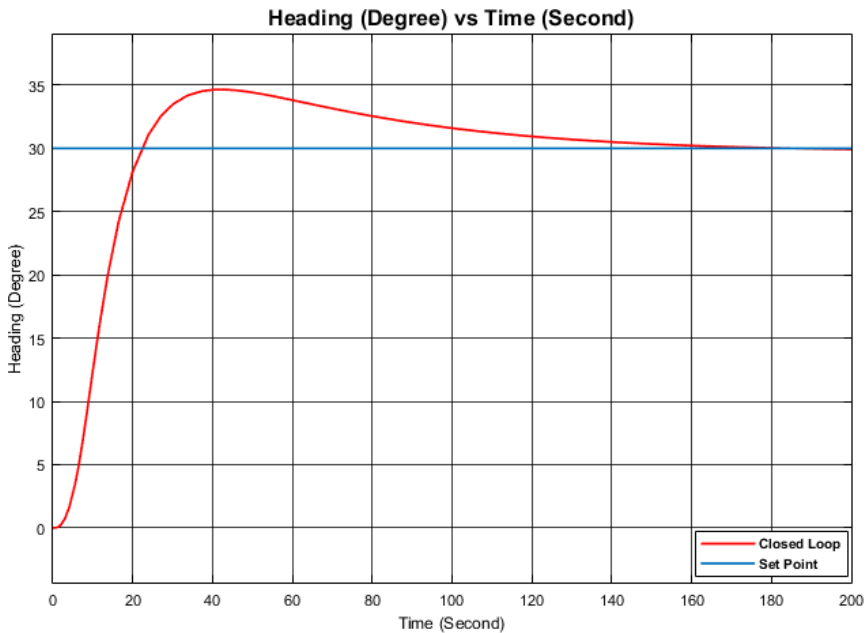
Performa Heading (30 Degree dan -30 Degree)		
No	Parameter	Open Loop
1	Rise Time (Second)	86.78
2	Settling Time (Second)	192.12
3	Delay Time (Second)	157.373
4	Peak Time (Second)	-
5	Maximum Overshoot (Degree)	-
6	Steady State Error (Degree)	-

4.6.2. Analisis Sistem Kendali *Heading Closed Loop*

Gambar 4.13 merupakan diagram blok dari sistem kendali *heading closed loop* atau siklus tertutup, dapat dilihat nilai sudut *heading* referensi (δ_R) akan diteruskan pada *rudder* sebagai aktuator sehingga didapatkan nilai sudut aktual *rudder* (δ). Selanjutnya sudut aktual *rudder* akan diteruskan pada PID kontrol yang akan mengontrol masukan sudut aktual *rudder* menuju fungsi *state space* yang akan mewakili dinamika kapal selama pada kondisi *yaw* sehingga didapatkan nilai sudut aktual *heading* kapal selama. Nilai sudut *heading* aktual kapal selama selanjutnya diumpam balikkan (*feedback*) pada *summing point* sehingga didapatkan nilai error *yaw* yang akan diteruskan menuju PID kontrol untuk dilakukan koreksi sehingga didapatkan nilai sudut *heading* sesuai *setpoint* yang ditentukan.



Gambar 4.13 Diagram Blok Sistem Kendali *Headong Closed Loop*



Gambar 4.14 Grafik Respon Sistem Kendali *Heading Closed Loop* (30°)

Dapat dilihat pada gambar 4.14 merupakan hasil simulasi sistem kendali *heading closed loop* dengan nilai sudut masukan sebesar 30° . Dari hasil simulasi ditunjukkan bahwa *rise time* dan *delay time* berturut-turut

adalah 13.62 detik dan 29.32 detik. Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *setpoint* (*settling time*) sebesar 30° membutuhkan waktu sebesar 185.5 detik. Pada sistem kendali *heading closed loop* ini terdapat *overshoot* yang cukup tinggi, yang mencapai titik maksimum sebesar 34.685° pada detik ke 43.06. Selain itu terdapat error sebesar -0.15° . Berdasarkan hasil simulasi sistem kendali *heading* pada masukan 30° memiliki performa yang cukup baik hal ini ditinjau dari nilai waktu *settling* dan *delay* yang sesuai dengan standard bahkan lebih cepat, serta memiliki *error steady state* yang tidak lebih dari 0.5%. Pada tabel 4.6 merupakan performa dari hasil simulasi sistem kendali *heading closed loop*.

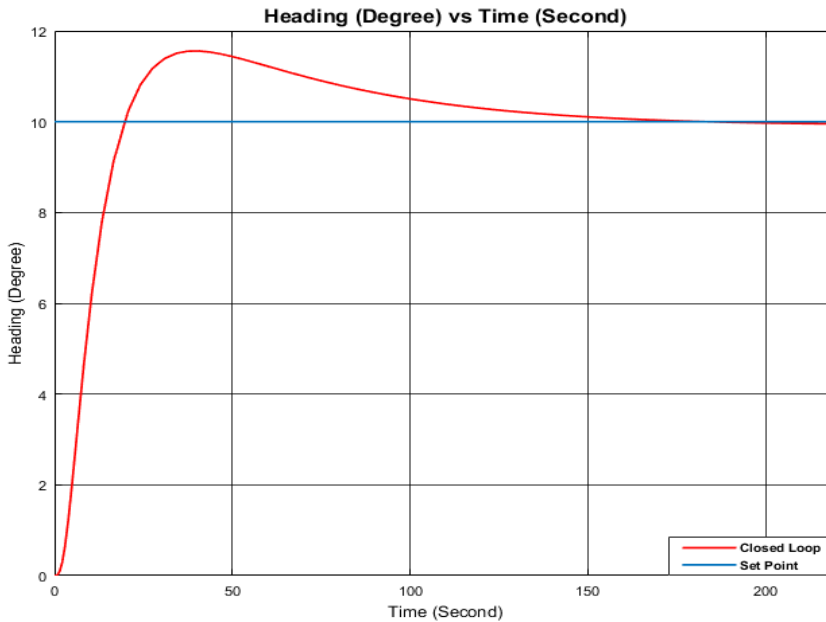
Tabel 4.6 Performa Sistem Kendali *Heading Open Loop* (30°)

Performa Heading (30 Degree)		
No	Parameter	Closed Loop
1	Rise Time (Second)	13.62
2	Settling Time (Second)	185.5
3	Delay Time (Second)	29.32
4	Peak Time (Second)	43.06
5	Maximum Overshoot (Degree)	34.69
6	Steady State Error (Degree)	-0.15

Selanjutnya pada gambar 4.15 merupakan hasil simulasi sistem kendali *heading closed loop* dengan nilai sudut masukan sebesar 10° . Dari hasil simulasi ditunjukkan bahwa *rise time* dan *delay time* berturut-turut adalah 19.85 detik dan 8.72 detik. Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *setpoint* (*settling time*) sebesar 10° membutuhkan waktu sebesar 182.92 detik. Pada sistem kendali *heading closed loop* ini terdapat *overshoot* yang cukup tinggi, yang mencapai titik maksimum sebesar 11.55° pada detik ke 40.65. Selain itu terdapat error sebesar -0.05° . Berdasarkan hasil simulasi sistem kendali *heading closed loop* memiliki performa yang baik dan sesuai standard. Hal ini ditunjukkan dari simulasi pada masukan sudut *heading* yang berbeda yaitu 10° dan 30° memiliki performa baik ditinjau dari nilai waktu *settling* dan *delay* maupun *error*. Pada tabel 4.7 merupakan performa hasil simulasi sistem kendali *heading closed loop* masukan 10° .

Tabel 4.7 Performa Sistem Kendali *Heading Closed Loop* (10°)

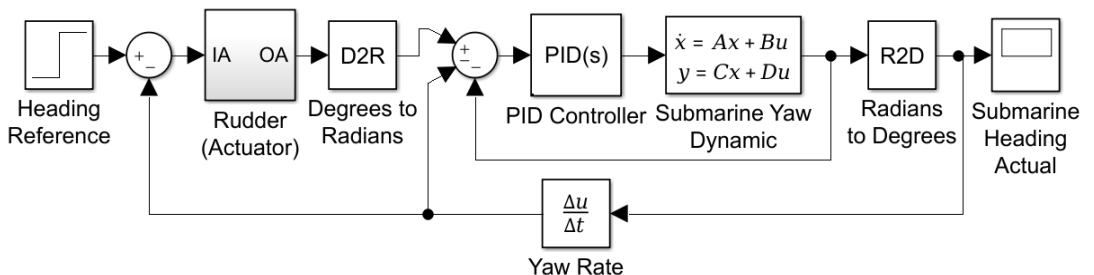
Performa Heading (10 Degree)		
No	Parameter	Closed Loop
1	Rise Time (Second)	19.845
2	Settling Time (Second)	182.92
3	Delay Time (Second)	8.72
4	Peak Time (Second)	40.65
5	Maximum Overshoot (Degree)	34.69
6	Steady State Error (Degree)	-0.05



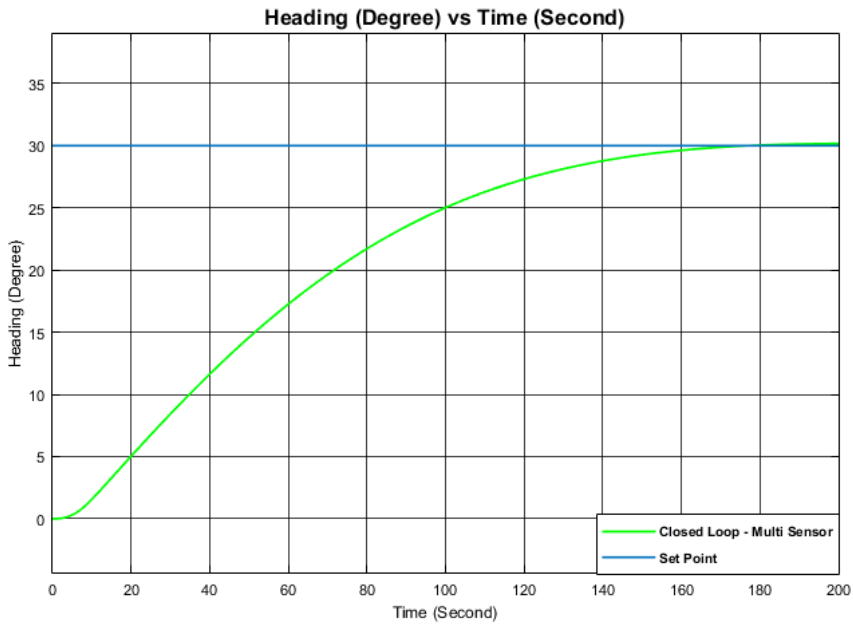
Gambar 4.15 Grafik Respon Sistem Kendali *Heading Closed Loop* (10°)

4.6.3. Analisis Sistem Kendali *Heading Closed Loop-Multi Sensor*

Gambar 4.16 merupakan diagram blok dari sistem kendali *heading closed loop* (siklus tertutup) yang diberikan tambahan sensor *yaw rate* berupa gyroscope yang berfungsi sebagai tambahan sensor pada sistem kendali. Sama seperti sistem kendali *closed loop* sudut *heading* referensi (δ_R) akan diteruskan pada *rudder* sehingga didapatkan nilai sudut aktual *rudder* (δ). Sudut aktual *rudder* selanjutnya akan diteruskan pada PID kontrol yang akan mengontrol masukan sudut aktual *rudder* menuju fungsi *state space* sehingga didapatkan nilai sudut *heading* aktual kapal selam. Nilai sudut *heading* aktual kapal selam yang menunjukkan nilai *error yaw* serta nilai perubahan *yaw* (*yaw rate*) akan diumpun balikkan pada *summing point* sehingga dapat dilakukan koreksi sehingga didapatkan nilai sudut *heading* sesuai *setpoint* yang ditentukan serta memperkecil nilai *error* dari sistem kendali.



Gambar 4.16 Diagram Blok Sistem Kendali *Heading Closed Loop-Multi Sensor*

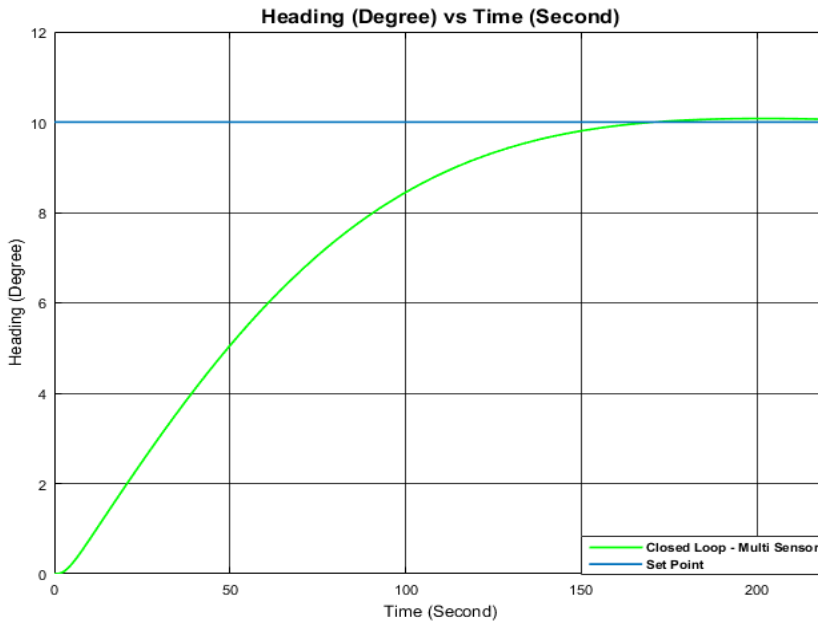


Gambar 4.17 Respon Sistem Kendali *Heading Closed Loop-Multi Sensor* (30°)

Dari hasil simulasi dengan nilai masukan sudut referensi 30° yang ditunjukkan oleh gambar 4.17, sistem kendali *heading closed loop-multi sensor* membutuhkan waktu untuk mencapai *setpoint* (*settling time*) sebesar 177 detik. Sedangkan *delay time* dari sistem kendali adalah sebesar 70.56 detik. Dapat dilihat pada grafik respon menunjukkan bahwa tidak adanya *overshoot*. Selain itu sistem kendali *heading closed loop-multi sensor* memiliki nilai *steady state error* yang kecil yaitu sebesar 0.15° . Berdasarkan hasil simulasi dengan masukan 30° , dapat diketahui sistem kendali *heading closed loop-multi sensor* memiliki performa sistem kendali yang baik. Hal ini ditunjukkan dengan tidak adanya *overshoot* serta *steady state error* yang sangat kecil bahkan dibawah batas standard. Selain itu *settling time* sesuai dengan standard bahkan lebih cepat. performa dari hasil simulasi sistem kendali *heading closed loop-multi sensor* dapat dilihat pada tabel 4.8.

Tabel 4.8 Performa Sistem Kendali *Heading Closed Loop – Multi Sensor* (30°)

Performa <i>Heading</i> (30 Degree)		
No	Parameter	Closed Loop-Multi Sensor
1	Rise Time (Second)	177
2	Settling Time (Second)	177
3	Delay Time (Second)	70.56
4	Peak Time (Second)	-
5	Maximum Overshoot (Degree)	-
6	Steady State Error (Degree)	0.15



Gambar 4.18 Grafik Sistem Kendali *Heading Closed Loop-Multi Sensor* (10°)

Selain itu juga dilakukan simulasi dengan nilai sudut referensi 10° yang ditunjukkan oleh gambar 4.18, sistem kendali *heading closed loop-multi sensor* membutuhkan waktu untuk mencapai *setpoint* (*settling time*) sebesar 170.6 detik. Sedangkan *delay time* dari sistem kendali adalah sebesar 49.42 detik. Dapat dilihat pada grafik respon menunjukkan bahwa tidak adanya *overshoot*. Selain itu sistem kendali *heading closed loop-multi sensor* memiliki nilai *steady state error* yang kecil yaitu sebesar 0.05° .

