



TUGAS AKHIR - TF 181801

PERANCANGAN SISTEM KONTROL GERAK PADA *AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE* (AUV) DENGAN PENGARUH GANGGUAN ARUS LAUT BERBASIS LOGIKA FUZZY

AGNES IVONNE MARGARETHA

NRP. 02311840000001

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 MOTION CONTROL SYSTEM ON AUTONOMOUS
UNDERWATER VEHICLE (AUV) WITH OCEAN CURRENT
DISTURBANCE EFFECT BASED ON FUZZY LOGIC***

AGNES IVONNE MARGARETHA
NRP. 02311840000001

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 : Agnes Ivonne Margaretha
NRP : 0231184000001
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 KONTROL GERAK PADA *AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV)* DENGAN PENGARUH GANGGUAN ARUS LAUT BERBASIS LOGIKA FUZZY**" 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, 14 Juni 2022

Yang membuat pernyataan,



Agnes Ivonne Margaretha

NRP. 0231184000001

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

PERANCANGAN SISTEM KONTROL GERAK PADA *AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE* (AUV) DENGAN PENGARUH GANGGUAN ARUS LAUT BERBASIS LOGIKA FUZZY

Oleh:

AGNES IVONNE MARGARETHA

NRP. 0231184000001

Surabaya,

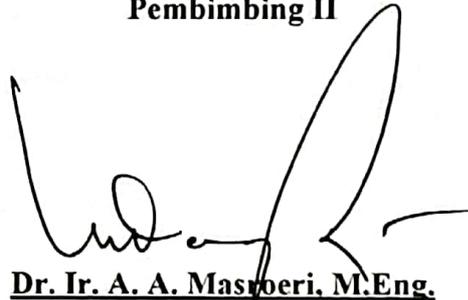
**Menyetujui,
Pembimbing I**



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. Suryanto S.T., M.T.

NIP. 19711113 199512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN SISTEM KONTROL GERAK PADA *AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE* (AUV) DENGAN PENGARUH GANGGUAN ARUS LAUT BERBASIS LOGIKA FUZZY
TUGAS AKHIR

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

Oleh:

AGNES IVONNE MARGARETHA

NRP. 0231184000001

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. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc. |  | (Ketua Penguji) |
| 4. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D. |  | (Penguji I) |
| 5. Muhammad Khamim Asy'ari, S.T., M.T. |  | (Penguji II) |

SURABAYA

2022

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PERANCANGAN SISTEM KONTROL GERAK PADA
AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV) DENGAN
PENGARUH GANGGUAN ARUS LAUT BERBASIS LOGIKA FUZZY**

Nama : Agnes Ivonne Margaretha
NRP : 0231184000001
Departemen : Teknik Fisika FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.

ABSTRAK

Indonesia sebagai negara maritim dengan wilayah laut yang sangat luas, terbuka, dan posisi geostrategis rentan terhadap berbagai bentuk ancaman, seperti perusakan sumber daya kelautan, pencurian kekayaan laut, dan jalur pelayaran yang dapat dilewati kapal selam asing. Teknologi modern berupa *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) diperlukan untuk menjaga pertahanan dan keamanan laut dari bahaya yang merugikan negara. Sebuah AUV diperlukan untuk membantu dalam mengatasi hal tersebut. AUV tidak dapat melakukan operasi secara baik tanpa sistem kontrol. Beberapa AUV menggunakan kontroler PID untuk mengendalikan *trajectory tracking*, namun tidak dapat memberikan performansi yang baik. Penelitian ini melakukan perancangan sistem kontrol gerak AUV dengan menggunakan kontroler logika *fuzzy* agar dapat menjaga kestabilan gerak AUV. Wilayah perairan yang digunakan pada penelitian ini adalah perairan Selayar, serta gangguan lingkungan berupa arus laut pada kedalaman 25 m, 100 m dan 250 m. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengujian sistem yang dilakukan secara *close loop* menggunakan kontroler logika *fuzzy* memiliki nilai maksimum *overshoot* sebesar 0.27° untuk *point set* 20° dan 0.62° untuk *set point* 30° , serta mampu mempertahankan kestabilan gerak AUV berada di lintasan yang ditentukan dengan nilai rata-rata *error* terbesar 1.18 m pada arus laut di kedalaman 250 m.

Kata Kunci: Arus Laut, *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV), Logika Fuzzy, Maksimum *Overshoot*, PID.

Halaman ini sengaja dikosongkan

***DESIGN OF MOTION CONTROL SYSTEM ON AUTONOMOUS
UNDERWATER VEHICLE (AUV) WITH OCEAN CURRENT
DISTURBANCE EFFECT BASED ON FUZZY LOGIC***

Name : Agnes Ivonne Margaretha
NRP : 0231184000001
Department : Engineering Physics FTIRS - ITS
Supervisors : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.

ABSTRACT

Indonesia as a maritime country with a very wide, open sea area and a geostrategic position is vulnerable to various forms of threats, such as the destruction of marine resources, the theft of marine wealth, and shipping lanes that can be passed by foreign submarines. To overcome this threat, modern technology is needed in the form of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) to maintain maritime defense and security from dangers that harm the country. An AUV is needed to help in overcoming this. The AUV cannot operate properly without a control system. Some AUV use a PID controller to control trajectory tracking, but they cannot provide good performance. So that in this research, the design of the AUV motion control system was carried out using a fuzzy logic controller in order to maintain the stability of the AUV motion. The sea water area used in this study is Selayar, as well as environmental disturbances in the form of ocean currents at a depth of 25 m, 100 m and 250 m. The results showed that the system test which was carried out in a close loop using a fuzzy logic controller had a maximum overshoot value of 0.27° for a set point of 20° and 0.62° for a set point of 30°. As well as being able to maintain the stability of the AUV's motion on the specified trajectory with the largest average error value of 1.18 m on ocean currents at a depth of 250 m.

Keywords: Autonomous Underwater Vehicle (AUV), Fuzzy Logic, Maximum Overshoot, Ocean Current, PID.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat serta hikmat-Nya, sehingga penulis diberikan kesehatan, kelancaran, dan kemudahan dalam proses menyusun dan menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul **“Perancangan Sistem Kontrol Gerak pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) dengan Pengaruh Gangguan Arus Laut berbasis Logika *Fuzzy*”**.

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi pada program studi S-1 Teknik Fisika FTIRS ITS. Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, pada kesempatan kali ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku kepala departemen Teknik Fisika ITS.
2. Kedua orang tua dan adik penulis yang senantiasa memberikan doa dan dukungan yang terbaik demi kelancaran pendidikan hingga kelulusan penulis.
3. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. selaku dosen pembimbing I yang telah banyak memberikan ilmu dan saran, serta meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan dalam pengerjaan penelitian tugas akhir ini.
4. Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng. selaku dosen pembimbing II yang telah banyak memberikan ilmu dan saran, serta meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan dalam pengerjaan penelitian tugas akhir ini.
5. Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc. dan Bapak Iwan Cony Setiadi, S.T., M.T. selaku dosen wali penulis yang senantiasa memberikan motivasi kepada penulis selama masa perkuliahan.
6. Segenap Bapak dan Ibu dosen pengajar di Departemen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu selama kuliah.
7. Rekan satu topik penelitian tugas akhir, Amalia Firdausy, Firdausy Nuzula, Nuriza Aulintang dan Naf'atul Miskiyah yang saling membantu selama masa pengerjaan penelitian.
8. Teman-teman terdekat penulis yang selalu memberikan dukungan selama masa perkuliahan dan pengerjaan penelitian tugas akhir terutama Carollina Kusumawidjaya, Ersakanti Belva, Maidatul Khasanah, Virliana Septi, Marsa Adyaninggar, Audra Chikita, Diah Ayu, Farah Feba, Winna Adiliani, Annisah Oktaviani, Safira Mardiana, Elsofi Alintya, dan Paulina Ari.

9. Teman-teman satu angkatan Teknik Fisika F53 dan seluruh Asisten Laboratorium Instrumentasi, Kontrol dan Optimisasi yang telah banyak membantu dan berproses bersama baik dalam kegiatan akademik maupun non akademik.

10. Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa mungkin masih terdapat kekurangan dalam laporan ini, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan guna penyempurnaan laporan tugas akhir. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya dan bermanfaat bagi penulis dan pihak pembacanya.

Surabaya, 14 Juni 2022

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
<i>COVER PAGE</i>	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK.....	xi
<i>ABSTRACT</i>	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 Masalah	26
3.2 Studi Literatur	26
3.3 Pengumpulan Data Spesifikasi AUV	26
3.4 Pengumpulan Data Jalur AUV.....	28

3.5	Pengumpulan Data Gangguan Arus Laut.....	30
3.6	Pemodelan Dinamika AUV	31
3.7	Pemodelan Dinamika Aktuator	36
3.8	Pemodelan Gangguan Arus Laut	36
3.9	Perancangan Sistem Kontrol Logika <i>Fuzzy</i> pada AUV	37
3.10	Pengujian Simulasi Sistem Kontrol <i>Heading</i> AUV berbasis Logika <i>Fuzzy</i>	42
3.11	Analisis Hasil dan Pembahasan Performansi Sistem	43
3.12	Penarikan Kesimpulan dan Saran	44
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		45
4.1	Analisis Pengujian <i>Open Loop</i> pada AUV	45
4.2	Analisis Pengujian Kestabilan AUV dengan <i>Root Locus</i>	46
4.3	Analisis Pengujian <i>Close Loop</i> Sistem Kontrol Logika <i>Fuzzy</i> pada AUV.....	46
4.4	Analisis Pengujian Sistem Kontrol Logika <i>Fuzzy</i> pada AUV Tanpa Gangguan....	48
4.5	Analisis Pengujian Sistem Kontrol Logika <i>Fuzzy</i> pada AUV dengan Gangguan Arus.....	51
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		59
5.1	Kesimpulan	59
5.2	Saran	59
DAFTAR PUSTAKA		61
LAMPIRAN.....		l xv
BIODATA PENULIS		l xxi

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi AUV dengan 6 Derajat Kebebasan (Ngatini et al., 2017)	8
Gambar 2. 2 Pelacakan <i>Waypoint</i> dengan Kendali <i>Heading</i> pada AUV (Xu et al., 2019)	22
Gambar 2. 3 Arsitektur Sistem Logika <i>Fuzzy</i>	24
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	25
Gambar 3. 2 Jalur AUV di Perairan Selayar dengan Lintasan Lurus	29
Gambar 3. 3 Jalur AUV di Perairan Selayar dengan Lintasan Belok	29
Gambar 3. 4 Perancangan Diagram Blok Pengendali Logika <i>Fuzzy</i>	37
Gambar 3. 5 Arsitektur Sistem Kendali Logika <i>Fuzzy</i>	38
Gambar 3. 6 Arsitektur Variabel <i>Input Error Yaw</i>	39
Gambar 3. 7 Arsitektur Variabel <i>Input Yaw Rate</i>	39
Gambar 3. 8 Arsitektur Variabel <i>Output Command Rudder</i>	40
Gambar 3. 9 <i>Rule Viewer</i> Sistem Kendali dengan Logika <i>Fuzzy</i> Tipe Sugeno	41
Gambar 3. 10 Diagram Blok Pengujian Sistem secara <i>Open Loop</i>	42
Gambar 3. 11 Diagram Blok Pengujian Sistem secara <i>Close Loop</i>	43
Gambar 4. 1 Respon Pengujian <i>Plant</i> secara <i>Open Loop</i>	45
Gambar 4. 2 Hasil Pengujian Kestabilan AUV dengan <i>Root Locus</i>	46
Gambar 4. 3 Respon Uji <i>Close Loop</i> dengan <i>Set Point</i> 20°	47
Gambar 4. 4 Respon Uji <i>Close Loop</i> dengan <i>Set Point</i> 30°	48
Gambar 4. 5 Hasil Pengujian Lintasan Lurus Tanpa Gangguan	49
Gambar 4. 6 Hasil Pengujian Lintasan Belok Tanpa Gangguan.....	50
Gambar 4. 7 Hasil Pengujian Lintasan Lurus dengan Gangguan Arus (d = 25 m).....	51
Gambar 4. 8 Hasil Pengujian Lintasan Lurus dengan Gangguan Arus (d = 100 m).....	53
Gambar 4. 9 Hasil Pengujian Lintasan Lurus dengan Gangguan Arus (d = 250 m).....	54
Gambar 4. 10 Hasil Pengujian Lintasan Belok dengan Gangguan Arus (d = 25 m)	55
Gambar 4. 11 Hasil Pengujian Lintasan Belok dengan Gangguan Arus (d = 100 m)	56
Gambar 4. 12 Hasil Pengujian Lintasan Belok dengan Gangguan Arus (d = 250 m)	58
Gambar B. 1 Pengujian Sistem secara <i>Open Loop</i> dengan <i>Input</i> 20°	lxviii
Gambar B. 2 Pengujian Sistem secara <i>Open Loop</i> dengan <i>Input</i> 30°	lxviii
Gambar B. 3 Pengujian secara <i>Close Loop</i> dengan <i>Input</i> 20°	lxviii

Gambar B. 4 Pengujian secara <i>Close Loop</i> dengan <i>Input</i> 30°	lxviii
Gambar B. 5 Pengujian Lintasan Lurus Tanpa Gangguan	lxix
Gambar B. 6 Pengujian Lintasan Lurus dengan Gangguan	lxix
Gambar B. 7 Pengujian Lintasan Belok Tanpa Gangguan.....	lxix
Gambar B. 8 Pengujian Lintasan Belok dengan Gangguan	lxix

