



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI GERAK *AUTONOMOUS*  
*UNDERWATER VEHICLE (AUV)* BERBASIS FUZZY-PID DENGAN *PATH*  
*FOLLOWING***

AMALIA FIRGUSEVTIA LISHARD  
NRP. 0231184000004

Dosen Pembimbing:

Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.

Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2022

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - TF 181801**

***DESIGN OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV) MOTION  
CONTROL SYSTEM BASED ON FUZZY-PID WITH PATH FOLLOWING***

**AMALIA FIRGUSEVTIA LISHARD**

**NRP. 02311840000004**

Supervisors:

Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.

Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.

***DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS***

***Faculty of Industrial Technology and System Engineering***

***Institut Teknologi Sepuluh Nopember***

***Surabaya 2022***

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Amalia Fergusetia Lishard  
NRP : 02311840000004  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “**PERANCANGAN SISTEM KENDALI GERAK *AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV)* BERBASIS FUZZY-PID DENGAN *PATH FOLLOWING*”** adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 13 Juli 2022

Yang membuat pernyataan,



Amalia Fergusetia Lishard

NRP. 02311840000004

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI GERAK *AUTONOMOUS UNDERWATER  
VEHICLE (AUV)* BERBASIS FUZZY-PID DENGAN *PATH FOLLOWING***

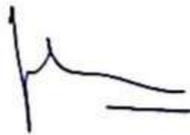
Oleh:

**Amalia Fergusetia Lishard**

NRP. 0231184000004

Surabaya,

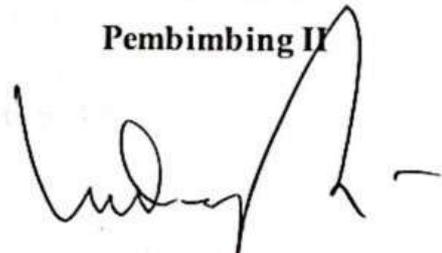
Menyetujui,  
Pembimbing I



**Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.**

NIP. 19660116 198903 2 001

Menyetujui,  
Pembimbing II



**Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.**

NIP. 19580807 198403 1 004

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Fisika FTIRS-ITS



**Dr. Suyanto S.T., M.T.**

NIP. 19711113 199512 1 002

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LEMBAR PENGESAHAN

### PERANCANGAN SISTEM KENDALI GERAK AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV) BERBASIS FUZZY-PID DENGAN PATH FOLLOWING

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Progam Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

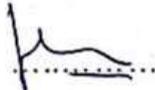
Oleh:

AMALIA FIRGUSEVTIA LISHARD

NRP. 0231184000004

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.



(Pembimbing I)

2. Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.



(Pembimbing II)

3. Prof. Totok Ruki B., S.T., M.T., Ph.D.



(Ketua Penguji)

4. Dr.Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.



(Penguji I)

5. Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc.



(Penguji II)

SURABAYA

2022

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# PERANCANGAN SISTEM KENDALI GERAK AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV) BERBASIS FUZZY-PID DENGAN PATH FOLLOWING

**Nama** : Amalia Firdusevtia Lishard  
**NRP** : 0231184000004  
**Departemen** : Teknik Fisika FTIRS - ITS  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.  
Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.

## ABSTRAK

Indonesia memiliki tingkat kerawanan yang tinggi terhadap ancaman dari dalam maupun luar negeri, namun kapal patroli laut yang dimiliki saat ini masih belum memenuhi, sehingga diperlukan kendaraan bawah laut tanpa awak yang mampu membantu melaksanakan tugas patroli di perairan Indonesia. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah dengan memperbaharui sistem kemudi otomatis (*autopilot*) AUV. Sistem *autopilot* yang ada saat ini menggunakan algoritma PID, dan memiliki kekurangan belum bisa menghilangkan *overshoot* pada respon sistem. Penelitian ini mengusulkan rancangan sistem pengendali PID adaptif yang disusun berdasarkan logika fuzzy. AUV yang digunakan dalam penelitian ini adalah AUV REMUS 100 yang disimulasikan berlayar dari Bunaken menuju Tateli. Penelitian ini diuji dengan gangguan berupa arus laut sebesar 0.05 m/s atau 0.097 knot dan 0.20 m/s atau 0.389 knot. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma pengendali yang diajukan menghasilkan respon dengan nilai *maximum overshoot* sebesar  $0.7683^\circ$  untuk setpoint  $20^\circ$  dan  $1.2281^\circ$  untuk setpoint  $30^\circ$ . Selain itu algoritma pengendali yang diajukan juga mampu menjaga AUV tetap berada pada jalurnya dengan nilai rata-rata error terbesar 2.3224 meter pada jalur belok dengan kondisi arus laut 0.20 m/s dari arah utara.

**Kata Kunci:** *Autopilot Autonomous Underwater Vehicle (AUV), Pengendali PID, Logika Fuzzy*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

***DESIGN OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV)  
MOTION CONTROL SYSTEM BASED ON FUZZY-PID WITH PATH  
FOLLOWING***

***Name*** : Amalia Firdusevtia Lishard  
***NRP*** : 0231184000004  
***Department*** : Engineering Physics FTIRS - ITS  
***Supervisors*** : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.  
Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.

**ABSTRACT**

*Indonesia has a high level of vulnerability to threats from within and outside the country, but the current marine patrol boats currently do not meet the requirements, so an unmanned underwater vehicle is needed that is able to help carry out patrol duties in Indonesian waters. One of the efforts that can be done is to update the AUV automatic steering system (autopilot). The current autopilot system uses the PID algorithm, and has the disadvantage of not being able to eliminate the overshoot on the system response. This study proposes an adaptive PID control system design based on fuzzy logic. The AUV used in this study is the AUV REMUS 100 which is simulated sailing from Bunaken to Tateli. This study was tested with disturbances in the form of ocean currents of 0.05 m/s or 0.097 knots and 0.20 m/s or 0.389 knots. The results show that the proposed control algorithm produces a response with a maximum overshoot value of  $0.7683^\circ$  for a setpoint of  $20^\circ$  and  $1.2281^\circ$  for a setpoint of  $30^\circ$ . In addition, the proposed control algorithm is also able to keep the AUV on track with the largest average error value of 2.3224 meters on the turning path with sea currents of 0.20 m/s from the north.*

***Keywords: Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Autopilot, PID Controller, Fuzzy Logic***

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur senantiasa penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul **“PERANCANGAN SISTEM KENDALI GERAK *AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV)* BERBASIS FUZZY-PID DENGAN *PATH FOLLOWING*”**.

Dalam proses penelitian maupun penyusunan laporan ini, penulis menyadari bahwa semua proses yang penulis lakukan tidak terlepas dari bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada::

1. Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS, yang telah bertanggung jawab atas terlaksananya kegiatan penelitian tugas akhir di Teknik Fisika
2. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. dan Dr. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng. selaku Dosen Pembimbing, yang telah memberi ilmu, masukan, dan bimbingannya selama proses penelitian hingga penyusunan laporan tugas akhir ini
3. Papa, Mama, dan kedua adik saya yang senantiasa memberi dukungan dan semangat selama penulis menjalani perkuliahan
4. Anarangga Shambarana Arminawan yang selalu mendukung dan memberi motivasi selama penulis menjalani perkuliahan
5. Agnes Ivonne Margaretha dan Carrollina Kusumawidjaya selaku rekan satu topik penelitian yang telah membantu selama penelitian
6. Firdausy Nuzula, Nuriza Aulintang, Sekar Arum Umarini, dan Selfi Stendafity selaku sahabat yang selalu mendukung dan membantu selama perkuliahan
7. Teman-teman F53 Trident Firmus, HMTF Kabinet Semangat, HMTF Kabinet Wani, dan VSNMC ITS yang telah membantu dan memberi semangat penulis selama menjalani perkuliahan

Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 13 Juli 2022

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE .....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI .....	v
LEMBAR PENGESAHAN .....	vii
LEMBAR PENGESAHAN .....	ix
ABSTRAK.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
KATA PENGANTAR .....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
DAFTAR NOTASI.....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....	5
2.1 Tinjauan Pustaka .....	5
2.2 Dasar Teori.....	7
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	25
3.1 Identifikasi Permasalahan .....	25
3.2 Studi literatur.....	26
3.3 Pengambilan Data Jalur AUV .....	26
3.4 Pengambilan Data Gangguan Arus Pada Jalur AUV .....	28
3.5 Pengambilan Data Spesifikasi AUV .....	29
3.6 Pemodelan Dinamika AUV.....	30

3.7	Perancangan Sistem <i>Path Following</i> AUV dengan Gangguan .....	33
3.8	Pengujian Sistem <i>Path Following</i> AUV dengan Gangguan .....	39
3.9	Analisa Data dan Pembahasan Performansi Sistem .....	39
3.10	Pengambilan Kesimpulan dan Saran .....	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....		41
4.1	Analisis Uji <i>Open Loop</i> .....	41
4.2	Analisis Uji <i>Close Loop</i> .....	42
4.3	Analisis <i>Path Following</i> Lurus Tanpa Gangguan .....	44
4.4	Analisis <i>Path Following</i> Lurus Gangguan Arus Kecil .....	45
4.5	Analisis <i>Path Following</i> Lurus Gangguan Arus Besar .....	46
4.6	Analisis <i>Path Following</i> Belok Tanpa Gangguan .....	47
4.7	Analisis <i>Path Following</i> Belok Gangguan Arus Kecil .....	49
4.8	Analisis <i>Path Following</i> Belok Gangguan Arus Besar .....	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		53
5.1	Kesimpulan .....	53
5.2	Saran .....	53
DAFTAR PUSTAKA .....		55
LAMPIRAN .....		57
BIODATA PENULIS .....		65

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> 6 Derajat Kebebasan dan 2 Titik Koordinat Acuan AUV (Khodayari & Balochian, 2015).....	8
<b>Gambar 2.2</b> (a) Motor DC, (b) <i>Propeller</i> (Ningsih, Subchan, & Nurhadi, 2015).....	16
<b>Gambar 2.3</b> (a) <i>Servomotor</i> , (b) <i>Fin</i> AUV (Ningsih, Subchan, & Nurhadi, 2015).....	17
<b>Gambar 2.4</b> Diagram Blok Sistem Pengendali PID (Bansal, 2009).....	18
<b>Gambar 2.5</b> Arsitektur Logika Fuzzy (Wang, 1997) .....	20
<b>Gambar 2.6</b> Pemanduan LOS AUV (Xu, et al., 2019).....	21
<b>Gambar 2.7</b> Sistem Koordinat Gangguan Arus (Fossen T. I., 1999).....	23
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Metodologi Penelitian .....	25
<b>Gambar 3.2</b> Jalur Lurus Bunaken-Tateli .....	26
<b>Gambar 3.3</b> Jalur Belok Bunaken-Tateli .....	27
<b>Gambar 3.4</b> Diagram Blok Sistem Pengendalian .....	34
<b>Gambar 3.5</b> Hasil Respon Sistem Stabil Kritis .....	35
<b>Gambar 3.6</b> Arsitektur Fuzzy Sugeno untuk Variabel $Kp'$ dan $Kd'$ .....	36
<b>Gambar 3.7</b> Arsitektur Variabel <i>Input Error</i> ( $e$ ).....	36
<b>Gambar 3.8</b> Arsitektur Variabel <i>Input Perubahan Error</i> ( $\Delta e$ ).....	36
<b>Gambar 3.9</b> Arsitektur Variabel <i>Output</i> $Kp'$ .....	37
<b>Gambar 3.10</b> Arsitektur Variabel <i>Output</i> $Kd'$ .....	37
<b>Gambar 3.11</b> Arsitektur Fuzzy Sugeno untuk Variabel $\alpha$ .....	38
<b>Gambar 3.12</b> Arsitektur Variabel <i>Output</i> $\alpha$ .....	38
<b>Gambar 4.1</b> Hasil Uji <i>Open Loop</i> .....	41
<b>Gambar 4.2</b> Hasil Uji <i>Close Loop</i> Set Poin $20^\circ$ .....	43
<b>Gambar 4.3</b> Hasil Uji <i>Close Loop</i> Set Poin $30^\circ$ .....	44
<b>Gambar 4.4</b> Respon Pengujian Jalur Lurus Tanpa Gangguan .....	45
<b>Gambar 4.5</b> Respon Pengujian Jalur Lurus Gangguan Arus Kecil (0.05 m/s).....	46
<b>Gambar 4.6</b> Respon Pengujian Jalur Lurus Gangguan Arus Besar (0.2 m/s) .....	48
<b>Gambar 4.7</b> Respon Pengujian Jalur Belok Tanpa Gangguan .....	49
<b>Gambar 4.8</b> Respon Pengujian Jalur Belok Gangguan Arus Kecil (0.05 m/s) .....	50
<b>Gambar 4.9</b> Respon Pengujian Jalur Belok Gangguan Arus Besar (0.2 m/s).....	52

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Simbol Derajat Kebebasan (Khodayari & Balochian, 2015).....	7
<b>Tabel 3.1</b> Koordinat Bunaken-Tateli dalam Jalur Lurus.....	27
<b>Tabel 3.2</b> Koordinat Bunaken-Tateli dalam Jalur Belok .....	28
<b>Tabel 3.3</b> Data Spesifikasi AUV REMUS (Prestero, 2001) .....	29
<b>Tabel 3.4</b> Data Koefisien Hidrostatik dan Hidrodinamis AUV REMUS (Prestero, 2001) .	29
<b>Tabel 3.5</b> Parameter <i>Propeller</i> dan <i>Rudder</i> (Ningsih, Subchan, & Nurhadi, 2015) .....	30
<b>Tabel 3.6</b> Rule Base Variabel Output $Kp'$ dan $Kd'$ .....	37
<b>Tabel 3.7</b> Rule Base Variabel Output $\alpha$ .....	38
<b>Tabel 4.1</b> Hasil Pengujian Sistem Fuzzy .....	42
<b>Tabel 4.2</b> Parameter Performansi Pengendali Uji <i>Close Loop</i> .....	44
<b>Tabel 4.3</b> Error Jalur Lurus Tanpa Gangguan.....	46
<b>Tabel 4.4</b> Error Jalur Lurus Gangguan Arus Kecil .....	47
<b>Tabel 4.5</b> Error Jalur Lurus Gangguan Arus Besar .....	48
<b>Tabel 4.6</b> Error Jalur Belok Tanpa Gangguan .....	50
<b>Tabel 4.7</b> Error Jalur Belok Gangguan Arus Kecil .....	51
<b>Tabel 4.8</b> Error Jalur Belok Gangguan Arus Besar.....	52

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR NOTASI

X	: gaya dan momen pada gerak sumbu-x
Y	: gaya dan momen pada gerak sumbu-y
Z	: gaya dan momen pada gerak sumbu-z
K	: gaya dan momen pada rotasi sumbu-x
M	: gaya dan momen pada rotasi sumbu-y
N	: gaya dan momen pada rotasi sumbu-z
u	: kecepatan linier pada sumbu-x
v	: kecepatan linier pada sumbu-y
w	: kecepatan linier pada sumbu-z
p	: kecepatan angular pada sumbu-x
q	: kecepatan angular pada sumbu-y
r	: kecepatan angular pada sumbu-z
x	: posisi pada sumbu-x
y	: posisi pada sumbu-y
z	: posisi pada sumbu-z
$\phi$	: sudut euler pada sumbu-x
$\theta$	: sudut euler pada sumbu-y
$\psi$	: sudut euler pada sumbu-z
M	: matriks inersia
C(v)	: matriks Coriolis
D(v)	: matriks redaman
m	: massa
B	: daya apung ( <i>buoyancy</i> )
$x_G$	: <i>center of gravity</i> sumbu-x
$y_G$	: <i>center of gravity</i> sumbu-y
$z_G$	: <i>center of gravity</i> sumbu-z
$X_{\dot{u}}$	: koefisien massa tambahan gerak sumbu-x arah <i>surge</i>
$X_{u u }$	: gaya hambat gerak sumbu-x arah <i>surge</i>
$X_{r r }$	: gaya hambat gerak sumbu-x arah <i>yaw</i>
$Y_{\dot{v}}$	: koefisien massa tambahan gerak sumbu-y arah <i>sway</i>

- $Y_{\dot{r}}$  : koefisien massa tambahan gerak sumbu-y arah *yaw*  
 $Y_{v|v|}$  : gaya hambat gerak sumbu-y arah *sway*  
 $Y_{r|r|}$  : gaya hambat gerak sumbu-y arah *yaw*  
 $Y_{uu\delta_r}$  : gaya dan momen angkat *rudder*  
 $N_{\dot{v}}$  : koefisien massa tambahan rotasi sumbu-z arah *sway*  
 $N_{\dot{r}}$  : koefisien massa tambahan rotasi sumbu-z arah *yaw*  
 $N_{v|v|}$  : gaya hambat gerak sumbu-z arah *sway*  
 $N_{r|r|}$  : gaya hambat gerak sumbu-z arah *yaw*  
 $N_{uu\delta_r}$  : gaya dan momen angkat *rudder*  
 $\omega_p$  : kecepatan sudut *propeller*  
 $K_T$  : koefisien *thrust*  
 $J$  : *advance number*  
 $D$  : diameter *propeller*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki posisi yang strategis, yaitu berada diantara dua benua dan dua samudera, sehingga alur laut Indonesia menjadi jalur yang sangat penting bagi pelayaran nasional maupun internasional. Kondisi ini mengakibatkan Indonesia memiliki tingkat kerawanan yang tinggi terhadap ancaman dari dalam maupun luar karena begitu terbuka dan terbarnya pulau-pulau di Indonesia. Sebagai negara yang memiliki wilayah laut yang sangat luas, Indonesia sering menghadapi berbagai kejahatan transnasional yang biasa terjadi di laut seperti, *illegal fishing*, penyelundupan barang, penyelundupan narkoba, *trafficking*/penyelundupan manusia dan *boat people* (manusia perahu), terorisme dan bajak laut. (FHUI, 2018)

NKRI telah melakukan beberapa upaya untuk menjaga wilayah kelautannya, yaitu dengan didirikannya lembaga penegak hukum yang memiliki satgas patroli di laut. Lembaga penegak hukum tersebut melaksanakan patroli terkait dengan keamanan dilaut secara sektoral sesuai dengan kewenangan yang dimiliki berdasarkan peraturan perundang-undangan masing-masing. Namun kapal patroli laut yang dimiliki oleh Indonesia saat ini masih kurang. Berdasarkan kajian TNI-AL, setidaknya Angkatan Laut membutuhkan 500 unit kapal patroli untuk membentengi wilayah laut Indonesia. Kurangnya jumlah kapal patroli yang dimiliki tentu dapat membahayakan keamanan laut Indonesia. Salah satu contohnya adalah ditemukannya *seaglider* asing yang tidak terdeteksi oleh patroli laut di Kepulauan Selayar pada tahun 2020. Kejadian ini juga membuktikan bahwa Indonesia masih lemah dalam teknologi untuk mendeteksi kendaraan asing bawah laut. Oleh karena itu, diperlukan teknologi modern berkonsep kendaraan bawah laut tanpa awak yang mampu membantu melaksanakan tugas patroli di perairan Indonesia.

Perkembangan kendaraan bawah laut tanpa awak dimulai pada abad ke-16 dan *Unmanned Underwater Vehicle* pertama dirancang pada tahun 1958 oleh Angkatan Laut Amerika Serikat. *Unmanned Underwater Vehicle* (UUV) memiliki 2 jenis yaitu *Remotely Operated Vehicle* (ROV) dan *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV). ROV dikendalikan oleh manusia dari pengontrol dan membutuhkan kontrol kemudi dari kapal induk di permukaan (Joo & Qu, 2015). ROV terhubung dengan platform yang bertugas memberi

perintah yang disambungkan dengan kabel atau sinyal nirkabel. Kabel yang ditambahkan memastikan sinyal pasokan energi dan informasi, dengan cara ini operator dapat terus memantau dan mengendalikan kapal secara akurat dan terus menerus untuk menyelesaikan tugasnya (Vervoort, 2009). Pengembangan ROV tidak hanya terbatas pada aplikasi eksplorasi bawah laut, juga digunakan untuk keperluan militer, inspeksi struktur bawah laut, dan juga sebagian besar digunakan di industri pertambangan dan minyak. (Liang, Li, Peng, & Zhang, 2015) Banyak negara memiliki program penelitian dan pengembangan UUV. ROV pada saat itu memiliki harga yang cukup mahal dan pengoperasiannya yang masih sangat terbatas sehingga kemunculan ROV masih sedikit peminat, serta masih diragukan mengenai tingkat keakuratan dan tingkat efisiensi kerja UUV dalam menyelesaikan misi bawah laut yang kompleks mengingat UUV merupakan system yang nonlinier. Kelemahan-kelemahan tersebut membuat para ilmuwan semakin melakukan pengembangan terhadap kendaraan bawah laut tanpa awak yang lebih fleksibel dalam beroperasi dan dapat menyelesaikan tugas *Navigation, Guidance* dan *Control* (NGC) yang biasa disebut *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV).

AUV pada dasarnya merupakan pengembangan dari teknologi ROV. ROV memiliki kekurangan karena penggunaan kabel sehingga jangkauan ROV menjadi pendek atau terbatas dapat diatasi oleh AUV. Kendaraan bawah laut yang bergerak secara otomatis tanpa awak yang disebut AUV di dalamnya sudah tersematkan baterai sebagai pasokan energi untuk meminimalkan penggunaan operator. AUV didesain sedemikian rupa agar dapat tetap bergerak sesuai jalur dan dapat mengatasi gangguan lingkungan bawah laut (Vervoort, 2009). AUV dikendalikan oleh pengontrol on-board yang dipandu oleh instruksi yang telah diprogram sebelumnya (Presterio, 2001). Saat ini sudah sangat banyak penelitian AUV terutama di bagian rancangan kontroler untuk menciptakan AUV yang memiliki kestabilan tinggi serta *robust* terhadap gangguan cuaca laut sehingga AUV tetap pada *path* yang sudah diperintahkan. Salah satunya yaitu penelitian mengenai AUV yang menggunakan *Fuzzy-PID* sebagai sistem pengendalinya. Sistem kontrol PID konvensional masih belum bisa menghilangkan overshoot pada respon sistem, sehingga digunakan Fuzzy untuk menghilangkan hampir 100% overshoot pada respon sistem. Penggunaan Fuzzy-PID pada AUV mampu menghasilkan respon yang lebih baik daripada PID konvensional (Kadir, Aras, Kasno, & Tumari, 2018). Pada penelitian lain, sistem kontrol Fuzzy-PID yang dikembangkan memiliki respon yang stabil, kompeten, dan cukup efisien untuk mengontrol AUV dengan kecepatan yang stabil (Khodayari & Balochian, 2015). Penelitian AUV lain memperoleh kesimpulan bahwa metode kontrol konvensional tidak bisa memenuhi syarat

untuk *motion control* pada AUV dikarenakan pada *motion control* membutuhkan respon yang cepat dan tahan untuk mengatasi kendala dalam bermanuver (Liang, Pang, Wan, & Wang, 2008)

Tugas Akhir ini akan dilakukan penelitian terhadap sistem kendali AUV pada arah gerak manuver dengan gangguan berupa arus laut. Sistem kendali diharapkan dapat menjaga AUV tetap berada dalam jalur yang telah ditentukan. Metode yang digunakan adalah kendali Fuzzy-PID (FPID) untuk mendapatkan respon lebih cepat dan akurat. Simulasi pengendalian akan dilakukan pada *software* MATLAB R2022a. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

- a) Berapa nilai parameter pengendali Fuzzy-PID yang dapat menghasilkan respon AUV pada performansi yang memenuhi kriteria?
- b) Bagaimana performansi sistem kendali Fuzzy-PID sebagai pengendali gerak AUV?
- c) Apakah sistem kendali mampu mempertahankan gerak AUV sesuai jalurnya pada saat terdapat gangguan arus laut?