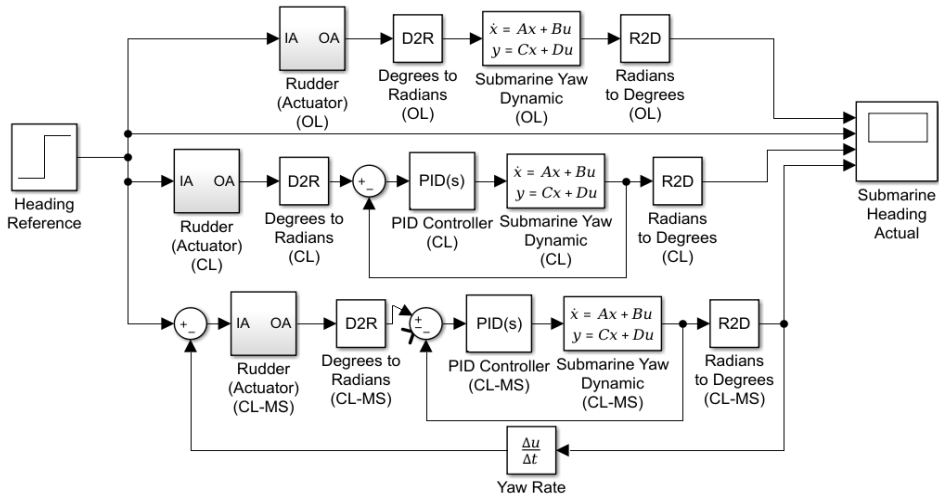
Berdasarkan hasil simulasi dapat disimpulkan sistem kendali *heading closed loop-multi sensor* memiliki performa sistem kendali yang baik baik dengan berbagai masukan sudut *heading* referensi. Hal ini ditunjukkan dengan tidak adanya *overshoot* serta *steady state error* yang sangat rendah serta *settling time* yang sangat singkat

Tabel 4.9 Performa Sistem Kendali *Heading Closed Loop – Multi Sensor* (10°)

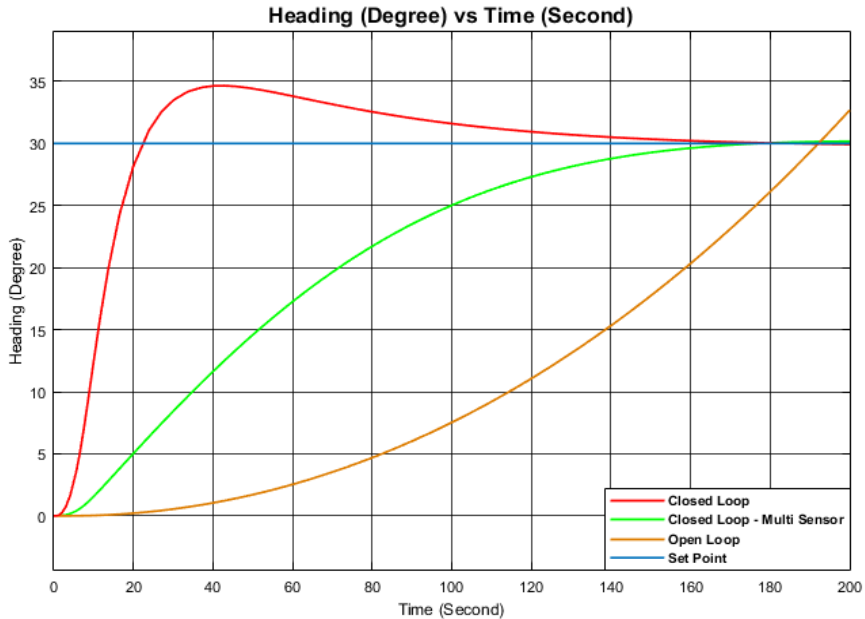
Performa Heading (10 Degree)		
No	Parameter	Closed Loop-Multi Sensor
1	Rise Time (Second)	170.6
2	Settling Time (Second)	170.6
3	Delay Time (Second)	49.42
4	Peak Time (Second)	-
5	Maximum Overshoot (Degree)	-
6	Steady State Error (Degree)	0.05

4.6.4. Analisis Perbandingan Sistem Kendali *Heading* pada *Setpoint* Tetap

Selanjutnya dilakukan perbandingan performa pada masing-masing sistem kendali *heading* baik pada *open loop*, *closed loop*, serta *closed loop-multi sensor*. Simulasi ini bertujuan agar diketahui desain sistem kendali *heading* yang paling akurat serta memiliki respon yang paling sesuai untuk manuver kapal selam. Dapat dilihat pada gambar 4.19 merupakan diagram blok pengujian perbandingan masing-masing sistem kendali *heading*.



Gambar 4.19 Diagram Blok Perbandingan Performa Sistem Kendali *Heading*



Gambar 4.20 Perbandingan Respon Sistem Kendali *Heading*

Pada gambar 4.20 merupakan hasil simulasi dengan masukan sudut *heading* 30° menunjukkan bahwa sistem kendali *heading* yang paling cepat mencapai *setpoint* atau *settling time* paling singkat adalah *closed loop – multi sensor* dengan waktu 177 detik. Sedangkan *settling time* dari sistem kendali *heading closed loop* dan *open loop* berturut-turut adalah 185.5 dan 192.12 detik. Akan tetapi *rise time* serta *delay time* dari sistem kendali *heading closed loop* memiliki waktu yang paling singkat yaitu 13.62 detik dan 29.32 detik, dibandingkan dengan *closed loop-multi sensor* dan *open loop*.

Meskipun memiliki *rise time* paling singkat *overshoot* dari *closed loop* memiliki nilai yang sangat besar yaitu 34.69° atau sekitar 15.64% dari *setpoint* serta mengalami *steady state error* sebesar -0.15°. Berbeda dengan *closed loop*, pada *closed loop-multi sensor* tidak mengalami *overshoot* namun mengalami *steady state error* meskipun dengan nilai yang amat kecil yaitu 0.15°. Sedangkan pada *open loop* tidak dapat mempertahankan nilai pada *setpoint* karena keluaran sistem kendali tidak diumpan balikkan. Sehingga dapat diketahui sistem kendali *closed loop-multi sensor* merupakan sistem kendali yang memiliki respon paling baik serta akurat untuk sistem kendali *heading* atau manuver horizontal pada kapal selam, karena adanya tambahan sensor *yaw rate* pada sistem kendali *closed loop – multi sensor*. Hal ini dibuktikan dengan tidak adanya *overshoot* yang terjadi serta *settling time* yang membutuhkan waktu singkat. Detail perbandingan performa dari masing-masing sistem kendali dapat dilihat pada tabel 4.10.

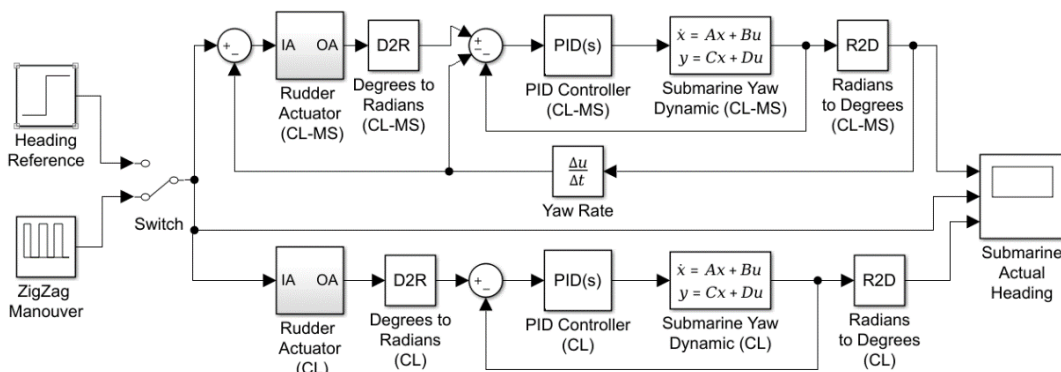
Tabel 4.10 Performa Sistem Kendali *Heading* dengan *Setpoint* tetap

Performa Heading (30 Degree)				
No	Parameter	OL	CL	CL-MS
1	Rise Time (Second)	86.78	13.62	177
2	Settling Time (Second)	192.12	185.5	177
3	Delay Time (Second)	157.373	29.32	70.56
4	Peak Time (Second)	-	43.06	-
5	Maximum Overshoot (Degree)	-	34.69	-
6	Steady State Error (Degree)	-	-0.15	0.15

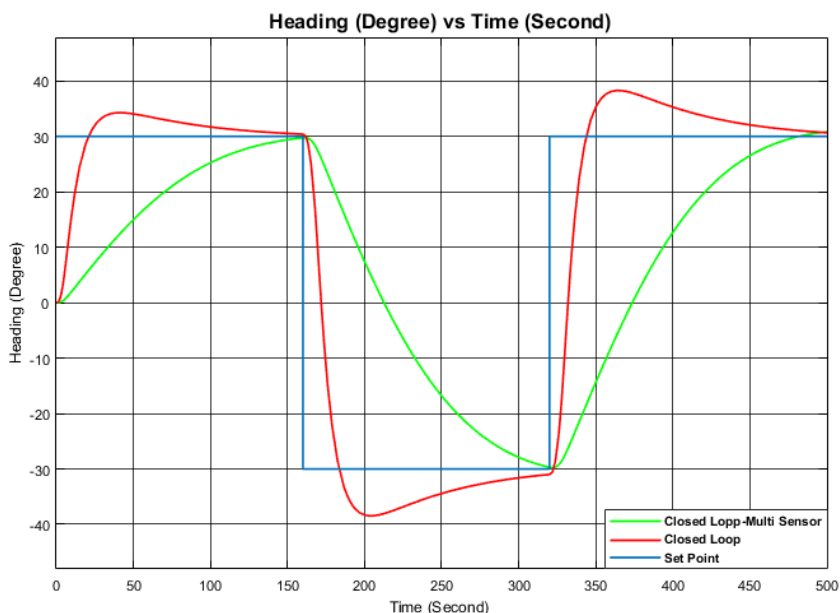
4.6.5. Analisis Perbandingan Sistem Kendali *Heading* pada *Setpoint* Berubah (*Horizontal Zig-Zag Manouver*)

Selain bermanuver dengan kondisi sudut *heading* tetap kapal selam juga melakukan manuver *Zig-Zag* baik pada bidang horizontal maupun vertikal. Manuver *Zig-Zag* dilakukan biasanya pada kondisi operasi tertentu seperti *silent run* dan mode pengejaran. Manuver *Zig-Zag* biasanya dilakukan untuk menghindari deteksi dari kapal lain serta mengelabui kapal lain yang sedang melakukan pengejaran pada kapal selam. Sehingga kemampuan manuver *Zig-Zag* pada sebuah kapal selam amatlah penting agar mampu beroperasi pada mode-mode tertentu dengan baik.

Maka perlu dilakukan simulasi pada desain sistem kendali *heading* untuk mengetahui kemampuan sistem kendali pada saat dilakukan manuver *Zig-Zag* atau perubahan sudut *heading* dari sudut *heading* positif menuju sudut *heading* negatif. Hal ini dilakukan agar dapat diketahui performa dari desain sistem kendali *heading* pada saat dilakukan manuver *Zig-Zag* atau *setpoint* berubah. Dapat dilihat pada gambar 4.21 merupakan diagram blok pengujian sistem kendali *heading* dengan nilai input atau *setpoint* berubah, dengan nilai masukan sudut *heading* awal adalah 30° dan selanjutnya -30° . Pengujian dilakukan pada sistem kendali *heading closed loop* dan *closed loop-multi sensors*.



Gambar 4.21 Diagram Blok Pengujian Manuver *Zig-Zag* Horizontal



Gambar 4.22 Respon Sistem Kendali Dengan Setpoint Berubah (Horizontal Zig-Zag Maneuver)

Dapat dilihat pada gambar 4.22 merupakan grafik respon sistem kendali *heading* dengan nilai masukan sudut *heading* atau *setpoint* berubah. Pada grafik respon dapat dilihat dengan masukan awal berupa sudut *heading* 30° , sistem kendali *closed loop* mengalami *overshoot* yang cukup besar yaitu 34.67° serta *steady state error* sebesar 0.08° , sedangkan sistem kendali *closed loop-multi sensor* tidak mengalami *overshoot* maupun *error steady state* sama sekali. Selain itu sistem kendali *closed loop-multi sensor* juga membutuhkan waktu paling singkat untuk mencapai *setpoint* dibandingkan *closed loop* yaitu 170.7 detik. Namun sistem kendali *closed loop* memiliki *rise time* dan *delay time* yang lebih singkat yaitu 20.8 detik dan 9.56 detik.

Pada masukan sudut *heading* -30° sistem kendali *closed loop* mengalami *overshoot* yang lebih tinggi dibandingkan sebelumnya yaitu mencapai -39.43° sedangkan pada sistem kendali *closed loop-multi sensor* tidak mengalami *overshoot* sama sekali. Kedua sistem kendali baik *closed loop* dan *closed loop-multi sensor* juga mengalami *steady state error* yaitu berturut-turut 0.08° dan 0.5° . Sistem kendali *closed loop-multi sensor* tetap memiliki nilai *settling time* paling singkat yaitu 336.65 detik. Namun sistem kendali *closed loop* tetap memiliki *rise time* dan *delay time* yang lebih singkat.

Dari hasil simulasi sistem kendali *heading* dalam kondisi *setpoint* berubah dapat disimpulkan bahwa sistem kendali *closed loop-multi sensor* merupakan desain sistem kendali dengan respon paling baik dan akurat bagi kendali *heading* kapal selam, hal ini dibuktikan dengan tidak adanya *overshoot* serta *settling time* yang singkat, dan *steady state error* yang kecil. Detail performa dari simulasi sistem kendali *heading* dengan nilai *setpoint* berubah dapat dilihat pada tabel 4.11

Tabel 4.11 Performa Sistem Kendali *Heading* dengan *Setpoint* Berubah

Horizontal Zig-Zag Maneuver Performance				
No	Parameter	Sudut	CL	CL-MS
1	Rise Time (second)	30	20.8	170.7
		-30	194.965	336.65
2	Settling Time (second)	30	172	170.7
		-30	343.5	336.65
3	Delay Time (second)	30	9.56	50.22
		-30	187.9	256.6
4	Peak Time (second)	30	39.65	-
		-30	214.2	-
5	Maximum Overshoot (degree)	30	34.67	-
		-30	39.43	-
6	Steady State Error (degree)	30	0.08	-
		-30	0.5	0.3

4.7. Analisis Sistem Kendali *Diving*

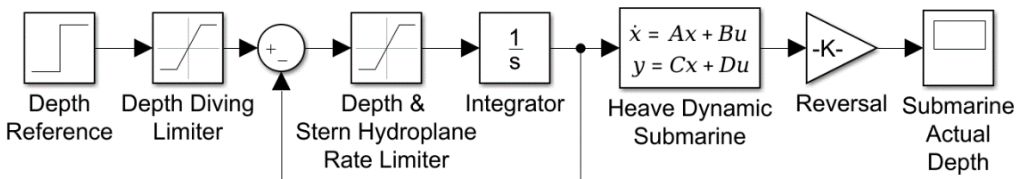
Kapal selam merupakan wahana air yang mampu beroperasi di bawah permukaan air sehingga membutuhkan kemampuan manuver yang baik apabila beroperasi di bawah permukaan air. Sehingga desain sistem kendali *diving* atau kedalaman harus dilakukan simulasi untuk mengatuhui performa dari sistem kendali yang dibuat sehingga diketahui desain sistem kendali yang paling akurat serta memiliki respon yang baik. Desain sistem kendali yang telah dibuat yaitu *open loop*, *closed loop*, serta *closed loop – multi sensor* selanjutnya akan dilakukan simulasi pada software *MATLAB*.