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Notasi Arah Gerak pada AUV	8
Tabel 3. 1 Data Spesifikasi AUV Model Remus (Prestero, 2001).....	26
Tabel 3. 2 Data Koefisien Hidrostatik dan Hidrodinamis AUV Remus (Prestero, 2001)...	27
Tabel 3. 3 Data Spesifikasi Propeller (Allen et al., 2000) (Ningsih et al., 2016)	28
Tabel 3. 4 Data Spesifikasi Rudder (Ningsih et al., 2016).....	28
Tabel 3. 5 Data Titik Koordinat Lintasan Lurus pada AUV di Perairan Selayar	30
Tabel 3. 6 Data Titik Koordinat Lintasan Belok pada AUV di Perairan Selayar	30
Tabel 3. 7 Himpunan <i>Fuzzy</i> pada Perancangan <i>Input Error Yaw</i> dan <i>Yaw Rate</i>	39
Tabel 3. 8 Himpunan <i>Fuzzy</i> pada Perancangan <i>Output Command Rudder</i>	40
Tabel 3. 9 <i>Rule Base</i> Perancangan Sistem Kendali <i>Heading</i> AUV	41
Tabel 4. 1 Analisis <i>Error</i> Pengujian Lintasan Lurus Tanpa Gangguan	49
Tabel 4. 2 Analisis <i>Error</i> Pengujian Lintasan Belok Tanpa Gangguan.....	50
Tabel 4. 3 Analisis <i>Error</i> Pengujian Lintasan Lurus dengan Gangguan Arus di Kedalaman 25 Meter.....	52
Tabel 4. 4 Analisis <i>Error</i> Pengujian Lintasan Lurus dengan Gangguan Arus di Kedalaman 100 Meter.....	53
Tabel 4. 5 Analisis <i>Error</i> Pengujian Lintasan Lurus dengan Gangguan Arus di Kedalaman 250 Meter.....	54
Tabel 4. 6 Analisis <i>Error</i> Pengujian Lintasan Belok dengan Gangguan Arus di Kedalaman 25 Meter.....	55
Tabel 4. 7 Analisis <i>Error</i> Pengujian Lintasan Belok dengan Gangguan Arus di Kedalaman 100 Meter.....	57
Tabel 4. 8 Analisis <i>Error</i> Pengujian Lintasan Belok dengan Gangguan Arus di Kedalaman 250 m	58

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR NOTASI

u	: Kecepatan Linear pada Sumbu-x
v	: Kecepatan Linear 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
ϕ	: Sudut Euler pada Sumbu-x
θ	: Sudut Euler pada Sumbu-y
ψ	: Sudut Euler pada Sumbu-z
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
η_1	: Vektor posisi AUV pada koordinat <i>Earth-Fixed Frame</i> (EFF)
η_2	: Vektor sudut euler AUV pada koordinat <i>Earth-Fixed Frame</i> (EFF)
v_1	: Kecepatan linier AUV pada koordinat <i>Body-Fixed Frame</i> (BFF)
v_2	: Vektor kecepatan angular pada koordinat <i>Body-Fixed Frame</i> (BFF)
τ_1	: Vektor gaya AUV pada koordinat <i>Body-Fixed Frame</i> (BFF)
τ_2	: Vektor momen AUV pada koordinat <i>Body-Fixed Frame</i> (BFF)
m	: Massa AUV
g	: Gaya gravitasi
W	: Berat AUV
ρ	: Massa jenis fluida
∇	: Volume total AUV
B	: Daya apung AUV
M	: Matriks Inersia

$C(v)$: Matriks Coriolis
$D(v)$: Matriks Redaman
$N_{\dot{r}}$: Massa tambahan pada arah gerak yaw
$N_{\dot{v}}$: Massa tambahan pada arah gerak yaw
N_{uv}	: Body dan Fin Lift dan Munk Moment
N_{ur}	: Massa tambahan cross term dan fin lift
$N_{v v }$: Gaya drag pada arah gerak sway
$N_{r r }$: Gaya drag pada arah gerak yaw
$N_{uu\delta r}$: Momen angkat fin
$X_{\dot{u}}$: Massa tambahan pada arah gerak surge
X_{vr}	: Massa tambahan pada arah gerak surge
$X_{u u }$: Gaya drag pada arah gerak surge
$X_{r r }$: Massa tambahan pada arah gerak surge
I_z	: Momen Inersia pada Sumbu Z
x_G	: <i>Center of Gravity</i> (CoG) pada sumbu X
y_G	: <i>Center of Gravity</i> (CoG) pada sumbu Y
$Y_{\dot{v}}$: Massa tambahan pada arah gerak sway
$Y_{\dot{r}}$: Massa tambahan pada arah gerak sway
Y_{uv}	: Body lift force dan Fin Lift
Y_{ur}	: Massa tambahan pada arah gerak sway
$Y_{v v }$: Gaya drag pada arah gerak sway
$Y_{r r }$: Gaya drag pada arah gerak pitch
$Y_{uu\delta r}$: Gaya angkat fin
J_{dc}	: Momen inersia motor dc (kgm ²)
L_a	: Induktansi <i>anchor coil</i> (H)
B_{dc}	: <i>Viscous friction</i> (Nm/rps)
R_a	: <i>Barriers anchor</i> (Ohm)
K_4	: <i>Back EMF</i> konstan
K_5	: Torsi konstan
J_s	: Momen inersia servomotor (kgm ²)
L_m	: Induktansi <i>anchor coil</i> (H)
B_s	: <i>Viscous friction</i> (Nm/rps)
R_m	: <i>Barriers anchor</i> (Ohm)

- K_m : *Back EMF* konstan
 K_T : Torsi konstan
 μ_0 : Nilai konstan
 $\omega(t)$: *Zero-Mean Gaussian White Noise Process*
 $V_c(t)$: Kecepatan Arus yang dibatasi dengan $V_{min} \leq V_c(t) \leq V_{max}$
 u_c : Arah Kecepatan Arus terhadap Sumbu X
 v_c : Arah Kecepatan Arus terhadap Sumbu Y
 β : Arah Sudut Kecepatan Arus terhadap Sumbu X
 V_c : Kecepatan Arus
 $x_d(k), y_d(k)$: *Waypoint* yang dituju AUV
 $x(t), y(t)$: Data posisi AUV yang sedang ditempuh pada saat (t)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara maritim yang memiliki potensi serta keanekaragaman sumber daya kelautan dan perikanan yang melimpah. Indonesia sebagai negara maritim dengan wilayah laut yang sangat luas, terbuka, dan posisi geostrategis yang memiliki tiga Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI) dan lima wilayah *choke points*, yaitu: Selat Malaka, Selat Singapura, Selat Sunda, Selat Lombok, dan Selat Ombai-Wetar, membuat Indonesia rentan terhadap berbagai bentuk ancaman. Ancaman ini dapat berupa penyelundupan senjata, perusakan sumber daya kelautan, pencurian kekayaan laut, jalur pelayaran yang dapat dilewati kapal selam asing, dan sebagainya (Coordinating Ministry for Maritime of The Republic of Indonesia, 2012).

Salah satu bentuk ancaman keamanan bawah laut yang pernah terjadi di Indonesia yaitu terdapat penemuan drone laut atau seaglider yang diduga milik China di wilayah Selayar, Sulawesi Selatan yang terjadi pada tanggal 26 Desember 2020. Seaglider ini dianggap memiliki tujuan untuk kepentingan riset oseanografi berupa pemetaan kondisi bawah laut untuk gerakan kapal selam agar tidak dapat terdeteksi berdasarkan lokasi penemuan dan teknologi yang digunakan. Adanya penemuan seaglider tersebut dapat dikatakan bahwa sistem pertahanan dan keamanan laut di Indonesia masih memiliki kelemahan dalam bidang teknologi, sehingga tidak dapat mendeteksi benda asing seperti seaglider yang menjelajah area bawah laut Indonesia.

Solusi untuk mengatasi ancaman tersebut, maka diperlukan teknologi modern untuk menjaga pertahanan dan keamanan laut dari bahaya yang merugikan negara. Teknologi ini dapat berupa wahana tanpa awak bawah air yang memiliki fungsi untuk melakukan pemantauan dan pemeliharaan area laut di Indonesia secara teratur. *Unmanned Underwater Vehicle* (UUV) merupakan wahana tanpa awak bawah air yang pertama kali dirancang oleh angkatan Laut Amerika Serikat pada tahun 1968. *Unmanned Underwater Vehicle* (UUV) ini terdiri dari dua jenis, yaitu *Remotely Operated Vehicle* (ROV) dan *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV).

Remotely Operated Vehicle (ROV) merupakan wahana bawah air yang dikendalikan secara langsung oleh manusia dengan menggunakan *remote control*. *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) merupakan wahana bawah air yang dikendalikan dengan menggunakan perangkat komputer dan dapat bermanuver secara tiga dimensi serta enam

dimensi (Von Alt, 2003). ROV terhubung dengan platform yang berfungsi untuk memberi perintah yang tersambung dengan kabel. Kabel yang disambungkan ini memastikan sinyal pasokan energi dan informasi agar operator dapat memantau dan mengendalikan kapal secara akurat. AUV dilengkapi dengan baterai sebagai sinyal pasokan energi untuk meminimalisir penggunaan operator (Nedelcu et al., 2018). AUV didesain agar tetap bergerak atau memiliki kestabilan sesuai dengan lintasan atau jalur yang ditentukan, serta diharapkan dapat mengatasi gangguan di lingkungan bawah laut.

Penelitian yang membahas mengenai perancangan kontroler pada wahana bawah air telah banyak dilakukan. Penelitian yang dilakukan oleh (Nag et al., 2013) yaitu mengenai perbandingan sistem kontrol kedalaman AUV berbasis PID dan logika *fuzzy*. Hasil simulasi yang diperoleh yaitu kendali logika *fuzzy* memiliki performansi yang baik untuk mengendalikan regulasi dan *trajectory tracking*. Strategi kontrol PID memiliki performansi yang baik dalam hal mengendalikan regulasi/*set point tracking*, namun tidak memberikan performansi yang baik ketika mengendalikan *trajectory tracking*. Penelitian yang dilakukan oleh (Imaduddin & Agustinah, 2016) yaitu mengenai desain sistem kontrol tracking AUV dengan menggunakan metode *State Dependent Riccati Equations* berdasarkan *Linear Quadratic Tracking* (SDRE-LQT). Hasil yang diperoleh yaitu kontroler SDRE-LQT mampu mengendalikan sudut *yaw* AUV sesuai dengan perubahan sinyal referensi yang diberikan serta menghasilkan nilai *error steady state* yang kecil yaitu sebesar -0.01282%. Penelitian yang dilakukan oleh (Liang et al., 2009) yaitu membahas mengenai pemodelan dinamik dan kontrol gerak AUV dengan fin, diperoleh hasil bahwa metode kontrol konvensional tidak memenuhi persyaratan untuk mengendalikan gerak AUV. Hal ini memerlukan *robustness* yang kuat dan respon yang cepat untuk mengatasi kendala AUV ketika melakukan manuver.

Logika *fuzzy* merupakan salah satu metode pengendali yang memiliki struktur kontrol sederhana, metode pengendali tersebut banyak digunakan pada sistem panduan dan kendali pada bidang robot. Penelitian yang dilakukan oleh (Xiang et al., 2018) membahas mengenai peninjauan *path following*, *trajectory tracking*, dan stabilisasi posisi berbasis kendali berbasis logika *fuzzy* pada *marine robotic vehicle*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem kendali logika *fuzzy* dapat menghasilkan performansi nilai yang baik. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Dededaka, 2018) yang membahas mengenai perbandingan metode kendali logika *fuzzy* dan kendali PID untuk kedalaman dan *heading* kapal selam. Hasil simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa pengendali logika *fuzzy* yang dirancang berhasil mencapai dan menjaga kedalaman dan heading pada *set point* yang telah ditentukan.

Kendali logika *fuzzy* memiliki performansi yang lebih baik jika dibandingkan dengan kendali PID.

Penelitian tugas akhir yang dikerjakan ini akan membahas mengenai perancangan sistem kontrol gerak pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) terhadap arah gerak 3 DOF yaitu *surge*, *sway*, dan *yaw*. Sistem wahana bawah laut ini tentu memiliki gangguan dari lingkungan sekitar seperti gelombang laut, kecepatan angin, dan arus laut. Penelitian ini menggunakan gangguan dari lingkungan berupa arus laut, hal ini dikarenakan arus laut dianggap memiliki pengaruh yang tinggi terhadap AUV (Sutarto et al., 2011) (Fossen, 2011) (Imaduddin & Agustinah, 2016). Metode pengendali yang digunakan adalah logika *fuzzy*, penggunaan metode logika *fuzzy* dipilih dengan mempertimbangkan keunggulan dari metode tersebut. Adanya beberapa keunggulan dari metode tersebut diharapkan hasil simulasi yang diperoleh memiliki respon kestabilan terbaik pada sistem AUV.

1.2 Rumusan Masalah

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

- a) Berapa nilai parameter pengendali logika *fuzzy* yang dapat menghasilkan respon AUV pada kondisi dan kriteria kestabilan yang baik?
- b) Bagaimana performansi sistem kendali berbasis logika *fuzzy* sebagai pengendali gerak AUV?
- c) Apakah sistem kendali mampu mempertahankan kondisi kestabilan pada saat terdapat gangguan arus laut?