## 1.3 Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

- a) Merancang dan mensimulasikan parameter pengendali Fuzzy-PID yang dapat menghasilkan respon AUV pada performansi yang memenuhi kriteria.
- b) Menganalisis dan mengevaluasi performansi sistem kendali Fuzzy-PID sebagai pengendali gerak AUV.
- c) Menganalisis dan mengevaluasi performansi sistem kendali dalam mempertahankan gerak AUV sesuai jalurnya pada saat terjadi gangguan arus laut.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

- a) Sistem pengendali yang digunakan berbasis Fuzzy-PID.
- b) Himpunan *fuzzy* yang digunakan adalah himpunan *fuzzy* tipe-1.
- c) *Fuzzy Inference System* (FIS) yang digunakan adalah metode Sugeno.

- d) Objek yang diteliti adalah AUV Tipe REMUS.
- e) Variabel yang dikendalikan adalah sudut *yaw* (*heading*) AUV.
- f) Gangguan yang digunakan adalah arus laut.
- g) Perancangan dan simulasi dari sistem pengendalian dilakukan pada software MATLAB R2022a.

## 1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a) BAB I Pendahuluan  
Bab I terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika laporan.
- b) BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori  
Bab II terdiri dari studi pustaka dan teori mengenai sistem pengendali logika fuzzy dan PID, pemodelan dinamik dan kinematik AUV, aktuator AUV, penentuan jalur AUV, dan pemodelan gangguan arus laut.
- c) BAB III Metodologi Penelitian  
Bab III berisi rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode, dan langkah-langkah dalam penelitian.
- d) BAB IV Hasil dan Pembahasan  
Bab IV berisi data hasil penelitian dari perancangan pengendali Fuzzy-PID beserta analisa path following yang telah dilakukan.
- e) BAB V Kesimpulan dan Saran  
Bab V berisi kesimpulan akhir dari penelitian dan saran-saran yang direkomendasikan berdasarkan pengalaman selama melakukan penelitian untuk perbaikan proses penelitian selanjutnya.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir yang dilakukan, yang dirangkum menjadi tiga topik yaitu tipe AUV yang digunakan, sistem kendali otomatis pada AUV, dan *path following* pada AUV.

##### **2.1.1 Tipe *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV)**

Penelitian yang dilakukan oleh (Xiang, Zhang, Yu, Wilson, & Xu, 2020) adalah mencari interval kecepatan pada dua tipe AUV, yaitu tipe *control surfaces* dan *through-body thrusters*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan mengumpulkan data manuver pada masing-masing tipe AUV pada kecepatan yang berbeda-beda. Data manuver yang diambil berupa torsi belok, posisi, dan waktu pada beberapa kecepatan. Data posisi dan kecepatan kemudian digambarkan dalam bentuk grafik untuk dicari kecepatan maksimalnya. Hasil yang diperoleh adalah pada AUV tipe *through-body thrusters*, AUV dapat bergerak secara efektif pada interval kecepatan rendah [0, 0.714] m/s, sedangkan pada AUV tipe *control surfaces*, AUV dapat bergerak secara efektif pada interval kecepatan tinggi [0.966, 3.084] m/s.

##### **2.1.2 Sistem Kendali Otomatis *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV)**

Penelitian yang dilakukan oleh (Kadir, Aras, Kasno, & Tumari, 2018) adalah mengubah kontroler PID konvensional yang masih belum bisa menghilangkan 100% *overshoot* pada respon sistem menjadi kontroler *Artificial Intelligence* (AI) menggunakan *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan simulasi pada Simulink MATLAB. Simulasi blok diagram dilakukan dengan menggunakan parameter awal dan auto tuning pada PID, sedangkan pada FLC dilakukan tuning secara manual dengan input berupa data dan *error* data, sementara outputnya adalah sinyal kontrol arah gerak *yaw* pada AUV. Hasil yang diperoleh adalah auto tuning PID memiliki respon yang kurang baik dan memiliki *overshoot* yang lebih tinggi daripada manual tuning. PID konvensional memiliki *rise time*, *settling time*, *peak time*, dan *overshoot*

yang sedikit lebih baik daripada FLC, karena FLC tidak di-tuning dengan baik. Apabila FLC di tuning dengan baik, maka hasil respon FLC akan lebih baik daripada PID konvensional.

Penelitian yang dilakukan oleh (Khodayari & Balochian, 2015) adalah merancang sistem kontrol AUV yang mampu mengontrol kedalaman, heading dan kecepatan. Sistem kontrol yang diusulkan adalah *self-adaptive* Fuzzy-PID yang diharapkan mampu mengatasi perubahan dinamis pada AUV. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan simulasi blok diagram dengan Multiple Input Multiple Output (MIMO) pada Simulink MATLAB. Simulasi dibagi menjadi dua, yaitu dengan menggunakan kontroler dual-PID dan *self-adaptive* Fuzzy-PID. Hasil yang diperoleh adalah kontroler Fuzzy-PID memiliki keadaptifan dan ketahanan yang lebih baik daripada kontroler dual-PID. Hasil juga menunjukkan bahwa kontroler yang diusulkan dapat meningkatkan ketahanan, kontrol usaha, overshoot, undershoot, dan stabilitas yang baik dibandingkan dengan PID konvensional.

### 2.1.3 *Path Following* AUV

Penelitian yang dilakukan oleh (Hammad & El-Shenawy, 2017) adalah melakukan perancangan dan validasi sistem kontrol dengan menggunakan Fuzzy-PID yang dapat melakukan self tuning, sehingga AUV dapat mengikuti jalur yang telah ditentukan. Perancangan sistem kontrol ini dilakukan karena sulitnya mengatasi non-linearitas yang dihasilkan dari hidrodinamika dan dinamika AUV yang digabungkan. AUV yang digunakan dalam penelitian ini memiliki 8 *thruster*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan simulasi blok diagram AUV. Sistem kontrol yang digunakan adalah Fuzzy-PID yang memiliki loop kontrol ganda, yaitu loop dalam untuk melakukan kontrol kecepatan *b-frame* AUV, sedangkan loop luar untuk melakukan kontrol posisi *n-frame* dan orientasi Euler AUV. Fuzzy yang digunakan untuk melakukan *tuning* PID adalah fuzzy Mamdani dengan fungsi keanggotaan Gaussian. Hasil yang diperoleh adalah kontroler *self-tuning* PID menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam kinerja respons waktu dalam mengendalikan AUV yang digerakkan penuh dengan respons cepat dan kesalahan minimum dibandingkan dengan PID konvensional. STFPID juga menunjukkan kinerja yang lebih baik, bahkan ketika gangguan arus laut diinjeksikan ke sistem AUV dengan *overshoot* yang hampir sangat kecil dibandingkan dengan PID konvensional yang memiliki *overshoot* yang sangat besar dan waktu respon yang lambat. Kontroler yang

digunakan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa loop kontrol ganda membuat sistem mampu mengontrol kecepatan dan posisi secara independen seperti yang diinginkan oleh peneliti.

Penelitian yang dilakukan oleh (Xiang, Yu, & Zhang, 2017) adalah melakukan perancangan sistem kontrol pada AUV sehingga dapat melakukan *path-following* sesuai dengan jalur 3D yang ditentukan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi blok diagram dengan menggunakan kontroler PID, *backstepping* dan Fuzzy-PID. Tipe fuzzy yang digunakan adalah fuzzy Mamdani dengan 2 input berupa *error* ( $e$ ) dan rasio *error* ( $ec$ ), dan 3 output berupa *gain tuning* kontroler PID ( $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ ). Hasil yang diperoleh adalah kontroler Fuzzy-PID memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap gangguan yang diberikan dibandingkan dengan kontroler lainnya. Hasil simulasi numerik menunjukkan efektivitas sistem kontrol Fuzzy-PID yang diusulkan dan menggambarkan kinerja pengontrol yang diusulkan lebih baik dibandingkan dengan metode lainnya melalui analisis kesalahan kuantitatif berupa *Mean Square Error* (MSE) dan *Mean Absolute Error* (MAE).

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Model Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

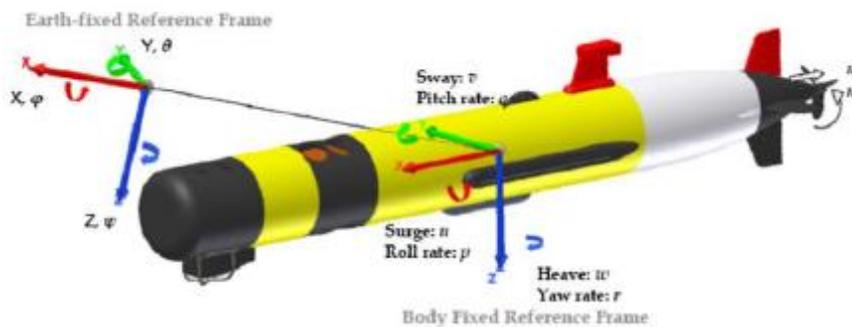
Autonomous Underwater Vehicle (AUV) adalah sebuah kendaraan laut yang memiliki 6 derajat kebebasan yaitu *surge*, *sway*, *heave*, *yaw*, *pitch* dan *roll*. Masing-masing *degrees of freedom* (DOF) tersebut memiliki besaran posisi, kecepatan, gaya dan momen yang ditunjukkan oleh simbol-simbol dalam Tabel 2.1

**Tabel 2.1** Simbol Derajat Kebebasan (Khodayari & Balochian, 2015)

DOF	Gerak	Gaya dan Momen	Kecepatan Linier dan Sudut	Posisi dan Sudut Euler
1	<i>Surge</i>	X	u	$x$
2	<i>Sway</i>	Y	v	$y$
3	<i>Heave</i>	Z	w	$z$
4	<i>Roll</i>	K	p	$\phi$
5	<i>Pitch</i>	M	q	$\theta$
6	<i>Yaw</i>	N	r	$\psi$

Tabel 2.1 menunjukkan terdapat variabel translasi dan rotasi, di mana tiga koordinat yang pertama, yaitu *surge*, *sway*, dan *heave* berperan dalam menentukan posisi dan gerakan translasi sepanjang sumbu x, y, dan z. Sedangkan tiga koordinat yang terakhir, yaitu *roll*, *pitch*, dan *yaw* digunakan untuk menggambarkan orientasi dan gerakan rotasi dari transportasi laut (Fossen T. , 2011)

AUV memiliki 2 jenis acuan sebagai titik koordinat yaitu kerangka bumi (*earth-fixed frame/EFF*) dan kerangka badan (*body-fixed frame/BFF*). Acuan titik koordinat tersebut dipakai untuk menentukan persamaan serta menentukan arah gerak AUV yang diilustrasikan pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** 6 Derajat Kebebasan dan 2 Titik Koordinat Acuan AUV (Khodayari & Balochian, 2015)

Persamaan yang merepresentasikan arah dan orientasi AUV ditunjukkan pada persamaan (2.1) sampai (2.3). (Fossen T. I., 1999)

Posisi dan sudut Euler

$$\eta = [\eta_1^T \quad \eta_2^T]^T \quad (2.1)$$

$$\eta_1 = [x \quad y \quad z]^T$$

$$\eta_2 = [\phi \quad \theta \quad \psi]^T$$

$\eta_1$  merupakan vektor posisi AUV pada koordinat *earth-fixed*, sedangkan  $\eta_2$  merupakan vektor sudut Euler AUV pada koordinat *earth-fixed*.

Kecepatan linier dan angular

$$v = [v_1^T \quad v_2^T]^T \quad (2.2)$$

$$v_1 = [u \quad v \quad w]^T$$

$$v_2 = [p \quad q \quad r]^T$$

$v_1$  merupakan vektor kecepatan linier AUV pada koordinat *body-fixed*, sedangkan  $v_2$  merupakan vektor kecepatan angular AUV pada koordinat *body-fixed*.

Gaya dan momen

$$\tau = [\tau_1^T \quad \tau_2^T]^T \quad (2.3)$$

$$\tau_1 = [X \quad Y \quad Z]^T$$

$$\tau_2 = [K \quad M \quad N]^T$$

$\tau_1$  merupakan vektor gaya AUV pada koordinat *body-fixed*, sedangkan  $\tau_2$  merupakan vektor momen AUV pada koordinat *body-fixed*.

### 2.2.2 Kinematika AUV

AUV memiliki 2 jenis acuan sebagai titik koordinat, yaitu vektor kecepatan AUV yang terdiri dari kecepatan linier dan angular ( $u, v, w, p, q, r$ ) mengacu pada BFF, sedangkan posisi dan orientasi ( $x, y, z, \phi, \theta, \psi$ ) mengacu pada EFF. Mengingat dalam kondisi sebenarnya AUV dipengaruhi oleh gerak translasi dan rotasi, maka dalam aplikasi gerak tersebut harus diketahui terlebih dahulu transformasi dari kecepatan linier dan angular sebagai berikut.

#### 1. Transformasi Kecepatan Linier

Transformasi kecepatan linier diperoleh dari laju perpindahan yang berpacu pada EFF sebagai berikut:

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1 \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J_1(\eta_2) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

$J_1(\eta_2)$  adalah matriks transformasi yang berhubungan dengan sudut Euler, yaitu *roll* ( $\phi$ ), *pitch* ( $\theta$ ), dan *yaw* ( $\psi$ ). Koordinat rotasi di sekitar sumbu -x, -y, -z berdasarkan EFF dapat dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{aligned} C_{x,\phi} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \\ C_{y,\theta} &= \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \\ C_{z,\psi} &= \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.5)$$

dengan menggabungkan ketiga matriks persamaan (2.5) maka akan diperoleh matriks transformasi kecepatan linier yang ditunjukkan pada persamaan (2.7).

$$J_1(\eta_2) = C_{z,\psi}^T C_{y,\theta}^T C_{x,\phi}^T \quad (2.6)$$

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c\psi \cdot c\theta & -s\psi \cdot c\phi + c\psi \cdot s\theta \cdot s\phi & s\psi \cdot s\phi + c\psi \cdot c\phi \cdot s\theta \\ s\psi \cdot c\theta & c\psi \cdot c\phi + s\phi \cdot s\theta \cdot s\psi & -c\psi \cdot s\phi + s\theta \cdot s\psi \cdot c\phi \\ -s\theta & c\theta \cdot s\phi & c\theta \cdot c\phi \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

dengan  $c$  adalah cos dan  $s$  adalah sin.

## 2. Transformasi Kecepatan Angular

Vektor kecepatan angular,  $v_2 = [p, q, r]^T$  pada koordinat BFF dan vektor laju Euler,  $\eta_2 = [\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$  saling berhubungan melalui transformasi matriks  $J_2(\eta_2)$  berdasarkan persamaan berikut:

$$\eta_2 = J_2(\eta_2)v_2 \quad (2.8)$$

dimana orientasi koordinat BFF yang mengacu pada koordinat EFF adalah sebagai berikut:

$$v_2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\phi}^T \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\phi}^T C_{y,\theta}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2^{-1}(\eta_2)\eta_2 \quad (2.9)$$

sehingga,

$$J_2^{-1}(\eta_2)\eta_2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} - \sin\theta\dot{\psi} \\ \cos\phi\dot{\theta} + \sin\phi \cos\theta\dot{\psi} \\ -\sin\phi\dot{\theta} + \cos\phi \cos\theta\dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \cos\theta \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\theta \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

melalui transformasi *inverse* akan diperoleh matriks kecepatan angular sebagai berikut:

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Hasil matriks transformasi kecepatan linier dan angular yang sudah diperoleh dapat ditulis dalam bentuk satu matriks sebagai berikut:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0 \\ 0 & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

### 2.2.3 Dinamika AUV

Berdasarkan hukum Newton II, persamaan gerak AUV dapat diasumsikan sebagai benda tegar dimana jumlah gaya yang bekerja sama dengan massa dikali percepatan benda. Persamaan dinamik AUV ditulis sebagai persamaan kapal *submarine* dengan arah gerak 6 *Degree of Freedom* oleh Fossen (Fossen T. , 2011) sebagai berikut:

*Surge:*

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = \Sigma X \quad (2.13)$$

*Sway:*

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] = \Sigma Y \quad (2.14)$$

*Heave:*

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] = \Sigma Z \quad (2.15)$$

*Roll:*

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{u} - wp + ur)] = \Sigma K \quad (2.16)$$

*Pitch:*

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = \Sigma M \quad (2.17)$$

*Yaw:*

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = \Sigma N \quad (2.18)$$

Tiga persamaan pertama adalah persamaan dinamik dalam arah translasi, sedangkan tiga persamaan selanjutnya adalah persamaan dinamik dalam arah rotasi. Persamaan di atas dapat dituliskan dalam bentuk vektor sebagai berikut:

$$M_{RB} \dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau \quad (2.19)$$

dimana  $v = [u, v, w, p, q, r]^T$  adalah vektor untuk kecepatan linier dan angular,  $\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$  adalah gaya dan momen eksternal yang bekerja pada AUV,  $(x_G, y_G, z_G)$  adalah posisi dari pusat massa pada koordinat BFF,  $M_{RB}$  adalah matriks inersia yang didalamnya terdapat  $(I_x, I_y, I_z)$  dan  $C_{RB}$  adalah matriks coriolis dan sentripetal, dengan notasi RB sebagai *round body* atau lambung silinder dari AUV. Bentuk dari matriks  $M_{RB}$  dan  $C_{RB}$  adalah sebagai berikut:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -mS(r_G) \\ mS(r_G) & I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

dimana  $I_{3 \times 3}$  menyatakan matriks identitas 3x3,  $S(r_G)$  menyatakan matriks simetris skew 3x3:

$$S(r_G) = -S^T(r_G) = \begin{bmatrix} 0 & -z_G & y_G \\ z_G & 0 & -x_G \\ -y_G & x_G & 0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Matriks  $C_{RB}(v)$  biasanya memiliki bentuk simetris skew, yaitu

$$C_{RB} = -C_{RB}^T \quad (2.22)$$

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -mS(v_1) - mS(v_2)S(r_G) \\ -mS(v_1) + mS(r_G)S(v_2) & -S(I_0 v_2) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_G q + z_G r) & m(w - x_G q) & m(-v - x_G r) \\ 0 & 0 & 0 & m(-w - y_G p) & m(z_G r + x_G p) & m(u - y_G r) \\ 0 & 0 & 0 & m(v - z_G p) & m(-u - z_G p) & m(x_G p + y_G q) \\ m(y_G q - z_G r) & m y_G p & m z_G p & 0 & I_z r & -I_y q \\ m x_G q & m(-z_G r - x_G p) & m z_G q & I_x r & 0 & -I_z r \\ m x_G r & m y_G r & m(-x_G p - y_G q) & I_y q & -I_z p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

### 2.2.4 Gaya Hidrostatika AUV

Setiap benda yang berada di dalam air akan mengalami gaya hidrostatis, yang terdiri dari gaya gravitasi atau gaya berat dan gaya apung. Gaya berat pada AUV dapat dicari dengan menggunakan rumus  $W = mg$  dengan  $m$  adalah massa AUV. Gaya apung AUV dapat dicari dengan rumus  $B = \rho V g$  dengan  $\rho$  adalah massa jenis fluida medium AUV dan  $V$  adalah volume total pada AUV. (Prestero, 2001)

$$X_{HS} = -(W - B)\sin\theta$$

$$Y_{HS} = (W - B)\sin\phi \cos\theta$$

$$Z_{HS} = (W - B)\cos\theta \cos\phi$$

$$K_{HS} = -(y_G W - y_B B)\cos\theta \cos\phi - (z_G W - z_B B)\cos\theta \sin\phi \quad (2.24)$$

$$M_{HS} = -(z_G W - z_B B)\sin\theta - (x_G W - x_B B)\cos\theta \cos\phi$$

$$N_{HS} = -(x_G W - x_B B)\cos\theta \sin\phi - (y_G W - y_B B)\sin\theta$$

### 2.2.5 Gaya Hidrodinamika AUV

Gaya hidrodinamika berhubungan dengan kecepatan dan percepatan pada AUV. Gaya hidrodinamika ditentukan berdasarkan koefisien yang relevan dari gaya-gaya tersebut. Koefisien gaya hidrodinamika dihitung melalui pendekatan empiris jika sudah diketahui kecepatan dan percepatan selama bergerak. (Rofiq, Effendie, & Sulisetyono, 2014) Gaya hidrodinamika pada AUV dapat dibagi menjadi 3, yaitu gaya hambat (drag force), gaya angkat (lift force), dan gaya massa tambahan (added mass force).

#### a) Gaya Massa Tambahan (*Added Mass Force*)

Dalam mekanika fluida, percepatan atau perlambatan suatu benda menggeser volume yang ditempati oleh cairan selama perpindahan terakhir. Karena benda dan cairan tidak dapat secara bersamaan menempati ruang fisik yang sama. Saat AUV bergerak, fluida

juga meningkatkan gaya gerak. Fenomena ini seperti menambahkan inersia ke sistem AUV, penambahan inersia disebut dengan istilah massa tambahan.

$$\tau_{addedmass} = M_A \dot{v} + C_A(v)v \quad (2.25)$$

dimana:

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & Y_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{\dot{w}} & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & N_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(A_{11}v_1 + A_{12}v_2) \\ -S(A_{11}v_1 + A_{12}v_2) & -S(A_{21}v_1 + A_{22}v_2) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Substitusi matriks diatas ke dalam persamaan gaya dan momen fluida akan menghasilkan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} X_A &= X_{\dot{u}}\dot{u} + Z_{\dot{w}}wq + Z_{\dot{q}}q^2 - Y_{\dot{v}}vr - Y_{\dot{r}}r^2 \\ Y_A &= Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + X_{\dot{u}}ur - Z_{\dot{w}}wp - Z_{\dot{q}}pq \\ Z_A &= Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} - X_{\dot{u}}uq + Y_{\dot{v}}vp + Y_{\dot{r}}rp \\ K_A &= K_{\dot{p}}\dot{p} \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$M_A = M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} - (Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}})uw - Y_{\dot{r}}vp + (K_{\dot{p}} - N_{\dot{r}})rp - Z_{\dot{q}}uq$$

$$N_A = N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} - (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})uv + Z_{\dot{q}}wp - (K_{\dot{p}} - M_{\dot{q}})pq + Y_{\dot{r}}ur$$

Perhitungan gaya massa tambahan dibagi menjadi tiga arah, yaitu *axial*, *crossflow*, dan *rolling*. (Prestero, 2001)

*Axial*:

$$X_{\dot{u}} = -m_{11} = -\frac{4\alpha\rho\pi}{3} \left(\frac{l}{2}\right) \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (2.29)$$

$\rho$  adalah massa jenis fluida di sekitarnya, dan  $\alpha$  adalah rasio panjang AUV terhadap diameter.