Pada desain sistem kendali *diving* sudut aktuator serta sudut *pitch* dari kapal selam yang diambil adalah sebesar 6° . Sudut *pitch* ini diambil kerana merupakan sudut yang digunakan pada saat operasional kapal selam ketika kapal selam menyelam menuju kedalaman tertentu. Selain itu sudut ini diambil juga karena mempertimbangkan titik kritis dan titik netral pada kapal selam yang amat berpengaruh pada kemampuan manuver kapal selam.

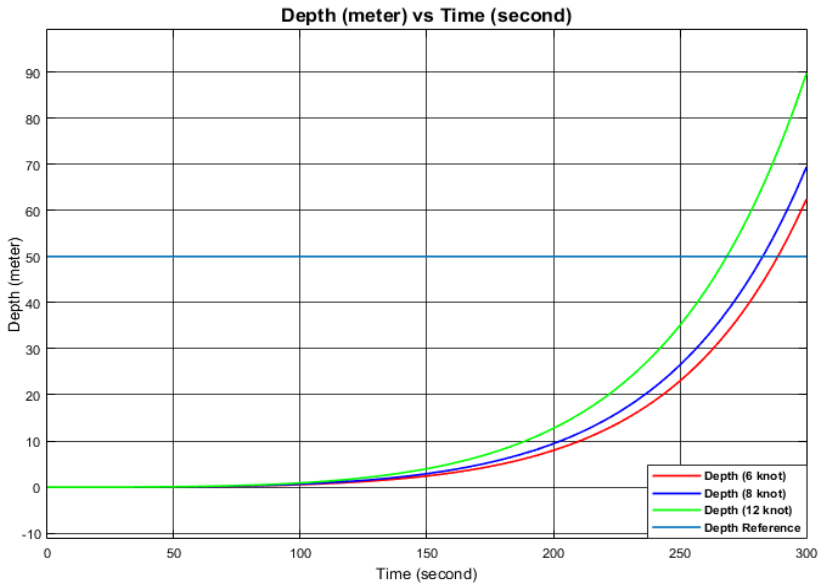
Berbeda dengan sistem kendali *heading* yang dimana nilai kecepatan dianggap konstan, pada sistem kendali *diving* kecepatan dari kapal selam amat berpengaruh hal ini dikarenakan kecepatan kapal selam akan mempengaruhi gaya hidrodinamis maupun gaya berat yang akan bekerja pada kapal selam. Selain itu karena sistem kendali *diving* merupakan fungsi dari perubahan posisi atau kedalaman dari kapal selam maka kecepatan akan sangat berpengaruh pada lama tidaknya waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *setpoint* atau titik yang diinginkan. Sehingga dilakukan simulasi pada beberapa variasi kecepatan yaitu 6, 8, serta 12 knot untuk mengetahui efek kecepatan terhadap performa dari sistem kendali *diving*. Kecepatan tersebut diambil karena merupakan kecepatan operasional pada kondisi *dive*.

4.7.1. Analisis Sistem Kendali *Diving Open Loop*

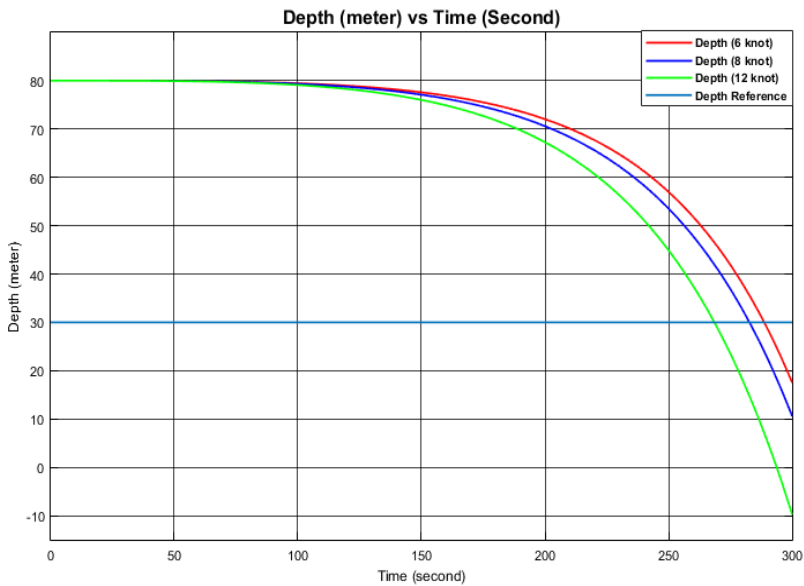
Gambar 4.21 merupakan diagram blok dari sistem kendali *open loop*, dapat dilihat nilai kedalaman referensi (Z) akan direspon oleh aktuator, dimana dari sudut aktuator (δ_H) akan menghasilkan sudut *pitch* (θ) kapal selam dimana sudut yang ditentukan adalah sebesar 6° . nilai sudut *pitch* selanjutnya akan diteruskan menuju fungsi *state space* yang merupakan mewakili dinamika kapal selam pada kondisi *heave* sehingga kapal akan bergerak dan didapatkan nilai kedalaman aktual dari kapal selam.



Gambar 4.23 Diagram Blok Sistem Kendali *Diving Open Loop*



Gambar 4.24 Respon Sistem Kendali *Diving* masukan 50 meter



Gambar 4.25 Respon Sistem Kendali *Diving* masukan -50 meter

Simulasi dilakukan dengan masukan nilai kedalaman *diving* 50 meter dan -50 meter untuk mengetahui performa sistem kendali *diving* dengan masukan kedalaman referensi positif maupun negatif, serta mengetahui apakah fungsi *state space* yang dibuat telah sesuai. Gambar 4.22 dan 4.23 ditunjukkan nilai grafik respon sistem kendali *diving* dengan masukan kedalaman positif dan kedalaman negatif. Dengan nilai kedalaman positif maka sudut *hydroplane* akan bernilai positif kapal selam akan bergerak kearah

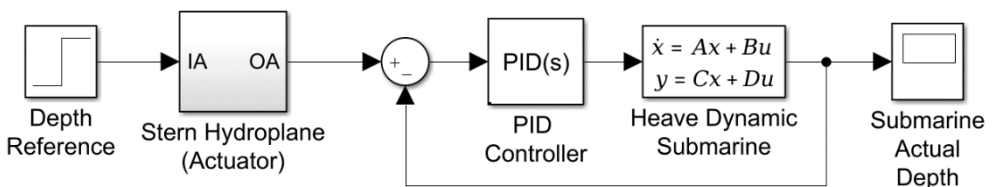
kearah bawah atau ke dalam sedangkan kedalaman referensi negative akan menghasilkan nilai sudut *hydroplane* negatif kapal selam akan bergerak kearah atas atau menuju ke permukaan. Hal ini menunjukkan bahwa fungsi *state space* yang mewakili dinamika kapal selam dalam kondisi *heave* sudah sesuai. Pada grafik respon ditunjukkan untuk mencapai nilai *setpoint* pada kecepatan 6,8, dan 12 knot berturut-turut dibutuhkan waktu 289.7 ,283.72 , dan 269.51 detik. *Delay time* dari sistem kendali *open loop* pada variasi kecepatan 6,8, dan 12 knot berturut-turut adalah 255.05, 248.12, dan 233.75 detik. Selain itu sistem kendali *diving open loop* ini kapal selam tidak dapat mempertahankan pada kedalaman yang telah ditentukan karena tidak ada umpan balik (*feedback*) dari plant. Performa dari sistem kendali *diving open loop* dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4.12 Performa Sistem Kendali *Diving Open Loop*

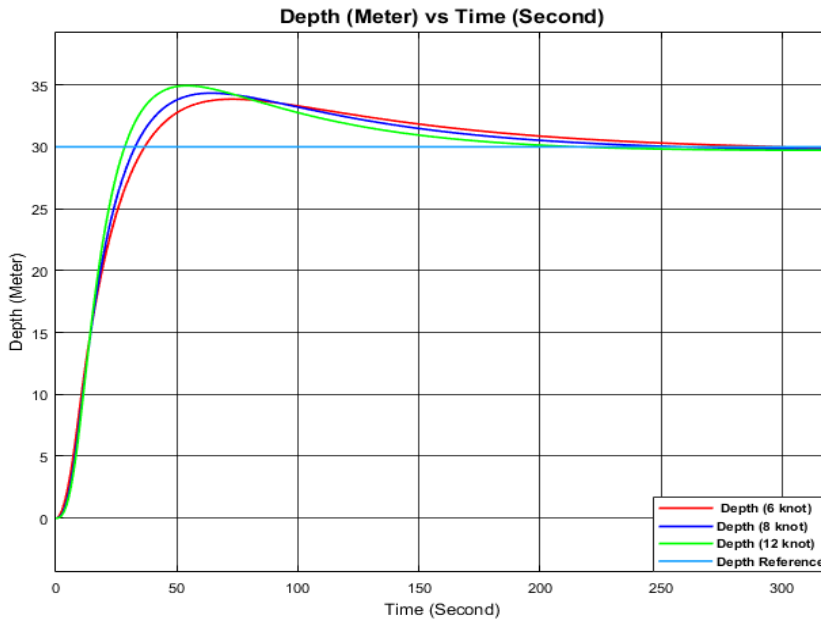
Performa <i>Diving 50 meter 6° Pitch (Open Loop)</i>				
No	Parameter	6 Knot	8 Knot	12 Knot
1	Rise Time (second)	289.7	283.72	269.51
2	Settling Time (second)	289.7	283.72	269.51
3	Delay Time (Second)	255.05	248.12	233.75
4	Peak Time (second)	-	-	-
5	Maximum Overshoot (meter)	-	-	-
6	Steady state error (meter)	-	-	-

4.7.2. Analisis Sistem Kendali *Diving Closed Loop*

Diagram blok dari sistem kendali *diving closed loop* atau siklus tertutup pada gambar 4.24 ,dapat dilihat nilai sudut kedalaman referensi (Z) akan diteruskan pada *hydroplane* dimana dari sudut aktuator (δ_H) akan menghasilkan sudut *pitch* (θ) kapal selam dimana sudut yang ditentukan adalah sebesar 6° . Sudut *pitch* kapal selam akan diteruskan pada PID kontrol yang akan mengontrol masukan sudut *pitch* dan kedalaman referensi menuju fungsi *state space* yang akan mewakili dinamika kapal selam pada kondisi *heave* sehingga didapatkan nilai kedalaman aktual kapal selam. Nilai kedalaman *aktual* kapal selam selanjutnya diumpun balikkan pada *summing point* sehingga didapatkan nilai error *heave* yang akan diteruskan menuju PID kontrol untuk dilakukan koreksi pada luaran (*output*) sistem kendali *diving*.



Gambar 4.26 Diagram Blok Sistem Kendali *Diving Closed Loop*

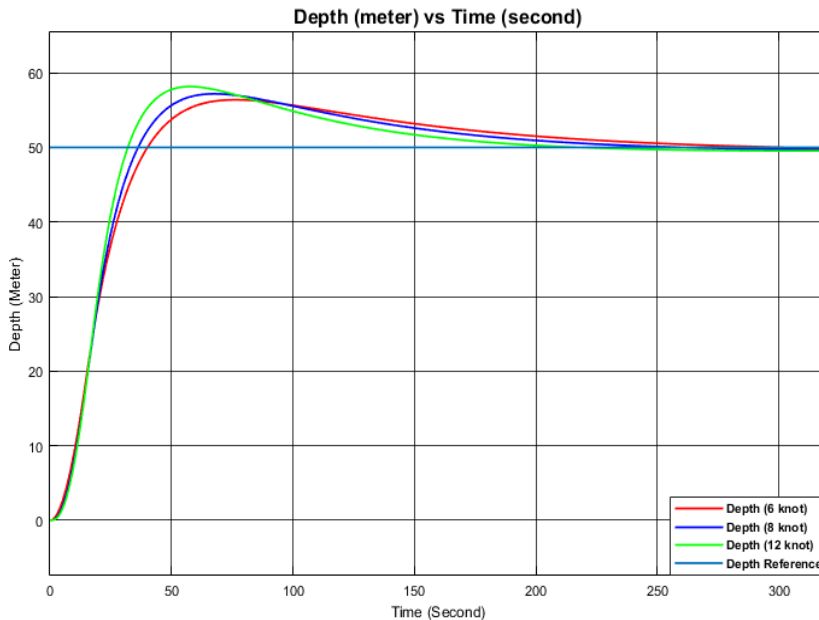


Gambar 4.27 Grafik Respon Sistem Kendali *Diving Closed Loop* (30 m)

Grafik respon pada gambar 4.27 merupakan hasil simulasi sistem kendali *diving closed loop* dengan nilai kedalaman referensi 30 meter. Dari hasil simulasi ditunjukkan bahwa *rise time* pada variasi kecepatan 6,8, serta 12 knot berturut-turut adalah 36.47, 32.82, dan 28.51 detik. Sedangkan *delay time* dari seluruh variasi kecepatan membutuhkan waktu 14 detik. Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *setpoint* pada kecepatan variasi kecepatan berturut-turut adalah 302.1, 258.6, dan 215.5 detik. Dapat dilihat bahwa *delay time*, *rise time*, dan *settling time* akan semakin singkat apabila kecepatan juga meningkat begitu pula sebaliknya. Pada sistem kendali *closed loop* ini dapat dilihat pada grafik respon dimana semakin besar kecepatan semakin besar pula *overshoot* serta *steady state error* yang dialami sistem kendali. Sedangkan rata-rata *steady state error* pada setiap variasi kecepatan adalah berkisar 0.5 – 0.8% dari *setpoint*. Performa dari sistem kendali *diving open loop* dapat dilihat pada tabel 4.13

Tabel 4.13 Performa Sistem Kendali *Diving Closed Loop*

Performa <i>Diving</i> 30 meter 6° Pitch (Closed Loop)				
No	Parameter	6 Knot	8 Knot	12 Knot
1	Rise Time (second)	36.47	32.82	28.51
2	Settling Time (second)	302.1	258.6	215.5
3	Delay Time (Second)	14.38	14.46	14.31
4	Peak Time (second)	72.55	64.32	54.34
5	Maximum Overshoot (meter)	33.85	34.34	34.94
6	Steady state error (meter)	-0.05	-0.2	-0.25



Gambar 4.28 Grafik Respon Sistem Kendali *Diving Closed Loop* (50 m)

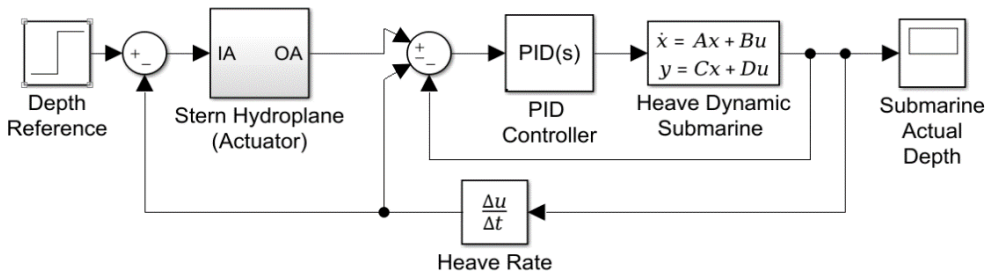
Selain itu juga dilakukan simulasi dengan kedalaman referensi yang berbeda yaitu 50 meter, yang dapat dilihat pada grafik pada gambar 4.28. Dari hasil simulasi ditunjukkan bahwa *rise time* pada variasi kecepatan 6,8,serta 12 knot berturut-turut adalah 40.15, 36.25, dan 32.58 detik. Sedangkan *delay time* dari seluruh variasi kecepatan membutuhkan waktu 17 detik. Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *setpoint* pada kecepatan variasi kecepatan berturut-turut adalah 305.16, 262.7, dan 219.64 detik. Dapat dilihat dari hasil simulasi pada kedalaman referensi yang berbeda sistem kendali *closed loop* memiliki karakteristik yang sama namun memiliki waktu yang berbeda. Pada tabel 4.13 maupun 4.14 dapat dilihat bahwa sistem kendali *diving closed loop* ini memiliki performa yang sesuai dengan standard manuver dari kapal selam, dengan nilai *overshoot* maupun *error steady state* yang rendah serta nilai *settling time* yang singkat.