1.3 Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

- a) Menentukan parameter pengendali logika *fuzzy* yang sesuai agar dapat menghasilkan respon AUV pada kondisi dan kriteria kestabilan terbaik.
- b) Melakukan analisis performansi sistem kendali berbasis logika *fuzzy* sebagai pengendali gerak AUV.
- c) Mempertahankan kondisi kestabilan sistem kendali pada saat terdapat gangguan arus laut.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

- a) Objek yang digunakan pada penelitian adalah *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) dengan model REMUS.
- b) Perancangan sistem pengendali dilakukan dengan menggunakan Logika *Fuzzy*.
- c) Himpunan *fuzzy* yang digunakan adalah himpunan *fuzzy* tipe-1
- d) Metode *Fuzzy Inference System* (FIS) yang digunakan adalah metode Sugeno.
- e) Variabel yang dikendalikan adalah haluan (*heading*) AUV.
- f) *Disturbance* yang digunakan adalah arus laut.
- g) Kecepatan AUV diasumsikan bernilai konstan.
- h) Pemodelan perancangan sistem kontrol AUV dilakukan terhadap arah gerak dengan 3 derajat kebebasan (3 DOF) yaitu *surge*, *sway*, dan *yaw*.
- i) Perancangan dan simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab R2022a.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan penelitian pada Tugas Akhir ini terdiri dari lima bab, sebagai berikut:

- a) BAB I Pendahuluan
Bab ini menjelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika laporan.
- b) BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori
Bab ini membahas mengenai tinjauan pustaka dan dasar teori penunjang yang diperlukan dalam mengerjakan penelitian Tugas Akhir ini.
- c) BAB III Metodologi Penelitian
Bab ini membahas mengenai langkah-langkah yang dilakukan dalam mengerjakan perancangan sistem kontrol gerak pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) sesuai dengan metode yang digunakan.
- d) BAB IV Hasil dan Pembahasan
Bab ini membahas mengenai hasil simulasi pengujian serta hasil validasi yang diperoleh dari perancangan sistem kontrol gerak *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) yang telah dikerjakan pada Bab III.
- e) BAB V Kesimpulan dan Saran
Bab ini membahas mengenai kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan, serta penulis memberikan saran untuk pengembangan penelitian berikutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian ini didukung dengan tinjauan pustaka dari beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Penelitian mengenai metode panduan LOS (*Line of Sight*) pada AUV dengan judul “*Nonlinear Guidance and Fuzzy Control for Three – Dimensional Path Following of an Underactuated Autonomous Underwater Vehicle*” dilakukan oleh (Yu et al., 2017) dan jurnal tersebut diterbitkan oleh *Elsevier*. Permasalahan yang diangkat dalam penelitian tersebut adalah *nonlinear fuzzy controller* disederhanakan dengan mengintegrasikan *3D guidance law* yang ditingkatkan untuk mengatasi masalah jalur berikutnya pada *Autonomous Underwater Vehicle (AUV)* yang tidak digerakkan dan terkena gangguan yang tidak diketahui. Metode yang digunakan yaitu mengacu pada hukum panduan LOS (*Line of Sight*) yang ditingkatkan untuk mengubah kesalahan posisi jalur 3D dan orientasi berikut ke dalam kecepatan panduan yang terkontrol dengan *equivalent coordinate transformastion* dan properti yang tidak digerakkan. *Nonlinear single input fuzzy controller* dirancang pada *dynamic layer* untuk melacak kecepatan panduan dengan biaya komputasi yang lebih sedikit dan menolak gangguan lingkungan yang tidak diketahui dalam jalur 3D. Hasil yang diperoleh pada analisis sensitivitas menunjukkan bahwa *nonlinear fuzzy controller* memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap gangguan lingkungan daripada *linear fuzzy controller*.

Penelitian yang membahas mengenai strategi kontrol gerak AUV dengan judul “*Survey on Fuzzy Logic Based Guidance and Control of Marine Surface Vehicles and Underwater Vehicles*” dilakukan oleh (Xiang et al., 2018) dan jurnal tersebut diterbitkan oleh *International Journal of Fuzzy Systems*. Penelitian ini bertujuan untuk meninjau panduan dan pengendali berbasis logika *fuzzy* tunggal dan *hybrid* pada *marine surface vehicles* dan *underwater vehicles*. Panduan dan *motion forms* termasuk manuver, *path following*, *trajectory tracking*, serta stabilisasi posisi dijelaskan pada penelitian tersebut. Metode sistem pengendali logika *fuzzy* yang digunakan yaitu *Adaptive Fuzzy Logic Control (AFLC)* dan *Hybrid Control Combining Fuzzy Control with Other Algoritihm*. Terdapat 3 jenis pengendali *fuzzy logic hybrid*, yaitu *Fuzzy PID Control (FPIDC)*, *Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)*, dan *Neuro Fuzzy Logic Control (NFLC)*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kontroler logika *fuzzy hybrid* memiliki performansi yang lebih baik jika dibandingkan dengan kontroler logika *fuzzy* tunggal, hal ini dikarenakan adanya beberapa

keunggulan yang dimiliki oleh kontroler logika *fuzzy hybrid*. Kontroler logika *fuzzy* digabungkan dengan algoritma lain seperti *Fuzzy PID Control* (FPIDC), *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC), dan *Neuro Fuzzy Logic Control* (NFLC).

Penelitian lain yang membahas sistem kontrol logika *fuzzy* pada AUV dengan judul “*Fuzzy Logic Controller Design for Autonomous Underwater Vehicle (AUV) – Yaw Control*” dilakukan oleh (Kadir et al., 2018) dan jurnal tersebut diterbitkan oleh *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. Penelitian ini bertujuan untuk menjelaskan mengenai proses tuning untuk desain *Fuzzy Logic Controller* (FLC) dan *Proportional Integral Derivative* (PID). Pengendali konvensional PID tidak dapat menghilangkan 100% *overshoot* pada respon sistem yang dihasilkan, sehingga diusulkan penggunaan pengendali logika *fuzzy* untuk mengatasi permasalahan tersebut. Simulasi pengendali PID dilakukan tuning secara manual dan auto, sedangkan pada pengendali *fuzzy* dilakukan tuning secara manual. Hasil simulasi yang diperoleh menunjukkan bahwa pengendali auto tuning PID memiliki respons yang kurang baik dan nilai *overshoot* yang dihasilkan tinggi jika dibandingkan dengan melakukan tuning PID secara manual. Pengendali logika *fuzzy* memiliki respon nilai *overshoot* sedikit lebih tinggi dari respons pengendali PID. Hasil performansi yang lebih baik dapat diperoleh dengan cara melakukan tuning pada pengendali logika *fuzzy*.

Penelitian berikutnya mengenai ketahanan (*robustness*) sistem AUV dengan judul “*Robustness of Fuzzy Logic based Controller Unmanned Autonomous Underwater Vehicle*” dilakukan oleh (Kumar et al., 2008) dan jurnal tersebut diterbitkan oleh *IEEE Region 10 Colloquium*. Penelitian ini membahas mengenai ketahanan dan stabilitas *Unmanned Autonomous Underwater Vehicle* dengan menggunakan kontroler logika *fuzzy*. Perancangan sistem kontrol untuk *underwater vehicle* bertujuan untuk menghasilkan sinyal kontrol yang sesuai untuk mencapai stabilitas sistem. Respons sistem yang dihasilkan harus cepat dan harus dapat mengurangi *error* hingga batas yang dapat ditoleransi. Hal tersebut membutuhkan kontroler yang sesuai agar sistem memiliki performansi yang baik. Kontroler konvensional tidak dapat mengatasi hal tersebut, sehingga diperlukan kontroler lain yang dapat mengatasi permasalahan tersebut. Kontroler logika *fuzzy* dapat digunakan sebagai alternatif untuk mengatasi ketidakpastian yang terjadi pada *Unmanned Autonomous Underwater Vehicle*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontroler logika *fuzzy* memiliki performansi yang baik dan mampu mengatasi plant dalam berbagai kondisi.

Penelitian lain mengenai kestabilan sistem AUV yang dipengaruhi gangguan lingkungan dengan judul “*Effect of Waves and Current on Motion Control of Underwater*

Gliders” dilakukan oleh (Ullah et al., 2020) dan jurnal tersebut diterbitkan oleh *Journal of Marine of Science and Technology*. Penelitian ini membahas mengenai pengaruh gelombang dan arus laut terhadap dinamika dan kontrol gerak pada *underwater gliders*, dimana gelombang dan arus laut mempengaruhi kinerja glider dengan menyimpang dari jalur yang telah ditetapkan. Strategi panduan untuk pengendali dirancang menggunakan pengendali PID dan algoritma *Line of Sight* (LOS) dengan menggunakan beberapa variasi gangguan gelombang dan arus laut. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendali dapat melacak jalur yang ditetapkan pada perairan tenang serta pada saat ketinggian gelombang mencapai 0.75 m dan 1.5 m. Glider mengikuti jalur ketika amplitudo gelombang mencapai 1.5 m, hal ini menunjukkan bahwa pengendali dapat bekerja dengan baik ketika tinggi gelombang kurang dari 1.5 m. Hasil simulasi menunjukkan bahwa terdapat sedikit pengaruh pada gerakan vertikal glider, hal tersebut juga mempengaruhi gerakan horizontal dan lintasan glider yang ditentukan jika ditambahkan gangguan berupa arus laut dengan magnitude 4 cm/s.

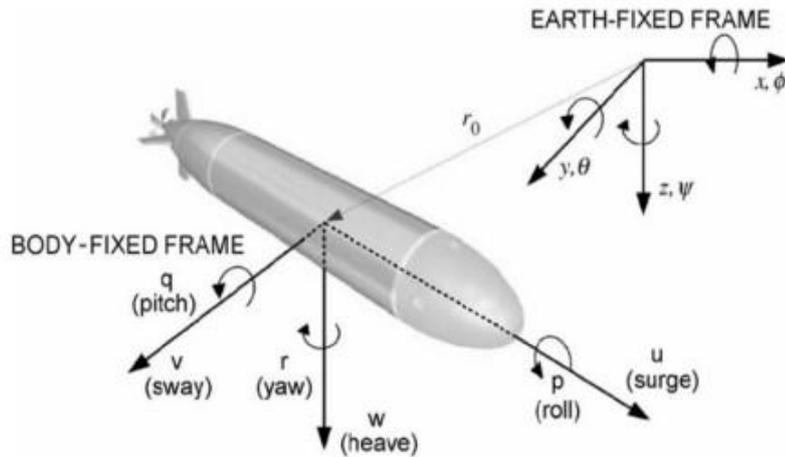
2.2 Dasar Teori

Beberapa teori penunjang yang mendasari penelitian tugas akhir ini disampaikan pada sub bab 2.2.1 – 2.2.5 sebagai berikut.

2.2.1 Model *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV)

Autonomous Underwater Vehicle (AUV) merupakan salah satu jenis wahana laut yang dapat bergerak di dalam air. Selain itu AUV ini juga dapat bermanuver dalam 6 derajat kebebasan, serta melaju di dalam air dengan menggunakan sistem propulsi. Adapun 6 derajat kebebasan yang dimiliki oleh AUV adalah yaitu *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw*. Masing-masing derajat kebebasan (*Degrees of Freedom*) tersebut memiliki besaran gaya dan momen, kecepatan linier, serta posisi dan sudut *Euler* (Perez and Fossen, 2010). Penelitian yang dilakukan ini akan meninjau AUV dengan arah gerak 3 DOF, yaitu *surge*, *sway*, dan *yaw*.

Pergerakan *underwater vehicle* dapat dianalisis dengan menggunakan dua titik koordinat, yaitu koordinat *Earth-Fixed Frame* (EFF) dan koordinat *Body-Fixed Frame* (BFF). Koordinat *Earth-Fixed Frame* (EFF) digunakan untuk merepresentasikan posisi dan orientasi AUV dengan sumbu x, y, dan z. Koordinat *Body-Fixed* (BFF) digunakan untuk merepresentasikan kecepatan dan percepatan dari AUV (Yang, 2007). Persamaan dan arah gerak AUV dapat ditentukan dengan menggunakan titik koordinat tersebut sebagai acuan. Gambar 2.1 ini merupakan ilustrasi dari *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) yang memiliki 6 derajat kebebasan.



Gambar 2. 1 Ilustrasi AUV dengan 6 Derajat Kebebasan (Ngatini et al., 2017)

Tabel 2.1 ini menunjukkan simbol dari masing-masing derajat kebebasan dari AUV, yaitu sebagai berikut.

Tabel 2. 1 Notasi Arah Gerak pada AUV (Fossen, 2011)

Arah Gerak	Gaya dan Momen	Kecepatan Linier dan Sudut	Posisi dan Sudut Euler
<i>Surge</i>	X	u	x
<i>Sway</i>	Y	v	y
<i>Heave</i>	Z	w	z
<i>Roll</i>	K	p	ϕ
<i>Pitch</i>	M	q	θ
<i>Yaw</i>	N	r	ψ

Persamaan arah dan orientasi dari AUV dapat direpresentasikan dalam persamaan berikut ini.

a) Posisi dan Sudut Euler

$$\eta = [\eta_1^T \ \eta_2^T]^T$$

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

$$\eta_2 = [\phi \ \theta \ \psi]^T$$
(2.1)

Keterangan:

η_1 : Vektor posisi AUV pada koordinat *Earth-Fixed Frame* (EFF)

η_2 : Vektor sudut euler AUV pada koordinat *Earth-Fixed Frame* (EFF)

b) Kecepatan Linier dan Angular

$$v = [v_1^T \ v_2^T]^T$$

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

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

Keterangan:

v_1 : Kecepatan linier AUV pada koordinat *Body-Fixed Frame* (BFF)

v_2 : Vektor kecepatan angular pada koordinat *Body-Fixed Frame* (BFF)

c) Gaya dan Momen

$$\tau = [\tau_1^T \ \tau_2^T]^T$$

$$\tau_1 = [X \ Y \ Z]^T \quad (2.3)$$

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

Keterangan:

τ_1 : Vektor gaya AUV pada koordinat *Body-Fixed Frame* (BFF)

τ_2 : Vektor momen AUV pada koordinat *Body-Fixed Frame* (BFF)

2.2.1.1 Kinematika *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV)

Pergerakan *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) bergantung pada posisi acuan yang telah ditentukan. Hubungan antara 2 koordinat acuan tersebut memiliki peran penting. Kecepatan angular dan linier merupakan 2 jenis vektor kecepatan AUV yang mengacu pada titik koordinat *Body-Fixed Frame* (BFF). Titik koordinat *Earth-Fixed Frame* (EFF) digunakan sebagai acuan untuk menentukan posisi dan orientasi dari AUV. Transformasi kecepatan berdasarkan titik koordinat acuan direpresentasikan sebagai berikut.

a) Transformasi Kecepatan Linier

Transformasi kecepatan linier diperoleh berdasarkan laju perpindahan berdasarkan persamaan (2.4).

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J_1(\eta_2) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$J_1(\eta_2)$ merupakan matriks transformasi dari sudut euler yakni *Roll* (ϕ), *Pitch* (θ), dan *Yaw* (ψ). Transformasi kecepatan linear terjadi ketika koordinat rotasi terletak di sumbu $-x$, $-y$, dan $-z$ yang mengacu pada *Earth-Fixed Frame* (EFF) ditunjukkan pada persamaan (2.5).

$$C_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

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

$$C_{z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriks pada persamaan (2.5) dapat digunakan untuk mencari transformasi kecepatan linier yang dituliskan pada persamaan (2.6).