*Crossflow*:

$$\begin{aligned} Y_{\dot{v}} &= -m_{22} = -\int_{x_{tail}}^{x_{fin}} m_a(x)dx - \int_{x_{fin}}^{x_{fin2}} m_a f(x)dx - \int_{x_{fin2}}^{x_{bow2}} m_a(x)dx \\ Z_{\dot{w}} &= -m_{33} = -m_{22} = Y_{\dot{v}} \\ M_{\dot{w}} &= -m_{53} = \int_{x_t}^{x_f} x m_a(x)dx - \int_{x_f}^{x_{f2}} x m_a f(x)dx - \int_{x_{f2}}^{x_{b2}} x m_a(x)dx \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$N_{\dot{v}} = -m_{62} = m_{53} = -M_{\dot{w}}$$

$$Y_{\dot{r}} = -m_{26} = -m_{62} = N_{\dot{v}}$$

$$Z_{\dot{q}} = -m_{35} = -m_{53} = M_{\dot{w}}$$

$$M_{\dot{q}} = -m_{55} = - \int_{x_t}^{x_f} x^2 m_a(x) dx - \int_{x_f}^{x_{f2}} x^2 m_{af}(x) dx - \int_{x_{f2}}^{x_{b2}} x^2 m_a(x) dx$$

$$N_{\dot{r}} = -m_{66} = -m_{55} = M_{\dot{q}}$$

dengan  $m_a(x) = \pi\rho R(x)^2$  dan  $m_{af}(x) = \pi\rho \left( a_{fin}^2 - R(x)^2 + \frac{R(x)^4}{a_{fin}^2} \right)$ , dimana  $R(x)$  adalah radius lambung AUV sebagai fungsi posisi axial, dan  $a_{fin}$  adalah ketinggian maksimum di atas garis tengah sirip AUV.

b) Gaya Hambat (*Drag Force*)

Gaya hambat merupakan gaya yang menolak gerakan benda pada saat melalui cairan. Gaya hambat terdiri dari gaya gesek dan gaya tekan. Gaya hambat dapat dibagi menjadi 4 bagian, yaitu gesekan kulit, radiasi induksi, gaya tarik gelombang, dan gaya tarik akibat *vortex medding*. Gaya yang dihitung merupakan gaya hambat yang sejajar dengan sumbu x yang merupakan hambatan aksial, dan gaya hambat yang tegak lurus dengan sumbu x yang merupakan hambatan *crossflow*. Gaya hambat *axial* ditunjukkan melalui persamaan berikut:

$$X_{u|u} = \frac{1}{2} \rho C_d A_f \quad (2.31)$$

$\rho$  adalah massa jenis fluida,  $C_d$  adalah parameter gaya hambat *axial*, dan  $A_f$  adalah luas penampang yang menimbulkan gaya hambat.

$$C_d = \frac{C_{ss} \pi A_p}{A_f} \left[ 1 + 60 \left( \frac{d}{l} \right)^3 + 0.0025 \left( \frac{d}{l} \right) \right] \quad (2.32)$$

$C_{ss}$  adalah angka Schomeherr untuk gesekan pada plat tipis,  $A_p$  adalah luasan penampang atas AUV,  $d$  adalah diameter maksimum, dan  $l$  adalah panjang total AUV.

Gaya hambat *crossflow* pada AUV ditunjukkan melalui persamaan berikut:

$$\begin{aligned} Y_{v|v} = Z_{w|w} &= \frac{1}{2} \rho C_{dc} \int_{x_t}^{x_{b2}} 2R(x) dx - 2 \left( \frac{1}{2} \rho S_{fin} C_{df} \right) \\ M_{w|w} = -N_{v|v} &= \frac{1}{2} \rho C_{dc} \int_{x_t}^{x_{b2}} 2xR(x) dx - 2x_{fin} \left( \frac{1}{2} \rho S_{fin} C_{df} \right) \\ Y_{r|r} = -Z_{q|q} &= -\frac{1}{2} \rho C_{dc} \int_{x_t}^{x_{b2}} 2x|R(x)| dx - 2x_{fin}|x_{fin}| \left( \frac{1}{2} \rho S_{fin} C_{df} \right) \\ M_{q|q} = N_{r|r} &= -\frac{1}{2} \rho C_{dc} \int_{x_t}^{x_{b2}} 2x^3 R(x) dx - 2x_{fin}^3 \left( \frac{1}{2} \rho S_{fin} C_{df} \right) \end{aligned} \quad (2.33)$$

$\rho$  adalah massa jenis air laut,  $C_{dc}$  adalah koefisien *drag* silinder,  $R(x)$  adalah radius lambung AUV sebagai fungsi posisi *axial*,  $S_{fin}$  adalah luas plat fin yang dikontrol, dan  $C_{df}$  adalah koefisien *crossflow drag* pada fin.

c) Gaya Angkat (*Lift Force*)

Saat AUV bergerak melalui cairan dan membentuk sudut dengan cairan, cairan akan terpisah. Tekanan di atas permukaan AUV berkurang dan tekanan di bawah permukaan AUV meningkat. Daya apung yang dihasilkan tegak lurus dengan aliran air yang mengenai bagian luar AUV. Besarnya gaya dan momen *body lift* adalah sebagai berikut:

$$Y_{uwl} = Z_{uwl} = -\frac{1}{2}\rho C_{y\alpha\beta} d^2 \quad (2.34)$$

$$M_{uwl} = -N_{uwl} = -\frac{1}{2}\rho C_{y\alpha\beta} x_{cp}$$

dengan  $C_{y\alpha\beta} = 0.003$  yang telah diturunkan oleh Hoerner (Yang, 2008). Sedangkan persamaan gaya dan momen *fin lift* adalah sebagai berikut:

$$Y_{uu\delta_r} = -Z_{uu\delta_s} = \rho C_{L\alpha} S_{fin}$$

$$M_{uu\delta_s} = N_{uu\delta_r} = \rho C_{L\alpha} S_{fin} x_{fin} \quad (2.35)$$

### 2.2.6 Gaya Dorong AUV (*Thrust Force*)

Arah gerak AUV dikendalikan oleh *fin* yang dapat bergerak terhadap sumbu Y ataupun sumbu Z, namun untuk arah terhadap sumbu X maka diperlukan gaya dorong untuk menggerakkan AUV. Propeller bertugas untuk memberi energi agar AUV tetap bisa bergerak maju. AUV REMUS memiliki kecepatan maju konstan pada 1.51 m/s (3 knot) pada kecepatan propeller 1500 RPM, maka diasumsikan gaya dorong *propeller* adalah sebagai berikut:

$$X_{prop} = \frac{1}{2}\rho D^4 K_T(J) |\omega_p| \omega_p \quad (2.36)$$

dengan  $\rho$  adalah massa jenis fluida,  $D$  adalah diameter *propeller*,  $K_T$  adalah koefisien gaya dorong,  $J$  adalah advance number, dan  $\omega_p$  adalah kecepatan sudut *propeller*.

### 2.2.7 Gaya dan Momen Total AUV

Gaya dan momen total yang bekerja pada AUV dapat diperoleh dengan menggabungkan persamaan gaya hidrostatis, gaya hidrodinamik, dan gaya dorong.

*Surge*:

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X_{HS} + X_{u|u}|u| + \quad (2.37)$$

$$X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{qq}qq + X_{wq}wq + X_{rr}rr + X_{vr}vr + X_{prop}$$

Sway:

$$\begin{aligned} m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + \\ Y_{r|r}|r|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{vu}vu & \\ + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r & \end{aligned} \quad (2.38)$$

Heave:

$$\begin{aligned} m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= Z_{HS} + Z_{w|w}|w|w| + \\ Z_{q|q}|q|q| + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{uu\delta_s}u^2\delta_s & \end{aligned} \quad (2.39)$$

Roll:

$$\begin{aligned} I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + \\ m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{u} - wp + ur)] &= K_{HS} + K_{p|p}|p|p| + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{prop} \end{aligned} \quad (2.40)$$

Pitch:

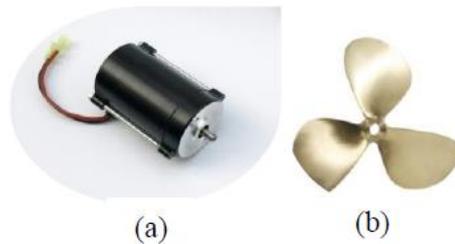
$$\begin{aligned} I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} + \\ m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= M_{HS} + M_{w|w}|w|w| + M_{q|q}|q|q| + \\ M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uu\delta_s}u^2\delta_s & \end{aligned} \quad (2.41)$$

Yaw:

$$\begin{aligned} I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} + \\ m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + \\ N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{vu}vu + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r & \end{aligned} \quad (2.42)$$

### 2.2.8 Aktuator AUV

AUV memiliki 2 jenis actuator yaitu *propeller* dan *fin*. *Propeller* digunakan untuk melakukan gerak maju AUV sedangkan *fin* digunakan untuk menentukan arah dari AUV sehingga dapat bergerak ke kanan dan kiri serta bergerak naik turun. Sistem propulsi pada AUV adalah sistem yang mengatur kecepatan *propeller* AUV ketika melakukan manuver. Dalam sistem ini, alat yang digunakan untuk mengatur kecepatan baling-baling adalah motor DC.



**Gambar 2.2** (a) Motor DC, (b) *Propeller* (Ningsih, Subchan, & Nurhadi, 2015)

Model matematika motor DC adalah persamaan diferensial linear dua tingkat non-homogen dengan bentuk fungsi transfer sebagai berikut (Ningsih, Subchan, & Nurhadi, 2015):

$$P_{dc}(s) = \frac{k_5}{J_{dc}L_a s^2 + (B_{dc}L_a + J_{dc}R_a)s + (B_{dc}R_a + k_4k_5)} \quad (2.43)$$

di mana,

$J_{dc}$  : Momen inersia motor DC (kg.m<sup>2</sup>)

$L_a$  : Induktansi kumparan *anchor* (H)

$B_{dc}$  : *Viscous friction* (NM/rps)

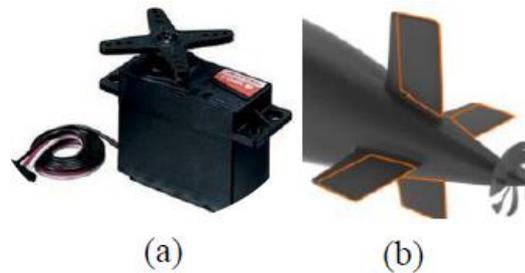
$R_a$  : Hambatan *anchor* (Ohm)

$k_4$  : *Constants back EMF*

$k_5$  : *Constants torque*

Input dari motor DC ini adalah berupa tegangan (volt) dan outputnya adalah kecepatan sudut propeller ( $\omega$ ).

Sistem *fin* pada AUV adalah sistem yang berfungsi untuk mengatur posisi sudut *fin* AUV ketika melakukan gerakan memutar. Alat yang digunakan untuk mengatur posisi sudut sirip dalam sistem sirip AUV adalah *servomotor*.



**Gambar 2.3** (a) *Servomotor*, (b) *Fin AUV* (Ningsih, Subchan, & Nurhadi, 2015)

Model matematika *servomotor* adalah persamaan diferensial linear tiga tingkat non-homogen dengan bentuk fungsi transfer sebagai berikut (Ningsih, Subchan, & Nurhadi, 2015):

$$P_s(s) = \frac{K_T}{J_s L_m s^3 + (B_s L_m + J_s R_m) s^2 + (B_s R_m + K_m K_T) s} \quad (2.44)$$

di mana,

$J_s$  : Momen inersia *servomotor* (kg.m<sup>2</sup>)

$L_m$  : Induktansi kumparan *anchor* (H)

$B_s$  : *Viscous friction* (NM/rps)

$R_m$  : Hambatan *anchor* (Ohm)

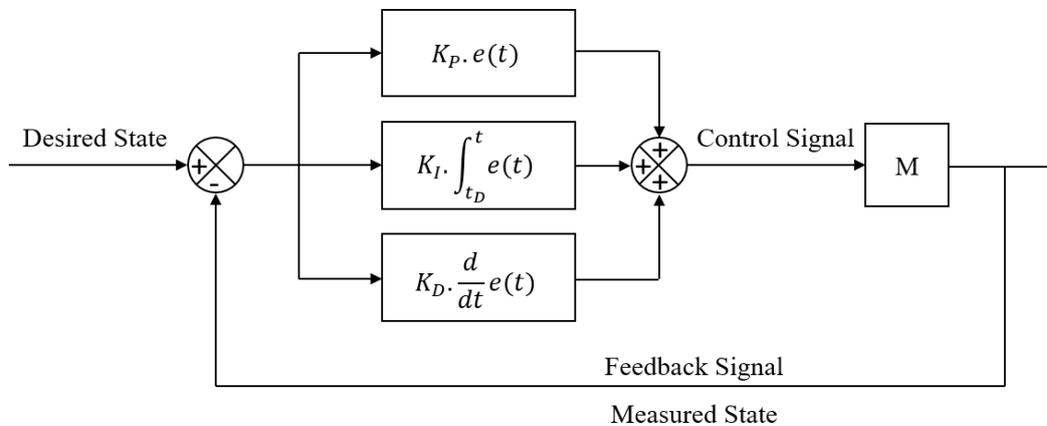
$K_m$  : Constants back EMF

$K_T$  : Constants torque

Input dari *servomotor* ini adalah berupa tegangan (volt) dan outputnya adalah derajat sudut posisi *fin*.

### 2.2.9 Pengendali PID

Kontrol *Proportional, Integral, Derivative* (PID) adalah sistem pengendali yang umum digunakan di industri maupun militer. Sistem kontrol PID (*Proportional Integral Derivative*) ini digunakan untuk menentukan presisi suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik (*feedback*) pada sistem tersebut (Ogata, 2010). Masing-masing parameter *proportional, integral* dan *derivative* memiliki fungsinya masing-masing. Parameter *proportional* digunakan untuk mengecilkan nilai ESS (*Error Steady State*), yang merupakan nilai kesalahan pada saat sistem dalam keadaan tunak. Jika nilai ESS yang dihasilkan sistem dirasa masih belum memenuhi keinginan, maka digunakan parameter *integral*. Parameter *integral* digunakan untuk mengeliminasi atau menghilangkan ESS. Parameter yang terakhir, yaitu *derivative* digunakan untuk mempercepat respon sistem. Blok diagram sistem kendali PID ditunjukkan pada gambar berikut.



**Gambar 2.4** Diagram Blok Sistem Pengendali PID (Bansal, 2009)

Persamaan untuk menentukan kendali PID diberikan pada persamaan (2.45)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.45)$$

Persamaan (2.45) menjelaskan bahwa nilai keluaran  $u(t)$ , merupakan jumlah dari *gain proportional* ( $K_p$ ), *gain integral* ( $K_i$ ), dan *gain derivative* ( $K_d$ ) yang masing-masing dipengaruhi oleh *error* ( $e$ ) dalam selang waktu ( $t$ ) tertentu.

### 2.2.10 Logika Fuzzy

Prinsip logika *fuzzy* pertama kali diperkenalkan oleh Prof. Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965. Logika *fuzzy* merupakan sebuah metode pengambilan keputusan berdasarkan teori himpunan *fuzzy*. Logika *fuzzy* merupakan sebuah pengembangan dari logika konvensional yang pengambilan keputusannya berdasarkan himpunan *crisp*. Pada teori himpunan *fuzzy*, pengambilan keputusan didasari oleh suatu derajat keanggotaan elemen terhadap suatu himpunan. Nilai derajat keanggotaan ini berkisar antara 0 sampai dengan 1. Sedangkan pada himpunan *crisp*, pengambilan keputusan didasari oleh nilai suatu elemen yang secara tegas dinyatakan sebagai anggota suatu himpunan atau bukan.

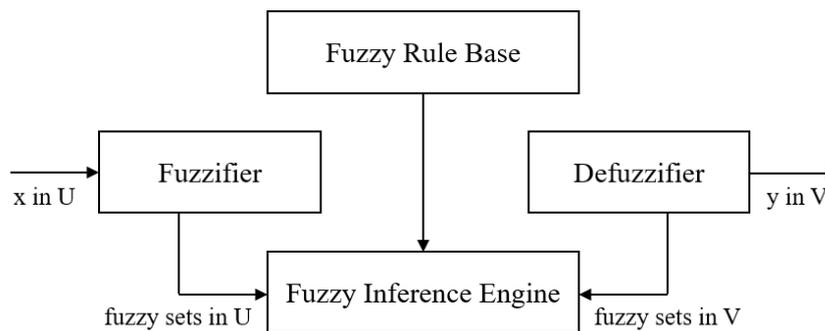
Sistem fuzzy dapat merepresentasikan pengetahuan manusia ke dalam bentuk matematis dengan lebih menyerupai cara berpikir manusia. Pengontrol dengan logika fuzzy mempunyai kelebihan yaitu dapat mengontrol sistem yang kompleks, non-linier, atau sistem yang sulit direpresentasikan ke dalam bentuk matematis. Sebagai contoh, pada himpunan *crisp* kecepatan diatas 1000 rpm masuk dalam kategori “cepat”. Berdasarkan teori *crisp*, kecepatan 999 rpm dikatakan “lambat” dan kecepatan 1001 dikatakan “cepat”. Hal ini dapat dikatakan tidak adil karena perubahan kecil dapat memberikan pengaruh yang signifikan pada kategori yang diberikan. Teori himpunan *fuzzy* digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Jika menggunakan himpunan *fuzzy*, kecepatan 999 rpm akan termasuk ke dalam kategori “lambat” dan “cepat” dengan derajat keanggotaan yang berbeda-beda untuk setiap kategorinya, sebagai contoh “0.4 lambat” dan “0.6 cepat”.

Ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam menyusun suatu sistem fuzzy, yaitu variabel fuzzy, himpunan fuzzy, semesta pembicaraan, dan domain. Variabel *fuzzy* merupakan variabel yang akan dibahas pada suatu sistem *fuzzy*, contohnya seperti berat badan, suhu, tinggi badan, umur, tekanan, dll. Himpunan *fuzzy* adalah suatu himpunan yang mewakili suatu kondisi atau keadaan pada suatu variabel *fuzzy*. Himpunan *fuzzy* memiliki 2 atribut, yaitu linguistik dan numerik. Linguistik adalah penamaan suatu grup yang mewakili suatu keadaan atau kondisi tertentu dengan menggunakan bahasa alami, seperti “lambat”, “normal”, dan “cepat”. Sedangkan numerik adalah suatu nilai yang menunjukkan ukuran dari suatu variabel seperti 17, 19, 21, dst. Semesta pembicaraan adalah keseluruhan nilai yang diperbolehkan dalam suatu variabel *fuzzy*. Semesta pembicara ini adalah berupa bilangan real yang nilainya akan bertambah secara linear dari kiri ke kanan. Sebagai contoh, nilai dari variabel *fuzzy* yang dapat dioperasikan adalah 1000-5000 dengan satuan rpm. Sedangkan domain adalah nilai yang diperbolehkan pada suatu himpunan *fuzzy*. Sebagai

contoh pada himpunan *fuzzy* LAMBAT, nilai kecepatan yang dapat dioperasikan adalah 0-1000 dengan satuan rpm, sedangkan untuk himpunan *fuzzy* CEPAT berkisar antara 500-2000 pm.

### 2.2.11 Arsitektur Logika Fuzzy

Sistem logika fuzzy memiliki beberapa tahapan dalam proses pengambilan keputusannya. Tahapan-tahapan tersebut membentuk arsitektur dari sistem logika fuzzy itu sendiri. Berikut merupakan arsitektur dari sistem logika fuzzy



**Gambar 2.5** Arsitektur Logika Fuzzy (Wang, 1997)

Fuzzifikasi merupakan proses mengonversi atau melakukan *mapping*/pemetaan dari input crisp atau bilangan tegas menjadi bilangan fuzzy. Setelah bilangan tegas dikonversi menjadi bilangan fuzzy, maka hasil konversi akan masuk ke dalam sebuah *inference engine*. *Inference engine* merupakan metode penentuan nilai *output* sebagai bentuk pengambilan keputusan. Terdapat beberapa metode penentuan nilai *output* pada logika fuzzy adalah seperti metode Mamdani, metode Sugeno, dan metode Tsukamoto. Hasil dari metode penentuan output ini didasari oleh aturan-aturan yang dibentuk pada *fuzzy rule base*. *Fuzzy rule base* ini berisi aturan atau kondisi IF-THEN yang menjadi batasan dalam pengambilan keputusan. Hasil dari pengambilan keputusan tersebut kemudian masuk ke dalam proses defuzzifikasi. Defuzzifikasi merupakan proses rekonversi atau *re-mapping* dari himpunan fuzzy menjadi output dalam bentuk *crisp output value*. (Wang, 1997)

### 2.2.12 Parameter Pengendali Fuzzy-PID

Algoritma dari pengendali Fuzzy-PID yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada penelitian (Zhao, Tomizuka, & Isaka, 1993). Perancangan pengendali dilakukan dengan terlebih dahulu melakukan *tuning* parameter PID menggunakan metode tuning Ziegler-Nichols. Tuning ini dilakukan untuk mendapatkan rentang nilai pengendali PID yang sesuai untuk sistem. Hasil tuning yang digunakan untuk langkah selanjutnya adalah

gain kritis  $K_{cr}$  dan periode kritis  $T_{cr}$ . Penentuan parameter PID dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut (Zhao, Tomizuka, & Isaka, 1993):

Proporsional:

$$K'_p = (K_p - K_{p.min}) / (K_{p.max} - K_{p.min}) \quad (2.46)$$

$$K_p = (K_{p.max} - K_{p.min})K'_p + K_{p.min} \quad (2.47)$$

Derivatif:

$$K'_d = (K_d - K_{d.min}) / (K_{d.max} - K_{d.min}) \quad (2.48)$$

$$K_d = (K_{d.max} - K_{d.min})K'_d + K_{d.min} \quad (2.49)$$

Integral:

$$K_i = K_p^2 / (\alpha K_d) \quad (2.50)$$

dengan  $K'_p$ ,  $K'_d$ , dan  $\alpha$  merupakan variabel *output* sistem logika fuzzy. Berdasarkan penelitian (Zhao, Tomizuka, & Isaka, 1993), nilai maksimum dan minimum dari  $K_p$  dan  $K_d$  dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$K_{p.max} = 0.6K_{cr} \quad (2.51)$$

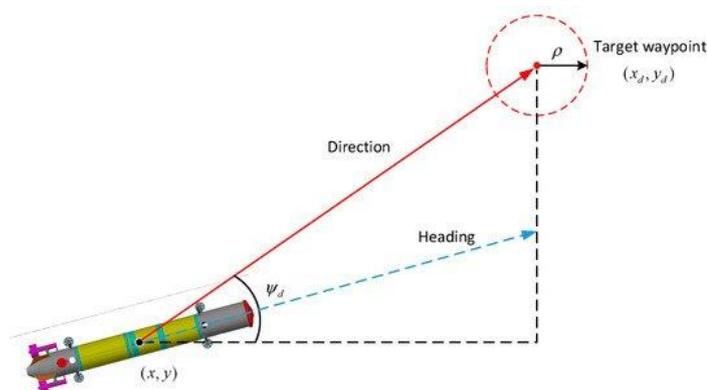
$$K_{p.min} = 0.32K_{cr} \quad (2.52)$$

$$K_{d.max} = 0.15K_{cr}T_{cr} \quad (2.53)$$

$$K_{d.min} = 0.08K_{cr}T_{cr} \quad (2.54)$$

### 2.2.13 Penentuan *Path* AUV

Pemanduan pada transportasi laut membutuhkan sebuah jalur tertentu. Manuver yang dilakukan oleh transportasi laut harus mengikuti *path* atau jalur tertentu. Manuver yang akan dilakukan oleh AUV bergantung pada posisi AUV yang direpresentasikan dengan koordinat  $(x, y)$ . Ada beberapa metode yang dapat dilakukan untuk melakukan pemanduan transportasi laut, salah satunya adalah metode *line-of-sight* (LOS).