Tabel 4.14 Performa Sistem Kendali *Diving Closed Loop*

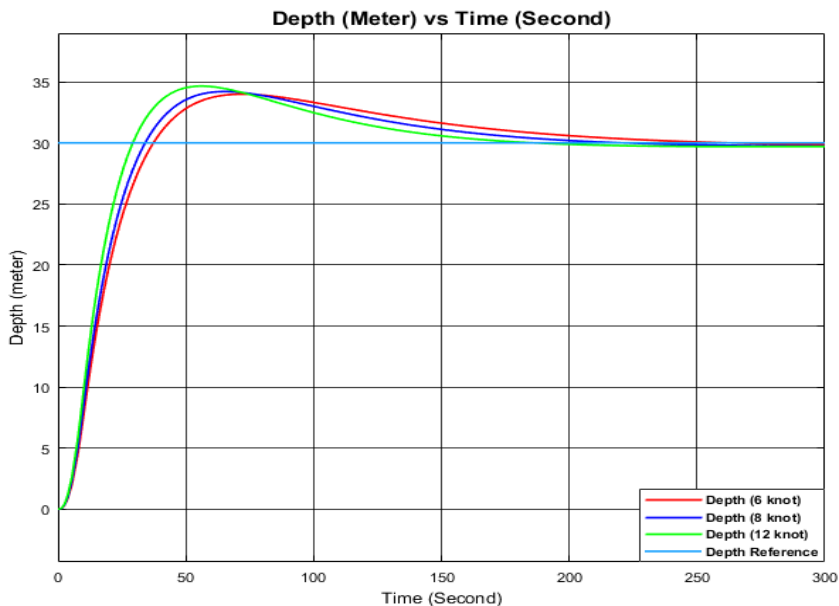
Performa Diving 50 meter 6° Pitch (Closed Loop)				
No	Parameter	6 Knot	8 Knot	12 Knot
1	Rise Time (second)	40.15	36.25	32.58
2	Settling Time (second)	305.16	261.7	218.64
3	Delay Time (Second)	17.82	17.73	17.58
4	Peak Time (second)	76.01	67.51	57.59
5	Maximum Overshoot (meter)	56.38	57.18	58.6
6	Steady state error (meter)	-0.15	-0.3	-0.2

4.7.3. Analisis Sistem Kendali *Diving Closed Loop* – *Multi Sensor*

Gambar 4.26 merupakan diagram blok dari sistem kendali *diving closed loop* (siklus tertutup) yang diberikan tambahan sensor *heave rate* berupa *depth sensor* yang berfungsi sebagai tambahan sensor pada sistem kendali *diving* sehingga didapatkan respon yang lebih baik. Dapat dilihat kedalaman referensi (Z) akan diteruskan pada *hydroplane* dimana dari sudut aktuator (δ_H) akan menghasilkan sudut *pitch* (θ) kapal selam dimana sudut yang ditentukan adalah sebesar 6° . Kedalaman referensi dan sudut *pitch* kapal selam akan diteruskan pada PID kontrol yang akan mengontrol masukan sudut *pitch* dan kedalaman referensi menuju fungsi *state space* yang akan mewakili dinamika kapal selam pada kondisi *heave* sehingga didapatkan nilai kedalaman aktual kapal selam. Nilai kedalaman aktual kapal selam akan dideteksi oleh sensor sehingga didapatkan nilai *error heave* serta *heave rate* yang akan diumpun balikkan pada *summing point* sehingga dapat dilakukan koreksi yang akan menghasilkan kedalaman aktual yang sesuai *setpoint*.



Gambar 4.29 Diagram Blok Sistem Kendali *Diving Closed Loop* – *Multi Sensor*



Gambar 4.30 Respon Sistem Kendali *Diving Closed Loop* – *Multi Sensor* (30 m)

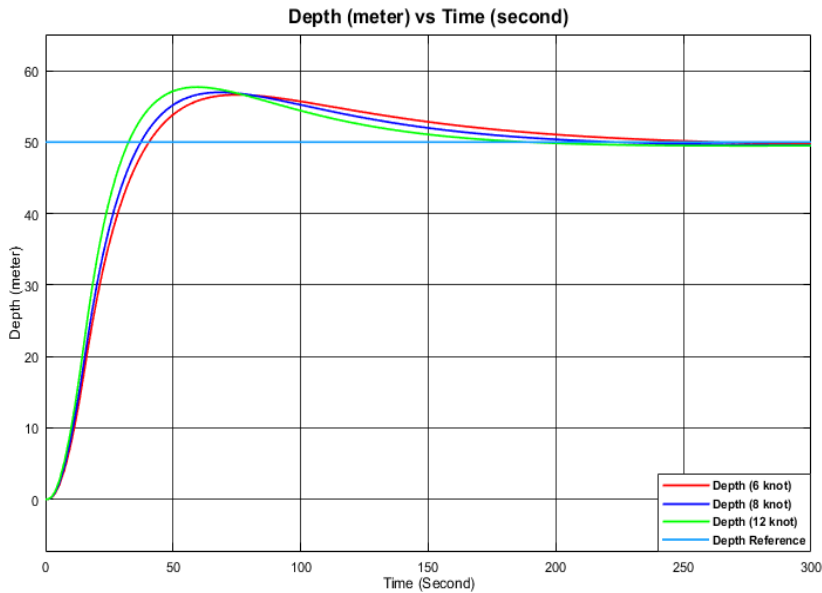
Dari hasil simulasi dengan nilai masukan kedalaman referensi 30 meter, yang ditunjukkan oleh gambar 4.27. Sistem kendali *diving closed loop-multi sensor* membutuhkan waktu untuk mencapai *setpoint* (*settling time*) pada variasi kecepatan 6,8, dan 12 knot berturut-turut membutuhkan waktu 263.2, 221.4, 186.5 detik. Sedangkan *delay time* dari sistem kendali pada setiap variasi kecepatan memiliki selisih sekitar 1 detik dimana yang tercepat adalah pada kecepatan 12 knot dengan *delay time* 13.18 detik. *Rise time* dari sistem kendali *diving* pada variasi kecepatan berturut-turut membutuhkan waktu 37.32, 34.15, dan 29.28 detik. Sehingga dapat diketahui, bahwa sistem kendali *diving closed loop – multi sensor* memiliki karakteristik yang sama dengan sistem kendali *closed loop* bahwa semakin besar kecepatan maka semakin singkat pula waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *rise time*, *delay time*, dan *settling time*. Selain itu semakin besar kecepatan maka semakin besar pula *overshoot* yang terjadi yang tertinggi adalah pada saat kecepatan 12 knot yaitu 34.65 meter.. Detail performa simulasi sistem kendali dapat dilihat pada tabel 4.15.

Tabel 4.15 Performa Sistem Kendali *Diving Closed Loop – Multi Sensor*

Performa Diving 30 meter 6° Pitch (Closed Loop – Multi Sensor)				
No	Parameter	6 Knot	8 Knot	12 Knot
1	Rise Time (second)	37.32	34.15	29.28
2	Settling Time (second)	263.2	221.4	186.5
3	Delay Time (second)	15.37	14.48	13.18
4	Peak Time (second)	71.8	64.55	55.45
5	Maximum Overshoot (meter)	33.95	34.21	34.65
6	Steady state error (meter)	-0.05	-0.25	-0.29

Selain itu juga dilakukan simulasi pada sistem kendali *diving closed loop – multi sensor* pada kedalaman referensi yang berbeda yaitu 50 meter hal ini dilakukan untuk mengetahui respon sistem kendali terhadap nilai kedalaman referensi yang berbeda. Grafik pada gambar 4.27 menunjukkan respon sistem kendali *diving closed loop-multi sensor* pada kedalaman referensi 50 meter. Dapat diketahui bahwa waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *setpoint* (*settling time*) pada variasi kecepatan 6,8, dan 12 knot berturut-turut membutuhkan waktu 267.2, 225.45, 190.5 detik. Sedangkan *delay time* dari sistem kendali pada setiap variasi kecepatan memiliki selisih sekitar 1 detik dimana yang tercepat adalah pada kecepatan 12 knot dengan *delay time* 17.33 detik. *Rise time* dari sistem kendali *diving* pada variasi kecepatan berturut-turut membutuhkan waktu 41.54, 38.33, dan 33.5 detik. Sehingga dapat diketahui bahwa sistem kendali *diving closed loop – multi sensor* memiliki respon karakteristik yang sama pada nilai kedalaman referensi yang berbeda. Selain itu respon sistem kendali *diving closed loop – multi sensor* ini telah sesuai dengan standard kemampuan manuver dari kapal

selam hal ini diketahui dari nilai *overshoot* serta *steady state error* yang rendah serta nilai *settling time* yang singkat hal ini dapat diketahui dari tabel 4.16 yang merupakan nilai performa dari sistem kendali *diving closed loop – multi sensor* pada nilai kedalaman referensi 50 meter.



Gambar 4.31 Respon Sistem Kendali *Diving Closed Loop – Multi Sensor* (50 m)

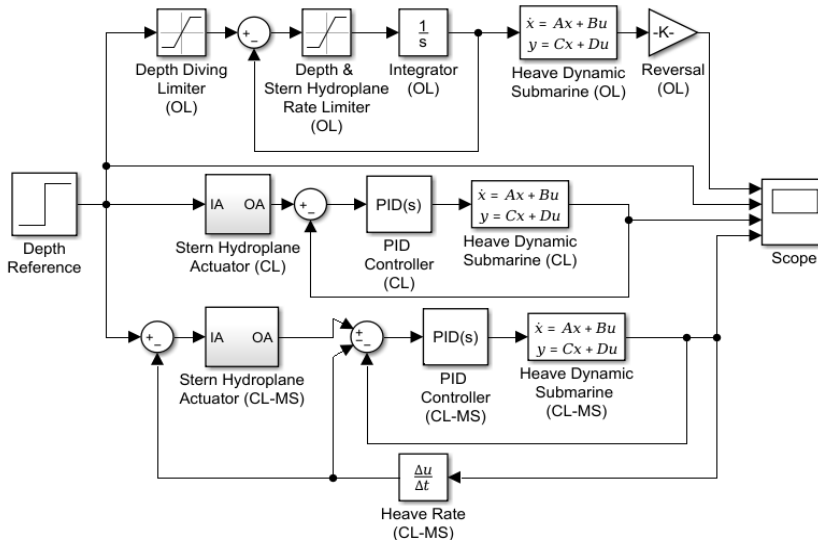
Tabel 4.16 Performa Sistem Kendali *Diving Closed Loop – Multi Sensor*

Performa Diving 50 meter 6° Pitch (Closed Loop – Multi Sensor)				
No	Parameter	6 Knot	8 Knot	12 Knot
1	Rise Time (second)	40.54	37.33	32.60
2	Settling Time (second)	266.2	224.4	190.5
3	Delay Time (second)	17.82	17.73	17.58
4	Peak Time (second)	76.01	67.51	57.59
5	Maximum Overshoot (meter)	56.38	57.18	58.6
6	Steady state error (meter)	-0.15	-0.3	-0.42

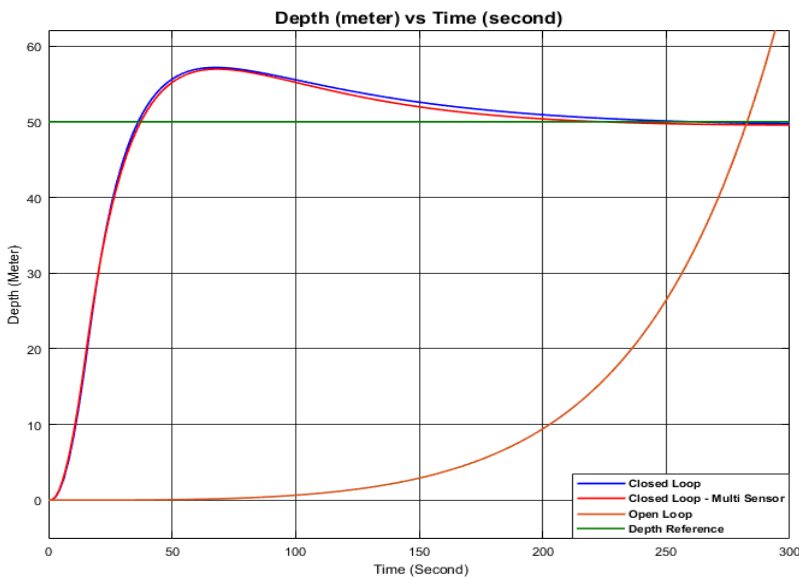
4.7.4. Analisis Perbandingan Sistem Kendali *Diving* pada *Setpoint* Tetap

Sama seperti sistem kendali *heading* pada sistem kendali *diving* juga dilakukan perbandingan performa pada masing-masing sistem kendali *heading* baik pada *open loop*, *closed loop*, serta *closed loop-multi sensor*. Simulasi ini bertujuan agar diketahui desain sistem kendali *diving* atau manuver kedalaman yang paling akurat serta memiliki respon yang paling sesuai untuk manuver kedalaman kapal selam. Pengujian ini sangat penting dilakukan karena pada sistem kendali *diving* atau kedalaman sangat amat

mempengaruhi perubahan mode operasi kapal selam yaitu pada posisi *surface* atau *snorkel* menuju mode operasi *silent run* maupun mode pengejaran, sehingga dibutuhkan kemampuan manuver serta respon sistem kendali kedalaman yang responsive dan sesuai dengan standard. Dapat dilihat pada gambar 4.28 merupakan diagram blok pengujian perbandingan masing-masing sistem kendali *diving*.



Gambar 4.32 Diagram Blok Perbandingan Performa Sistem Kendali *Diving*



Gambar 4.33 Perbandingan Respon Sistem Kendali *Diving*

Simulasi dilakukan dengan *setpoint* atau nilai kedalaman referensi sebesar 50 meter serta kecepatan yang diambil adalah sebesar 8 knot. Pada

gambar 4.29 hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem kendali *diving* atau kedalaman yang paling cepat mencapai *setpoint* atau *settling time* paling singkat adalah *closed loop – multi sensor* dengan waktu 224.4 detik. Sedangkan *settling time* dari sistem kendali *diving closed loop* dan *open loop* berturut-turut adalah 262.7 dan 283.7 detik. Akan tetapi *rise time* serta *delay time* dari sistem kendali heading *closed loop* memiliki waktu yang paling singkat yaitu 37.25 detik dan 38.33 detik, dibandingkan dengan *closed loop-multi sensor* dan *open loop*.

Meskipun memiliki *rise time* maupun *delay time* paling singkat *overshoot* dari *closed loop* memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan *overshoot* yang dialami oleh *closed loop-multi sensor*. *Overshoot* dari sistem kendali *closed loop* mencapai 57.2 meter sedangkan pada *closed loop – multi sensor* hanya memiliki sedikit perbedaan yaitu sebesar 57.3 meter. Namun nilai *steady state error* dari sistem kendali *closed loop – multi sensor* sedikit lebih besar dari *closed loop* dimana *closed loop – multi sensor* memiliki *steady state error* sebesar 49.62 atau 0.076% dari *setpoint* sedangkan *closed loop* sebesar 49.7 atau 0.06% dari *setpoint*. Sedangkan pada *open loop* tidak dapat mempertahankan nilai pada *setpoint* karena keluaran sistem kendali tidak diumpan balikkan, sehingga tidak bisa dibandingkan pula performanya.