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

$$J_1^{-1}(\eta_2) = J_1^T(\eta_2) = C_{x,\phi} C_{y,\theta} C_{z,\psi} \quad (2.6)$$

Persamaan (2.6) dapat dituliskan dalam bentuk matriks dibawah ini, dimana C adalah \cos dan S adalah \sin .

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

b) Transformasi Kecepatan Angular

Koordinat *Body-Fixed Frame* (BFF) digunakan sebagai acuan dari vektor kecepatan angular dan vektor laju euler. Vektor kecepatan sudut (v_2) yakni $v_2 = [p \ q \ r]^T$ dan vektor laju *euler* ($\dot{\eta}_2$) yakni $\dot{\eta}_2 = [\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ memiliki keterkaitan dengan transformasi matriks $J_2(\eta_2)$ sebagai berikut.

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)v_2 \quad (2.8)$$

Vektor kecepatan angular $v_2 = [p \ q \ r]^T$ tidak dapat diintegrasikan secara langsung untuk mendapatkan koordinat sudut yang sebenarnya. Orientasi koordinat *Body-Fixed Frame* (BFF) menggunakan acuan *Earth-Fixed Frame* (EFF) sebagai berikut.

$$v_2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\phi}^T \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\phi}^T C_{y,\theta}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2^{-1}(\eta_2)\dot{\eta}_2 \quad (2.9)$$

Kecepatan angular didapatkan dengan cara melakukan tranformasi *inverse*, sehingga diperoleh persamaan matriks (2.10) dan (2.11).

$$J_2^{-1}(\eta_2)\dot{\eta}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \phi & \cos \theta \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

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

Persamaan kinematik dari transformasi kecepatan linier dan kecepatan angular dapat dinyatakan dalam bentuk vektor pada persamaan (2.12).

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0 \\ 0 & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

2.2.1.2 Dinamika *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV)

Persamaan gerak *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) ditentukan dengan menggunakan asumsi sebagai benda tegar seperti pada Hukum Newton II. AUV memiliki gerakan 6 derajat kebebasan yaitu 3 gerak translasi dan 3 gerak rotasi pada sumbu x, y, dan z (Fossen, 2011), dimana persamaan umum 6 DOF dari AUV adalah sistem nonlinier. Persamaan tersebut terdiri dari arah gerak *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Persamaan ΣX , ΣY , dan ΣZ pada persamaan (2.13) – (2.15) merupakan persamaan dinamik AUV dalam arah translasi yang dinyatakan sebagai berikut.

Arah *Surge*:

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

Arah *Sway*:

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

Arah *Heave*:

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

Persamaan ΣK , ΣM , dan ΣN merupakan persamaan dinamik dalam arah rotasi yang dinyatakan pada persamaan (2.16) – (2.18).

Arah *Roll*:

$$I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})rq - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = \Sigma K \quad (2.16)$$

Arah *Pitch*:

$$I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + pq)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = \Sigma M \quad (2.17)$$

Arah *Yaw*:

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

Kinetika benda tegar pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) dapat dinyatakan dalam bentuk vektor pada persamaan (2.19).

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

dengan $v = [u, v, w, p, q, r]^T$ merupakan vektor kecepatan linier dan kecepatan angular, sedangkan $\tau_{RB} = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ merupakan vektor gaya dan momen eksternal. Persamaan inersia sistem benda tegar M_{RB} dituliskan dalam bentuk matriks (2.20).

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -mS(r_G) \\ mS(r_G) & I_0 \end{bmatrix}$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_g & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

matriks $I_{3 \times 3}$ adalah matriks identitas, lalu $I_0 = I_0^T > 0$ adalah tensor inersia, dan $S(r_G)$ adalah matriks simetris skew. Model matriks simetris skew berfungsi untuk merancang sistem kontrol yang memiliki gerak nonlinier sebagai berikut.

$$C_{RB}(v) = -C_{RB}^T$$

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -mS(v_1) - mS(S(v_2)r_g^b) \\ -mS(v_1) - mS(S(v_2)r_g^b) & mS(S(v_1)r_g^b) - S(I_b v_2) \end{bmatrix}$$

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -mS(v_1) - mS(v_2)S(r_g^b) \\ -mS(v_1) - mS(r_g^b)S(v_2) & -S(I_b v_2) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Persamaan (2.21) diatas, maka diperoleh kompleksitas pemodelan AUV dengan 6 derajat kebebasan dapat dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut.

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_g q + z_g r) & m(y_{gp} + w) & m(z_g p - v) \\ m(x_g q - w) & -m(z_g r + x_g p) & m(z_g q + u) \\ m(x_g r + v) & m(y_g r - u) & -m(x_g p + y_g q) \\ m(y_g q + z_g r) & -m(x_g q - w) & -m(x_g r + v) \\ -m(y_g p + w) & m(z_g r + x_g p) & -m(y_g r - u) \\ -m(z_g p - v) & -m(z_g q + u) & m(x_g p + y_g q) \\ 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_z r & I_{yz}r + I_{xy}p - I_y q \\ I_{yz}q + I_{xz}p - I_z r & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_x p \\ -I_{yz}r - I_{xy}p + I_y q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_x p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

2.2.1.3 Gaya Hidrostatiska

Gaya dan momen hidrostatik pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) disebabkan karena adanya efek gabungan dari massa dan daya apung AUV. Berat AUV dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.23).

$$W = mg \quad (2.23)$$

Keterangan:

- m : Massa AUV
- g : Gaya gravitasi
- W : Berat AUV

Daya apung AUV diperoleh dengan menggunakan persamaan (2.24).

$$B = \rho \nabla g \quad (2.24)$$

Keterangan:

- ρ : Massa jenis fluida
- ∇ : Volume total AUV
- B : Daya apung AUV

Gaya dan momen dari AUV ini dapat direpresentasikan dalam bentuk koordinat *Body-Fixed Frame* (BFF). Persamaan untuk gaya dan momen menggunakan persamaan transformasi matriks yang diberikan dalam persamaan (2.7) sehingga diperoleh persamaan (2.25).

$$f_G(\eta_2) = J_1^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$f_B(\eta_2) = J_1^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Gaya dan momen hidrostatik pada AUV dapat dinyatakan pada persamaan 2.27.

$$F_{HS} = f_G - f_B \quad (2.27)$$

$$M_{HS} = r_G \times f_G - r_B \times f_B \quad (2.28)$$

Persamaan tersebut dapat dijabarkan agar diperoleh persamaan untuk gaya dan momen hidrostatik pada persamaan (2.29).

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

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

$$Z_{HS} = (W - B) \cos \theta \cos \phi \quad (2.29)$$

$$K_{HS} = -(y_g W - y_b B) \cos \theta \cos \phi - (z_g W - z_b B) \cos \theta \sin \phi$$

$$M_{HS} = -(z_g W - z_B) \sin \theta - (x_g W - x_b B) \cos \theta \cos \phi$$

$$N_{HS} = -(x_g W - x_b B) \cos \theta \sin \phi - (y_g W - y_b B) \sin \theta$$

Momen hidrostatis stabil dalam arah gerak *pitch* dan *roll*, sehingga hal ini menunjukkan bahwa momen hidrostatis melawan defleksi pada arah sudut tersebut.

2.2.1.4 Gaya Hidrodinamika

Gaya hidrodinamika memiliki korelasi dengan kecepatan dan percepatan yang ada pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV). Pemodelan gaya hidrodinamik dapat dilakukan dengan menentukan koefisien yang berkaitan dengan gaya tersebut. Besarnya nilai kecepatan dan percepatan AUV selama bergerak sudah diketahui, maka perhitungan koefisien gaya hidrodinamika dapat dilakukan dengan pendekatan empiris (Rofiq et al., 2014). Gaya hidrodinamika terbagi menjadi 3 jenis, yaitu gaya hambat (*drag force*), gaya angkat (*lift force*), dan gaya massa tambahan (*added mass force*) (Herlambang, 2016).

a) Gaya Hambat (*Drag Force*)

Gaya hambat (*drag force*) terjadi ketika benda padat bergerak melalui fluida, dengan gaya ini terdiri dari gaya tekan dan gaya gesek. Selain itu pada gaya drag terdapat dua jenis hambatan, yaitu *axial* dan *crossflow*. Hambatan *axial* merupakan gaya *drag* yang sejajar dengan sumbu x , sedangkan hambatan *crossflow* merupakan gaya *drag* yang tegak lurus dengan sumbu x . Gaya hambat *axial* di sepanjang sumbu x dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$X_{u|u} = -\left(\frac{1}{2}\rho C_d A_f\right) \quad (2.30)$$

ρ adalah massa jenis fluida, A_f adalah luas penampang yang menimbulkan gaya drag, dan C_d adalah parameter gaya hambat *axial*. Nilai C_d dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$C_d = \frac{C_{ss}\pi A_p}{A_f} \left[1 + 60\left(\frac{d}{l}\right)^3 + 0.0025\left(\frac{d}{l}\right)\right] \quad (2.31)$$

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

Perhitungan nilai gaya hambat *crossflow* dapat menggunakan persamaan (2.32) berikut.

$$Y_{v|v} = Z_{w|w} = -\frac{1}{2}\rho C_{dc} \int_{x_t}^{x_{b2}} 2R(x)dx - 2\left(\frac{1}{2}\rho S_{fin} c_{df}\right)$$

$$M_{w|w} = -N_{v|v} = \frac{1}{2} \rho C_{dc} \int_{x_t}^{x_{b2}} 2xR(x)dx - 2x_{fin} \left(\frac{1}{2} \rho S_{fin} c_{df} \right) \quad (2.32)$$

$$Y_{r|r} = -Z_{q|q} = -\frac{1}{2} \rho C_{dc} \int_{x_t}^{x_{b2}} 2x|x|R(x)dx - 2x_{fin}|x_{fin}| \left(\frac{1}{2} \rho S_{fin} c_{df} \right)$$

$$M_{q|q} = N_{r|r} = -\frac{1}{2} \rho C_{dc} \int_{x_t}^{x_{b2}} 2x^3 R(x)dx - 2x_{fin}^3 \left(\frac{1}{2} \rho S_{fin} c_{df} \right)$$

$R(x)$ adalah radius *hull* sebagai fungsi dari posisi *axial*, ρ adalah massa jenis air laut, C_{dc} adalah koefisien hambatan silinder, C_{df} adalah koefisien hambatan *crossflow* pada *fin*, dan S_{fin} adalah luas area plat *fin* yang dikendalikan.

b) Gaya Angkat (*Lift Force*)

AUV melakukan perpindahan posisi melalui fluida dan membentuk sudut terhadap fluida tersebut, maka fluida akan terpisah. Hal ini menyebabkan tekanan yang ada dibawah permukaan AUV meningkat, sedangkan tekanan yang ada diatas permukaan AUV menurun. Gaya angkat yang dihasilkan tegak lurus dengan arah aliran eksternal yang mendekati AUV.

Momen akan dihasilkan ketika titik angkat efektif dimana gaya angkat diterapkan tidak sesuai dengan titik asal koordinat *Body-Fixed Frame* (BFF). Besarnya nilai gaya serta momen *body lift* dapat menggunakan persamaan berikut.

$$Y_{uwl} = Z_{uwl} = -\frac{1}{2} \rho C_{y d \beta} d^2$$

$$M_{uwl} = -N_{uwl} = -\frac{1}{2} \rho C_{y d \beta} x_{cp} \quad (2.33)$$

$C_{y d \beta}$ memiliki nilai sebesar 0.003, nilai ini telah diturunkan oleh Horner. Kemudian untuk menghitung besarnya nilai gaya serta momen pada *fin lift* dapat menggunakan persamaan berikut.

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

$$M_{uu\delta_s} = N_{uu\delta_r} = \rho C_{La} S_{fin} X_{fin} \quad (2.34)$$

c) Gaya Massa Tambahan (*Added Mass Force*)

Massa tambahan (*Added Mass*) adalah ukuran massa fluida yang bergerak pada saat suatu benda mengalami percepatan atau perlambatan, hal ini menyebabkan benda harus memindahkan sejumlah volume fluida saat bergerak di sekitarnya. Benda dan fluida tidak dapat menempati ruang fisik yang sama secara bersamaan. Pada saat kendaraan melakukan gerakan melalui fluida, maka fluida akan menambah gaya untuk berpindah secara bersamaan

sehingga menunjukkan adanya penambahan inersia. Adanya penambahan inersia ke sistem kendaraan dan inersia yang ditambahkan dapat disebut dengan massa tambahan (*added mass*). Persamaan gaya massa tambahan dinyatakan sebagai berikut.

$$\tau_{added\ mass} = M_A \dot{v} + C_A(v)v \quad (2.35)$$

dengan masing-masing komponen nilai M_A dan $C_A(v)$ sebagai berikut.

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{v}} \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & M_{\dot{w}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & Y_{\dot{r}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(A_{11}v_1 + A_{12}v_2) \\ -S(A_{11}v_1 + A_{12}v_2) & -S(A_{21}v_1 + A_{22}v_2) \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Persamaan matriks diatas disubstitusikan ke dalam persamaan gaya dan momen fluida sebagai berikut.

$$F_j = -\dot{u}_i m_{ji} - \varepsilon_{jkl} u_i \Omega_k m_{li} \quad (2.38)$$

$$M_j = -\dot{u}_i m_{j+3,i} - \varepsilon_{jkl} u_i \Omega_k m_{l+3,i} - \varepsilon_{jkl} u_k u_i m_{li} \quad (2.39)$$

dimana M_j adalah koefisien pada matriks persamaan (2.36).

$$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

$$jkl = 1, 2, 3$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.38) dan (2.39), maka diperoleh besarnya gaya dan momen tambahan dari arah *surge*, *sway*, *yaw* yang ditunjukkan pada persamaan (2.40).

$$\begin{aligned} X_A &= X_{\dot{u}} \dot{u} + Z_{\dot{w}} w \dot{q} + Z_{\dot{q}} \dot{q}^2 - Y_{\dot{v}} v \dot{r} - Y_{\dot{r}} \dot{r}^2 \\ Y_A &= Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + X_{\dot{u}} u \dot{r} - Z_{\dot{w}} w \dot{p} - Z_{\dot{q}} p \dot{q} \\ Z_A &= Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_{\dot{q}} \dot{q} + X_{\dot{u}} u \dot{q} - Y_{\dot{v}} v \dot{p} - Y_{\dot{r}} r \dot{p} \\ K_A &= K_{\dot{p}} \dot{p} \end{aligned} \quad (2.40)$$

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

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

Gaya massa tambahan (*added mass force*) ini dihitung berdasarkan arahnya, yaitu *axial*, *crossflow*, dan *rolling*. Berikut ini merupakan persamaan dari masing-masing arah.