**Gambar 2.6** Pemanduan LOS AUV (Xu, et al., 2019)

Pemanduan *line-of-sight* (LOS) menggunakan informasi posisi AUV yang disediakan oleh sensor untuk menghitung derajat dari *heading* referensi ( $\psi_{ref}$ ) yang diperlukan untuk memandu AUV menuju titik atau *waypoint* pada jalur yang sudah ditentukan. Perhitungan dari LOS dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\psi_d(t) = \tan^{-1} \frac{y_d(k) - y(t)}{x_d(k) - x(t)} \quad (2.55)$$

Pada persamaan diatas,  $(x_d(k), y_d(k))$  mendefinisikan *waypoint* yang menjadi tujuan dari AUV, sedangkan  $(x(t), y(t))$  mendefinisikan data dari posisi AUV yang sedang ditempuh pada saat  $(t)$  yang disediakan oleh GPS. Pemanduan AUV untuk bergerak ke *waypoint* yang telah dirancang dapat dikatakan berhasil ketika AUV memasuki area radius aman  $\rho$  di sekitar area *waypoint*. Kondisi keberhasilan ini dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\sqrt{(x_d(k) - x(t))^2 + (y_d(k) - y(t))^2} \leq \rho \quad (2.56)$$

Koordinat AUV yang sedang ditempuh  $(x(t), y(t))$  diperoleh dengan menggunakan persamaan yang didapatkan dari persamaan kinematika AUV sebagai berikut:

$$\begin{aligned} x(t) &= V \cos \psi \\ y(t) &= V \sin \psi \end{aligned} \quad (2.57)$$

### 2.2.14 Pemodelan Gangguan Cuaca

Pemodelan gangguan cuaca diperlukan dalam melakukan simulasi kemudi AUV otomatis. Gangguan cuaca digunakan agar hasil dari simulasi mendekati kondisi yang sesungguhnya. Gangguan cuaca yang mungkin untuk terjadi di laut dalam adalah arus laut. Gangguan ini dapat mengganggu kestabilan dari AUV. Kemampuan AUV dalam mengatasi gangguan ini akan menentukan keberhasilan AUV dalam mencapai *waypoint* pada jalur yang sudah ditentukan. AUV ditinjau dari bentuk permukaan 2 dimensi, yaitu sumbu X dan sumbu Y, sehingga terdapat dua komponen dalam gangguan arus ini, yaitu rata-rata kecepatan arus laut  $V_c$  dan arah arus  $\beta$ .

Persamaan kecepatan arus laut dapat dideskripsikan pada persamaan (2.58) (Fossen T. , 2011)

$$\dot{V}_c(t) + \mu_o V_c(t) = \omega(t) \quad (2.58)$$

Penyelesaian persamaan diatas menggunakan deret Euler:

$$V_c(t) = \frac{V_c(0)}{0!} + \frac{t}{1!} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.59)$$

Sehingga:

$$V_c(t) = V_c(0) + t(\omega(t) - \mu_o V_c(0)) \quad (2.60)$$

Keterangan:

$V_c(t)$  : Kecepatan arus yang dibatasi dengan  $V_{min} \leq V_c(t) \leq V_{max}$

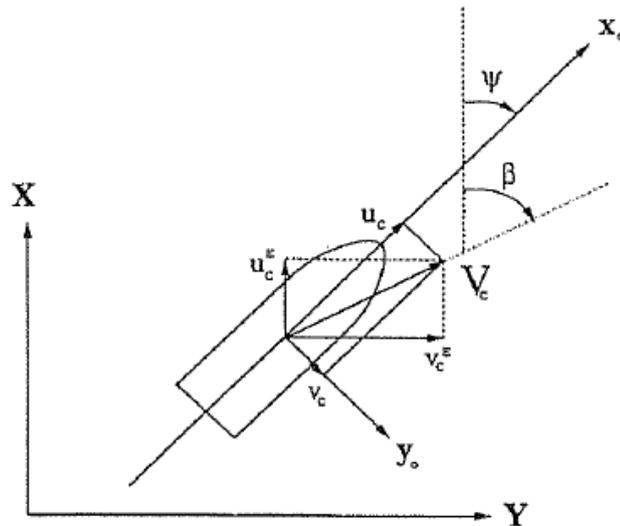
$\omega(t)$  : *Zero-Mean Gaussian white noise process*

$\mu_o$  : Nilai konstan (0.1)

Arus laut memiliki arah gerak arus  $\beta$  yang berpengaruh terhadap posisi AUV dalam sumbu X dan Y. Pengaruh kecepatan arus laut ditunjukkan pada persamaan (2.61) dan (2.52), sedangkan sistem koordinat gangguan arus dapat dilihat pada Gambar 2.7.

$$u_c = V_c \cos(\beta - \psi) \quad (2.61)$$

$$v_c = V_c \sin(\beta - \psi) \quad (2.62)$$



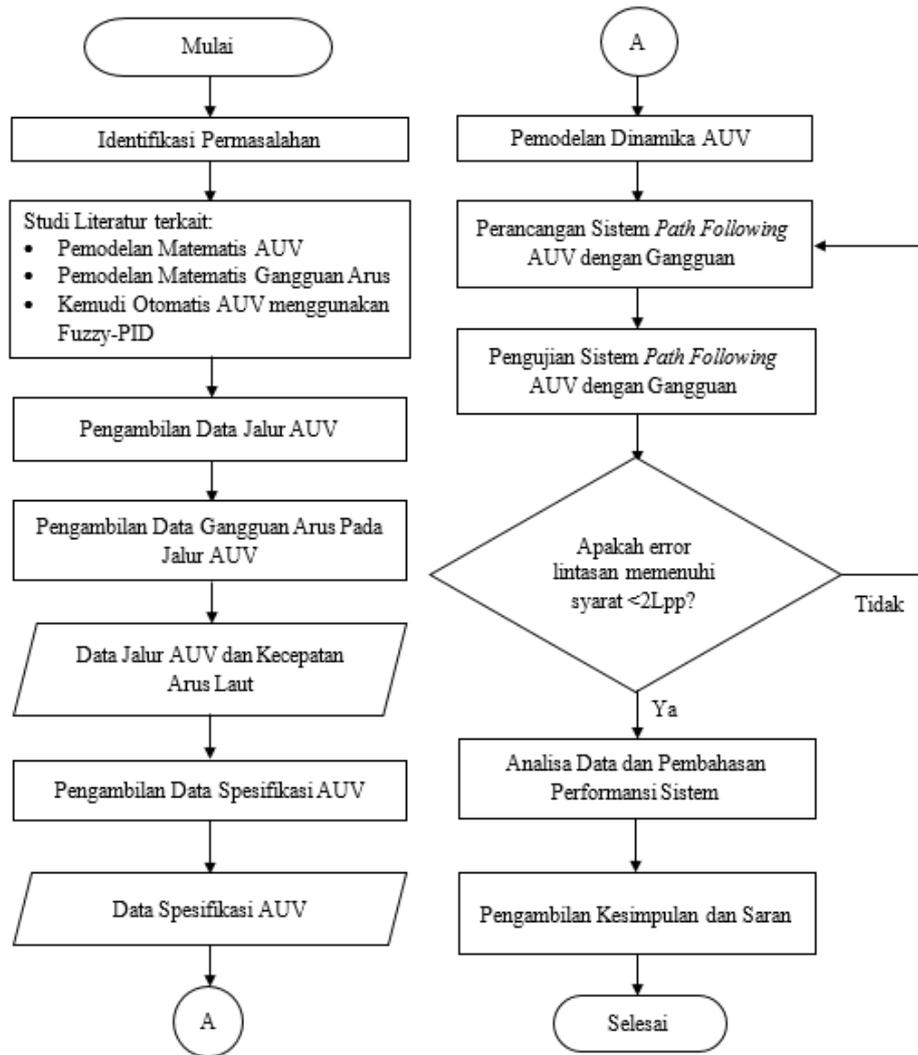
**Gambar 2.7** Sistem Koordinat Gangguan Arus (Fossen T. I., 1999)

Gambar 2.7 menunjukkan ilustrasi gerakan kapal di mana  $\psi$  adalah sudut arah kapal terhadap sumbu X (yaw),  $u_c$  adalah arah kecepatan arus terhadap sumbu X,  $v_c$  adalah kecepatan arus terhadap sumbu Y,  $\beta$  adalah arah sudut kecepatan arus terhadap sumbu X, dan  $V_c$  adalah kecepatan arus.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan pada tugas akhir ini dijelaskan melalui tahapan yang dapat dilihat pada Gambar 3.1.



**Gambar 3.1** Diagram Alir Metodologi Penelitian

### 3.1 Identifikasi Permasalahan

Tahapan pertama yang dilakukan pada penelitian ini adalah melakukan identifikasi permasalahan. Permasalahan yang diangkat pada penelitian adalah mengenai kemudi otomatis untuk wahana bawah laut AUV. Sistem pengendali yang sudah sering digunakan adalah pengendali PID konvensional. Kelemahan utama dari pengendali PID konvensional adalah pengendali tersebut hanya cocok diterapkan pada sistem yang linear, sedangkan AUV

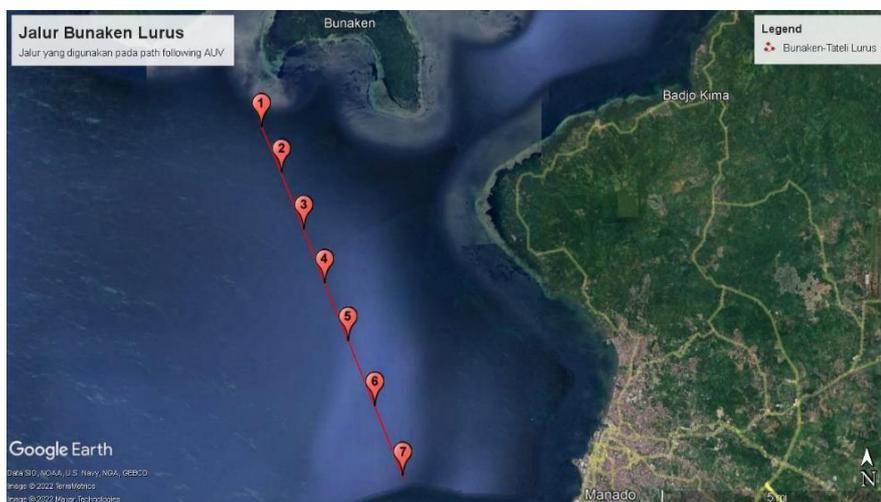
sendiri dapat mengalami perubahan dinamis sepanjang bergerak karena adanya perubahan kondisi lautan yang dilintasinya. Oleh karena itu, diperlukan sebuah pengendali yang mampu menjaga stabilitas AUV terhadap adanya gangguan berupa perubahan kondisi laut seperti arus laut.

### 3.2 Studi literatur

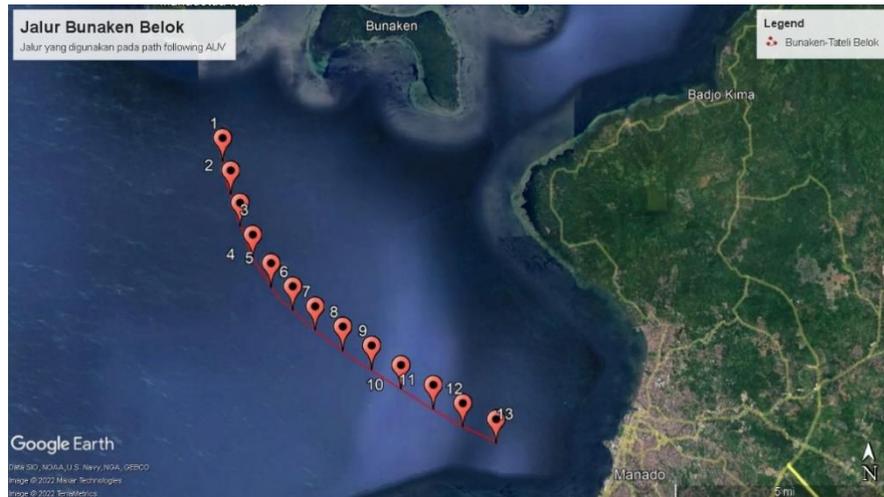
Studi literatur merupakan tahap dimana dilakukan pengkajian mengenai teori-teori dasar yang mampu memperkuat gagasan peneliti. Pada tahap ini akan dilakukan pengkajian terhadap pemodelan matematis AUV karena AUV menjadi objek penelitian pada tugas akhir ini, selain itu juga dilakukan studi mengenai pemodelan matematis gangguan arus sebagai gangguan yang akan ditambahkan dalam simulasi. Kemudi otomatis AUV menggunakan Fuzzy-PID juga perlu dilakukan pengkajian dikarenakan akan menjadi sistem kendali yang akan digunakan dalam melakukan penelitian ini. Hasil studi literatur telah dituliskan pada Bab II.

### 3.3 Pengambilan Data Jalur AUV

Tahap ini merupakan tahap untuk menentukan jalur dari AUV yang digunakan pada penelitian ini. Penentuan titik jalur diperlukan agar rudder dapat menggerakkan AUV sesuai dengan jalur yang telah ditentukan. Titik keberangkatan AUV adalah perairan Pulau Bunaken dan berhenti pada Desa Tateli. Penentuan titik jalur yang digunakan oleh AUV dilakukan dengan menggunakan layanan *Google Earth Pro*. Jalur yang digunakan dalam AUV memiliki dua bentuk, yaitu bentuk jalur lurus dan bentuk jalur belok. Jalur lurus yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2, sedangkan jalur belok dapat dilihat pada Gambar 3.3.



**Gambar 3.2** Jalur Lurus Bunaken-Tateli



**Gambar 3.3** Jalur Belok Bunaken-Tateli

Jalur pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 diubah ke dalam bentuk titik-titik jalur yang merepresentasikan letak koordinat astronomis jalur tersebut. Koordinat astronomis dari masing-masing titik jalur dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2. Koordinat astronomis yang diperoleh dari layanan *Google Earth Pro* berupa titik koordinat DMS atau *Degree Minute Second*. Koordinat DMS ini kemudian dikonversi menjadi koordinat UTM atau *Universal Transverse Mercator*. Koordinat UTM pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 kemudian dikonversi dengan menjadikan titik jalur pertama, yaitu Pulau Bunaken menjadi titik pusat (0,0). Koordinat UTM sesuai titik referensi ini kemudian dikonversi ke dalam satuan Nautical Mile. Koordinat UTM yang berupa titik koordinat (x,y) ini akan diolah menggunakan metode pemanduan LOS untuk menentukan referensi haluan AUV sebagai setpoint dalam sistem pengendalian.

**Tabel 3.1** Koordinat Bunaken-Tateli dalam Jalur Lurus

Kode Posisi	DMS		Koordinat UTM		Koordinat UTM sesuai Titik Referensi		Konversi Nautical Mile	
	Latitude	Longitude	X	Y	X (m)	Y (m)	X (mi)	Y (mi)
1	1°35' 27.36"N	124°43' 56.85"E	692734.9454	175927.3064	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	1°34' 35.49"N	124°44' 19.60"E	693439.5332	174334.5946	704.5878	-1592.7118	0.3805	-0.8601
3	1°33' 31.57"N	124°44' 44.78"E	694219.5460	172371.7928	1484.6006	-3555.5136	0.8017	-1.9200
4	1°32' 30.05"N	124°45' 8.46"E	694953.1259	170482.6628	2218.1804	-5444.6435	1.1978	-2.9401
5	1°31' 24.62"N	124°45' 34.97"E	695774.2861	168473.4879	3039.3407	-7453.8185	1.6412	-4.0251
6	1°30' 10.66"N	124°46' 5.27"E	696712.8198	166202.3731	3977.8743	-9724.9333	2.1481	-5.2515
7	1°28' 50.97"N	124°46' 36.71"E	697686.7337	163755.2566	4951.7882	-12172.0498	2.6740	-6.5729

**Tabel 3.2** Koordinat Bunaken-Tateli dalam Jalur Belok

Kode Posisi	DMS		Koordinat UTM		Koordinat UTM sesuai Titik Referensi		Konversi Nautical Mile	
	Latitude	Longitude	X	Y	X (m)	Y (m)	X (mi)	Y (mi)
1	1°34' 42.66"N	124°42' 15.75"E	689610.8872	174551.6674	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	1°34' 3.93"N	124°42' 25.41"E	689910.4688	173362.2536	299.5816	-1189.4139	0.1618	-0.6423
3	1°33' 25.31"N	124°42' 36.47"E	690253.3216	172176.2508	642.4344	-2375.4166	0.3469	-1.2827
4	1°32' 47.14"N	124°42' 51.60"E	690721.9742	171004.1690	1111.0870	-3547.4984	0.6000	-1.9156
5	1°32' 13.13"N	124°43' 13.39"E	691396.4015	169960.0312	1785.5143	-4591.6363	0.9642	-2.4795
6	1°31' 45.47"N	124°43' 39.15"E	692193.3991	169111.0405	2582.5119	-5440.6269	1.3946	-2.9379
7	1°31' 21.55"N	124°44' 5.80"E	693017.8222	168376.9505	3406.9350	-6174.7170	1.8397	-3.3343
8	1°30' 57.39"N	124°44' 38.66"E	694034.2288	167635.6399	4423.3417	-6916.0275	2.3886	-3.7347
9	1°30' 34.83"N	124°45' 12.96"E	695095.1200	166943.5103	5484.2328	-7608.1571	2.9615	-4.1084
10	1°30' 11.45"N	124°45' 47.86"E	696174.5890	166226.2048	6563.7019	-8325.4626	3.5444	-4.4957
11	1°29' 47.79"N	124°46' 26.25"E	697361.9649	165500.3829	7751.0777	-9051.2845	4.1856	-4.8877
12	1°29' 25.89"N	124°47' 1.34"E	698447.2908	164828.5394	8836.4036	-9723.1280	4.7717	-5.2505
13	1°29' 6.76"N	124°47' 40.91"E	699671.0547	164241.8952	10060.1675	-10309.7722	5.4325	-5.5673

### 3.4 Pengambilan Data Gangguan Arus Pada Jalur AUV

Data yang diambil pada tahap ini adalah data kecepatan arus rata-rata pada daerah jalur yang digunakan. Daerah perairan yang digunakan pada penelitian ini adalah daerah perairan Tateli-Bunaken. Kecepatan arus rata-rata pada perairan sekitar Bunaken bervariasi antara 0.05 m/s atau 0.097 knot sampai dengan 0.20 m/s atau 0.389 knot. (Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika, 2022)

#### 3.4.1 Pemodelan Gangguan Arus Laut

Pemodelan gangguan arus laut memiliki dua komponen, yaitu kecepatan arus rata-rata  $V_c(t)$  dan arah arus  $\beta$ . Kecepatan arus laut dimodelkan seperti pada persamaan (2.60). Kecepatan arus laut yang digunakan adalah 0.05 m/s dan 0.20 m/s dengan nilai  $\mu_o$  tetap senilai 0.1. Pemodelan masing-masing kecepatan arus sesuai dengan persamaan (2.60) adalah sebagai berikut:

Kecepatan arus 0.05 m/s:

$$V_c(t) = 0.05 + t(\omega(t) - 0.005) \quad (3.1)$$

Kecepatan arus 0.2 m/s:

$$V_c(t) = 0.2 + t(\omega(t) - 0.02) \quad (3.2)$$

Pada penelitian ini, arah arus diasumsikan bergerak secara seragam menuju satu arah tertentu. Arah datang arus laut pada penelitian ini adalah dari arah utara, dengan nilai  $\beta$  adalah  $90^\circ$ , sehingga arus laut menabrak sisi kiri AUV.

### 3.5 Pengambilan Data Spesifikasi AUV

Tahap ini dilakukan untuk mendapatkan data spesifikasi AUV yang digunakan sebagai subjek penelitian. AUV yang digunakan pada penelitian ini adalah AUV Tipe REMUS. Data yang diperlukan adalah data spesifikasi body dari AUV, serta data spesifikasi dari *propeller* dan *rudder* yang digunakan untuk menentukan koefisien hidrostatis dan hidrodinamis.

Tabel 3.3 menunjukkan data spesifikasi bentuk fisik dari AUV REMUS yang diteliti oleh Prestero (Prestero, 2001) yang kemudian data-data tersebut digunakan untuk menghitung nilai koefisien hidrostatis dan hidrodinamis dari AUV.

**Tabel 3.3** Data Spesifikasi AUV REMUS (Prestero, 2001)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Massa	$m$	30	kg
Densitas	$\rho$	1025	kg/l
Panjang	$l$	1.33	m
Lebar	$w$	0.19	m
Tinggi	$h$	0.19	m
Diameter	$d$	0.19	m
Kecepatan Normal	$v$	1.51	m/s

Tabel 3.4 menunjukkan koefisien hidrostatis dan hidrodinamis yang diperlukan untuk pemodelan AUV terhadap 3 DOF yakni *surge*, *sway* dan *yaw*.