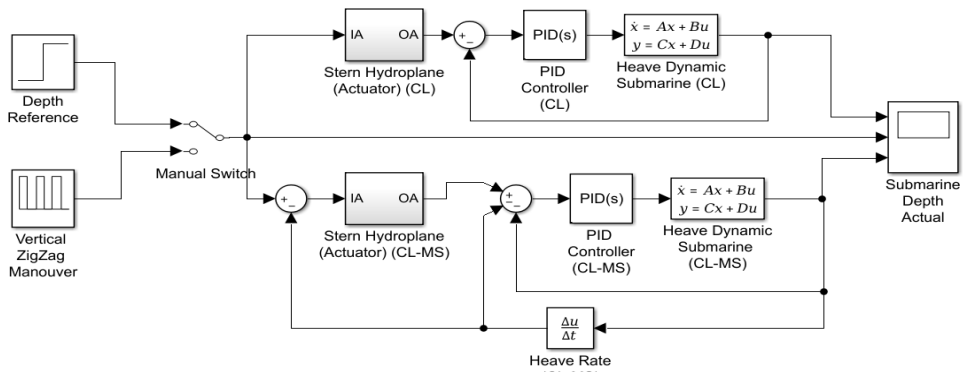
Sehingga dapat diketahui sistem kendali *closed loop-multi sensor* merupakan sistem kendali yang memiliki respon paling baik, akurat, serta sesuai dengan standard manuver dari kapal selam untuk sistem kendali *diving* atau manuver vertikal pada kapal selam. Hal ini dibuktikan dengan kecilnya nilai *overshoot* yang terjadi bila dibandingkan dengan *closed loop* serta *settling time* yang membutuhkan waktu yang lebih singkat. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan sensor *heave rate* yang berupa *depth sensor* pada sistem kendali *diving* menghasilkan respon sistem kendali yang lebih baik, akurat serta cepat. Detail perbandingan performa dari masing-masing sistem kendali dapat dilihat pada tabel 4.13.

Tabel 4.17 Performa Sistem Kendali *Diving* dengan *Setpoint* tetap

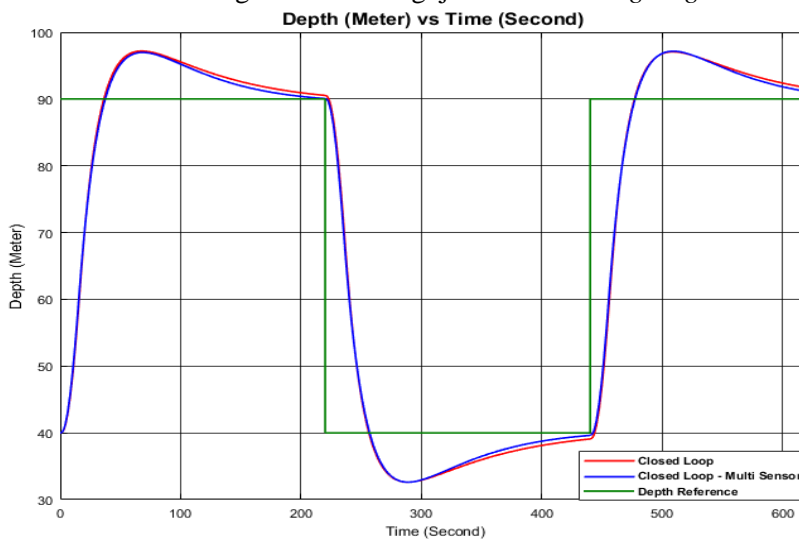
Perbandingan Performa <i>Diving</i> 50 meter 6° Pitch				
No	Parameter	OL	CL	CL-MS
1	Rise Time (Second)	86.78	13.62	177
2	Settling Time (Second)	192.12	185.5	177
3	Delay Time (Second)	157.373	29.32	70.56
4	Peak Time (Second)	-	43.06	-
5	Maximum Overshoot (Degree)	-	34.69	-
6	Steady State Error (Degree)	-	-0.15	0.15

4.7.5. Analisis Perbandingan Sistem Kendali *Diving* pada *Setpoint* Berubah (*Vertical Zig-Zag Manouver*)

Selain bermanuver serta bergerak pada kedalaman tetap kapal selam juga melakukan manuver *Zig-Zag* pada bidang vertikal yang biasanya pada saat kondisi tertentu seperti menghindari deteksi kapal permukaan maupun kondisi lainnya sehingga harus dilakukan perubahan mode operasi dari *snorkel* atau *surface* menuju mode *silent run* pada kedalaman tertentu dan akan kembali berubah menuju mode *snorkel* ketika kondisi telah aman. Maka perlu dilakukan simulasi pada desain sistem kendali *diving* untuk mengetahui kemampuan sistem kendali pada saat dilakukan manuver *Zig-Zag* saat terjadi perubahan kedalaman menuju kedalaman tertentu sehingga diketahui performa dari desain sistem kendali *diving* yang telah dibuat. Dapat dilihat pada gambar 4.30 merupakan diagram blok pengujian sistem kendali *diving* dengan nilai input atau *setpoint* berubah, dengan nilai masukan kedalaman referensi awal adalah 50 meter dan selanjutnya -50 meter simulasi dilakukan pada posisi kedalaman awal kapal selam adalah 40 meter serta nilai kecepatan kapal selam sebesar 8 knot. Pengujian dilakukan pada sistem kendali *heading closed loop* dan *closed loop-multi sensors*.



Gambar 4.34 Diagram Blok Pengujian Manuver *Zig-Zag* Vertikal



Gambar 4.35 Diagram Blok Pengujian Manuver *Zig-Zag* Vertikal

Dapat dilihat pada gambar 4.31 merupakan grafik respon sistem kendali *diving* dengan nilai masukan kedalaman referensi atau *setpoint* berubah. Pada grafik respon dapat dilihat dengan masukan awal berupa kedalaman referensi awal sebesar 50 meter. Kedua sistem kendali yaitu *closed loop* dan *closed loop – multi sensor* mengalami *overshoot* yang memiliki nilai sebesar 57.18 meter dan 56.98 meter. Selain itu sistem kendali *closed loop* juga mengalami *steady state error* sebesar 0.9 %, sedangkan sistem kendali *closed loop-multi sensor* tidak mengalami *error steady state* sama sekali. Selain itu sistem kendali *closed loop-multi sensor* juga membutuhkan waktu paling singkat untuk mencapai *setpoint* dibandingkan *closed loop* yaitu sepanjang 224.5 detik. Namun sistem kendali *closed loop* memiliki *rise time* dan *delay time* yang lebih singkat yaitu 36.31 detik dan 17.62 detik

Pada masukan kedalaman referensi -50 meter, kedua sistem kendali *closed loop* maupun *closed loop – multi sensor* mengalami *overshoot* yang yaitu sebesar -64.5 meter dan -64.05 meter. Kedua sistem kendali baik *closed loop* dan *closed loop-multi sensor* juga mengalami *steady state error* yaitu berturut-turut sebesar 3% dan 0.9%. Sistem kendali *closed loop-multi sensor* tetap memiliki nilai *settling time* paling singkat yaitu 449.9 detik. Namun sistem kendali *closed loop* tetap memiliki *rise time* dan *delay time* yang lebih singkat.

Dari hasil simulasi sistem kendali *heading* dalam kondisi *setpoint* berubah dapat disimpulkan bahwa sistem kendali *closed loop-multi sensor* merupakan desain sistem kendali dengan respon paling baik dan akurat bagi sistem kendali *diving* kapal selam, hal ini dibuktikan dengan tidak adanya *overshoot* serta *settling time* yang singkat, dan *steady state error* yang kecil.. Detail performa dari simulasi sistem kendali *heading* dengan nilai *setpoint* berubah dapat dilihat pada tabel 4.14

Tabel 4.0.18 Performa Sistem Kendali *Diving* dengan *Setpoint* Berubah

Vertical Zig-Zag Manouver Performance (8 knot, 6° Pitch)				
No	Parameter	Depth	CL	CL-MS
1	Rise Time (second)	50	36.31	37.32
		-50	261.32	261.85
2	Settling Time (second)	50	261.7	224.5
		-50	462.1	449.9
3	Delay Time (second)	50	17.63	17.83
		-50	253.44	253.82
4	Peak Time (second)	50	67.5	68.62
		-50	292.5	294.2
5	Maximum Overshoot (meter)	50	57.18	56.98
		-50	-64.5	-64.05
6	Steady State Error (meter)	50	0.45	-
		-50	1.5	0.45

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari desain sistem kendali *heading* dan *diving* pada kapal selam berbasis PID kontrol adalah sebagai berikut:

1. Desain sistem kendali *heading* kapal selam yang berbasis PID kontrol dengan konsep *closed loop – multi sensor* yang menggunakan dua sensor (*error yaw* dan *yaw rate*) memiliki performa yang akurat serta sesuai standard manuver. Hal ini dibuktikan dengan hasil simulasi dengan masukan 30° didapatkan nilai *settling time* selama 177 detik. serta tidak terjadi *overshoot*. Selain itu sistem kendali *closed loop – multi sensor* memiliki nilai *steady state error* yang rendah yaitu hanya sebesar 0.5% apabila dibandingkan dengan konsep lainnya.
2. Desain sistem kendali *diving* kapal selam yang berbasis PID kontrol dengan konsep *closed loop – multi sensor* yang menggunakan dua sensor (*error heave* dan *heave rate*) juga memiliki performa yang akurat. Hal ini dibuktikan dengan hasil simulasi dengan masukan kedalaman 50 meter dan kecepatan 8 knot pada sudut pitch 6° didapatkan nilai *settling time* selama 224.4 detik serta nilai *overshoot* yang masih dibawah nilai toleransi. Selain itu sistem kendali *closed loop – multi sensor* memiliki nilai *steady state error* yang rendah yaitu hanya sebesar 0.9% apabila dibandingkan dengan konsep lainnya.
3. Desain sistem kendali *heading* dan *diving* pada kapal selam menggunakan konsep *closed loop – multi sensor* memiliki performa yang sesuai dengan standard manuver kapal selam hal ini dibuktikan dengan nilai *settling time* yang lebih singkat dibandingkan rata-rata kapal selam pada umumnya, serta rendahnya nilai *overshoot* dan *steady state error*. sehingga sangat sesuai diaplikasikan pada kapal selam yang membutuhkan respon sistem kendali yang akurat.

5.2. Saran

Saran yang dapat digunakan untuk menyempurnakan penelitian ini yang dapat dilakukan pada penilitan selanjutnya adalah:

1. Dilakukan perancangan sistem kendali manuver kapal selam tidak hanya dengan konsep autopilot namun juga dengan konsep *real-time*
2. Dalam perancangan sistem kendali manuver kapal selam dapat menggunakan kontroler jenis lain selain kontroler PID seperti kontrol logika *fuzzy* dan *Neural Network Controller* atau juga bisa mengkombinasikan dua kontroler seperti PID – *fuzzy* dan *neuro - fuzzy*.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Thor I. Fossen. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamic and Motion Control*. Norwegia : Trondheim, 2011.
- [2] Richard C. Dorf and Robert H. Bishop. *Modern Control System*, 12th Edition. New Jersey : Upper Saddle River, 2011.
- [3] Ong Li Koon, Liu Chee Kong, and Toh Chee Wee. *Introduction to Submarine Design*. Singapore, 2011.
- [4] A.F Molland dkk. "Chapter 8: Maneuvering", *Maritime Engineering Reference Book*. UK: Southampton, 2008.
- [5] Martin Renilson. "Chapter 3 : Maneuvering and Control", *Submarine Hydrodynamic*, 2nd Edition. Australia : Tasmania, 2018
- [6] Erik Lind and Magnus Meijer. "Simulation and Control of Submarine". MSc Thesis. Departement of Automatic Control. Lund University. Lund, Sweden. 2014.
- [7] Minghui Wang dkk. "Hybird Intelegent Control for Submarine Stabilization", *International Journal of Advance Robotic System*. January 2013.
- [8] Katsuhiko Ogata. "Chapter 10 : PID Control and Introduction to Robust Control", *Modern Control Engineering*, 5th Edition. New Jersey: Uppers Saddle River, 2010
- [9] C Fureby dkk. *Experimental and Numerical Study of Generic Conventional Subamrine at Yaw 10°*. *Ocean Engineering*, Vol.116, pp.1-20, April 2016.
- [10] J. Van Amerongen dkk. "Criteria for Optimum Steering of Ships", in *Symposium on Ship Steering Automatic Control*, Jun. 25 – 27 . 1980
- [11] J. Van Amerongen dkk. "Gradient Based Model Reference Adaptive Autopilot For Ships". *IFAC Proceedings*, Vol. 8 . Issue.1, Part.1, pp.655-662, August 1975.
- [12] DNV-GL, "Part 4 Sub-Surface Ship, Chapter 1 Submarines", *Rules For Classification Naval Vessels*. Oslo : DNV-GL , 2015
- [13] Michael S.T. and Franz S.H., *Maneuvering and Control of Marine Vehicles*, Massachusetts : Cambridge, 2003.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

LAMPIRAN A

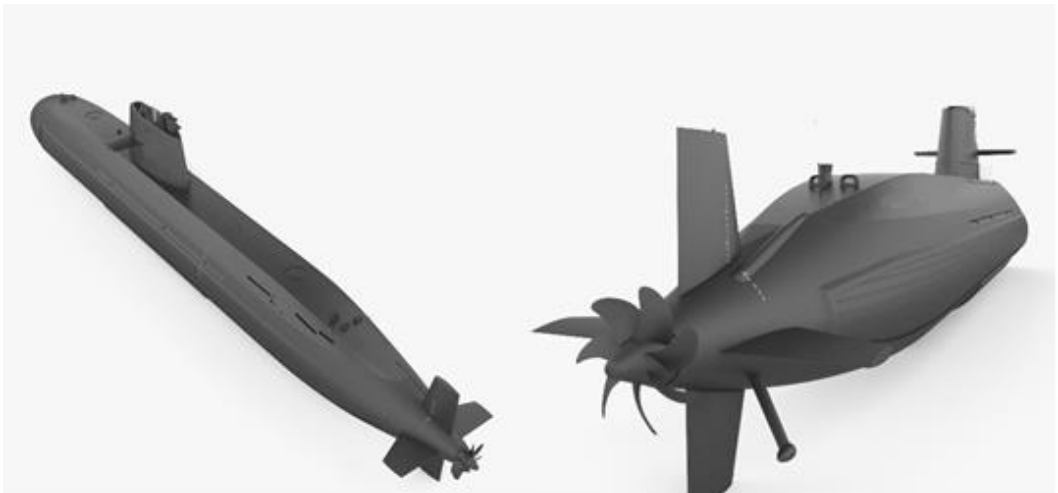
Desain 3D Model Kapal Selam Bagian Haluan dan Depan



Desain 3D Model Kapal Selam (Tampak Samping)



Desain 3D Model Kapal Selam (Tampak Atas dan Belakang)