Arah Axial:

$$X_{\dot{u}} = -m_{11} = -\frac{4\alpha\rho\pi}{3} \left(\frac{l}{2}\right) \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (2.41)$$

atau

$$X_{\dot{u}} = -m_{11} = -\frac{4\beta\rho\pi}{3}\left(\frac{d}{2}\right)^3 \quad (2.42)$$

dimana α dan β adalah parameter empiris yang ditentukan berdasarkan rasio panjang wahana AUV terhadap diameter, sedangkan ρ adalah massa jenis fluida yang ada disekitarnya.

Arah Crossflow:

$$m_a(x) = \pi\rho R(x)^2 \quad (2.43)$$

$$m_{af}(x) = \pi\rho\left(a_{fin}^2 - R(x)^2 + \frac{R(x)^4}{a_{fin}^2}\right) \quad (2.44)$$

dimana $R(x)$ adalah radius *hull* AUV sebagai fungsi dari posisi *axial*, sedangkan a_{fin} adalah ketinggian maksimum di atas garis tengah sirip AUV, dan ρ adalah massa jenis fluida yang ada disekitarnya. Dengan mengintegrasikan kedua persamaan diatas, maka diperoleh persamaan gaya massa tambahan *crossflow* sebagai berikut.

$$\begin{aligned} Y_{\dot{v}} = -m_{22} &= -\int_{x_{tail}}^{x_{fin}} m_a(x)dx - \int_{x_{fin}}^{x_{fin2}} m_{af}(x)dx - \int_{x_{fin2}}^{x_{bow2}} m_a(x)dx \\ Z_{\dot{w}} = -m_{33} &= -m_{22} = Y_{\dot{v}} \\ M_{\dot{w}} = -m_{53} &= \int_{x_{tail}}^{x_{fin}} xm_a(x)dx - \int_{x_{fin}}^{x_{fin2}} xm_{af}(x)dx - \int_{x_{fin2}}^{x_{bow2}} xm_a(x)dx \\ N_{\dot{v}} = -m_{62} &= m_{53} = -M_{\dot{w}} \\ Y_{\dot{r}} = -m_{26} &= -m_{62} = N_{\dot{v}} \\ Z_{\dot{q}} = -m_{35} &= -m_{53} = M_{\dot{w}} \\ M_{\dot{q}} = -m_{55} &= -\int_{x_{tail}}^{x_{fin}} x^2m_a(x)dx - \int_{x_{fin}}^{x_{fin2}} x^2m_{af}(x)dx - \int_{x_{fin2}}^{x_{bow2}} x^2m_a(x)dx \\ N_{\dot{r}} = -m_{66} &= -m_{55} = M_{\dot{q}} \end{aligned} \quad (2.45)$$

Arah Rolling:

$$K_{\dot{p}} = -\int_{x_{fin}}^{x_{fin2}} \frac{2}{\pi}\rho\alpha^4 dx \quad (2.46)$$

dimana α adalah tinggi fin diatas garis tengah AUV.

2.2.1.5 Gaya Dorong

Fin digunakan untuk mengendalikan arah gerak AUV yang bergerak terhadap sumbu Y atau sumbu Z, akan tetapi dibutuhkan gaya dorong untuk menggerakkan AUV terhadap sumbu X. Agar AUV tetap bergerak maju, maka diperlukan adanya propeller yang berfungsi

untuk menghasilkan energi. Energi yang diberikan oleh propeller dan motor berpengaruh terhadap penentuan gaya dorong AUV. Untuk menghitung besarnya gaya dorong yang dihasilkan oleh propeller digunakan persamaan berikut.

$$T = \frac{1}{2} \rho D^4 K_T(J) |\omega_p| \omega_p \quad (2.47)$$

Ketika propeller menghasilkan gaya dorong, hal ini akan menghasilkan momen tambahan di waktu yang sama.

$$\tau_p = \frac{1}{2} \rho D^5 K_T(J) |\omega_p| \omega_p \quad (2.48)$$

dimana ρ adalah densitas fluida, ω_p adalah kecepatan putaran propeller, D adalah diameter propeller, K_T adalah koefisien gaya dorong (*thrust*), dan $J = \frac{V_a}{\omega_p D}$ adalah bilangan *advance*.

Untuk V_a adalah kecepatan *advance* pada propeller.

2.2.1.6 Gaya dan Momen Total AUV

AUV memiliki gaya dan momen total pada setiap arah gerak yang diperoleh dengan cara menggabungkan persamaan gaya hidrodinamik, hidrostatik, dan gaya dorong. Persamaan gaya dan momen total yang bekerja pada AUV ditunjukkan pada persamaan (2.49) – (2.54) berikut.

Arah Surge:

$$m[\ddot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X_{HS} + X_{u|u}|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} \quad (2.49)$$

Arah Sway:

$$m[\ddot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] = Y_{HS} + Y_{v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r \quad (2.50)$$

Arah Heave:

$$m[\ddot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(\dot{p} + rq)] = Z_{HS} + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{w|w}|w| + Z_{q|q}|q| + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{uu\delta_s}u^2\delta_s \quad (2.51)$$

Arah Roll:

$$I_{xx}\ddot{p} + (I_{zz} - I_{yy})rq - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = K_{HS} + K_{p|p}|p| + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{prop} \quad (2.52)$$

Arah Pitch:

$$\begin{aligned}
& I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + pq)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} + \\
& m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M_{HS} + M_{w|w|}w|w| + M_{q|q|}q|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + \\
& M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uu\delta_s}u^2\delta_s
\end{aligned} \tag{2.53}$$

Arah Yaw:

$$\begin{aligned}
& I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{xz} + \\
& m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N_{HS} + N_{v|v|}v|v| + N_{r|r|}r|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + \\
& N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r
\end{aligned} \tag{2.54}$$

2.2.2 Aktuator Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

Autonomous Underwater Vehicle (AUV) tipe Remus digerakkan oleh aktuator *fin* dan *propeller* (Prestero, 2001). Fungsi dari aktuator *fin* adalah digunakan sebagai penentuan arah AUV agar dapat bergerak ke arah kanan-kiri dan naik-turun. Sedangkan aktuator *propeller* digunakan untuk menggerakkan maju AUV.

AUV bermanuver menggunakan sistem propulsi yang merupakan sistem pengatur kecepatan propeller, dalam hal ini untuk mengatur kecepatan propeller akan menggunakan motor dc dengan *input* berupa tegangan (volt) dan *output* berupa kecepatan sudut propeller (ω). Model matematis dari motor dc (Ningsih et al., 2016) direpresentasikan pada persamaan berikut.

$$P_{dc}(s) = \frac{K_5}{J_{dc}L_a s^2 + (B_{dc}L_a + J_{dc}R_a)s + (B_{dc}R_a + K_4K_5)} \tag{2.55}$$

Keterangan:

J_{dc} : Momen inersia motor dc (kgm^2)

L_a : Induktansi *anchor coil* (H)

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

R_a : *Barriers anchor* (Ohm)

K_4 : *Back EMF* konstan

K_5 : Torsi konstan

Sistem yang berfungsi untuk mengatur posisi sudut fin AUV pada saat melakukan gerakan memutar disebut sebagai sistem fin. Dalam hal ini untuk mengatur posisi sudut fin akan menggunakan servomotor dengan *input* berupa tegangan (volt) dan *output* berupa

derajat sudut posisi fin. Model matematis dari servomotor (Ningsih et al., 2016) direpresentasikan pada persamaan berikut.

$$P_s(s) = \frac{K_T}{J_s L_m s^3 + (J_s R_m + L_m B_s) s^2 + (R_m B_s + K_m K_T) s} \quad (2.56)$$

Keterangan:

J_s : Momen inersia servomotor (kgm^2)

L_m : Induktansi *anchor coil* (H)

B_s : *Viscous friction* (Nm/rps)

R_m : *Barriers anchor* (Ohm)

K_m : *Back EMF* konstan

K_T : Torsi konstan

2.2.3 Model Gangguan Arus Laut

Gangguan atau *disturbance* yang digunakan pada penelitian ini berupa arus laut. Hal ini dikarenakan agar simulasi yang dilakukan memiliki hasil yang mendekati dengan kondisi yang *real* pada saat di laut. Pada penelitian ini akan meninjau AUV dengan 3 derajat kebebasan (3 DOF), dimana AUV diharapkan dapat mengatasi gangguan arus laut. Hal tersebut dikarenakan pengendalian gerak AUV dilakukan dengan menggunakan acuan titik koordinat lintasan (*waypoint*) yang telah ditentukan.

Simulasi dengan gangguan arus laut serta pengaruhnya terhadap gerakan AUV dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan kecepatan rata-rata arus yang dibangkitkan menggunakan *Gauss-Markov Process* orde pertama. Model gangguan arus laut ini terdiri dari komponen yang ditinjau berdasarkan permukaan 2 dimensi (Sumbu X dan Sumbu Y), yaitu kecepatan arus laut rata-rata $V_c(t)$ dan arah arus (β). Persamaan 2.51 menunjukkan kecepatan arus laut rata-rata $V_c(t)$, yaitu sebagai berikut (Fossen, 2011).

$$\dot{V}_c(t) + \mu_0 V_c(t) = \omega(t) \quad (2.57)$$

Persamaan tersebut dapat diselesaikan dengan menggunakan deret Euler, yaitu

$$V_c(t) = \frac{V_c(0)}{0!} + \frac{t}{1!} \cdot \frac{\delta V_c}{\delta t} \quad (2.58)$$

Sehingga diperoleh persamaan akhir sebagai berikut.

$$V_c(t) = V_c(0) + t(\omega(t) - \mu_0 V_c(0)) \quad (2.59)$$

Keterangan:

μ_0 : Nilai konstan

$\omega(t)$: *Zero-Mean Gaussian White Noise Process*

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

Pengaruh kecepatan arus laut dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.60) dan (2.61). Pergerakan arus laut dengan arah β memiliki pengaruh terhadap posisi AUV, terlebih pada sumbu X dan sumbu Y.

$$u_c = V_c \cos(\beta - \psi) \quad (2.60)$$

$$v_c = V_c \sin(\beta - \psi) \quad (2.61)$$

Keterangan:

u_c : Arah Kecepatan Arus terhadap Sumbu X

v_c : Arah Kecepatan Arus terhadap Sumbu Y

β : Arah Sudut Kecepatan Arus terhadap Sumbu X

V_c : Kecepatan Arus

ψ : Sudut Arah AUV terhadap Sumbu X (*Yaw*)

2.2.4 Pemanduan Jalur pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV)

Sistem pemanduan jalur merupakan salah satu hal penting untuk mempertimbangkan performansi kestabilan gerak pada AUV. Pada sistem pelacakan jalur tidak tergantung terhadap batasan waktu dan hanya membutuhkan AUV agar menuju di jalur yang diinginkan. Algoritma yang sering digunakan sebagai strategi pemandu jalur adalah *Line of Sight* (LOS). Prinsipnya tidak tergantung pada pengendali dan model dinamik, serta diperlukan beberapa parameter untuk melakukan perancangan. Arah yang diinginkan hanya terkait dengan posisi *real time* AUV dan rute yang diharapkan. Dengan memberikan serangkaian titik jalur $[x_d(k), y_d(k)]$, $k = 1, 2, \dots, n$, maka AUV akan bergerak ke setiap titik jalur secara bergantian seperti pada Gambar 2.2. Untuk menghitung sudut *heading* dari AUV dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\psi_d(t) = \arctan \frac{y_d(k) - y_a(t)}{x_d(k) - x_a(t)} \quad (2.62)$$

Keterangan:

$x_d(k), y_d(k)$: *Waypoint* yang dituju AUV

$x_a(t), y_a(t)$: Data posisi AUV yang sedang ditempuh pada saat (t)

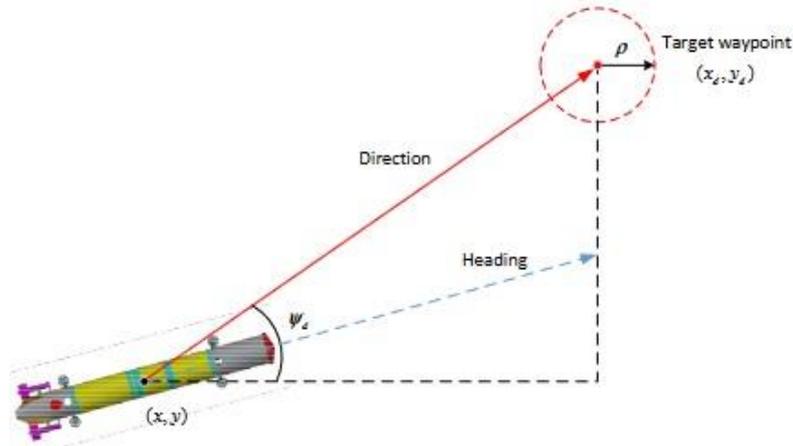
Jika AUV memasuki radius aman (ρ) disekitar *waypoint*, maka AUV dapat dianggap berhasil mencapai *waypoint* yang telah ditentukan dan selanjutnya akan bergerak menuju titik berikutnya. Nilai radius aman (ρ) dari AUV adalah $2L_{vehicle}$ atau dua kali panjang AUV (X. Wang & Wu, 2020), untuk menentukan kondisi keberhasilan AUV dalam melakukan pelacakan *waypoint* dapat menggunakan persamaan (2.63) berikut.

$$\sqrt{(x_a(k) - x_a(t))^2 + (y_a(k) - y_a(t))^2} \leq \rho \quad (2.63)$$

Keterangan:

$x_a(k), y_a(k)$: *Waypoint* yang dituju AUV

$x_a(t), y_a(t)$: Data posisi AUV yang sedang ditempuh pada saat (t)



Gambar 2. 2 Pelacakan *Waypoint* dengan Kendali *Heading* pada AUV (Xu et al., 2019)

Posisi aktual berupa titik koordinat (x_a, y_a) diperoleh berdasarkan perhitungan pada persamaan (2.64) dan (2.65). Posisi aktual AUV tersebut akan mengalami perubahan berdasarkan waktu tempuh (t).

$$x_a = V(t) \cos \psi(t) \quad (2.64)$$

$$y_a = V(t) \sin \psi(t) \quad (2.65)$$

Keterangan:

x_a, y_a : Titik koordinat aktual AUV

$V(t)$: Kecepatan AUV

$\psi(t)$: Sudut haluan AUV

2.2.5 Sistem Logika Fuzzy

Prinsip logika *fuzzy* diperkenalkan oleh peneliti yang bernama Prof. Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965. Logika *fuzzy* merupakan suatu metode sistem pakar yang mampu mengatasi ketidakpastian di segala bidang. Dalam logika *fuzzy* memungkinkan nilai keanggotaan berada di interval 0 atau 1, sehingga dapat diartikan bahwa suatu keadaan memiliki dua nilai “Ya dan Tidak”, “Benar dan Salah”, “Baik dan Buruk” secara bersamaan, akan tetapi besar nilainya tergantung pada bobot keanggotaan yang dimilikinya (Widarma, 2019). Logika *fuzzy* merupakan salah satu metode pengambilan keputusan yang memiliki beberapa kelebihan (Cox, 2013) yaitu sebagai berikut.