**Tabel 3.4** Data Koefisien Hidrostatis dan Hidrodinamis AUV REMUS (Prestero, 2001)

Notasi	Nilai	Satuan
$X_{\dot{u}}$	-0.93	kg
$X_{vr}$	35.5	kg/rad
$X_{u u }$	-1.62	kg/m
$X_{r r }$	-1.93	kg.m/rad
$Y_{\dot{v}}$	-35.5	kg

Notasi	Nilai	Satuan
$Y_{\dot{r}}$	1.93	kg.m/rad
$Y_{uv}$	-28.6	kg/m
$Y_{ur}$	5.22	kg/rad
$Y_{v v }$	-131	kg/m
$Y_{r r }$	0.632	kg.m/rad <sup>2</sup>
$Y_{uu\delta_r}$	9.64	kg/(m.rad)
$N_{\dot{v}}$	1.93	kg.m
$N_{\dot{r}}$	-4.88	kg.m <sup>2</sup> /rad
$N_{uv}$	-24	kg
$N_{ur}$	-2	kg.m/rad
$N_{v v }$	-3.18	kg
$N_{r r }$	-9.4	kg.m <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup>
$N_{uu\delta_r}$	-6.15	kg/rad
$I_z$	3.45	kg.m <sup>2</sup>

Tabel 3.5 menunjukkan nilai parameter dari *propeller* dan *rudder* AUV yang digunakan pada penelitian ini.

**Tabel 3.5** Parameter *Propeller* dan *Rudder* (Ningsih, Subchan, & Nurhadi, 2015)

Sistem Propulsi	Sistem Rudder
$J_{dc} = 0.1 \text{ kg.m}^2/\text{s}^2$	$J_s = 0.0000019 \text{ kg.m}^2/\text{s}^2$
$B_{dc} = 0.01 \text{ Ns/m}$	$B_s = 0.0000018 \text{ Ns/m}$
$k_5 = k_4 = 0.3 \text{ Nm/Amp}$	$K_M = K_T = 0.0311 \text{ Nm/Amp}$
$L_a = 0.1 \text{ H}$	$L_m = 0.00464 \text{ H}$
$T_D = 0$	$R_m = 7.38 \text{ ohm}$
$R_a = 2 \text{ ohm}$	

### 3.6 Pemodelan Dinamika AUV

*Autonomous Underwater Vehicle* bergerak maju di dalam air dengan menggunakan aktuator berupa *propeller* yang terpasang pada AUV serta *rudder* untuk dapat berbelok ke kanan kiri. Pergerakan AUV mengandalkan kecepatan *propeller* dan sudut defleksi *rudder*, sehingga untuk mendapatkan model yang sederhana maka model dinamik AUV dilinerisasi

terhadap 3 DOF yakni *surge*, *sway*, dan *yaw* sehingga AUV dapat bergerak menuju arah yang bebas dari satu titik menuju titik yang lain.

Persamaan dinamik AUV didapatkan dari persamaan gerak AUV 6 DOF yang terdapat pada (Fossen T. , 2011) seperti yang telah ditunjukkan pada persamaan (2.37) sampai persamaan (2.42). Persamaan dinamik tersebut kemudian dilakukan linearisasi sehingga diperoleh persamaan gerak 3 DOF untuk gerak *surge*, *sway*, dan *yaw*. Gerak 3 DOF tersebut dipilih karena pada penelitian ini hanya meninjau pengendalian heading (Fossen T. , 2011). Linearisasi dilakukan dengan mengasumsikan bahwa variabel selain *surge* ( $u$ ), *sway* ( $v$ ), dan *yaw* ( $r$ ) dianggap tidak mempengaruhi gerak AUV atau  $w = p = q = 0$ . Hal ini dikarenakan AUV tidak diperkenankan mengalami gerak roll. Gerak *surge*, *sway*, dan *yaw* diambil dikarenakan pada penelitian ini dilakukan pengendalian terhadap *heading*.

Persamaan dinamik AUV dilinearisasi dengan menggunakan metode ekspansi deret Taylor. Persamaan gaya dan momen total arah gerak *surge* yang terdapat pada persamaan (2.37) dilinearisasi sehingga diperoleh persamaan berikut:

$$\begin{aligned} (m - X_{\dot{u}})(\dot{u}) - my_G(\dot{r}) &= X_{HS} + X_{u|u}|u|u| + X_{rr}rr + X_{prop} + \\ (m + X_{vr})vr + mx_Gr^2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Persamaan gaya dan momen total arah gerak *sway* yang terdapat pada persamaan (2.38) dilinearisasi sehingga diperoleh persamaan berikut:

$$\begin{aligned} (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (mx_G - Y_{\dot{r}})(\dot{r}) &= Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{vu}vu + \\ Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (m - Y_{ur})ur + my_Gr^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Persamaan gaya dan momen total arah gerak *yaw* yang terdapat pada persamaan (2.42) dilinearisasi sehingga diperoleh persamaan berikut:

$$\begin{aligned} -my_G(\dot{u}) + (mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} &= N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + \\ N_{r|r}|r|r| + N_{vu}vu + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (mx_G - N_{ur})ur - my_G(vr) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Persamaan (3.3), (3.4), dan (3.5) di atas diubah menjadi bentuk matriks seperti pada persamaan (3.6).

$$\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{HS} + X_{u|u}|u|u| + X_{rr}rr + X_{prop} + (m + X_{vr})vr + mx_Gr^2 \\ Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{vu}vu + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (m - Y_{ur})ur + my_Gr^2 \\ N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{vu}vu + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (mx_G - N_{ur})ur - my_G(vr) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Matriks tersebut kemudian diubah ke dalam persamaan *state-space* sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\tag{3.7}$$

dengan:

$$\begin{aligned}A &= \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 \\ a_3 & b_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & 0 \\ A_3 & B_3 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ C &= [0 \ 0 \ 0 \ 1] \text{ dan } D = 0\end{aligned}\tag{3.8}$$

sehingga didapatkan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \\ &\begin{bmatrix} 2X_{u|u} & (m + X_{vr}) & 2X_{rr} + (m + X_{vr}) + 2mx_G & 0 \\ Y_{vu} - (m - Y_{ur}) & 2Y_{v|v} + Y_{vu} & 2Y_{r|r} - (m - Y_{ur}) - 2my_G & 0 \\ N_{vu} - (mx_G - N_{ur}) & 2N_{v|v} + N_{vu} - my_G & 2N_{r|r} - (mx_G - N_{ur}) - my_G & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\rho D^4 K_T(J) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2Y_{uu}\delta_r & 2Y_{uu}\delta_r & 0 \\ 0 & 2N_{uu}\delta_r & 2N_{uu}\delta_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{3.9}$$

Ditentukan bahwa  $m - X_{\dot{u}} = A$ ,  $-my_G = B = E$ ,  $m - Y_{\dot{v}} = C$ ,  $mx_G - Y_{\dot{r}} = D$ ,  $mx_G - N_{\dot{v}} = F$ ,  $I_z - N_{\dot{r}} = G$ , maka:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} &= \frac{\begin{bmatrix} CG - DF & BF & -BC & 0 \\ DE & AG - BE & -AD & 0 \\ -CE & -AF & AC & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}{ACG - BCE - ADF} \\ &\begin{bmatrix} 2X_{u|u} & (m + X_{vr}) & 2X_{rr} + (m + X_{vr}) + 2mx_G & 0 \\ Y_{vu} - (m - Y_{ur}) & 2Y_{v|v} + Y_{vu} & 2Y_{r|r} - (m - Y_{ur}) - 2my_G & 0 \\ N_{vu} - (mx_G - N_{ur}) & 2N_{v|v} + N_{vu} - my_G & 2N_{r|r} - (mx_G - N_{ur}) - my_G & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{3.10}$$

$$+ \begin{bmatrix} CG - DF & BF & -BC & 0 \\ DE & AG - BE & -AD & 0 \\ -CE & -AF & AC & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho D^4 K_T(J) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2Y_{uu\delta_r} & 2Y_{uu\delta_r} & 0 \\ 0 & 2N_{uu\delta_r} & 2N_{uu\delta_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

Nilai hidrostatik dan hidrodinamik dimasukkan ke dalam pemodelan *state-space* sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1046 & 2.1156 & 1.9909 & 0 \\ -0.9146 & -4.5833 & -0.4362 & 0 \\ -3.3308 & -4.7020 & -2.5963 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0002 \\ 0.5062 \\ -2.8344 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Persamaan *state-space* di atas memiliki tiga masukan sistem yaitu kecepatan sudut *propeller* untuk arah gerak *surge*, sudut elevasi rudder untuk arah gerak *sway* dan *yaw*. Sistem memiliki 4 keluaran yaitu kecepatan arah *surge*, *sway*, dan *yaw* serta posisi sudut *yaw*.

### 3.6.1 Pemodelan Aktuator AUV

*Autonomous Underwater Vehicle* bergerak maju di dalam air dengan menggunakan aktuator berupa *propeller* yang terpasang pada AUV serta *rudder* untuk dapat berbelok ke kanan kiri. Nilai parameter *propeller* pada Tabel 3.5 disubstitusikan ke dalam persamaan (2.43) sehingga diperoleh persamaan *propeller* AUV sebagai berikut:

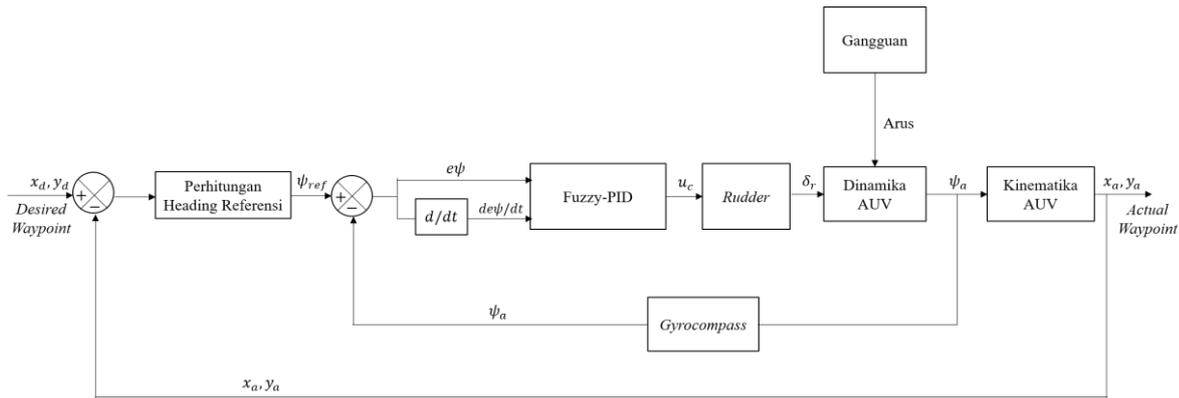
$$P_{dc}(s) = \frac{0.3}{0.01s^2 + 0.201s + 0.11} \quad (3.12)$$

Nilai parameter *rudder* pada Tabel 3.5 disubstitusikan ke dalam persamaan (2.44) sehingga diperoleh persamaan *rudder* AUV sebagai berikut:

$$P_s(s) = \frac{0.311}{8.816 \times 10^{-9} s^3 + 1.40304 \times 10^{-5} s^2 + 0.000980494 s} \quad (3.13)$$

## 3.7 Perancangan Sistem *Path Following* AUV dengan Gangguan

Tahap perancangan sistem kontrol diawali dengan melakukan perancangan diagram blok yang menjelaskan proses pengendalian seperti pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.4** Diagram Blok Sistem Pengendalian

Gambar 3.4 merupakan diagram blok sistem pengendali sudut haluan AUV. Pengendali sudut haluan pada penelitian ini menggunakan pengendali Fuzzy-PID. Sistem logika fuzzy yang digunakan bertindak sebagai blok adaptif dari pengendali PID. Blok adaptif ini bertugas melakukan *self-tuning* berdasarkan input *error* ( $e$ ) dan *delta error* ( $\Delta e$ ) heading AUV. Sinyal kontrol kemudian akan mengatur bukaan *rudder* yang akan mempengaruhi dinamika AUV. Gangguan arus yang mengenai AUV akan mempengaruhi gerakan AUV. *Output* dari dinamika AUV yang berupa heading aktual akan menjadi sinyal *feedback* yang dibaca oleh sensor *gyrocompass*. Heading aktual juga akan masuk ke dalam kinematika AUV untuk melakukan perhitungan koordinat posisi ( $x, y$ ). Koordinat posisi aktual akan dibaca oleh sensor SONAR yang kemudian akan masuk ke perhitungan heading referensi menggunakan metode *Line of Sight* (LOS), sehingga saat terjadi penyimpangan arah gerak AUV dari yang seharusnya, sistem kendali AUV dapat mengatur bukaan *rudder* dan AUV dapat kembali ke jalur yang seharusnya.

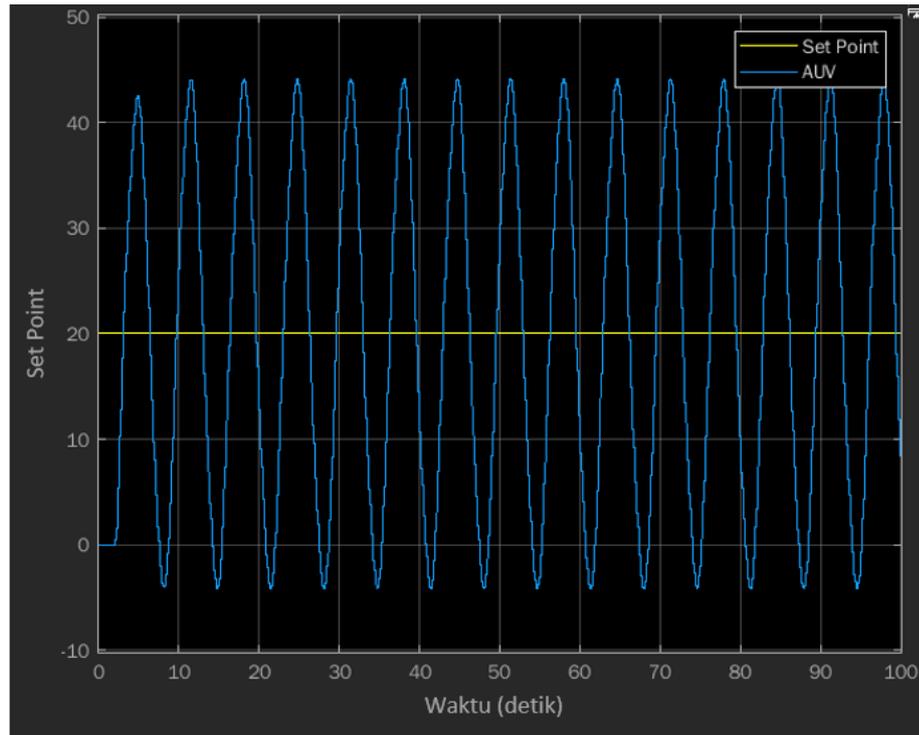
### 3.7.1 Perancangan Kendali Logika Fuzzy *Self-Tuning* PID

Kendali logika fuzzy *self-tuning* PID ini bertujuan untuk melakukan *tuning* terhadap parameter pengendali PID secara otomatis. Algoritma dari pengendali Fuzzy-PID yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada penelitian (Zhao, Tomizuka, & Isaka, 1993). Perancangan pengendali dilakukan dengan terlebih dahulu melakukan *tuning* parameter PID menggunakan metode *tuning* Ziegler-Nichols. *Tuning* ini dilakukan untuk mendapatkan rentang nilai pengendali PID yang sesuai untuk sistem. Hasil *tuning* yang digunakan untuk langkah selanjutnya adalah *gain* kritis  $K_{cr}$  dan periode kritis  $T_{cr}$ . Penentuan parameter PID dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (2.46) sampai (2.50).

*Tuning* PID otomatis pada penelitian ini menggunakan dua sistem fuzzy dengan tipe *Fuzzy Inference System* (FIS) Sugeno. Variabel input yang digunakan adalah *error* ( $e$ ) dan

*delta error* ( $\Delta e$ ). Sistem fuzzy yang pertama menentukan variabel output  $K_p'$  dan  $K_d'$ , sedangkan sistem fuzzy yang kedua menentukan variabel output  $\alpha$ . Ketiga variabel output tersebut digunakan untuk melakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan (2.47), (2.49), dan (2.50).

Pada software MATLAB, digunakan toolbox Tuning-PID sehingga diperoleh nilai  $K_{cr}$  sebesar -1.5842 dan  $T_{cr}$  sebesar 6.817 detik dengan respon sistem yang dapat dilihat pada Gambar 3.5.



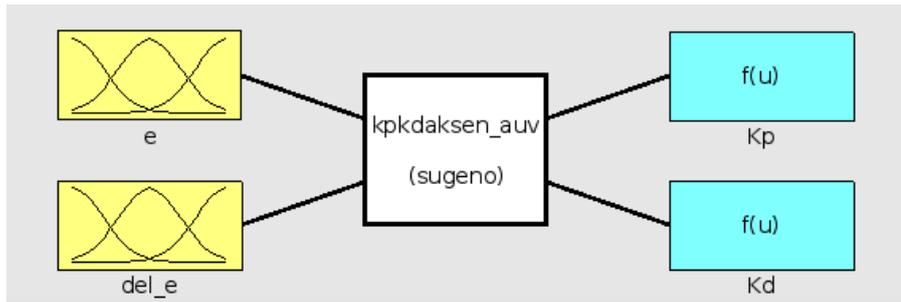
**Gambar 3.5** Hasil Respon Sistem Stabil Kritis

Nilai parameter  $K_{cr}$  dan  $T_{cr}$  yang diperoleh digunakan untuk menentukan range pengendali  $K_p$  dan  $K_d$ . Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan (2.47) dan (2.49), diperoleh range pengendali  $K_p$  dan  $K_d$  sebagai berikut:

$$K_p = (-0.9505 + 0.4752)K_p' - 0.4752 \quad (3.14)$$

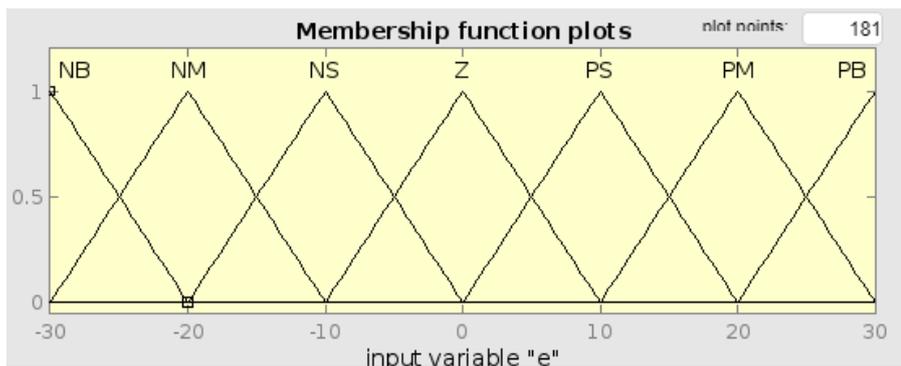
$$K_d = (-1.6199 + 0.8639)K_d' - 0.8639 \quad (3.15)$$

Susunan fuzzy yang pertama dapat dilihat pada Gambar 3.6. Pada gambar dapat dilihat bahwa sistem fuzzy yang digunakan memiliki 2 variabel input dan 2 variabel output. Variabel output merupakan parameter  $K_p'$  dan  $K_d'$  yang akan digunakan untuk menghitung parameter  $K_p$  dan  $K_d$  menggunakan persamaan (2.47) dan (2.49).

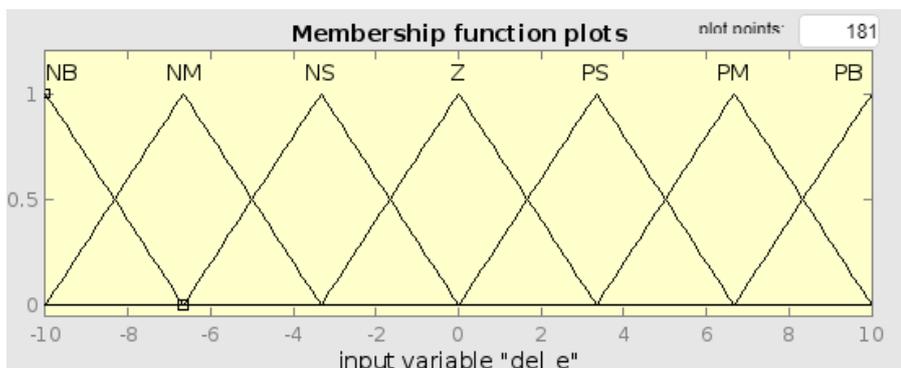


**Gambar 3.6** Arsitektur Fuzzy Sugeno untuk Variabel  $K_p'$  dan  $K_d'$

Variabel input pada sistem ini, yaitu berupa *error* ( $e$ ) dan *delta error* ( $\Delta e$ ), memiliki 7 fungsi keanggotaan, yaitu NB (*Negative Big*), NM (*Negative Medium*), NS (*Negative Small*), Z (*Zero*), PS (*Positive Small*), PM (*Positive Medium*), dan PB (*Positive Big*). Fungsi keanggotaan yang disusun memiliki bentuk fungsi keanggotaan segitiga dengan variabel  $e$  memiliki rentang nilai  $-30^\circ$  sampai dengan  $30^\circ$ , sedangkan variabel  $\Delta e$  memiliki rentang nilai  $-10^\circ$  sampai dengan  $10^\circ$ . Arsitektur variabel input dapat dilihat pada Gambar 3.7 untuk variabel  $e$  dan Gambar 3.8 untuk variabel  $\Delta e$ .