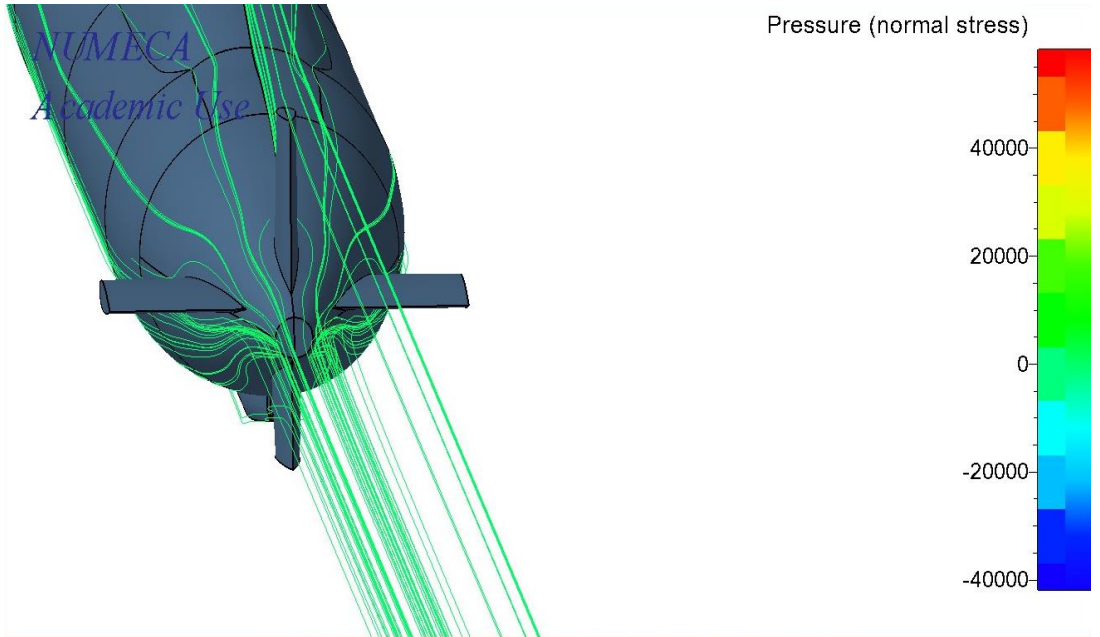


“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

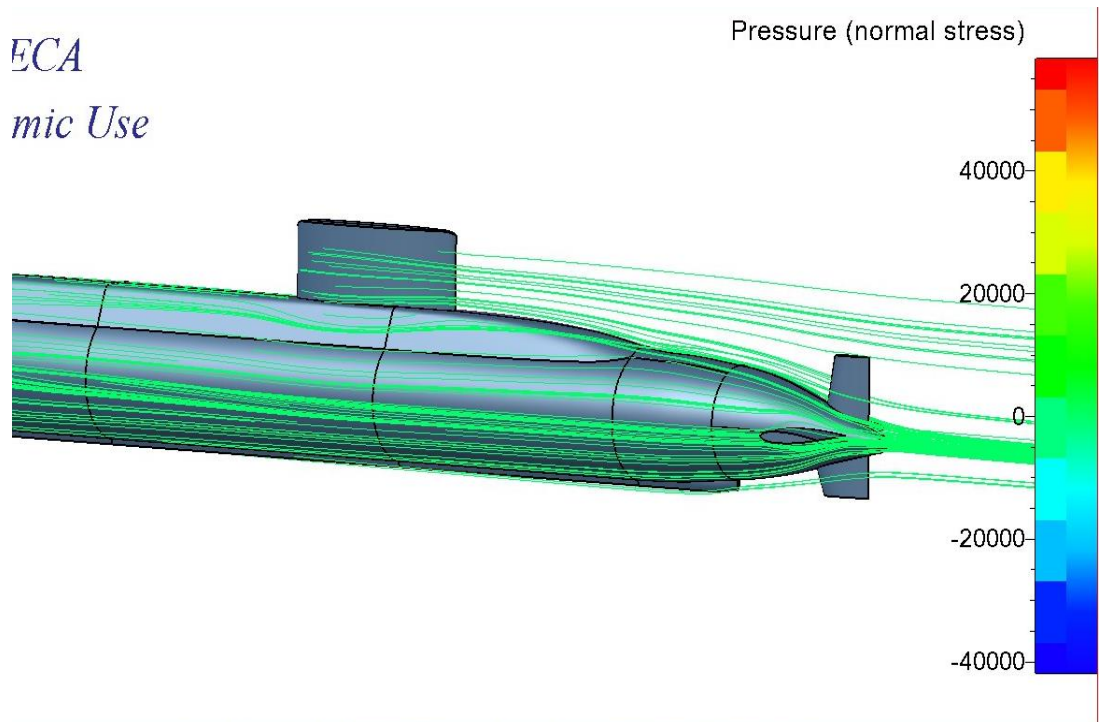
LAMPIRAN B

Simulasi CFD Menggunakan *Maxsurf Fan Marine*

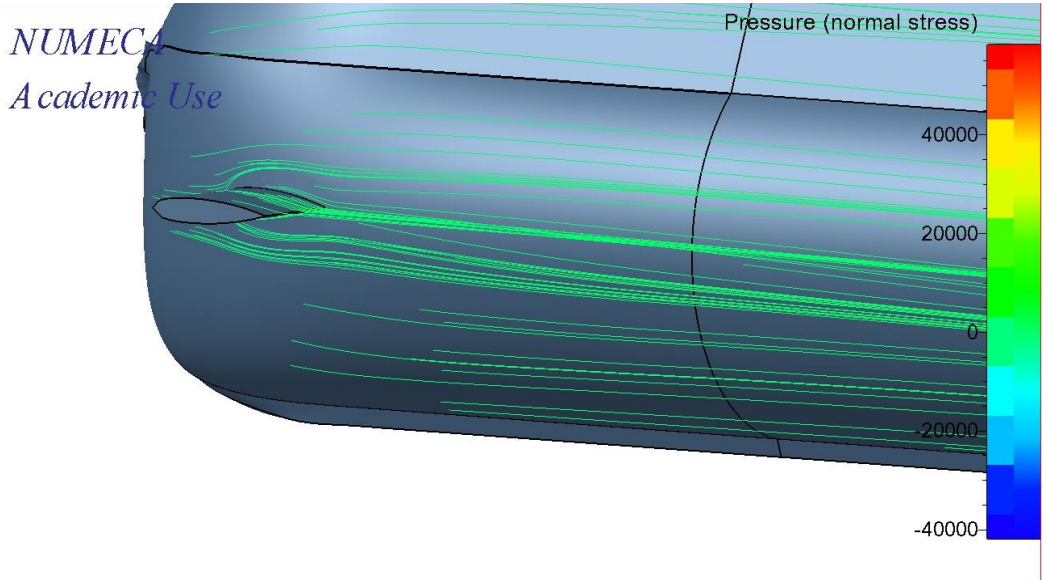
Simulasi Pada *Rudder dan Stern Hydroplane*



Simulasi Pada *Hull*



Simulasi Pada *Bow Hydroplane*



LAMPIRAN C

Tabel Hasil Simulasi CFD

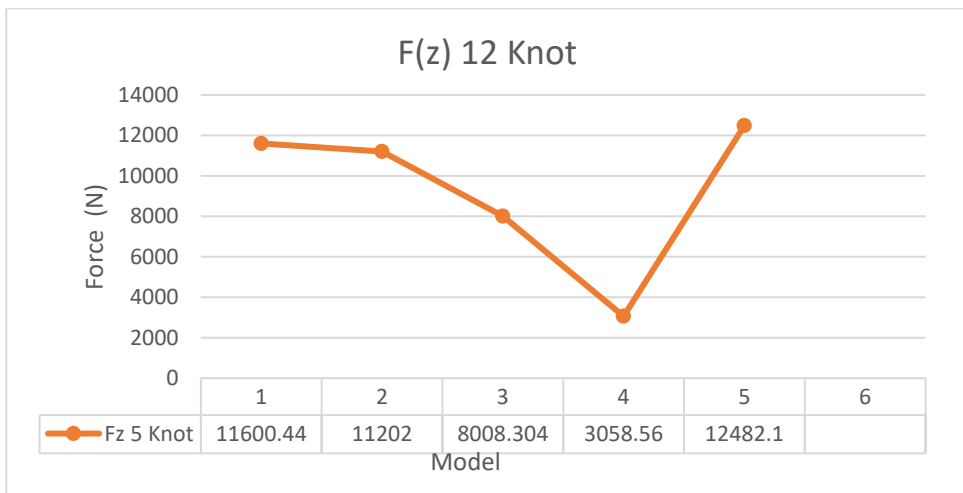
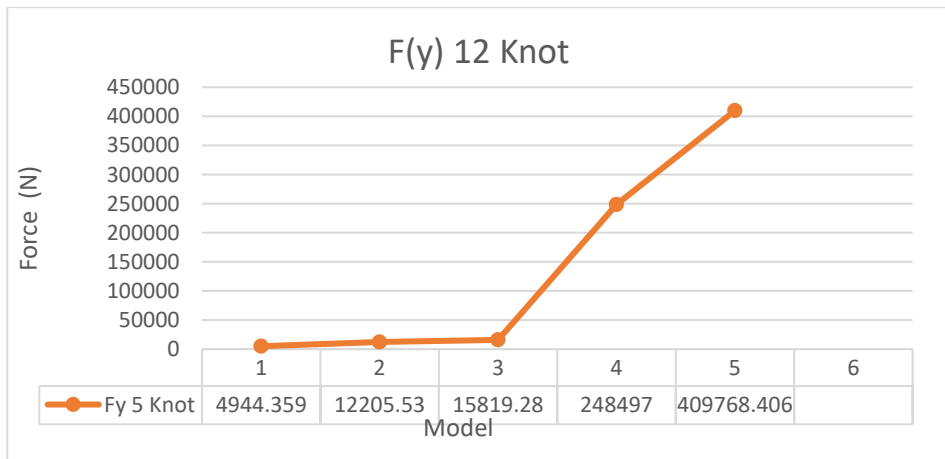
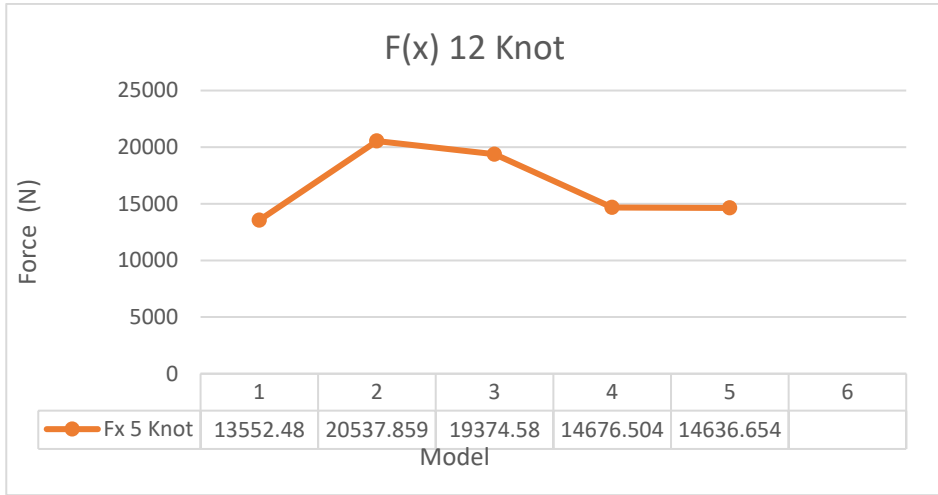
6 knot						
Model	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
	(N)	(N)	(N)	(Nm)	(Nm)	(Nm)
HEN	- 20030.85 9	13034.4 8	9542.63 7	- 62888.57 8	- 350539.81 25	- 128124.39 8
HEA	- 20527.16	10375.5	11578.6 3	- 66039.25	- 441653.90 6	-225821
HEB	- 19439.47	15774.2 4	8054.43	- 61660.89	- 376195.09 3	- 102448.31 25
HV0	- 15079.81 82	231501	3018.80 2	- 1106142. 75	-76344.28	- 1624875.2 5
HV5	-14667.5	332840. 18	12815.0 06	- 1241945. 62	171231.26 4	-3132674

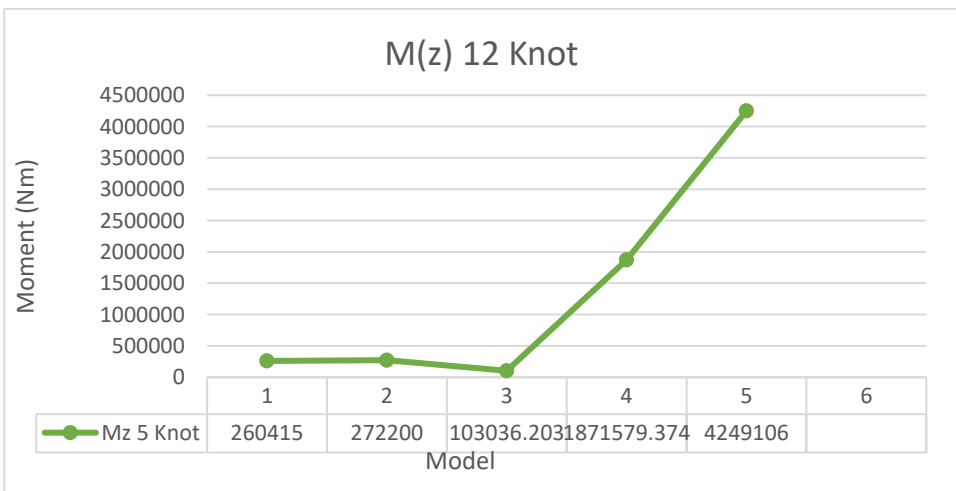
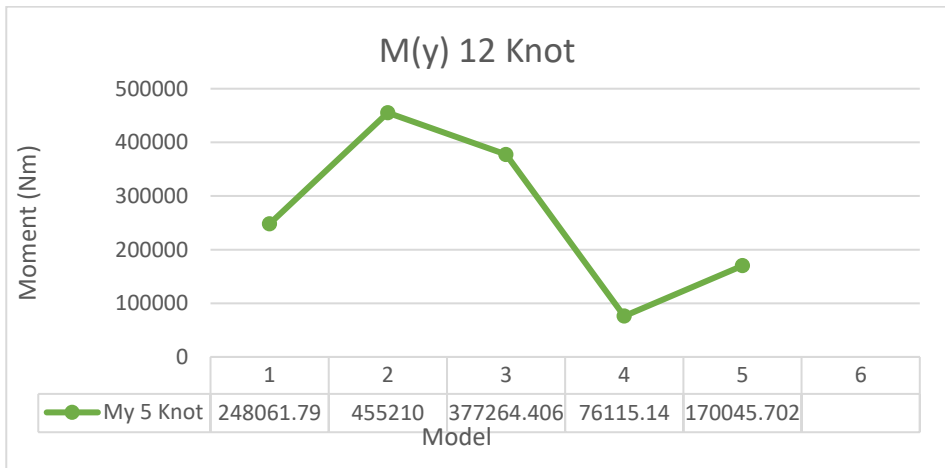
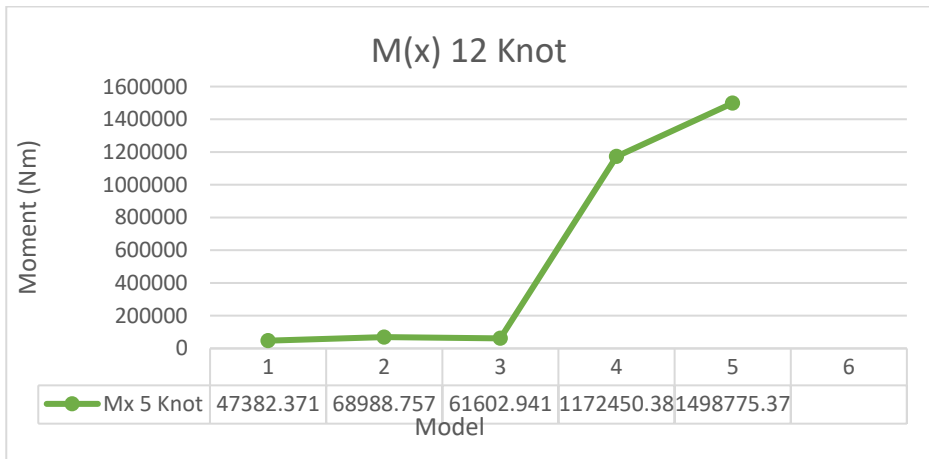
8 knot						
Model	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
	(N)	(N)	(N)	(Nm)	(Nm)	(Nm)
HEN	- 14443.2 09	3457	11912.66	-56037	-12010.48	109504
HEA	- 20245.3 9	12994.30 9	12448.20 99	- 726204. 4	- 436517.68 7	-297039.9
HEB	- 19404.6 09	15757.99	8030.597	- 61454.2 81	- 376754.81 25	- 102104.79 6
HV0	- 14698.1 92	236348.2 04	3036.238	- 1125068	- 75862.476	- 1695186.3 75
HV5	- 14664.1 62	384647.1 8	- 12784.50 4	- 1414988	172564.20 2	-3884814