- a) Konsep logika *fuzzy* mudah dipahami, hal ini dikarenakan logika *fuzzy* menggunakan dasar teori himpunan.
- b) Logika *fuzzy* mampu memodelkan fungsi-fungsi nonlinear yang sangat kompleks.
- c) Logika *fuzzy* memiliki toleransi terhadap data yang tidak tepat.
- d) Logika *fuzzy* sangat fleksibel, dimana sistem logika *fuzzy* tersebut dapat beradaptasi dengan perubahan-perubahan, dan ketidakpastian yang menyertai permasalahan.
- e) Logika *fuzzy* dapat mengaplikasikan pengalaman dari pakar secara langsung tanpa harus melalui proses pelatihan.
- f) Logika *fuzzy* dapat bekerjasama dengan teknik-teknik kendali secara konvensional.
- g) Logika *fuzzy* didasarkan pada bahasa sehari-hari sehingga mudah dimengerti.

Secara umum terdapat beberapa hal yang menjadi dasar dalam memahami logika *fuzzy*, yaitu variabel *fuzzy*, himpunan *fuzzy*, domain himpunan *fuzzy*, dan semesta pembicaraan yang dijelaskan sebagai berikut.

a) Variabel *Fuzzy*

Variabel *fuzzy* merupakan variabel yang akan dibahas dalam suatu sistem *fuzzy*.
Contoh: temperatur, permintaan, temperatur, dll.

b) Himpunan *Fuzzy*

Himpunan *fuzzy* merupakan suatu kelompok yang mewakili suatu kondisi atau keadaan tertentu dalam suatu variabel *fuzzy*. Himpunan *fuzzy* ini memiliki 2 atribut yaitu:

- Linguistik merupakan penamaan suatu grup yang mewakili suatu keadaan tertentu dengan menggunakan bahasa alami. Contoh: panas, sejuk, hangat, dingin, dll.
- Numeris merupakan suatu nilai yang menunjukkan ukuran dari suatu variabel.
Contoh: 10, 20, 30, 40, dst.

c) Semesta Pembicaraan

Semesta pembicaraan adalah keseluruhan nilai yang diperbolehkan untuk dioperasikan dalam suatu variabel *fuzzy*. Contoh: Semesta pembicaraan untuk variabel temperatur $[0 \ 120]$, usia $[0 \ \infty]$, dan tinggi badan $[1 \ 160]$.

d) Domain Himpunan *Fuzzy*

Domain himpunan *fuzzy* merupakan keseluruhan nilai yang termasuk di dalam semesta pembicaraan dan diperbolehkan untuk dioperasikan dalam himpunan *fuzzy*. Domain berupa himpunan bilangan real yang senantiasa bertambah secara berulang dari kiri ke kanan, dimana nilai domain tersebut dapat berupa bilangan positif ataupun negatif. Contoh: Dingin = $[0 \ 20]$, Sejuk = $[15 \ 25]$, Normal = $[20 \ 30]$, Hangat = $[25 \ 35]$, Panas $[30 \ 40]$.

Perancangan sistem dengan menggunakan kendali logika *fuzzy* dilakukan melalui 4 tahapan (Ibrahim, 2016) sebagai berikut.

a) Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan suatu proses yang berfungsi untuk mengkonversi bilangan tegas (bilangan *crisp*) ke dalam bentuk bilangan *fuzzy*. Dengan adanya hal tersebut, maka sebuah nilai dikelompokkan kedalam fungsi keanggotaan himpunan dengan nilai keanggotaan tertentu.

b) *Rule Base*

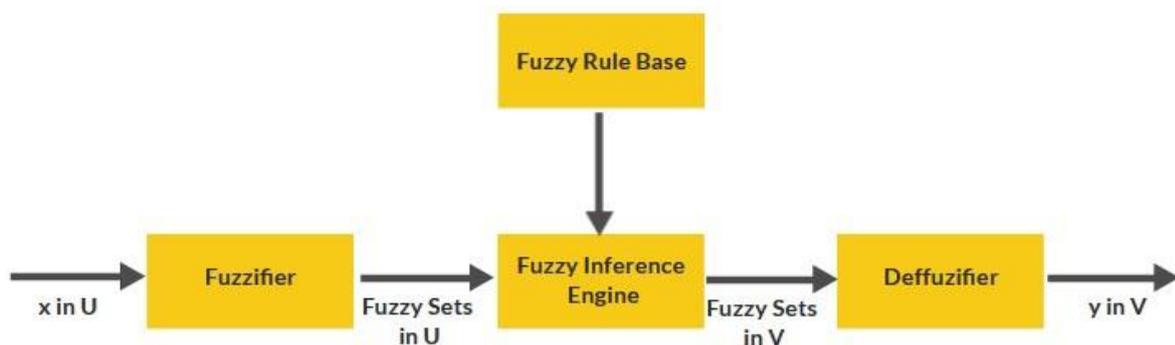
Rule base merupakan aturan dasar yang berfungsi untuk menjelaskan metode pengendali dan hubungan antara *input* dan *output* pengendali logika *fuzzy*. Pada *rule base* ini berisi aturan atau kondisi *IF-THEN* yang menjadi batasan ketika melakukan pengambilan keputusan.

c) Sistem Inferensi *Fuzzy*

Sistem inferensi *fuzzy* merupakan suatu proses yang berfungsi untuk melakukan penalaran dan pengambilan keputusan berdasarkan *input fuzzy* dan *rule base* yang telah ditentukan, sehingga menghasilkan *output fuzzy*. Dalam sistem inferensi *fuzzy* terbagi menjadi tiga tipe metode yaitu metode Tsukamoto, metode Mamdani, dan metode Takagi-Sugeno.

d) Defuzzifikasi

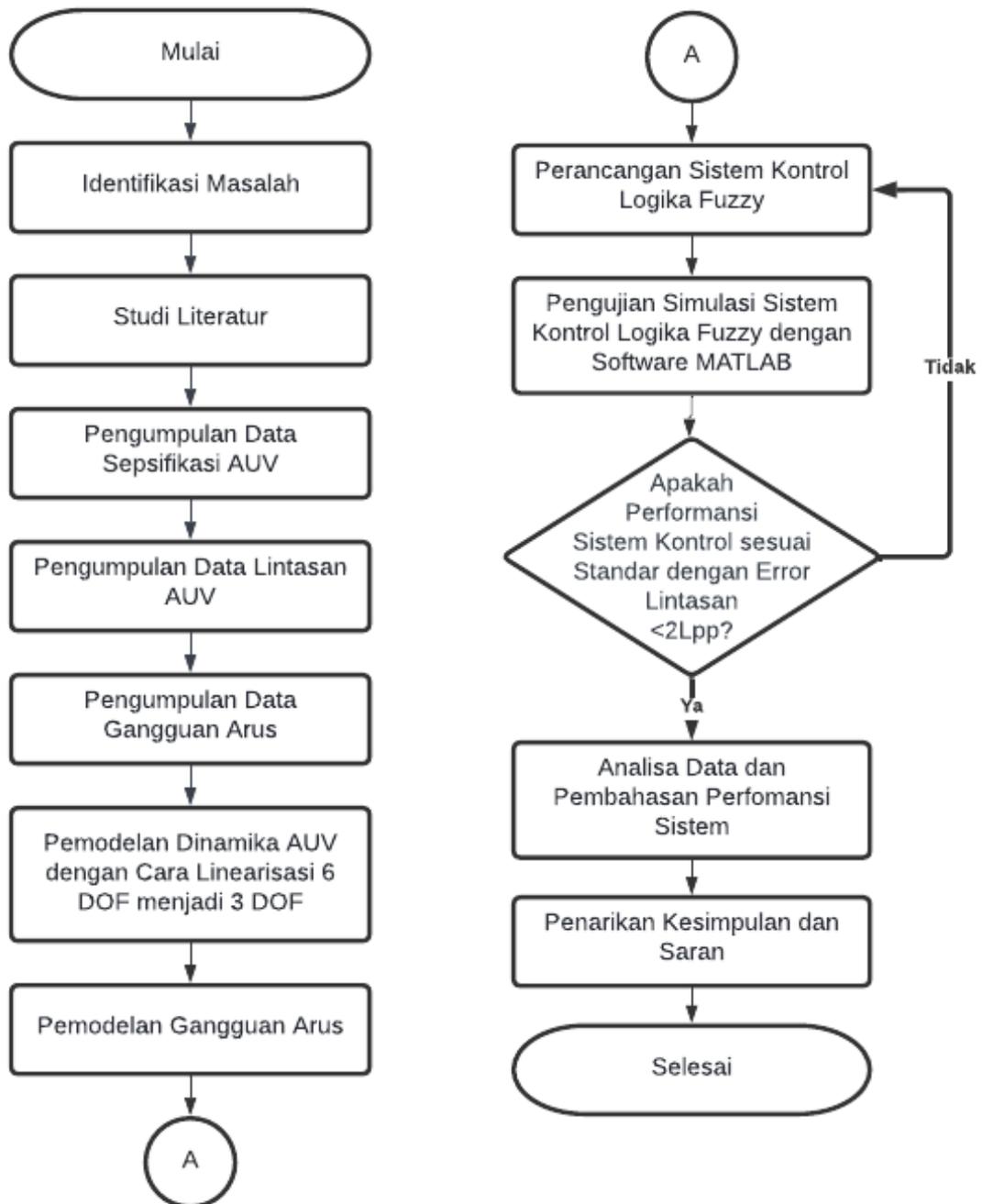
Defuzzifikasi merupakan suatu proses perubahan *output* bilangan *fuzzy* menjadi bilangan tegas (bilangan *crisp*) yang ditentukan menggunakan operator defuzzifikasi berdasarkan fungsi keanggotaan.



Gambar 2. 3 Arsitektur Sistem Logika *Fuzzy* (L.-X. Wang, 1997)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Gambar 3.1 ini merupakan diagram alir (*flowchart*) yang dibuat untuk menjelaskan mengenai tahapan atau langkah-langkah dalam pengerjaan penelitian tugas akhir.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.1 Identifikasi Masalah

Tahap pertama yang dilakukan dalam penelitian ini adalah mencari sebuah permasalahan yang akan dijadikan sebagai topik dalam tugas akhir. Penelitian ini permasalahan yang diangkat adalah bagaimana cara merancang sistem kontrol gerak pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) yang dipengaruhi oleh gangguan arus laut agar sesuai dengan jalur yang telah ditentukan. Pengendali logika *fuzzy* digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Penggunaan pengendali logika *fuzzy* ini dipilih dengan mempertimbangkan keunggulan dari metode tersebut, sehingga dengan adanya beberapa keunggulan metode logika *fuzzy* ini diharapkan hasil simulasi yang diperoleh memiliki respon kestabilan terbaik.

3.2 Studi Literatur

Tahap studi literatur ini dilakukan untuk mempelajari mengenai dasar teori yang akan digunakan sebagai penunjang penelitian tugas akhir. Hal ini dapat dilakukan dengan cara mencari dan mengumpulkan sumber informasi berupa buku, jurnal, artikel ilmiah, serta *thesis* ataupun laporan penelitian sebelumnya yang terkait dengan pemodelan dinamika *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV), pemodelan gangguan arus laut, pengendali Logika *Fuzzy*, serta dilakukan pemahaman materi mengenai pemrograman sistem logika *fuzzy* pada *software* Matlab.

3.3 Pengumpulan Data Spesifikasi AUV

Tahap ini dilakukan pengumpulan data spesifikasi *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) model Remus yang diperoleh dari penelitian sebelumnya (Prestero, 2001). Data spesifikasi AUV model Remus ditunjukkan pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3. 1 Data Spesifikasi AUV Model Remus (Prestero, 2001)

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
m	30	kg	Massa
p	1.33	m	Panjang
l	0.19	m	Lebar
t	0.19	m	Tinggi
d	0.19	m	Diameter
v	1.51	m/s	Kecepatan Normal
ρ	1030	kg/m ³	Densitas

Data koefisien hidrostatis dan hidrodinamis pada Tabel 3.2 akan digunakan pada tahap pemodelan dinamik AUV terhadap arah gerak 3 DOF yaitu *surge*, *sway*, dan *yaw*.