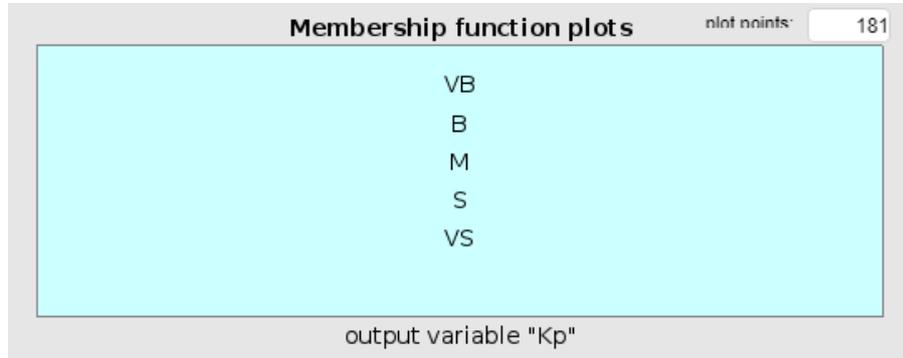
**Gambar 3.7** Arsitektur Variabel *Input Error* ( $e$ )



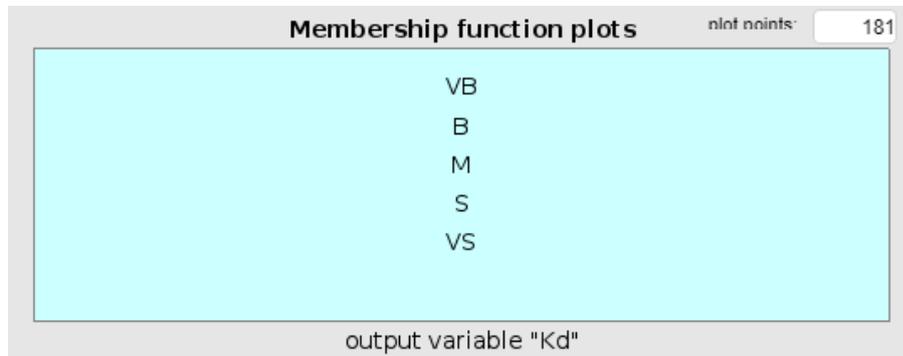
**Gambar 3.8** Arsitektur Variabel *Input Perubahan Error* ( $\Delta e$ )

Variabel output  $K_p'$  dan  $K_d'$  disusun dengan menggunakan 5 fungsi keanggotaan, yaitu VS (*Very Small*), S (*Small*), M (*Medium*), B (*Big*), dan VB (*Very Big*). Kedua variabel output tersebut memiliki bentuk fungsi keanggotaan *singleton* dan memiliki rentang nilai yang

sama, yaitu antara 0-1. Arsitektur variabel output dapat dilihat pada Gambar 3.9 untuk variabel  $K_p'$  dan Gambar 3.10 untuk variabel  $K_d'$ . Rule base yang disusun untuk menentukan nilai  $K_p'$  dan  $K_d'$  dapat dilihat pada Tabel 3.6.



**Gambar 3.9** Arsitektur Variabel Output  $K_p'$



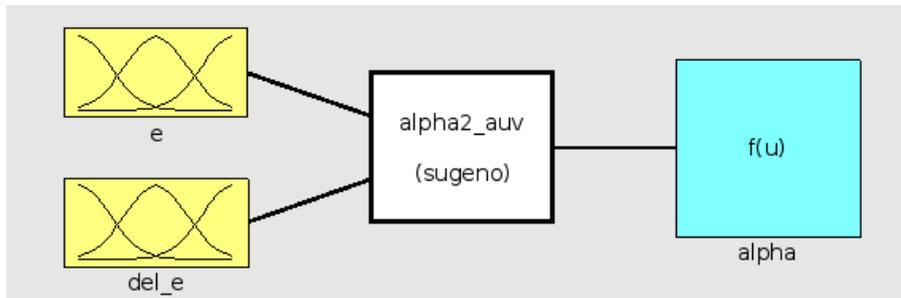
**Gambar 3.10** Arsitektur Variabel Output  $K_d'$

**Tabel 3.6** Rule Base Variabel Output  $K_p'$  dan  $K_d'$

e Δe	NB		NM		NS		Z		PS		PM		PB	
	Kp'	Kd'												
<b>NB</b>	M	S	S	M	VS	B	S	VB	VS	B	S	B	M	S
<b>NM</b>	B	VS	M	S	S	M	M	VB	S	M	M	S	B	VS
<b>NS</b>	VB	VS	B	VS	B	S	B	VB	B	S	B	VS	VB	VS
<b>Z</b>	VB	VS	VB	VS	VB	VS	VB	VB	VB	VS	VB	VS	VB	VS
<b>PS</b>	VB	VS	B	VS	B	S	B	VB	B	S	B	VS	VB	VS
<b>PM</b>	B	VS	M	S	S	M	M	VB	S	M	M	S	B	VS
<b>PB</b>	M	S	SM	M	VS	B	S	VB	VS	B	S	M	M	S

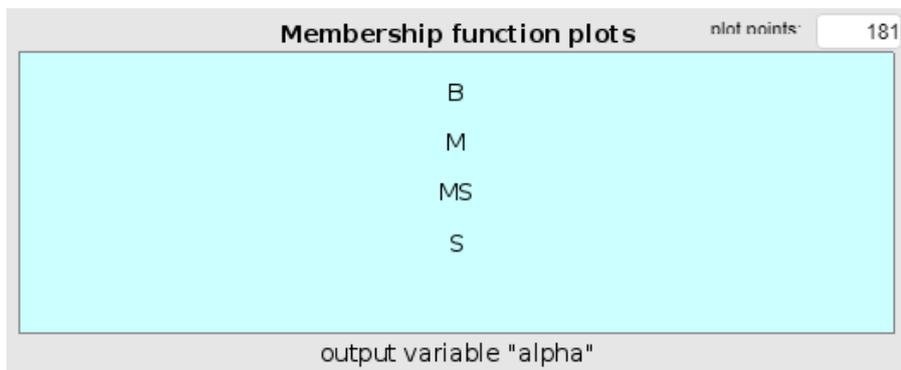
Susunan fuzzy yang kedua dapat dilihat pada Gambar 3.11. Pada gambar dapat dilihat bahwa sistem fuzzy yang digunakan memiliki 2 variabel input dan 1 variabel output.

Variabel output merupakan parameter  $\alpha$  yang akan digunakan untuk menghitung parameter  $K_i$  menggunakan persamaan (2.50).



**Gambar 3.11** Arsitektur Fuzzy Sugeno untuk Variabel  $\alpha$

Variabel input yang digunakan sama seperti sistem fuzzy sebelumnya, yaitu *error* ( $e$ ) dan *delta error* ( $\Delta e$ ). Variabel output  $\alpha$  disusun dengan menggunakan 4 fungsi keanggotaan, yaitu *S (Small)*, *M (Medium)*, *B (Big)*, dan *VB (Very Big)*. Variabel output tersebut memiliki bentuk fungsi keanggotaan *singleton* dan memiliki rentang nilai 25-100. Arsitektur variabel output dapat dilihat pada Gambar 3.12. Rule base yang disusun untuk menentukan nilai  $\alpha$  dapat dilihat pada Tabel 3.7.



**Gambar 3.12** Arsitektur Variabel Output  $\alpha$

**Tabel 3.7** Rule Base Variabel Output  $\alpha$

$\Delta e \backslash e$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	S	MS	M	B	M	MS	S
NM	S	MS	MS	M	MS	MS	S
NS	S	S	MS	MS	MS	S	S
Z	S	S	S	MS	S	S	S
PS	S	S	MS	MS	MS	S	S
PM	S	MS	MS	M	MS	MS	S
PB	S	MS	M	B	M	MS	S

### **3.8 Pengujian Sistem *Path Following* AUV dengan Gangguan**

Pada tahap ini dilakukan simulasi terhadap pengendalian proses *path following* pada AUV. Simulasi dilakukan dengan menggunakan gangguan berupa arus laut yang telah dimodelkan. Simulasi dilakukan dengan tujuan mengetahui performansi pengendali yang sudah dirancang mampu untuk mengatasi adanya gangguan sehingga hasil simulasi nantinya dapat dikatakan telah mencerminkan kondisi riil di lautan. Perancangan simulasi yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada bagian lampiran.

### **3.9 Analisa Data dan Pembahasan Performansi Sistem**

Hasil simulasi yang telah diperoleh akan dilakukan analisa data pada tahap ini. Analisis yang dilakukan adalah dengan mengamati nilai-nilai parameter pengendalian yang dihasilkan oleh sistem pengendali yang telah dirancang pada penelitian ini. Dikarenakan AUV belum memiliki standar sendiri, maka nilai-nilai parameter pengendali hasil simulasi akan dibandingkan dengan standar kapal yang telah ditetapkan oleh IMO. Jika hasil performansi pengendali yang diperoleh telah sesuai dengan standar IMO, maka dilanjutkan dengan proses simulasi *path following*. Pada *path following*, akan dilakukan pengamatan pada error jalur yang dihasilkan oleh sistem pengendali yang telah dirancang. Penentuan keberhasilan *path following* ditentukan oleh nilai error jalur, apakah masih berada dalam rentang *circle of acceptance* atau berada di luar rentang tersebut.

### **3.10 Pengambilan Kesimpulan dan Saran**

Berdasarkan analisa data yang telah dilakukan, dapat dilakukan pengambilan kesimpulan yang diharapkan dapat menjawab tujuan dari penelitian ini. Selain itu, dapat diberikan saran-saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya.

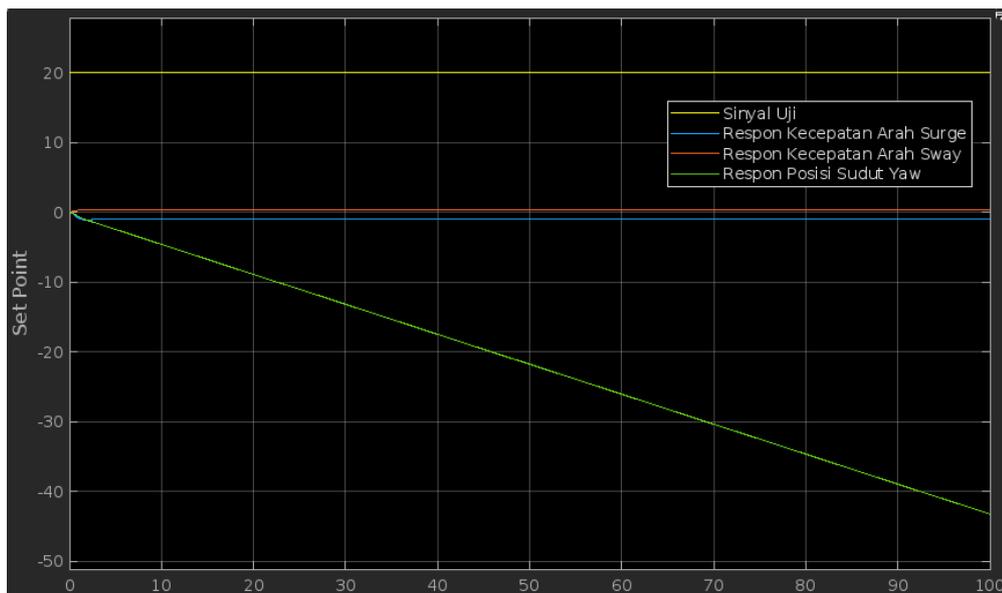
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Analisis Uji *Open Loop*

Analisis sistem pengendalian rudder dilakukan dalam dua tahap uji, yaitu uji *open loop* dan uji *close loop*. Uji *open loop* dilakukan agar dapat diketahui respon sistem saat belum diberikan sistem pengendali. Pengujian *open loop* dilakukan dengan menggunakan persamaan (3.11) dan dilakukan simulasi dengan nilai  $u = 1$  sehingga menghasilkan respon uji *open loop* sistem seperti pada Gambar 4.1. Uji *open loop* yang digunakan merupakan sistem orde nol, sehingga dapat diperoleh respon sistem langsung tanpa menggunakan kontroler dan sinyal *feedback*.



**Gambar 4.1** Hasil Uji *Open Loop*

*Set point* yang digunakan pada uji *open loop* adalah sebesar  $20^\circ$ . Gambar 4.1 menunjukkan bahwa respon kecepatan arah surge dan respon kecepatan arah sway adalah konstan pada setiap kenaikan waktu, sedangkan respon sudut *yaw* (*heading*) AUV tidak bisa mencapai *set point* dan cenderung terus menurun pada setiap kenaikan waktu. Respon *heading* AUV akan dapat mencapai nilai *set point* saat diberikan sistem pengendali ke dalam sistem.

Sistem pengendali haluan yang digunakan pada penelitian ini adalah pengendali Fuzzy-PID adaptif yang berfungsi sebagai pengatur parameter PID. Sistem pengendali ini memiliki

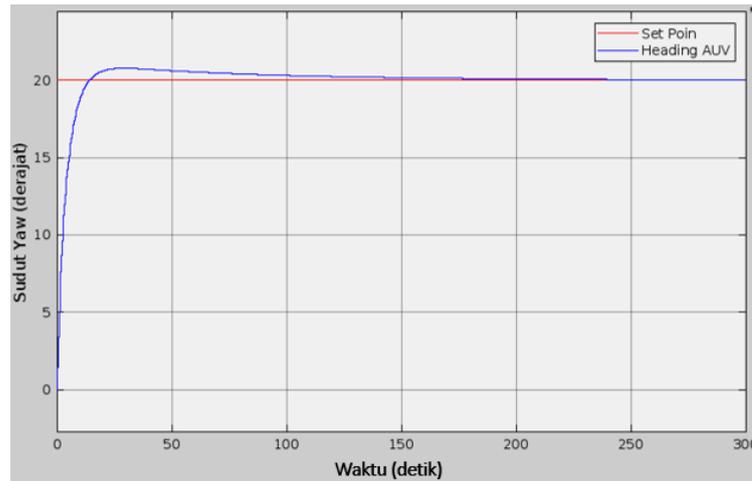
2 variabel input, yaitu *error* ( $e$ ) dan *delta error* ( $\Delta e$ ), serta 2 variabel output, yaitu  $K_p'$ ,  $K_d'$ , dan  $\alpha$ . Variabel  $K_p'$  dan  $K_d'$  digunakan untuk mengatur nilai  $K_p$  dan  $K_d$ , sedangkan variabel  $\alpha$  digunakan untuk mengatur nilai  $K_i$ . Berdasarkan rentang nilai pengendali yang diperoleh, dilakukan penyusunan sistem fuzzy seperti pada Gambar 3.6 dan 3.11. Pemilihan sistem fuzzy tersebut didasarkan pada hasil pengujian sistem fuzzy seperti pada tabel berikut:

**Tabel 4.1** Hasil Pengujian Sistem Fuzzy

No.	Sistem Fuzzy		Overshoot	
	Kp' dan Kd'	Alfa	Set Poin 20°	Set Poin 30°
1	5 Fungsi Keanggotaan Tipe Sugeno	4 Fungsi Keanggotaan Tipe Sugeno	32.667%	42.143%
	Range Output Kp' = 0-1	Range Output Alfa = 2-5		
	Range Output Kd' = 0-1			
2	5 Fungsi Keanggotaan Tipe Sugeno	4 Fungsi Keanggotaan Tipe Sugeno	8.152%	9.341%
	Range Output Kp' = 0-1	Range Output Alfa = 10-40		
	Range Output Kd' = 0-1			
3	5 Fungsi Keanggotaan Tipe Sugeno	4 Fungsi Keanggotaan Tipe Sugeno	10.556%	11.798%
	Range Output Kp' = 0-1	Range Output Alfa = 10-25		
	Range Output Kd' = 0-1			
4	2 Fungsi Keanggotaan Tipe Mamdani	4 Fungsi Keanggotaan Tipe Sugeno	11.798%	11.798%
	Range Output Kp' = 0-1	Range Output Alfa = 10-25		
	Range Output Kd' = 0-1			
5	5 Fungsi Keanggotaan Tipe Sugeno	4 Fungsi Keanggotaan Tipe Sugeno	3.8415%	4.0937%
	Range Output Kp' = 0-1	Range Output Alfa = 25-100		
	Range Output Kd' = 0-1			

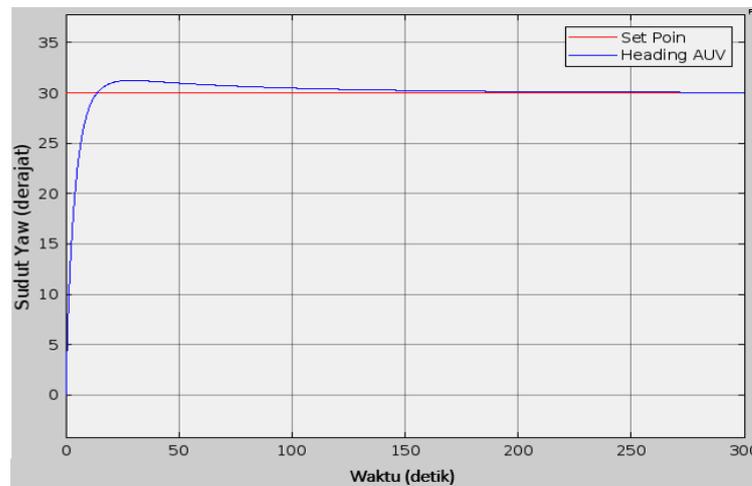
#### 4.2 Analisis Uji Close Loop

Pengujian kedua untuk melakukan analisis sistem pengendalian haluan adalah dengan uji *close loop*. Pengujian dilakukan dengan menetapkan nilai *set point* 20° dan 30° sebagai input. Hasil uji *close loop* untuk *set point* 20° dapat dilihat pada Gambar 4.2.



**Gambar 4.2** Hasil Uji *Close Loop* Set Poin 20°

Hasil uji *close loop* dengan *set point* 20° menghasilkan nilai *overshoot* sebesar 3.8415% dari nilai *set point* atau sebesar 0.7683°. Terdapat beberapa parameter pengendali lain yang dapat diamati dari hasil simulasi yang dilakukan, yaitu *rise time*, *settling time*, dan *error steady-state*. *Rise time* yang didapatkan adalah sebesar 7.9694 detik, *settling time* sebesar 133.5070 detik, dan *error steady-state* sebesar -0.0258.



**Gambar 4.3** Hasil Uji *Close Loop* Set Poin 30°

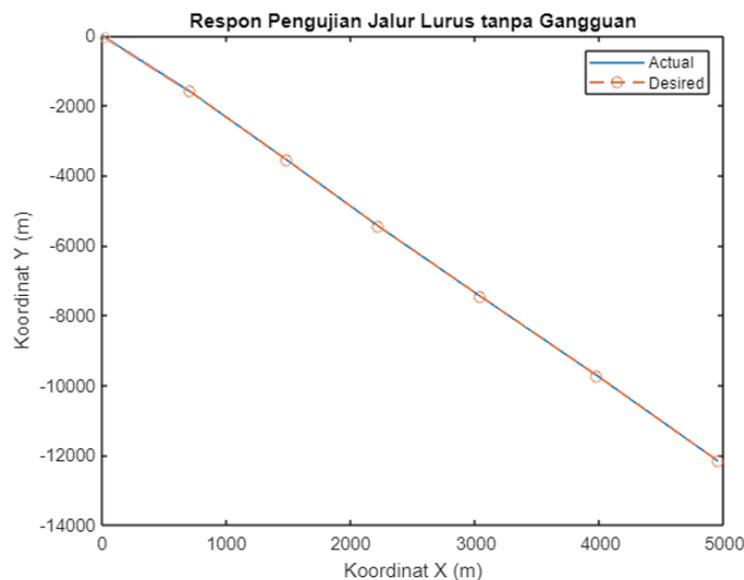
Hasil uji *close loop* dengan *set point* 30° menghasilkan nilai *overshoot* sebesar 4.0937% dari nilai *set point* atau sebesar 1.2281°. Terdapat beberapa parameter pengendali lain yang dapat diamati dari hasil simulasi yang dilakukan, yaitu *rise time*, *settling time* dan *error steady-state*. *Rise time* yang didapatkan adalah sebesar 7.9023 detik, *settling time* sebesar 132.8886 detik dan *error steady-state* sebesar -0.0396. Parameter performansi pengendali pada uji *close loop* dengan *set point* 20° dan 30° secara ringkas dapat dilihat pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Parameter Performansi Pengendali Uji *Close Loop*

Parameter Performansi	Set Poin 20	Set Poin 30
<i>Rise Time</i>	7.9694 detik	7.9023
<i>Settling Time</i>	133.5070 detik	132.8886
<i>Overshoot</i>	3.8415%	4.0937%
<i>Undershoot</i>	0	0
<i>Peak</i>	20.7683°	31.2281°
<i>Peak Time</i>	28.9840 detik	29.0018 detik

### 4.3 Analisis *Path Following* Lurus Tanpa Gangguan

Pengujian dan analisa *path following* yang pertama dilakukan pada jalur lurus dengan kondisi laut tenang tanpa ada gangguan arus laut. Titik-titik koordinat yang digunakan pada jalur lurus dapat dilihat pada Tabel 3.1. Titik koordinat yang digunakan merupakan koordinat dalam bentuk UTM yang telah disederhanakan, dengan titik keberangkatan Pulau Bunaken sebagai titik referensi (0,0).

**Gambar 4.4** Respon Pengujian Jalur Lurus Tanpa Gangguan

Hasil pengujian sistem kendali otomatis AUV pada jalur lurus tanpa gangguan dapat diamati pada Gambar 4.4. Analisis dilakukan dengan menghitung dan mengamati nilai error pada tiap titik jalur yang telah ditentukan. Nilai error jalur diperoleh dari jarak antara nilai (x,y) aktual AUV dengan nilai (x,y) referensi yang dilewati. Pada jalur lurus, terdapat 7 titik koordinat yang dianalisis nilai errornya. Analisa error untuk setiap titik koordinat dapat dilihat pada Tabel 4.3. Rata-rata nilai error yang dihasilkan adalah sebesar 0.4299 meter atau 0.0002 mil laut. Error terbesar dialami pada saat AUV tiba di titik ke-3, yaitu sebesar 0.7744 meter. Berdasarkan nilai error yang didapatkan, sistem kendali gerak AUV yang dirancang

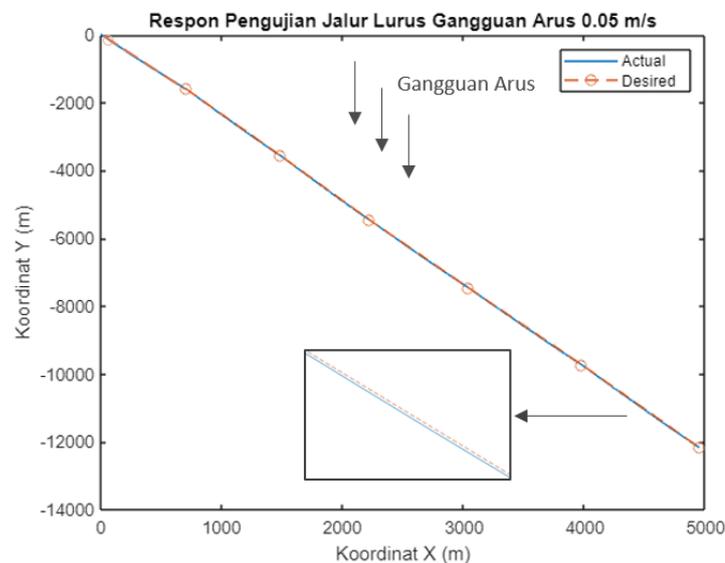
mampu menjaga gerak AUV agar tetap berada dalam jalur yang ditentukan, yaitu nilai error berada di bawah nilai  $2L_{pp}$ .