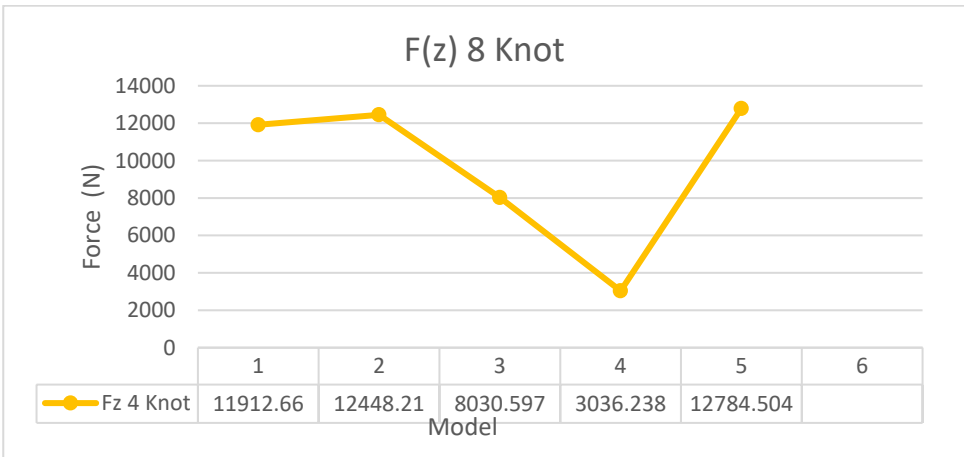
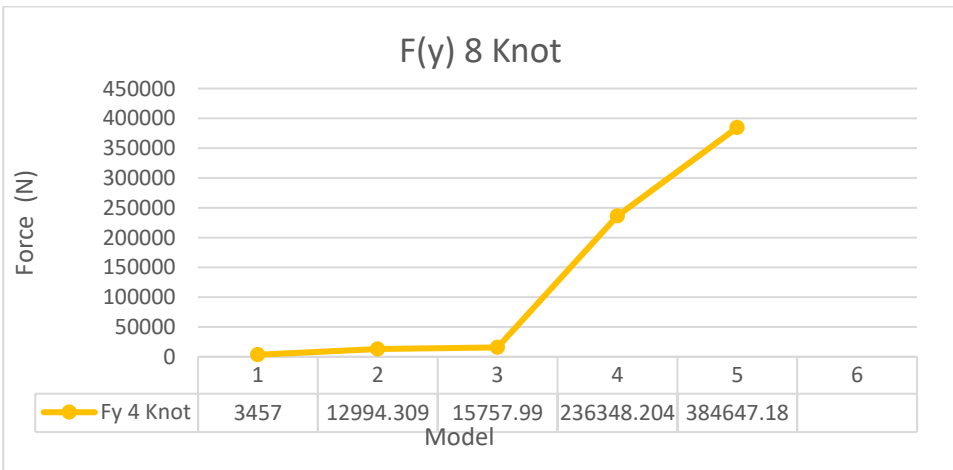
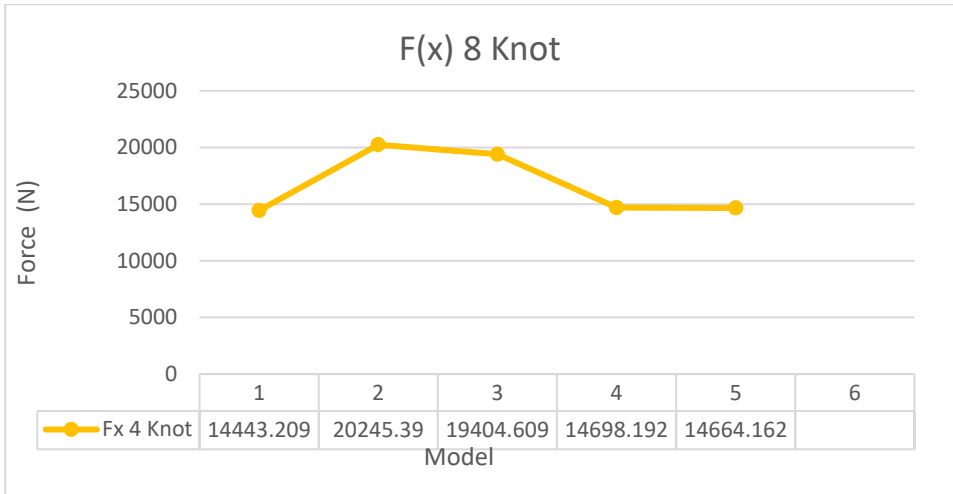
12 knot						
Model	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Mx (Nm)	My (Nm)	Mz (Nm)
HEN	- 13552.4 8	4944.359	116000. 44	- 47382.371	- 248061.7 9	260415
HEA	- 20537.8 59	12205.53	11202	- 68988.757	-455210	-272200
HEB	- 19374.5 8	15819.28	8008.30 4	- 61602.941	- 377264.4 06	- 103036.20 3
HV0	- 14676.5 04	248497	3058.56	- 1172450.3 75	- 76115.14	- 1871579.3 74
HV5	- 14636.6 54	409768.4 06	-12482.1	- 1498775.3 74	170045.7 02	-4249106

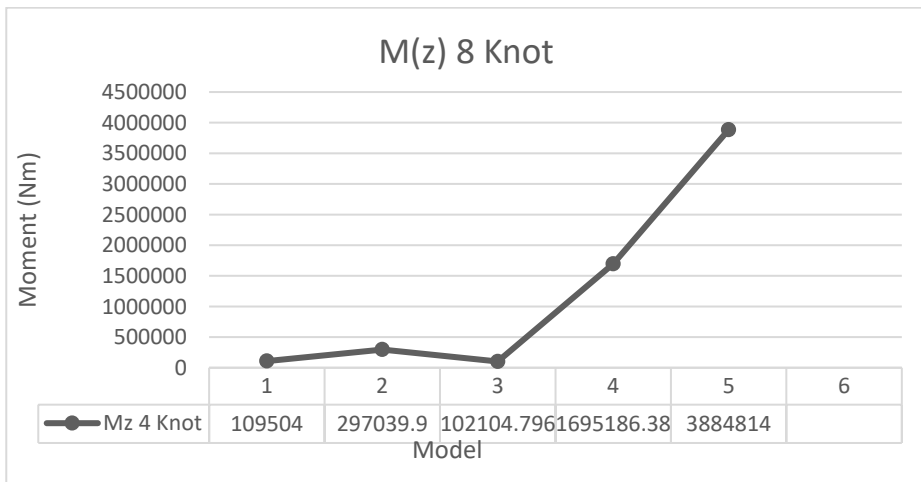
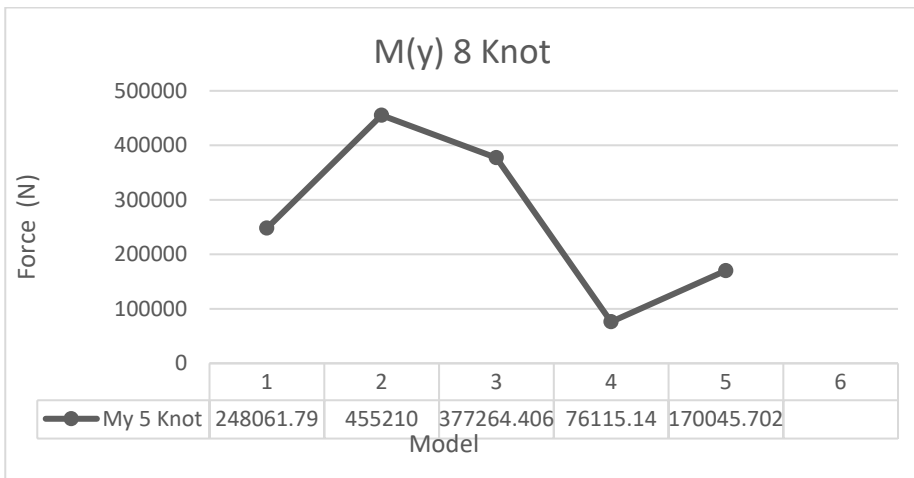
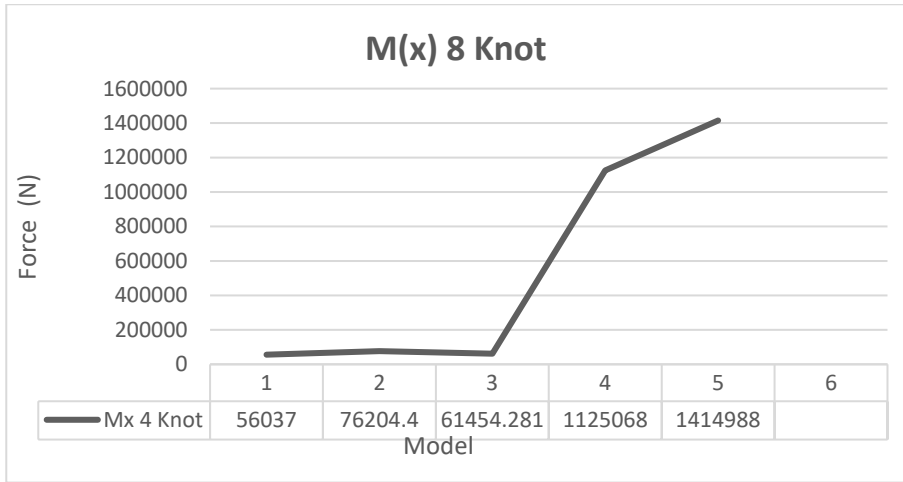
LAMPIRAN D

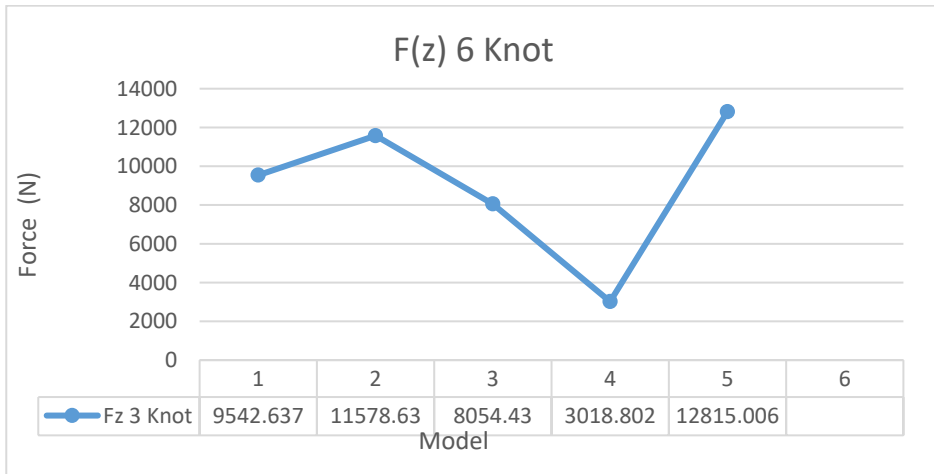
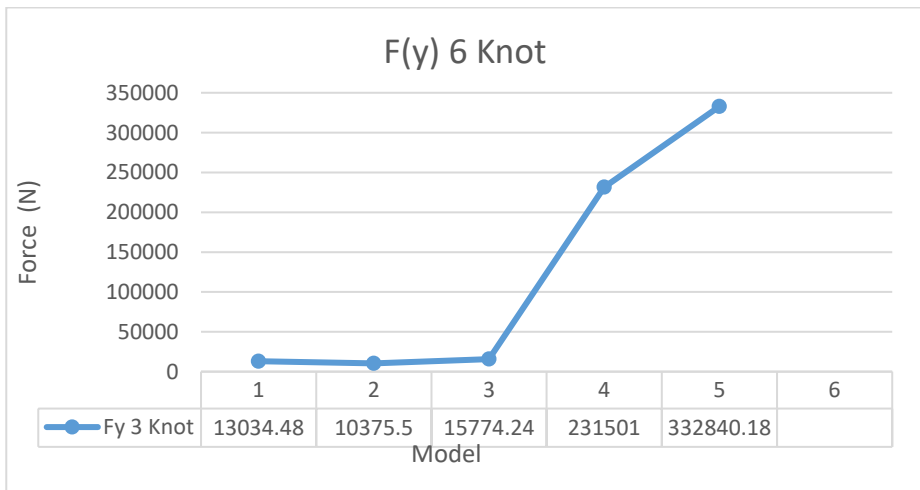
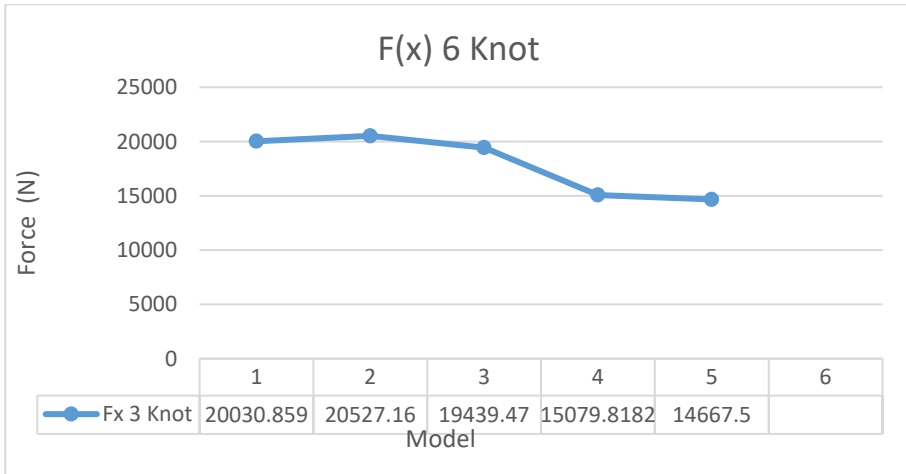
Grafik Hasil Simulasi CFD