Tabel 3. 2 Data Koefisien Hidrostatis dan Hidrodinamis AUV Remus (Prestero, 2001)

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
$N_{\dot{r}}$	-4.88	kg.m ² /rad	Massa tambahan pada arah gerak <i>yaw</i>
$N_{\dot{v}}$	1.93	kg.m	Massa tambahan pada arah gerak <i>yaw</i>
N_{uv}	-24	kg	<i>Body</i> dan <i>Fin Lift</i> dan <i>Munk Moment</i>
N_{ur}	-2	kg.m/rad	Massa tambahan <i>cross term</i> dan <i>fin lift</i>
$N_{v v }$	-3.18	kg	Gaya drag pada arah gerak <i>sway</i>
$N_{r r }$	-9.4	kg.m ² /rad ²	Gaya drag pada arah gerak <i>yaw</i>
$N_{uu\delta r}$	-6.15	kg/rad	Momen angkat <i>fin</i>
$X_{\dot{u}}$	-0.93	kg	Massa tambahan pada arah gerak <i>surge</i>
X_{vr}	35.5	kg/rad	Massa tambahan pada arah gerak <i>surge</i>
$X_{u u }$	-1.62	kg/m	Gaya drag pada arah gerak <i>surge</i>
$X_{r r }$	-1.93	kg.m/rad	Massa tambahan pada arah gerak <i>surge</i>
I_z	3.45	kg.m ²	Momen Inersia pada Sumbu Z
x_G	0	m	<i>Center of Gravity</i> (CoG) pada sumbu X
y_G	0	m	<i>Center of Gravity</i> (CoG) pada sumbu Y
$Y_{\dot{v}}$	-35.5	kg	Massa tambahan pada arah gerak <i>sway</i>
$Y_{\dot{r}}$	1.93	kg.m/rad	Massa tambahan pada arah gerak <i>sway</i>
Y_{uv}	-28.6	kg/m	<i>Body lift force</i> dan <i>Fin Lift</i>
Y_{ur}	5.22	kg/rad	Massa tambahan pada arah gerak <i>sway</i>
$Y_{v v }$	-131	kg/m	Gaya drag pada arah gerak <i>sway</i>
$Y_{r r }$	0.632	kg.m/rad ²	Gaya drag pada arah gerak <i>pitch</i>
$Y_{uu\delta r}$	9.64	kg/(m.rad)	Gaya angkat <i>fin</i>

Data spesifikasi propeller pada Tabel 3.3 akan digunakan untuk melakukan perhitungan pada tahap pemodelan dinamik AUV.

Tabel 3. 3 Data Spesifikasi Propeller (Allen et al., 2000) (Ningsih et al., 2016)

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
D	0.1397	m	Diameter
n	25.42	rps	Putaran per detik
V_s	1.51	m/s	Kecepatan
K_T	0.075	kg	Koefisien Gaya Dorong
τ	0.286	Nm	Torsi
QPC	0.811		Efisiensi
J	0.4252		<i>Advance Number</i>
J_{dc}	0.1	kg m ² s ⁻²	Momen inersia motor dc
B_{dc}	0.01	Ns/m	<i>Viscous friction</i>
k_4	0.3	Nm/Amp	EMF balik konstan
k_5	0.3	Nm/Amp	Torsi konstan
L_a	0.1	H	Induktansi <i>anchor coil</i>
T_D	0		Torsi <i>disturbance</i>
R_a	2	ohm	<i>Barriers anchor</i>

Data spesifikasi rudder pada Tabel 3.4 akan digunakan untuk melakukan perhitungan pada tahap pemodelan dinamik AUV.

Tabel 3. 4 Data Spesifikasi Rudder (Ningsih et al., 2016)

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
J_s	0.0000019	kg m ²	Momen inersia motor dc
B_s	0.0000018	Nm/rps	<i>Viscous friction</i>
K_M	0.0311	Nm/Amp	EMF balik konstan
K_T	0.0311	Nm/Amp	Torsi konstan
L_M	0.00464	H	Induktansi <i>anchor coil</i>
R_M	7.38	ohm	<i>Barriers anchor</i>

3.4 Pengumpulan Data Jalur AUV

Wilayah perairan yang digunakan sebagai jalur AUV adalah Perairan Selayar di Sulawesi Selatan. Letak astronomis jalur AUV berupa titik koordinat *Degree Minute Second* (DMS) diperoleh berdasarkan aplikasi *Google Earth*, dimana titik koordinat DMS akan dikonversi menjadi titik koordinat *Universal Transverse Mercator* (UTM). Titik berwarna

merah yang membentuk garis lurus dan lengkung pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 menunjukkan titik referensi jalur AUV yang digunakan sebagai acuan.



Gambar 3. 2 Jalur AUV di Perairan Selayar dengan Lintasan Lurus



Gambar 3. 3 Jalur AUV di Perairan Selayar dengan Lintasan Belok

Data titik koordinat DMS dan UTM jalur AUV di perairan Selayar dengan Lintasan Lurus dan Lintasan Belok ditunjukkan pada tabel 3.5 dan Tabel 3.6 sebagai berikut.

Tabel 3. 5 Data Titik Koordinat Lintasan Lurus pada AUV di Perairan Selayar

Titik	Koordinat DMS		Koordinat UTM		Penyederhanaan UTM	
	LS	BT	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
1	6°17'57.23"S	120°13'9.67"E	192320.63	9302897.98	0	0
2	6°17'50.93"S	120°13'15.98"E	192513.69	9303092.69	193.06	194.71
3	6°17'43.90"S	120°13'21.70"E	192688.49	9303309.75	367.86	411.76
4	6°17'35.91"S	120°13'29.02"E	192912.34	9303556.57	591.72	658.59
5	6°17'27.26"S	120°13'37.24"E	193163.78	9303823.83	843.15	925.85
6	6°17'16.84"S	120°13'46.83"E	193457.07	9304145.73	1136.45	1247.74
7	6°17'8.59"S	120°13'54.58"E	193694.12	9304400.62	1373.50	1502.62

Tabel 3. 6 Data Titik Koordinat Lintasan Belok pada AUV di Perairan Selayar

Titik	Koordinat DMS		Koordinat UTM		Penyederhanaan UTM	
	LS	BT	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
1	6° 8'12.13"S	120° 8'28.49"E	183573.97	9320839.57	0	0
2	6° 8'14.77"S	120° 8'33.37"E	183724.57	9320759.22	150.60	-80.36
3	6° 8'19.09"S	120° 8'36.77"E	183829.90	9320626.95	255.93	-212.62
4	6° 8'23.24"S	120° 8'39.34"E	183909.67	9320499.79	335.69	-339.78
5	6° 8'27.58"S	120° 8'41.48"E	183976.23	9320366.71	402.25	-472.86
6	6° 8'31.47"S	120° 8'42.71"E	184014.72	9320247.32	440.74	-592.25
7	6° 8'34.98"S	120° 8'42.97"E	184023.29	9320139.45	449.32	-700.12

3.5 Pengumpulan Data Gangguan Arus Laut

Tahap ini akan dilakukan pengumpulan data gangguan berupa arus laut yang meliputi kecepatan arus rata-rata pada wilayah perairan yang digunakan yaitu di area Perairan Selayar, Sulawesi Selatan. Data gangguan arus laut ini diperoleh berdasarkan situs resmi BMKG Maritim, dimana besarnya kecepatan arus ditentukan berdasarkan tingkat kedalaman laut. Data kecepatan arus pada kedalaman 25 m; 100 m; dan 250 m secara berturut-turut yaitu 0.45 m/s atau 0.8747 knot; 0.2 m/s atau 0.3887 knot; dan 0.05 m/s atau 0.0972 knot. Data tersebut akan digunakan untuk mengerjakan pemodelan dinamik agar diperoleh persamaan *disturbance* berupa arus laut pada AUV.

3.6 Pemodelan Dinamika AUV

Autonomous Underwater Vehicle (AUV) dengan model Remus memiliki aktuator sebanyak 2 yaitu propeller dan rudder. Pemodelan dinamik AUV akan direpresentasikan dalam bentuk matriks, sehingga harus dilakukan proses linearisasi terlebih dahulu terhadap arah gerak 3 DOF yaitu *surge*, *sway*, dan *yaw*. Persamaan gaya dan momen total pada setiap arah gerak AUV yang diteliti ditunjukkan pada persamaan (2.49), (2.50), dan (2.54).

Arah Surge:

Persamaan (2.49) harus dilinearisasi, variabel selain arah gerak *surge* (u), *sway* (v), dan *yaw* (r) diasumsikan memiliki nilai 0 [*heave* (w), *roll* (p), dan *pitch* (q) = 0], sehingga diperoleh hasil linearisasi yang ditunjukkan pada persamaan (3.1).

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr - x_G(r^2) + y_G(-\dot{r})] &= X_{HS} + X_{u|u}|u|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} \\
 (m - X_{\dot{u}})(\dot{u}) - (m + X_{vr})vr - mx_G(r^2) - my_G(\dot{r}) &= X_{HS} + X_{u|u}|u|u| + X_{rr}rr + X_{prop} \\
 (m - X_{\dot{u}})(\dot{u}) - my_G(\dot{r}) &= X_{HS} + X_{u|u}|u|u| + X_{rr}rr + X_{prop} + (m + X_{vr})vr + mx_G(r^2) \\
 (m - X_{\dot{u}})(\dot{u}) - my_G(\dot{r}) &= X_{res} + X_{u|u}|u|u| + X_{rr}rr + X_{prop} + (m + X_{vr})vr + mx_G(r^2)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Arah Sway:

Persamaan (2.50) harus dilakukan linearisasi, variabel selain arah gerak *surge* (u), *sway* (v), dan *yaw* (r) diasumsikan memiliki nilai 0 [*heave* (w), *roll* (p), dan *pitch* (q) = 0], sehingga diperoleh hasil linearisasi yang ditunjukkan pada persamaan (3.2).

$$\begin{aligned}
 m[\dot{v} + ur - y_G(r^2) + x_G(\dot{r})] &= Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{uv}uv \\
 &+ Y_{uu\delta r}u^2\delta r \\
 (m - Y_{\dot{v}})(\dot{v}) + (m - Y_{ur})ur - my_G(r^2) + (mx_G - Y_{\dot{r}})(\dot{r}) &= Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| \\
 &+ Y_{uv}uv + Y_{uu\delta r}u^2\delta r \\
 (m - Y_{\dot{v}})(\dot{v}) + (mx_G - Y_{\dot{r}})(\dot{r}) &= Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta r}u^2\delta r - \\
 &(m - Y_{ur})ur + my_G(r^2) \\
 (m - Y_{\dot{v}})(\dot{v}) + (mx_G - Y_{\dot{r}})(\dot{r}) &= Y_{res} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta r}u^2\delta r - \\
 &(m - Y_{ur})ur + my_G(r^2)
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Arah Yaw:

Persamaan (2.54) harus dilinearisasi, variabel selain arah gerak *surge* (u), *sway* (v), dan *yaw* (r) diasumsikan memiliki nilai 0 [*heave* (w), *roll* (p), dan *pitch* (q) = 0], sehingga diperoleh persamaan (3.3) berikut.

$$\begin{aligned}
I_z \dot{r} + m[x_G(\dot{v} - ur) - y_G(\dot{u} - vr)] &= N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + \\
N_{ur}ur + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r \\
(I_z - N_r)(\dot{r}) + (mx_G - N_{\dot{v}})(\dot{v}) + (mx_G - N_{ur})(ur) - (my_G)(\dot{u}) + (my_G)(vr) &= N_{HS} + \\
N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r \\
-(my_G)(\dot{u}) + (mx_G - N_{\dot{v}})(\dot{v}) + (I_z - N_r)(\dot{r}) &= N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{uv}uv + \\
N_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (mx_G - N_{ur})(ur) - (my_G)(vr) \\
-(my_G)(\dot{u}) + (mx_G - N_{\dot{v}})(\dot{v}) + (I_z - N_r)(\dot{r}) &= N_{res} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{uv}uv + \\
N_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (mx_G - N_{ur})(ur) - (my_G)(vr) \tag{3.3}
\end{aligned}$$

Persamaan (3.1) – (3.3) dapat dituliskan dalam bentuk matriks yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
&\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} X_{HS} + X_{u|u}|u|u| + X_{rr}rr + X_{prop} + (m + X_{vr})vr + mx_G(r^2) \\ Y_{HS} + Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (m - Y_{ur})ur + my_G(r^2) \\ N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r - (mx_G - N_{ur})(ur) - (my_G)(vr) \end{bmatrix} \\
&\tag{3.4}
\end{aligned}$$

X_{HS} , Y_{HS} , dan N_{HS} adalah persamaan gaya dan momen total yang akan dilakukan linearisasi terhadap variabel selain arah gerak *surge*, *sway*, dan *yaw* yang mengacu pada persamaan (2.29).

$$X_{HS} = X_{res} = 0$$

$$Y_{HS} = Y_{res} = 0$$

$$N_{HS} = N_{res} = 0 \tag{3.5}$$

Persamaan matriks (3.4) dapat dituliskan menjadi persamaan (3.6).

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

Pemodelan linear AUV dalam bentuk *state space* terhadap arah gerak *surge*, *sway*, dan *yaw* dapat dituliskan sebagai berikut.

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

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (3.7)$$

dengan,

$$A = J_x = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & g_1 & 0 \\ a_2 & b_2 & g_2 & 0 \\ a_6 & b_6 & g_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = J_u = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & G_1 & 0 \\ A_2 & B_2 & G_2 & 0 \\ A_6 & B_6 & G_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = 0$$

Pemodelan linier AUV dalam bentuk *state space* berdasarkan persamaan (3.7) dapat dituliskan menjadi persamaan (3.8).