**Tabel 4.3** Error Jalur Lurus Tanpa Gangguan

Kode Posisi	Desired		Actual		Error Jalur (m)	Konversi Nautical Mile (mi)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)		
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	704.5878	-1592.7118	704.6830	-1592.9000	0.2109	0.0001
3	1484.6006	-3555.5136	1484.3000	-3554.8000	0.7744	0.0004
4	2218.1804	-5444.6435	2218.4000	-5445.3000	0.6922	0.0004
5	3039.3407	-7453.8185	3039.8000	-7454.0000	0.4939	0.0003
6	3977.8743	-9724.9333	3977.6000	-9724.5000	0.5128	0.0003
7	4951.7882	-12172.0498	4951.5000	-12171.9000	0.3249	0.0002
Rata-rata					0.4299	0.0002

#### 4.4 Analisis *Path Following* Lurus Gangguan Arus Kecil

Pengujian dan analisa *path following* yang kedua dilakukan pada jalur lurus dengan kondisi AUV terkena gangguan arus sebesar 0.05 m/s atau 0.097 knot. Titik-titik koordinat yang digunakan pada jalur lurus dapat dilihat pada Tabel 3.1. Titik koordinat yang digunakan merupakan koordinat dalam bentuk UTM yang telah disederhanakan, dengan titik keberangkatan Pulau Bunaken sebagai titik referensi (0,0).



**Gambar 4.5** Respon Pengujian Jalur Lurus Gangguan Arus Kecil (0.05 m/s)

Hasil pengujian sistem kendali otomatis AUV pada jalur lurus dengan gangguan arus kecil dapat diamati pada Gambar 4.5. Analisis dilakukan dengan menghitung dan mengamati nilai error pada tiap titik jalur yang telah ditentukan. Nilai error jalur diperoleh dari jarak antara nilai (x,y) aktual AUV dengan nilai (x,y) referensi yang dilewati. Pada jalur lurus,

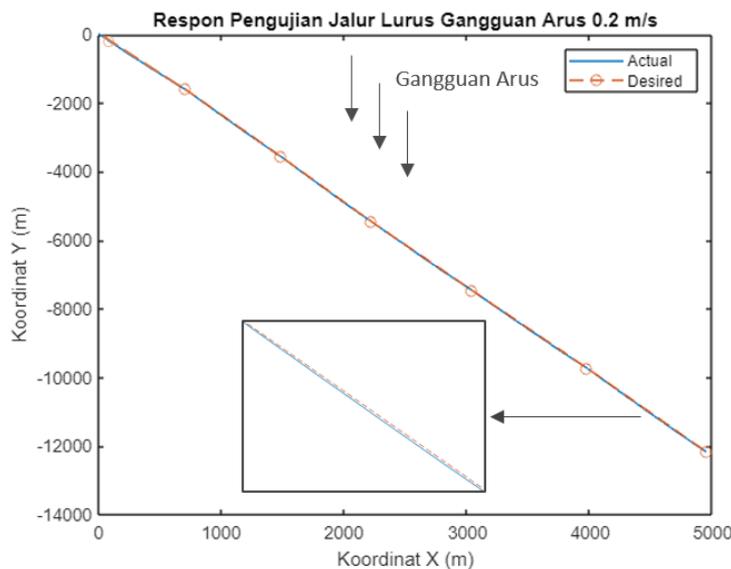
terdapat 7 titik koordinat yang dianalisis nilai errornya. Analisa error untuk setiap titik koordinat dapat dilihat pada Tabel 4.4. Rata-rata nilai error yang dihasilkan adalah sebesar 0.6467 meter atau 0.0003 mil laut. Error terbesar dialami pada saat AUV tiba di titik ke-7, yaitu sebesar 1.1193 meter. Berdasarkan nilai error yang didapatkan, sistem kendali gerak AUV yang dirancang mampu menjaga gerak AUV agar tetap berada dalam jalur yang ditentukan, yaitu nilai error berada di bawah nilai 2Lpp.

**Tabel 4.4** Error Jalur Lurus Gangguan Arus Kecil

Kode Posisi	Desired		Actual		Error Jalur (m)	Konversi Nautical Mile (mi)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)		
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	704.5878	-1592.7118	704.8806	-1591.8000	0.9576	0.0005
3	1484.6006	-3555.5136	1484.8000	-3555.2000	0.3717	0.0002
4	2218.1804	-5444.6435	2218.8000	-5445.1000	0.7696	0.0004
5	3039.3407	-7453.8185	3039.1000	-7453.3000	0.5716	0.0003
6	3977.8743	-9724.9333	3977.8000	-9724.2000	0.7371	0.0004
7	4951.7882	-12172.0498	4951.4000	-12171.0000	1.1193	0.0006
Rata-rata					0.6467	0.0003

**4.5 Analisis Path Following Lurus Gangguan Arus Besar**

Pengujian dan analisa *path following* yang ketiga dilakukan pada jalur lurus dengan kondisi AUV terkena gangguan arus sebesar 0.20 m/s atau 0.389 knot. Titik-titik koordinat yang digunakan pada jalur lurus dapat dilihat pada Tabel 3.1. Titik koordinat yang digunakan merupakan koordinat dalam bentuk UTM yang telah disederhanakan, dengan titik keberangkatan Pulau Bunaken sebagai titik referensi (0,0).



**Gambar 4.6** Respon Pengujian Jalur Lurus Gangguan Arus Besar (0.2 m/s)

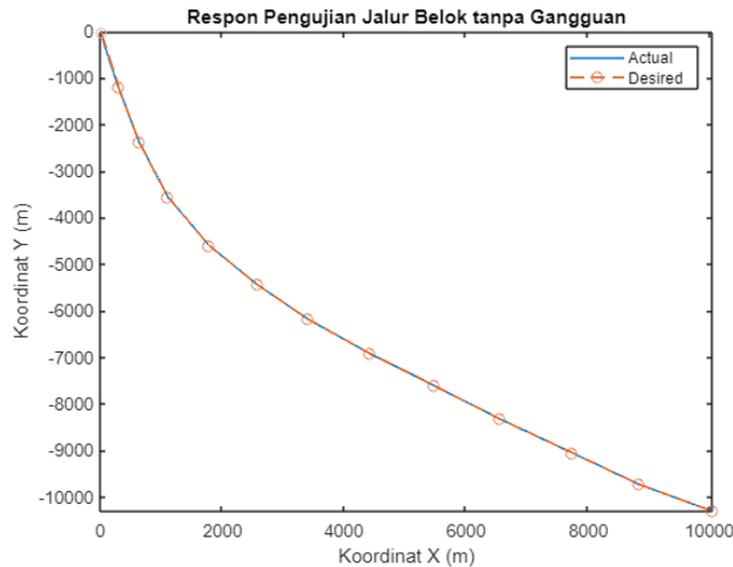
Hasil pengujian sistem kendali otomatis AUV pada jalur lurus dengan gangguan arus besar dapat diamati pada Gambar 4.6. Analisis dilakukan dengan menghitung dan mengamati nilai error pada tiap titik jalur yang telah ditentukan. Nilai error jalur diperoleh dari jarak antara nilai (x,y) aktual AUV dengan nilai (x,y) referensi yang dilewati. Pada jalur lurus, terdapat 7 titik koordinat yang dianalisis nilai errornya. Analisa error untuk setiap titik koordinat dapat dilihat pada Tabel 4.5. Rata-rata nilai error yang dihasilkan adalah sebesar 0.9350 meter atau sebesar 0.0005 mil laut. Error terbesar dialami pada saat AUV tiba di titik terakhir, yaitu sebesar 2.2340 meter. Berdasarkan nilai error yang didapatkan, sistem kendali gerak AUV yang dirancang mampu menjaga gerak AUV agar tetap berada dalam jalur yang ditentukan, yaitu nilai error berada di bawah nilai 2Lpp.

**Tabel 4.5** Error Jalur Lurus Gangguan Arus Besar

Kode Posisi	<i>Desired</i>		<i>Actual</i>		Error Jalur (m)	Konversi Nautical Mile (mi)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)		
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	704.5878	-1592.7118	704.7975	-1591.9000	0.8384	0.0005
3	1484.6006	-3555.5136	1484.0000	-3555.4000	0.6112	0.0003
4	2218.1804	-5444.6435	2218.4000	-5444.6000	0.2238	0.0001
5	3039.3407	-7453.8185	3039.7000	-7452.0000	1.8536	0.0010
6	3977.8743	-9724.9333	3977.3000	-9724.4000	0.7837	0.0004
7	4951.7882	-12172.0498	4950.9000	-12170.0000	2.2340	0.0012
Rata-rata					0.9350	0.0005

#### 4.6 Analisis *Path Following* Belok Tanpa Gangguan

Pengujian dan analisa *path following* yang keempat dilakukan pada jalur belok dengan kondisi laut tenang tanpa ada gangguan arus laut. Titik-titik koordinat yang digunakan pada jalur belok dapat dilihat pada Tabel 3.2. Titik koordinat yang digunakan merupakan koordinat dalam bentuk UTM yang telah disederhanakan, dengan titik keberangkatan Pulau Bunaken sebagai titik referensi (0,0).



**Gambar 4.7** Respon Pengujian Jalur Belok Tanpa Gangguan

Hasil pengujian sistem kendali otomatis AUV pada jalur belok dengan tanpa gangguan dapat diamati pada Gambar 4.7. Analisis dilakukan dengan menghitung dan mengamati nilai error pada tiap titik jalur yang telah ditentukan. Nilai error jalur diperoleh dari jarak antara nilai (x,y) aktual AUV dengan nilai (x,y) referensi yang dilewati. Pada jalur belok, terdapat 13 titik koordinat yang dianalisis nilai errornya. Analisa error untuk setiap titik koordinat dapat dilihat pada Tabel 4.6. Rata-rata nilai error yang dihasilkan adalah sebesar 0.7648 meter atau sebesar 0.0004 mil laut. Error terbesar dialami pada saat AUV tiba di titik ke-5, yaitu sebesar 1.4804 meter. Berdasarkan nilai error yang didapatkan, sistem kendali gerak AUV yang dirancang mampu menjaga gerak AUV agar tetap berada dalam jalur yang ditentukan, yaitu nilai error berada di bawah nilai  $2L_{pp}$ .

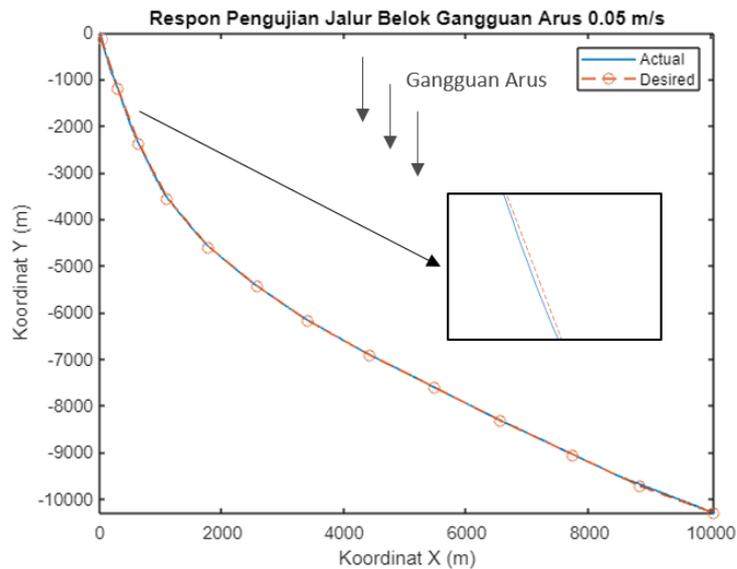
**Tabel 4.6** Error Jalur Belok Tanpa Gangguan

Kode Posisi	Desired		Actual		Error Jalur (m)	Konversi Nautical Mile (mi)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)		
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	299.5816	-1189.4139	299.5014	-1189.1000	0.3239	0.0002
3	642.4344	-2375.4166	642.4512	-2375.5000	0.0851	0.0000
4	1111.0870	-3547.4984	1112.0000	-3548.5000	1.3553	0.0007
5	1785.5143	-4591.6363	1784.7000	-4590.4000	1.4804	0.0008
6	2582.5119	-5440.6269	2581.7000	-5439.7000	1.2322	0.0007
7	3406.9350	-6174.7170	3406.7000	-6174.5000	0.3199	0.0000
8	4423.3417	-6916.0275	4422.8000	-6915.6000	0.6900	0.0002
9	5484.2328	-7608.1571	5484.7000	-7608.6000	0.6437	0.0000
10	6563.7019	-8325.4626	6563.0000	-8325.0000	0.8406	0.0007

Kode Posisi	Desired		Actual		Error Jalur (m)	Konversi Nautical Mile (mi)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)		
11	7751.0777	-9051.2845	7752.0000	-9051.9000	1.1088	0.0008
12	8836.4036	-9723.1280	8835.3000	-9722.4000	1.3221	0.0007
13	10060.1675	-10309.7722	10059.7000	-10309.5000	0.5410	0.0002
Rata-rata					0.7648	0.0004

#### 4.7 Analisis Path Following Belok Gangguan Arus Kecil

Pengujian dan analisa *path following* yang kelima dilakukan pada jalur belok dengan kondisi AUV terkena gangguan arus sebesar 0.05 m/s atau 0.097 knot. Titik-titik koordinat yang digunakan pada jalur belok dapat dilihat pada Tabel 3.2. Titik koordinat yang digunakan merupakan koordinat dalam bentuk UTM yang telah disederhanakan, dengan titik keberangkatan Pulau Bunaken sebagai titik referensi (0,0).



**Gambar 4.8** Respon Pengujian Jalur Belok Gangguan Arus Kecil (0.05 m/s)

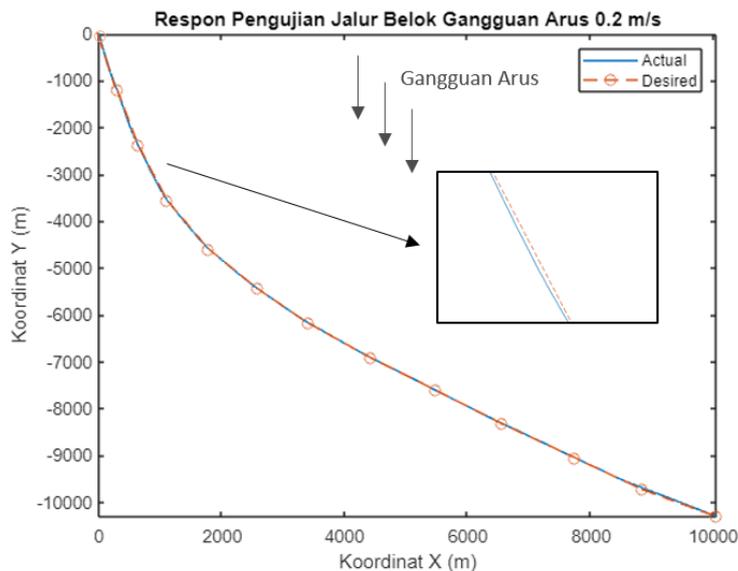
Hasil pengujian sistem kendali otomatis AUV pada jalur belok dengan gangguan arus dapat diamati pada Gambar 4.8. Analisis dilakukan dengan menghitung dan mengamati nilai error pada tiap titik jalur yang telah ditentukan. Nilai error jalur diperoleh dari jarak antara nilai (x,y) aktual AUV dengan nilai (x,y) referensi yang dilewati. Pada jalur belok, terdapat 13 titik koordinat yang dianalisis nilai errornya. Analisa error untuk setiap titik koordinat dapat dilihat pada Tabel 4.7. Rata-rata nilai error yang dihasilkan adalah sebesar 0.8155 meter atau sebesar 0.0004 mil laut. Error terbesar dialami pada saat AUV tiba di titik ke-7, yaitu sebesar 1.7720 meter. Berdasarkan nilai error yang didapatkan, sistem kendali gerak AUV yang dirancang mampu menjaga gerak AUV agar tetap berada dalam jalur yang ditentukan, yaitu nilai error berada di bawah nilai  $2L_{pp}$ .

**Tabel 4.7** Error Jalur Belok Gangguan Arus Kecil

Kode Posisi	Desired		Actual		Error Jalur (m)	Konversi Nautical Mile (mi)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)		
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	299.5816	-1189.4000	299.9167	-1188.1000	1.3425	0.0007
3	642.4344	-2375.4000	642.4321	-2375.6000	0.2000	0.0001
4	1111.1000	-3547.5000	1111.3000	-3547.8000	0.3606	0.0002
5	1785.5000	-4591.6000	1784.4000	-4591.1000	1.2083	0.0007
6	2582.5000	-5440.6000	2581.7000	-5440.4000	0.8246	0.0004
7	3406.9000	-6174.7000	3405.2000	-6174.2000	1.7720	0.0010
8	4423.3000	-6916.0000	4422.3000	-6916.2000	1.0198	0.0006
9	5484.2000	-7608.2000	5484.1000	-7608.5000	0.3162	0.0002
10	6563.7000	-8325.5000	6562.7000	-8325.1000	1.0770	0.0006
11	7751.1000	-9051.3000	7750.6000	-9051.3000	0.5000	0.0003
12	8836.4000	-9723.1000	8836.8000	-9723.5000	0.5657	0.0003
13	10060.0000	-10310.0000	10059.0000	-10309.0000	1.4142	0.0008
Rata-rata					0.8155	0.0004

#### 4.8 Analisis *Path Following* Belok Gangguan Arus Besar

Pengujian dan analisa *path following* yang terakhir dilakukan pada jalur belok dengan kondisi AUV terkena gangguan arus sebesar 0.20 m/s atau 0.389 knot. Titik-titik koordinat yang digunakan pada jalur belok dapat dilihat pada Tabel 3.2. Titik koordinat yang digunakan merupakan koordinat dalam bentuk UTM yang telah disederhanakan, dengan titik keberangkatan Pulau Bunaken sebagai titik referensi (0,0).

**Gambar 4.9** Respon Pengujian Jalur Belok Gangguan Arus Besar (0.2 m/s)

Hasil pengujian sistem kendali otomatis AUV pada jalur belok dengan gangguan arus dapat diamati pada Gambar 4.9. Analisis dilakukan dengan menghitung dan mengamati nilai error pada tiap titik jalur yang telah ditentukan. Nilai error jalur diperoleh dari jarak antara nilai (x,y) aktual AUV dengan nilai (x,y) referensi yang dilewati. Pada jalur belok, terdapat 13 titik koordinat yang dianalisis nilai errornya. Analisa error untuk setiap titik koordinat dapat dilihat pada Tabel 4.8. Rata-rata nilai error yang dihasilkan adalah sebesar 0.8443 meter atau sebesar 0.0005 mil laut. Error terbesar dialami pada saat AUV tiba di titik ke-2, yaitu sebesar 2.3224 meter. Berdasarkan nilai error yang didapatkan, sistem kendali gerak AUV yang dirancang mampu menjaga gerak AUV agar tetap berada dalam jalur yang ditentukan, yaitu nilai error berada di bawah nilai 2Lpp.

**Tabel 4.8** Error Jalur Belok Gangguan Arus Besar

Kode Posisi	Desired		Actual		Error Jalur (m)	Konversi Nautical Mile (mi)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)		
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	299.5816	-1189.4000	299.2598	-1187.1000	2.3224	0.0013
3	642.4344	-2375.4000	642.5985	-2375.8000	0.4324	0.0002
4	1111.1000	-3547.5000	1110.5000	-3547.2000	0.6708	0.0004
5	1785.5000	-4591.6000	1784.9000	-4591.6000	0.6000	0.0003
6	2582.5000	-5440.6000	2582.5000	-5440.3000	0.3000	0.0002
7	3406.9000	-6174.7000	3406.3000	-6173.6000	1.2530	0.0007
8	4423.3000	-6916.0000	4423.4000	-6916.0000	0.1000	0.0001
9	5484.2000	-7608.2000	5484.5000	-7607.7000	0.5831	0.0003
10	6563.7000	-8325.5000	6564.0000	-8326.0000	0.5831	0.0003
11	7751.1000	-9051.3000	7750.3000	-9050.9000	0.8944	0.0005
12	8836.4000	-9723.1000	8835.6000	-9723.7000	1.0000	0.0005
13	10060.0000	-10310.0000	10058.0000	-10309.0000	2.2361	0.0012
Rata-rata					0.8443	0.0005

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- a) Parameter pengendali Fuzzy-PID yang dapat menghasilkan respon dengan performansi yang memenuhi kriteria adalah menggunakan tipe Sugeno yang tersusun dari 5 fungsi keanggotaan dan memiliki rentang nilai output 0-1 untuk nilai  $K_p'$  dan  $K_d'$ , serta rentang nilai output 25-100 untuk nilai alfa.
- b) Performansi pengendali Fuzzy-PID yang disusun memiliki performansi yang baik, dimana pada saat nilai set poin dari *heading* AUV diatur sebesar  $20^\circ$  dan  $30^\circ$ , nilai overshoot yang dihasilkan sebesar  $0.7683^\circ$  dan  $1.2281^\circ$ .
- c) Sistem pengendali yang disusun mampu untuk mempertahankan gerak AUV sesuai jalurnya pada perairan Bunaken-Tateli dengan gangguan arus laut yang telah ditetapkan, dengan nilai error rata-rata pada masing-masing jalur masih berada dalam radius aman sebesar  $<2.66$  m ( $<2L_{pp}$ )

#### **5.2 Saran**

Saran yang diberikan penulis untuk penelitian selanjutnya:

- a) Arah gerak AUV lainnya seperti pitch dan heave dapat ditambahkan sesuai dengan pengendalian yang dilakukan
- b) Pengendali fuzzy dapat diganti menjadi fuzzy tipe-2
- c) Bentuk jalur yang digunakan dapat menggunakan bentuk lain seperti jalur zig-zag dll.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika. (2022, June 3). *Pusat Meteorologi Maritim*. Diambil kembali dari BMKG Ocean Forecast System: [peta-maritim.bmkg.go.id](https://peta-maritim.bmkg.go.id)
- Bansal, H. O. (2009). Tuning of PID Controllers using Simulink. *International Journal of Mathematical Modeling, Simulation, and Applications*, 2(3), 337-344.
- FHUI, H. (2018). *Penegakan Hukum di Wilayah Laut Indonesia*. Dipetik January 12, 2022, dari <https://law.ui.ac.id/v3/penegakan-hukum-di-wilayah-laut-indonesia/>
- Fossen, T. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control* (1st ed.). United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Fossen, T. I. (1999). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd.
- Hammad, M. M., & El-Shenawy, A. K. (2017). Trajectory following and stabilization control of fully actuated AUV using inverse. *PLOS One*, 12(7).
- Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control (1st ed.)*. (2011). United Kingdom: John Wwiley & Sons Ltd.
- Joo, M. G., & Qu, Z. (2015). An Autonomous Underwater Vehicle as an Underwater Glider and Its Depth Control. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 13(5), 1212-1220.
- Kadir, A., Aras, M. M., Kasno, M. A., & Tumari, M. M. (2018). Fuzzy logic controller design for autonomous underwater vehicle (AUV)-yaw control. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(5).
- Khodayari, M. H., & Balochian, S. (2015). Modeling and control of autonomous underwater vehicle (AUV) in heading and depth attitude via self-adaptive fuzzy PID controller. *Journal of Marine Science and Technology*, 20, 559-578.
- Liang, X., Li, Y., Peng, Z., & Zhang, J. (2015). Nonlinear dynamics modeling and performance prediction for underactuated AUV with fins. *Nonlinear Dynamic*, 84, 237-249.
- Liang, X., Pang, Y., Wan, L., & Wang, B. (2008). Dynamic Modelling and Motion Control for Underwater Vehicles with Fins. *Underwater Vehicles*.