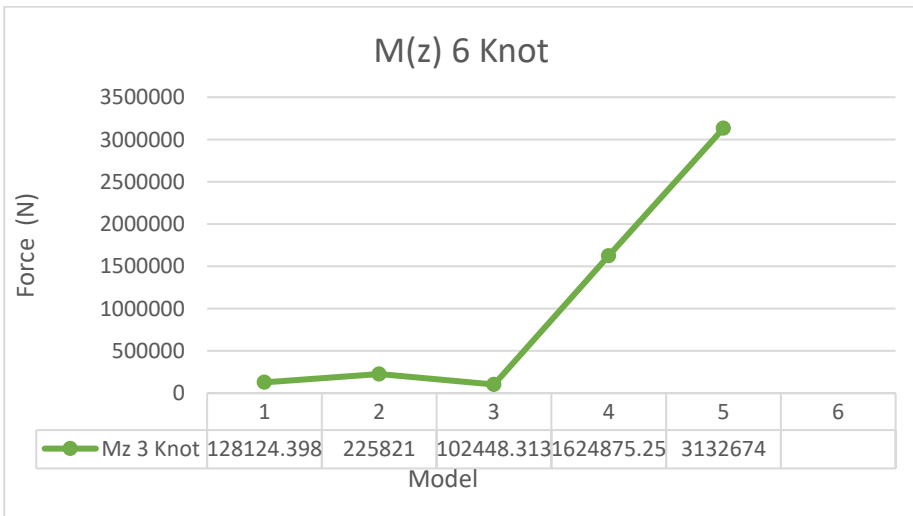
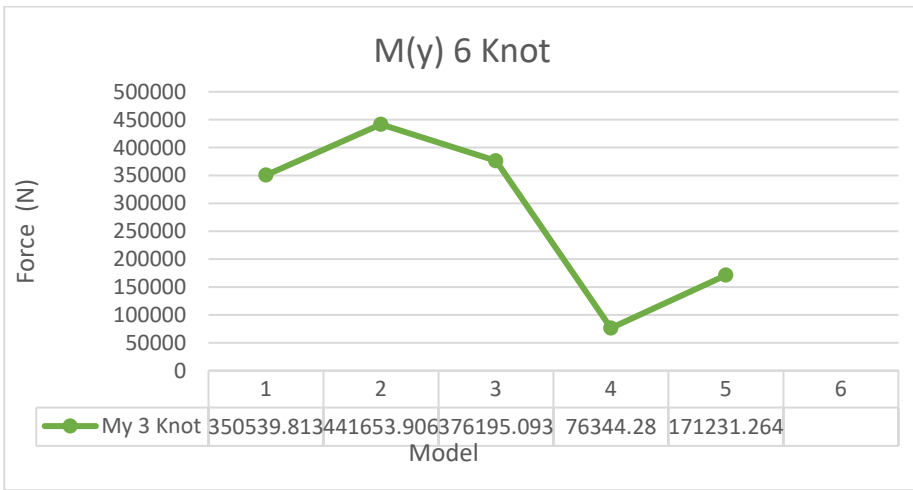
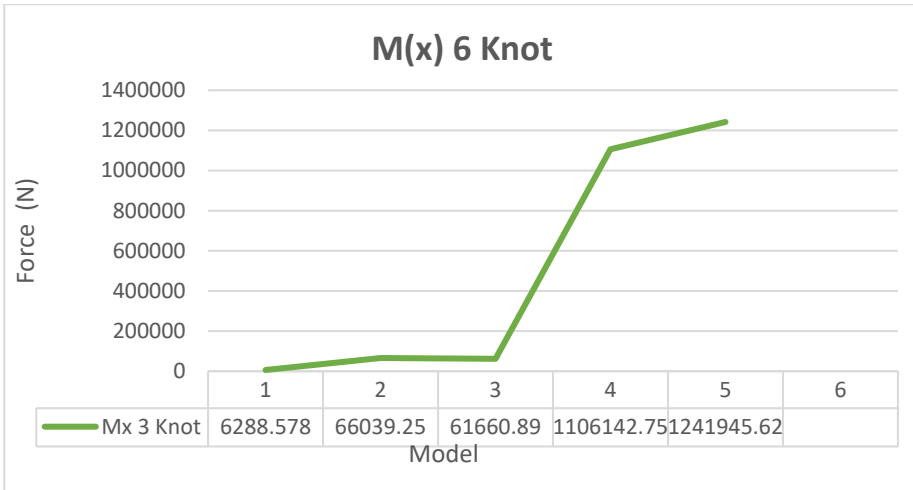




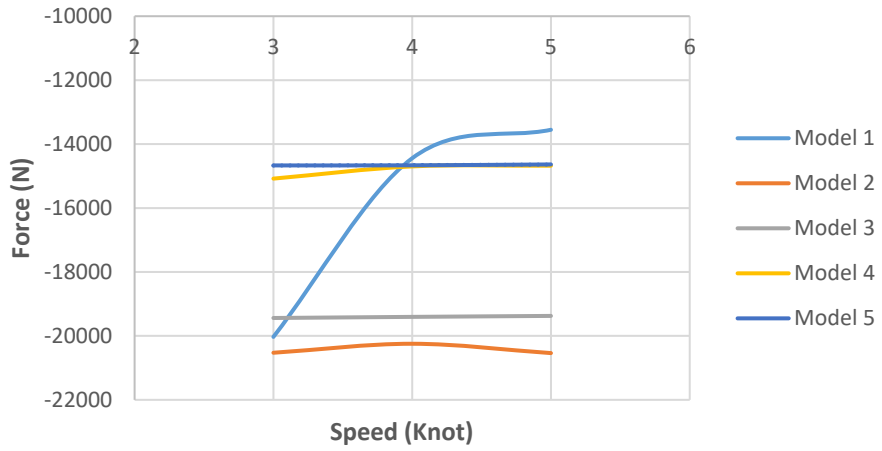








Grafik Perbandingan Fx



LAMPIRAN E

Heading Control Formulation

1. Merumuskan Persamaan Sistem Kendali Heading

$M\dot{v} + N(u_o)v = \tau \gg \gg$ Persamaan utama sistem kendali heading

Dimana:

- $M\dot{v}$ = Matriks Inersia
- $N(u_o)v$ = Matriks Redaman
- τ = Matriks Input Kontrol

Matrik Inersia ($M\dot{v}$)

$$M\dot{v} = \begin{pmatrix} m - Y_{\dot{v}} & m x_g - Y_{\dot{r}} & 0 \\ m x_g - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix}$$

Matriks Redaman ($N(u_o)v$)

$$N(u_o)v = \begin{pmatrix} -Y_v & m u_o - Y_r & 0 \\ -N_v & m x_g - u_o & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ v \\ \psi \end{pmatrix}$$

Matriks Input Kontrol (τ)

$$\tau = \begin{pmatrix} -Y_{\delta} \\ -N_{\delta} \\ 0 \end{pmatrix} \delta_R$$

2. Persamaan sistem kendali dalam bentuk *state space*

Persamaan state space dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu = Ax + B\delta_R \\ y &= Cx + Du = C^T x + 0 \end{aligned}$$

Dimana nilai dari x dan y merupakan matriks berikut:

$$x = \begin{pmatrix} v \\ v \\ \psi \end{pmatrix}; y = \psi$$

Sehingga persamaan kendali heading dapat diubah menjadi persamaan state space berikut

$$M\dot{v} + N(u_o)v = \tau$$

$$M\dot{v} + N(u_o)v = B \delta$$

$$M\dot{v} = -N(u_o)v + B \delta$$

$$\dot{v} = M^{-1} - N(u_o)v + M^{-1} B \delta$$

3. Matriks Sistem Kendali Heading dalam bentuk *state space*

Dari persamaan state space diatas maka dapat dirumuskan matriks sistem kendali heading adalah sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m' - Y'_{\dot{v}} & m' x'_g - Y'_{\dot{r}} & 0 \\ m x'_g - N'_{\dot{v}} & I_z - N'_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} - \begin{pmatrix} -Y'_{\dot{v}} & m' u'_o - Y'_{\dot{r}} & 0 \\ -N'_{\dot{v}} & m' x'_g - u'_o & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \psi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m' - Y'_{\dot{v}} & m' x'_g - Y'_{\dot{r}} & 0 \\ m x'_g - N'_{\dot{v}} & I_z - N'_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -Y'_{\delta} \\ -N'_{\delta} \\ 0 \end{pmatrix} \delta_R$$

Sehingga dengan memasukkan koefisien hidrodinamis, inersia, kecepatan serta massa dari kapal selam pada matriks tersebut didapatkan matriks state space. Berikut adalah masing-masing nilai dari koefisien non dimensional pada sistem kendali heading:

No	Koefisien	Nilai	Pengkali	Hasil
1	$Y'_{\dot{r}}$	0.268	0.001	0.00027
2	$Y'_{\dot{v}}$	-25.259	0.001	-0.0253
3	$Y'_{\dot{r}}$	7.984	0.001	0.00798
4	$Y'_{\dot{v}}$	-60.300	0.001	-0.0603
5	$Y'_{\delta R}$	4.037	0.001	0.00404
6	$N'_{\dot{r}}$	-1.273	0.001	-0.0013
7	$N'_{\dot{v}}$	0.661	0.001	0.00066
8	$N'_{\dot{r}}$	-4.217	0.001	-0.0042
9	$N'_{\dot{v}}$	-15.501	0.001	-0.0155
10	$N'_{\delta R}$	-1.882	0.001	-0.0019
11	m'	13.800637	0.001	0.0138
12	u'_o	1000	0.001	1
13	I'_z	0.7217849	0.001	0.00072
14	x_g	46300	0.001	46.3

Maka berikut merupakan persamaan matriks setelah koefisien hidrodinamis serta berbagai koefisien lainnya disubstitusikan kedalam matriks:

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} m' - Y'_v & m' x'_g - Y'_r & 0 \\ m' x'_g - N'_v & I_z - N'_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \\
 &\quad - \begin{pmatrix} -Y'_v & m' u'_o - Y'_r & 0 \\ -N'_v & m' x'_g - u'_o & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ v \\ \psi \end{pmatrix} \\
 &\quad + \begin{pmatrix} m' - Y'_v & m' x'_g - Y'_r & 0 \\ m' x'_g - N'_v & I_z - N'_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -Y'_\delta \\ -N'_\delta \\ 0 \end{pmatrix} \delta_R \\
 \begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0,019245 & -0,270122 & 0 \\ 0,07558 & 0,025967 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ v \\ \psi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0,002423 \\ -0,005257 \\ 0 \end{pmatrix} \delta_R
 \end{aligned}$$

Diving Control Formulation

4. Merumuskan Persamaan Sistem Kendali Diving

$M\dot{w} + N(u_o)w + G\eta = \tau \gg \gg$ Persamaan utama sistem kendali diving

Persamaan diatas dapat disederhanakan dengan memasukkan nilai dari $G\eta$ kedalam matriks $N(u_o)w$, hal ini dikarenakan nilai dari $G\eta$ merupakan faktor dari sudut pitch sehingga didapatkan persamaan baru sebagai berikut:

$M\dot{w} + N(u_o)w = \tau \gg$ Persamaan baru sistem kendali diving

Dimana:

- $M\dot{v}$ = Matriks Inersia
- $N(u_o)v$ = Matriks Redaman
- $G\eta$ = Matriks Gaya Balik atau Restoring Force
- τ = Matriks Input Kontrol

Matrik Inersia ($M\dot{w}$)

$$M\dot{w} = \begin{pmatrix} m' - Z'_{\dot{w}} & -m'x'_g - Z'_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ -m'x'_g - Z'_{\dot{q}} & I'_y - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix}$$

Matriks Redaman ($N(u_o)w$)

$$= \begin{pmatrix} -Z'_{\dot{w}} & -(m' - X'_{\dot{u}})u'_o - Z'_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ (Z'_{\dot{w}} - X'_{\dot{u}})u'_o - M'_{\dot{w}} & m'x'_g u'_o - M'_{\dot{q}} & W\overline{BG}_z \sin \theta & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & u'_o & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{pmatrix}$$

Matriks Input Kontrol (τ)

$$\tau = \begin{pmatrix} -Z_{\delta} \\ -M_{\delta} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \delta_H$$

5. Persamaan sistem kendali dalam bentuk *state space*

Persamaan state space dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu = Ax + B\delta_H \\ y &= Cx + Du = C^T x + 0 \end{aligned}$$

Dimana nilai dari x dan y merupakan matriks berikut:

$$x = \begin{pmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{pmatrix}; y = z$$

Sehingga persamaan kendali Diving dapat diubah menjadi persamaan state space berikut

$$M\dot{w} + N(u_o)w = \tau$$

$$M\dot{v} + N(u_o)w = B \delta$$

$$M\dot{v} = -N(u_o)w + B \delta$$

$$\dot{w} = M^{-1} - N(u_o)w + M^{-1} B \delta$$

6. Matriks Sistem Kendali Diving

Dari persamaan state space diatas maka dapat dirumuskan matriks sistem kendali Diving adalah sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} m' - Z'_w & -m'x'_g - Z'_q & 0 & 0 \\ -m'x'_g - Z'_q & I'_y - M'_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -Z'_w & -(m' - X'_u)u'_o - Z'_q & 0 & 0 \\ (Z'_w - X'_u)u'_o - M'_w & m'x'_g u'_o - M'_q & W\overline{BG}_z \sin \theta & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & u'_o & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -Z'_\delta \\ -M'_\delta \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \delta_H$$

$$\begin{pmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m' - Z'_w & -m'x'_g - Z'_q & 0 & 0 \\ -m'x'_g - Z'_q & I'_y - M'_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} - \begin{pmatrix} -Z'_w & -(m' - X'_u)u'_o - Z'_q & 0 & 0 \\ (Z'_w - X'_u)u'_o - M'_w & m'x'_g u'_o - M'_q & \overline{BG}_z \sin \theta & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & u'_o & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m' - Z'_w & -m'x'_g - Z'_q & 0 & 0 \\ -m'x'_g - Z'_q & I'_y - M'_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -Z'_\delta \\ -M'_\delta \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \delta_H$$

Sehingga dengan memasukkan koefisien hidrodinamis,inersia,kecepatan serta massa dari kapal selam pada matriks tersebut didapatkan matriks state space. Berikut adalah masing-masing nilai dari koefisien non dimensional pada sistem kendali diving:

No	Koefisien	Nilai		
1	Z'_q	-0.315	0.001	-0.00032
2	Z'_w	-16.244	0.001	-0.01624
3	Z'_q	-8.654	0.001	-0.00865
4	Z'_w	-22.052	0.001	-0.02205
5	$Z'_{\delta H}$	-4.115	0.001	-0.00412
6	M'_q	-1.121	0.001	-0.00112
7	M'_w	-0.746	0.001	-0.00075
8	M'_q	-4.362	0.001	-0.00436
9	M'_w	4.856	0.001	0.004856
10	$M'_{\delta H}$	-1.956	0.001	-0.00196
11	m	13.8006372	0.001	0.013801
12	u'_o	1000	0.001	1
13	I_y	0.7217849	0.001	0.000722
14	x_g	46300	0.001	46.3
15	$W' 6 \text{ knot}$	925.236518	0.001	0.925237
16	$W' 8 \text{ knot}$	520.445541	0.001	0.520446
17	$W' 12 \text{ knot}$	231.309129	0.001	0.231309
18	BG_z	311	0.001	0.311
19	X'_u	-0.513	0.001	-0.00051

Maka berikut merupakan persamaan matriks setelah koefisien hidrodinamis serta berbagai koefisien lainnya disubstitusikan kedalam matriks:

$$\begin{pmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m' - Z'_w & -m'x'_g - Z'_q & 0 & 0 \\ -m'x'_g - Z'_q & I'_y - M'_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \\
 - \begin{pmatrix} -Z'_w & -(m' - X'_u)u'_o - Z'_q & 0 & 0 \\ (Z'_w - X'_u)u'_o - M'_w & m'x'_g u'_o - M'_q & \overline{BG}_z \sin \theta & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & u'_o & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{pmatrix} \\
 + \begin{pmatrix} m' - Z'_w & -m'x'_g - Z'_q & 0 & 0 \\ -m'x'_g - Z'_q & I'_y - M'_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -Z'_\delta \\ -M'_\delta \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \delta_H$$

$$\begin{pmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0321 & 1.0074 & 0.0265 & 0 \\ 0.03301 & 0.0385 & 0.0013 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 4.112 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -0.00308 \\ -0.00659 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \delta_H \quad (2.63)$$

$$z = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1) \begin{pmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{pmatrix}$$

PROFIL PENULIS



Muchammad Rifki Abdillah, lahir di Kota Surabaya, Jawa Timur pada tanggal 10 Oktober 1997 merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan sekolah dasar di SD Islam Wachid Hasyim Surabaya, kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 35 Surabaya dan SMA Negeri 17 Surabaya. Setelah lulus dari bangku SMA, Penulis melanjutkan pendidikan ke Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama menempuh pendidikan di Departemen Teknik Sistem Perkapalan ITS, Penulis aktif di berbagai kegiatan keilmiahan dan organisasi kampus. Pada tahun 2017 penulis bergabung menjadi staff Inovasi Karya Himasiskal FTK-ITS serta pada tahun 2019 penulis juga diterima dan menjadi anggota Trainer Keilmiahan ITS, BEM ITS. Di tahun kedua hingga keempat kuliah, penulis mengikuti berbagai lomba karya tulis ilmiah dan berhasil mendapatkan berbagai juara dan penghargaan ajang kompetisi keilmahan nasional. Pada tahun tahun terakhir perkuliahan 2019/2020 penulis berhasil mendapatkan dua medali emas pada ajang 2nd World Invention Technology Expo serta European Exhibition of Creativity and Innovation. Selain itu penulis juga menjadi member sekaligus CEO Laboratorium Marine Electrical and Automation System (MEAS) dan menjadi grader Transformator 3 Phase.

E-mail : danrifzero@gmail.com