- Ningsih, W., Subchan, & Nurhadi, H. (2015). Design and Analysis of Motion Control System in The Fin and The Propulsion System of The Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Using Cross Coupled Control. Surabaya: ICAMIMIA 2015.
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Prestero, T. (2001). Verification of A Six-Degree of Freedom Simulation Model for The REMUS Autonomous Underwater Vehicle. *Applied Ocean Science and Engineering*.
- Rofiq, S. A., Effendie, R., & Sulisetyono, A. (2014). Perancangan Sistem Pengaturan Kestabilan Autonomous Underwater Vehicle (AUV) untuk Gerak Lateral Menggunakan Sliding Mode Control (SMC). *JURNAL TEKNIK POMITS*, 3(1).
- Vervoort, J. (2009). *Modeling and Control of an Unmanned Underwater Vehicle*. New Zealand: University of Canterbury.
- Wang, L.-X. (1997). *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Michigan: Prentice-Hall International Inc.
- Xiang, X., Yu, C., & Zhang, Q. (2017). Robust Fuzzy 3D Path Following for Autonomous Underwater Vehicle Subject to Uncertainties. *Computers and Operation Research*.
- Xiang, X., Zhang, Q., Yu, C., Wilson, P. A., & Xu, G. (2020). Manoeuvring-based actuation evaluation of an AUV with control surfaces and through-body thrusters. *Applied Ocean Research*.
- Xu, H., Zhang, G. C., Sun, Y. S., Pang, S., Ran, X. R., & Wang, X. B. (2019). Design and Experiment of a Plateau Data-Gathering AUV. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10).
- Yang, C. (2008). *Modular Modeling and Control for Autonomous Underwater Vehicle (AUV)*. Singapore: National University of Singapore Libraries.
- Zhao, Z. Y., Tomizuka, M., & Isaka, S. (1993). Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers. *IEEE Transactions on System, Man., and Cybernetics*, 1392-1398.

## LAMPIRAN

### A. Pemodelan Dinamika AUV

Persamaan gaya dan momen total pada arah gerak *Surge*:

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

Dari persamaan di atas, variabel selain surge, sway, dan yaw dianggap sama dengan 0 ( $w = p = q = 0$ ) sehingga persamaan di atas menjadi sebagai berikut:

$$(m - X_{\dot{u}})(\dot{u}) - my_G(\dot{r}) = X_{HS} + X_{u|u}|u|u| + X_{rr}rr + X_{prop} + (m + X_{vr})vr + mx_Gr^2$$

Persamaan gaya dan momen total pada arah gerak *Sway*:

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] = Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{vu}vu + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r$$

Dari persamaan di atas, variabel selain surge, sway, dan yaw dianggap sama dengan 0 ( $w = p = q = 0$ ) sehingga persamaan di atas menjadi sebagai berikut:

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (mx_G - Y_{\dot{r}})(\dot{r}) = Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{vu}vu + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (m - Y_{ur})ur + my_Gr^2$$

Persamaan gaya dan momen total pada arah gerak *Yaw*:

$$I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{vu}vu + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r$$

Dari persamaan di atas, variabel selain surge, sway, dan yaw dianggap sama dengan 0 ( $w = p = q = 0$ ) sehingga persamaan di atas menjadi sebagai berikut:

$$-my_G(\dot{u}) + (mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} = N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{vu}vu + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (mx_G - N_{ur})ur - my_G(vr)$$

sehingga didapatkan persamaan gaya dan momen total pada arah gerak *Surge*, *Sway*, *Yaw* sebagai berikut:

- $(m - X_{\dot{u}})(\dot{u}) - my_G(\dot{r}) = X_{HS} + X_{u|u}|u|u| + X_{rr}rr + X_{prop} + (m + X_{vr})vr + mx_Gr^2$
- $(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (mx_G - Y_{\dot{r}})(\dot{r}) = Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{vu}vu + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (m - Y_{ur})ur + my_Gr^2$

$$\bullet \quad -my_G(\dot{u}) + (mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} = N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{vu}vu + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (mx_G - N_{ur})ur - my_G(vr)$$

Persamaan di atas diubah ke bentuk matriks seperti persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{HS} + X_{u|u}|u|u| + X_{rr}rr + X_{prop} + (m + X_{vr})vr + mx_Gr^2 \\ Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{vu}vu + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (m - Y_{ur})ur + my_Gr^2 \\ N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{vu}vu + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (mx_G - N_{ur})ur - my_G(vr) \\ r \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} X_{HS} + X_{u|u}|u|u| + X_{rr}rr + \frac{1}{2}\rho D^4 K_T(J)\omega_p^2 + (m + X_{vr})vr + mx_Gr^2 \\ Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{vu}vu + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (m - Y_{ur})ur + my_Gr^2 \\ N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{vu}vu + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (mx_G - N_{ur})ur - my_G(vr) \\ r \end{bmatrix}$$

Model linier didapatkan sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

dengan

$$A = J_x = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 \\ a_3 & b_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = J_u = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & 0 \\ A_3 & B_3 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \text{ dan } D = 0$$

sehingga,

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 \\ a_3 & b_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & 0 \\ A_3 & B_3 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} & \frac{\partial f_1}{\partial v} & \frac{\partial f_1}{\partial r} & 0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} & \frac{\partial f_2}{\partial v} & \frac{\partial f_2}{\partial r} & 0 \\ \frac{\partial f_3}{\partial u} & \frac{\partial f_3}{\partial v} & \frac{\partial f_3}{\partial r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \omega_p} & \frac{\partial f_1}{\partial \delta_r} & \frac{\partial f_1}{\partial \delta_r} & 0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial \omega_p} & \frac{\partial f_2}{\partial \delta_r} & \frac{\partial f_2}{\partial \delta_r} & 0 \\ \frac{\partial f_3}{\partial \omega_p} & \frac{\partial f_3}{\partial \delta_r} & \frac{\partial f_3}{\partial \delta_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

- $f_1 = X_{HS} + X_{u|u}|u|u| + X_{rr}rr + \frac{1}{2}\rho D^4 K_T(J)\omega_p^2 + (m + X_{vr})vr + mx_G r^2$
- $f_2 = Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{vu}vu + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (m - Y_{ur})ur + my_G r^2$
- $f_3 = N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{vu}vu + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (mx_G - N_{ur})ur - my_G(vr)$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 2X_{u|u} & (m + X_{vr}) & 2X_{rr} + (m + X_{vr}) + 2mx_G & 0 \\ Y_{vu} - (m - Y_{ur}) & 2Y_{v|v}|v| + Y_{vu} & 2Y_{r|r}|r| - (m - Y_{ur}) - 2my_G & 0 \\ N_{vu} - (mx_G - N_{ur}) & 2N_{v|v}|v| + N_{vu} - my_G & 2N_{r|r}|r| - (mx_G - N_{ur}) - my_G & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\rho D^4 K_T(J) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2Y_{uu\delta_r} & 2Y_{uu\delta_r} & 0 \\ 0 & 2N_{uu\delta_r} & 2N_{uu\delta_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ditentukan bahwa  $m - X_{\dot{u}} = A$ ,  $-my_G = B = E$ ,  $m - Y_{\dot{v}} = C$ ,  $mx_G - Y_{\dot{r}} = D$ ,  $mx_G - N_{\dot{v}} = F$ ,  $I_z - N_{\dot{r}} = G$ , maka:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} CG - DF & BF & -BC & 0 \\ DE & AG - BE & -AD & 0 \\ -CE & -AF & AC & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}{ACG - BCE - ADF} + \frac{\begin{bmatrix} 2X_{u|u|} & (m + X_{vr}) & 2X_{rr} + (m + X_{vr}) + 2mx_G & 0 \\ Y_{vu} - (m - Y_{ur}) & 2Y_{v|v|} + Y_{vu} & 2Y_{r|r|} - (m - Y_{ur}) - 2my_G & 0 \\ N_{vu} - (mx_G - N_{ur}) & 2N_{v|v|} + N_{vu} - my_G & 2N_{r|r|} - (mx_G - N_{ur}) - my_G & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}{1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \frac{\begin{bmatrix} CG - DF & BF & -BC & 0 \\ DE & AG - BE & -AD & 0 \\ -CE & -AF & AC & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}{ACG - BCE - ADF} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho D^4 K_T(J) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2Y_{uu\delta_r} & 2Y_{uu\delta_r} & 0 \\ 0 & 2N_{uu\delta_r} & 2N_{uu\delta_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dari nilai hidrostatis dan hidrodinamis, diketahui:

$$A = m - X_{\dot{u}} = 30 - (-0.93) = 30.93$$

$$B = E = -my_G = -30(0) = 0$$

$$C = m - Y_{\dot{v}} = 30 - (-35.5) = 65.5$$

$$D = mx_G - Y_{\dot{r}} = 30(0) - 1.93 = -1.93$$

$$F = mx_G - N_{\dot{v}} = 30(0) - 1.93 = -1.93$$

$$G = I_z - N_{\dot{r}} = 3.45 - (-4.88) = 8.33$$

sehingga,

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} 541.8901 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 257.6469 & 59.6949 & 0 \\ 0 & 59.6949 & 2025.915 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}{16760.66079} + \frac{\begin{bmatrix} 541.8901 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 257.6469 & 59.6949 & 0 \\ 0 & 59.6949 & 2025.915 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}{16760.66079} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho D^4 K_T(J) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2Y_{uu\delta_r} & 2Y_{uu\delta_r} & 0 \\ 0 & 2N_{uu\delta_r} & 2N_{uu\delta_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0323 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0154 & 3.5616 \times 10^{-3} & 0 \\ 0 & 3.5616 \times 10^{-3} & 0.1208 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3.24 & 65.5 & 61.64 & 0 \\ -53.38 & -290.6 & -23.516 & 0 \\ -26 & -30.36 & -20.8 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0.0323 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0154 & 3.5616 \times 10^{-3} & 0 \\ 0 & 3.5616 \times 10^{-3} & 0.1208 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6.2552 \times 10^{-3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 19.28 & 19.28 & 0 \\ 0 & -12.3 & -12.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

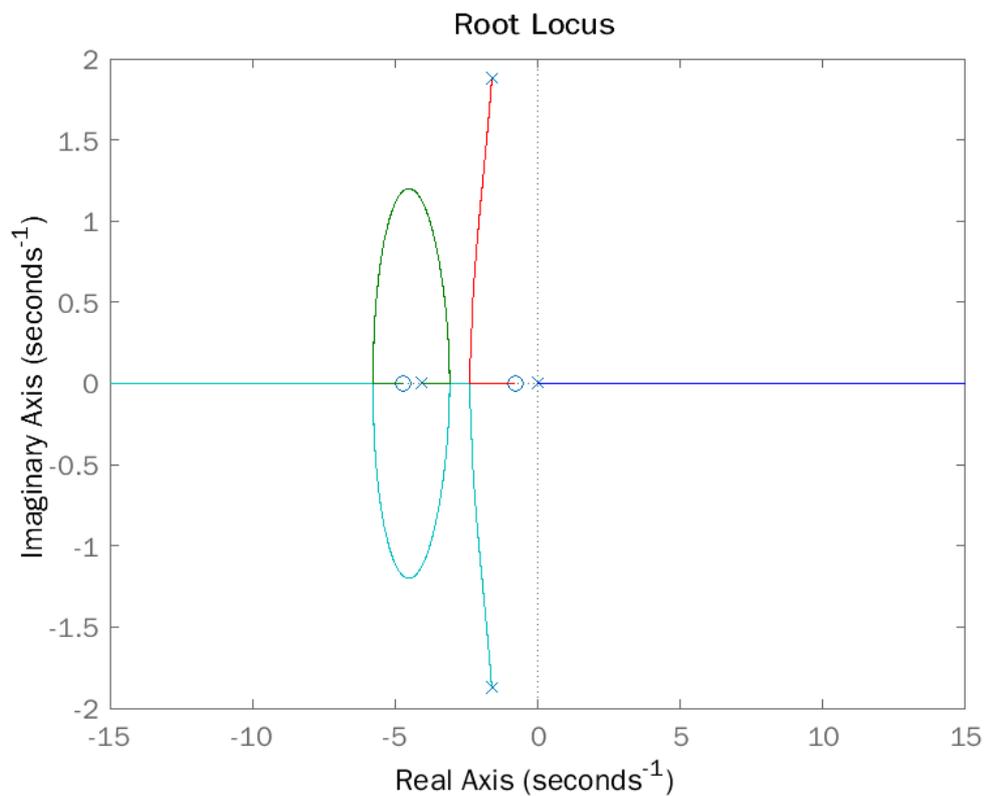
$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1046 & 2.1156 & 1.9909 & 0 \\ -0.9146 & -4.5833 & -0.4362 & 0 \\ -3.3308 & -4.7020 & -2.5963 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0.0002 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2531 & 0.2531 & 0 \\ 0 & -1.4172 & -1.4172 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

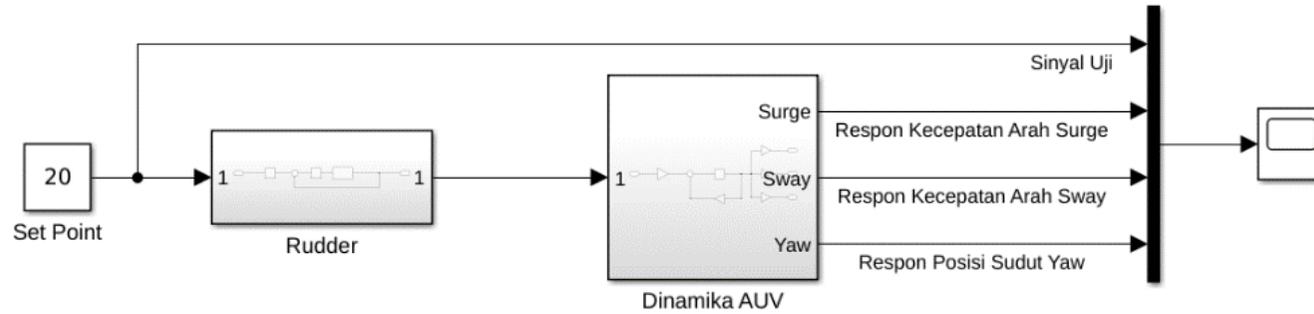
$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1046 & 2.1156 & 1.9909 & 0 \\ -0.9146 & -4.5833 & -0.4362 & 0 \\ -3.3308 & -4.7020 & -2.5963 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0002\omega_p \\ 0 + 0.2531\delta_r + 0.2531\delta_r \\ 0 - 1.4172\delta_r - 1.4172\delta_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1046 & 2.1156 & 1.9909 & 0 \\ -0.9146 & -4.5833 & -0.4362 & 0 \\ -3.3308 & -4.7020 & -2.5963 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0002 \\ 0.5062 \\ -2.8344 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

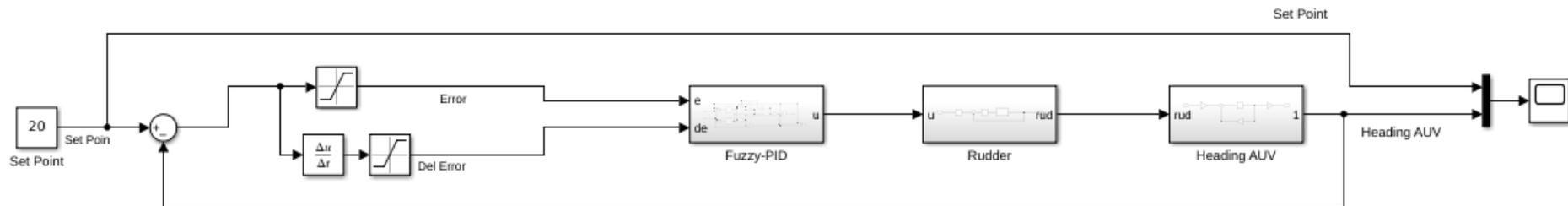
## B. Uji Root Locus



### C. Rangkaian Uji Open Loop dan Close Loop

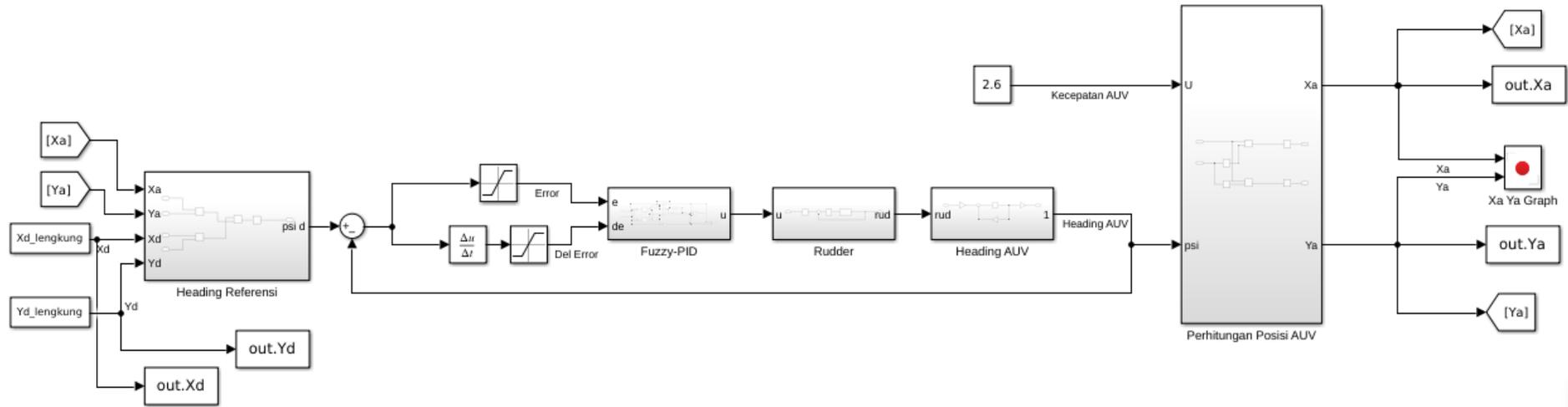


**Gambar C.1** Rangkaian Uji Open Loop Sistem Kendali Heading

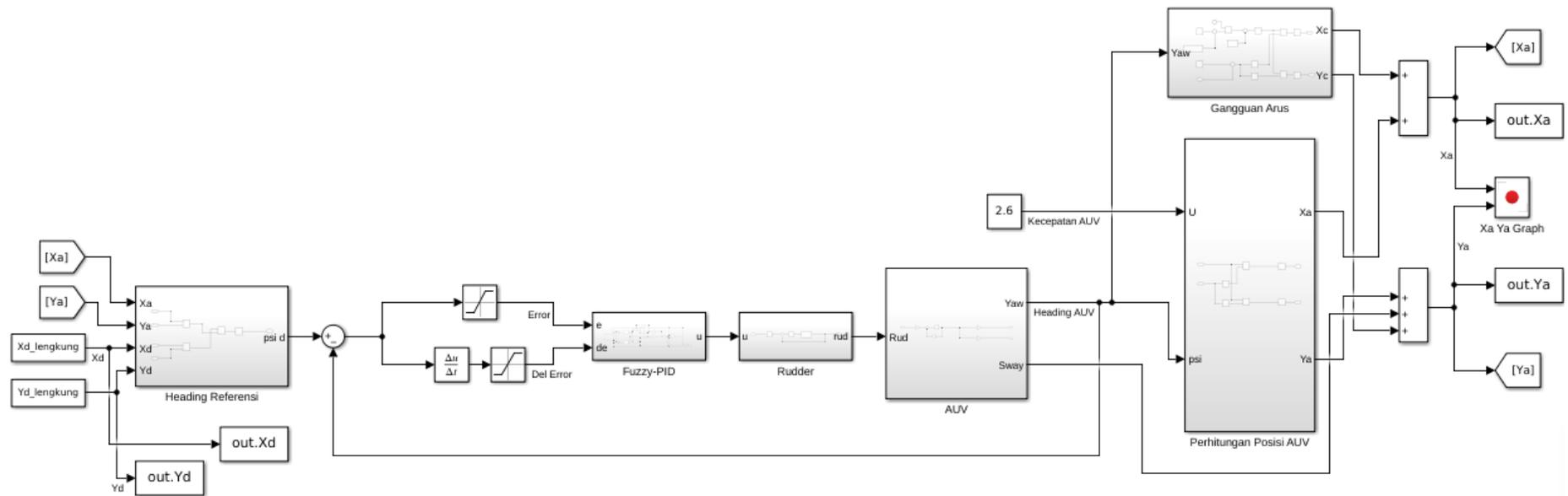


**Gambar C.2** Rangkaian Uji Close Loop Sistem Kendali Heading

#### D. Rangkaian Simulasi tanpa Gangguan dan dengan Gangguan



Gambar D.1 Rangkaian Simulasi tanpa Gangguan



**Gambar D.2** Rangkaian Simulasi dengan Gangguan

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Jakarta, pada tanggal 7 Agustus 2000 dengan nama Amalia Firdgusevtia Lishard. Penulis menempuh pendidikan di SDN 01 Pagi Jakarta Barat (2006-2007), SDN Pekuncen Pasuruan (2007-2012), SMP Negeri 2 Pasuruan (2012-2015), dan SMA Negeri 1 Pasuruan (2015-2018). Setelah lulus dari SMA, penulis diterima di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2018.

Selama menempuh pendidikan di Departemen Teknik Fisika ITS, penulis aktif di beberapa organisasi, diantaranya Staf Pengembangan Sumber Daya Unit (PSDU) *Victory* Sepuluh Nopember *Marching Corps* (VSNMC) ITS yang kemudian menjadi Staf Ahli Pengembangan Sumber Daya Unit (PSDU) VSNMC ITS. Selain itu, penulis juga menjadi Staf Hubungan Luar (HUBLU) Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika (HMTF) ITS yang kemudian menjadi Wakil Kepala Departemen Hubungan Luar (HUBLU) HMTF ITS. Apabila terdapat hal-hal yang ingin didiskusikan terkait topik tugas akhir ini, penulis dapat dihubungi melalui email [amalia.firdgusevtialishard07@gmail.com](mailto:amalia.firdgusevtialishard07@gmail.com)