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & g_1 & 0 \\ a_2 & b_2 & g_2 & 0 \\ a_6 & b_6 & g_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & G_1 & 0 \\ A_2 & B_2 & G_2 & 0 \\ A_6 & B_6 & G_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta u} & \frac{\delta f_1}{\delta v} & \frac{\delta f_1}{\delta r} & 0 \\ \frac{\delta f_2}{\delta u} & \frac{\delta f_2}{\delta v} & \frac{\delta f_2}{\delta r} & 0 \\ \frac{\delta f_6}{\delta u} & \frac{\delta f_6}{\delta v} & \frac{\delta f_6}{\delta r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta \omega_p} & \frac{\delta f_1}{\delta r} & \frac{\delta f_1}{\delta r} & 0 \\ \frac{\delta f_2}{\delta \omega_p} & \frac{\delta f_2}{\delta r} & \frac{\delta f_2}{\delta r} & 0 \\ \frac{\delta f_6}{\delta \omega_p} & \frac{\delta f_6}{\delta r} & \frac{\delta f_6}{\delta r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

variabel X_{prop} dapat ditulis menggunakan persamaan gaya dorong propeller pada persamaan 2.47, serta dilakukan substitusi nilai dari setiap komponen Jacobi pada persamaan (3.10), sehingga diperoleh persamaan matriks sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \\
 &\begin{bmatrix} 2X_{u|u|} & m + X_{vr} & 2X_{rr} + (m + X_{vr}) + 2mx_G & 0 \\ Y_{uv} - (m - Y_{ur}) & 2Y_{v|v|} + Y_{uv} & 2Y_{rr} - (m - Y_{ur}) - 2my_G & 0 \\ N_{uv} - (mx_G - N_{ur}) & 2N_{v|v|} + N_{uv} - my_G & 2N_{rr} - (mx_G - N_{ur}) - my_G & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \\
 &\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -my_G & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 \\ -my_G & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho D^4 K_T(J) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2Y_{uu\delta r} & 2Y_{uu\delta r} & 0 \\ 0 & 2N_{uu\delta r} & 2N_{uu\delta r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Persamaan matriks (3.11) telah didapatkan, perhitungan nilai invers matriks dilakukan dengan menggunakan asumsi persamaan (3.12).

$$\begin{aligned}
 A &= m - X_{\dot{u}} \\
 B &= E = -my_G \\
 C &= m - Y_{\dot{v}} \\
 D &= mx_G - Y_{\dot{r}} \\
 F &= mx_G - N_{\dot{v}} \\
 G &= I_z - N_{\dot{r}}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Diperoleh model persamaan matriks pada persamaan (3.13).

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

$$\begin{bmatrix} CG - DF & BF & -BC & 0 \\ DE & AG - BE & -AD & 0 \\ -CE & -AF & AC & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho D^4 K_T(J) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2Y_{uu\delta r} & 2Y_{uu\delta r} & 0 \\ 0 & 2N_{uu\delta r} & 2N_{uu\delta r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Persamaan pemodelan *state space* dikerjakan dengan cara mensubstitusikan nilai hidrostatik dan hidrodinamis yang tertera pada Tabel 3.2 kedalam asumsi yang telah dibuat pada persamaan (3.12), sehingga diperoleh hasil perhitungan berikut.

$$A = 30.93$$

$$B = E = 0$$

$$C = 65.5$$

$$D = -1.93$$

$$F = -1.93$$

$$G = 8.33$$

Nilai dari masing-masing variabel A , B , C , D , E , F , dan G akan disubstitusikan pada persamaan matriks (3.13), sehingga diperoleh hasil pada persamaan (3.14).

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0323 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0154 & 3.5616 \times 10^{-3} & 0 \\ 0 & 3.5616 \times 10^{-3} & 0.1208 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3.24 & 65.5 & 61.64 & 0 \\ -53.38 & -290.6 & -23.52 & 0 \\ -26 & -30.36 & -20.8 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 0.0323 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0154 & 3.5616 \times 10^{-3} & 0 \\ 0 & 3.5616 \times 10^{-3} & 0.1208 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6.2552 \times 10^{-3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 19.28 & 19.28 & 0 \\ 0 & -12.3 & -12.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Persamaan (3.15) dibawah ini merupakan model *state space* berdasarkan hasil perhitungan perkalian matriks pada persamaan (3.14). *Input* dari model *state space* ini berupa kecepatan sudut propeller pada arah gerak *surge*, serta sudut elevasi *rudder* pada arah gerak *sway* dan *yaw*. *Output* dari model *state space* berupa kecepatan pada arah gerak *surge*, *sway*, dan *yaw*, serta posisi sudut pada arah gerak *yaw*.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1046 & 2.1156 & -1.9909 & 0 \\ -0.9146 & -4.5833 & -0.4362 & 0 \\ -3.3308 & -4.7020 & -2.5936 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0002 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2531 & 0.2531 & 0 \\ 0 & -1.4172 & -1.4172 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Persamaan (3.15) dapat disederhanakan, sehingga diperoleh persamaan (3.16) sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1046 & 2.1156 & -1.9909 & 0 \\ -0.9146 & -4.5833 & -0.4362 & 0 \\ -3.3308 & -4.7020 & -2.5936 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0002 \\ 0.5062 \\ -2.8344 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_r \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

3.7 Pemodelan Dinamika Aktuator

Model *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) yang digunakan pada penelitian adalah Remus, model tersebut memiliki dua aktuator yaitu propeller dan rudder. Pemodelan dinamika dari kedua aktuator tersebut dilakukan dengan cara mensubstitusikan nilai parameter yang tertera pada Tabel 3.3 dan 3.4 ke dalam persamaan (2.55) dan (2.56). Hasil perhitungan fungsi transfer kedua aktuator ditunjukkan pada persamaan (3.17) dan (3.18).

$$P_{dc}(s) = \frac{0.3}{(0.1)(0.1)s^2 + ((0.01)(0.1) + (0.2)(2))s + ((0.01)(2) + (0.3)(0.3))}$$

$$P_{dc}(s) = \frac{0.3}{0.01s^2 + 0.201s + 0.11} \quad (3.17)$$

Persamaan fungsi transfer rudder ditunjukkan pada persamaan (3.18).

$$P_s(s) = \frac{0.0311}{((1.9 \times 10^{-6})(0.00464))s^3 + ((1.9 \times 10^{-6})(7.38) + (0.00464)(1.8 \times 10^{-6}))s^2 + (0.0311)}$$

$$P_s(s) = \frac{0.0311}{8.816 \times 10^{-9}s^3 + 1.40304 \times 10^{-5}s^2 + 0.000980494s} \quad (3.18)$$

3.8 Pemodelan Gangguan Arus Laut

Penelitian sistem kendali AUV ini menggunakan gangguan berupa arus laut, dimana gangguan arus laut ini terdiri dari dua komponen yaitu kecepatan arus laut rata-rata $V_c(t)$ dan arah arus laut (β). Penelitian ini besarnya nilai kecepatan arus di Perairan Selayar ditentukan berdasarkan tingkat kedalaman laut, sehingga diperoleh data kecepatan arus pada kedalaman 25 m; 100 m; dan 250 m secara berturut-turut yaitu 0.45 m/s atau 0.8747 knot; 0.2 m/s atau 0.3887 knot; dan 0.05 m/s atau 0.0972 knot. Sedangkan untuk nilai μ_o menggunakan nilai konstan yakni 0.1 (Fossen, 2011). Berikut ini merupakan pemodelan kecepatan arus berdasarkan persamaan (2.60) dan (2.61).

- a) Kecepatan Arus di Kedalaman 25 m

$$V_c(t) = 0.45 + t(\omega(t) - 0.045) \quad (3.19)$$

- b) Kecepatan Arus di Kedalaman 100 m

$$V_c(t) = 0.2 + t(\omega(t) - 0.02) \quad (3.20)$$

- c) Kecepatan Arus di Kedalaman 250 m

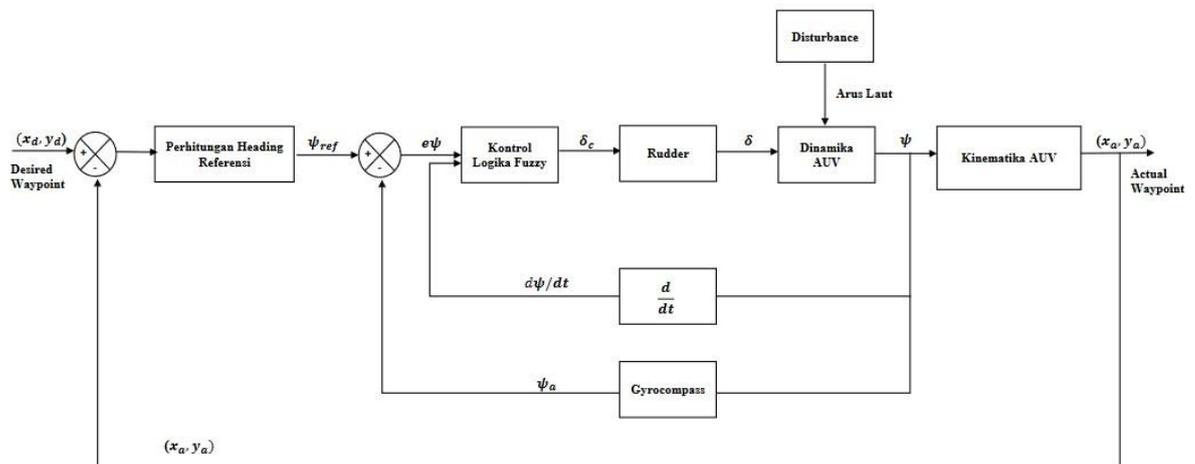
$$V_c(t) = 0.05 + t(\omega(t) - 0.005) \quad (3.21)$$

Asumsi yang digunakan berupa arah arus yang bergerak secara seragam menuju satu arah tertentu. Penelitian ini untuk arah datang arus laut dibagi menjadi 2 yaitu dari arah utara (atas) dengan nilai $\beta = 90^\circ$ dan arah selatan (bawah) dengan nilai $\beta = 120^\circ$.

3.9 Perancangan Sistem Kontrol Logika Fuzzy pada AUV

Tahap perancangan sistem kontrol ini dimulai dengan melakukan perancangan diagram blok yang menjelaskan proses pengendalian gerak AUV seperti pada Gambar 3.2. Perancangan sistem kontrol ini dilakukan untuk mengendalikan gerak pada AUV baik dengan menggunakan *disturbance* ataupun tidak, dimana *disturbance* yang akan digunakan yaitu berupa gangguan arus laut pada AUV.

Perancangan sistem kendali gerak AUV ini menggunakan sistem Logika Fuzzy dengan tujuan agar AUV tetap berada pada lintasan yang telah ditentukan. *Desired waypoint* berupa titik koordinat (X_d, Y_d) digunakan sebagai titik referensi pada perancangan sistem kendali tersebut. Informasi posisi aktual dengan titik koordinat (X_a, Y_a) akan terdeteksi oleh Sonar, kemudian data informasi posisi aktual tersebut akan diolah dengan menggunakan metode *Line of Sight* (LOS) untuk mendapatkan besarnya nilai sudut haluan dari objek referensi (ψ_{ref}) yang diperlukan untuk memandu AUV menuju titik koordinat pada lintasan yang sudah ditentukan. Nilai *heading* referensi (ψ_{ref}) dihitung menggunakan persamaan (2.62).



Gambar 3. 4 Perancangan Diagram Blok Pengendali Logika Fuzzy

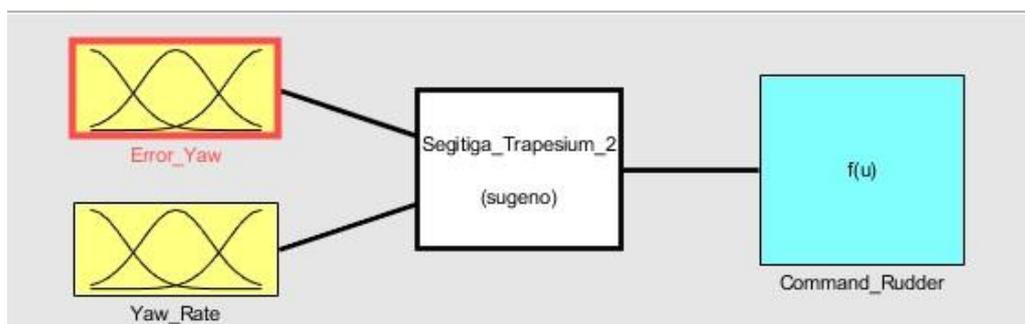
Bagian sudut haluan aktual (ψ_a) yang terdeteksi oleh *Gyrocompass* akan diolah menjadi nilai *error yaw* (e) dan *yaw rate* (r). Nilai *error yaw* (e) dan *yaw rate* (r) tersebut akan digunakan sebagai *input* dalam perancangan sistem pengendalian sudut haluan pada AUV dengan kontroler logika *fuzzy*. *Output* dari sistem pengendali logika *fuzzy* yaitu berupa sinyal kontrol yang akan dikirimkan ke rudder yang berfungsi sebagai aktuator. *Output* dari rudder ini akan diolah menggunakan persamaan kinematika AUV agar dapat menghasilkan *desired waypoint* pada AUV. Perancangan sistem kendali yang dilakukan pada penelitian ini akan menggunakan gangguan dari lingkungan berupa arus laut, hal ini dikarenakan arus laut dianggap memiliki pengaruh yang tinggi terhadap kestabilan gerak AUV.

Perancangan sistem kendali dengan menggunakan pengendali logika *fuzzy* terdiri dari beberapa tahap yaitu perancangan fuzzifikasi, perancangan *rule base*, serta proses inferensi *fuzzy*. Tahapan perancangan tersebut akan dijelaskan dalam bentuk poin-poin sebagai berikut.

a) Fuzzifikasi

Perancangan sistem kendali dengan menggunakan metode logika *fuzzy* untuk heading AUV dapat dilakukan melalui *Fuzzy Inferensi Sistem* (FIS) pada toolbox di Matlab. *Input* dari sistem kendali ini adalah *error yaw* dan *yaw rate*, sedangkan *output* berupa *command rudder*. Tampilan arsitektur kendali logika *fuzzy* pada Matlab ditunjukkan pada gambar 3.5.

Input berupa *error yaw* (e) adalah selisih dari nilai dari sudut *yaw* aktual dengan sudut *yaw* yang telah ditentukan, sedangkan *yaw rate* merupakan perubahan sudut rudder pada setiap detik (*seconds*). Bentuk fungsi keanggotaan yang digunakan adalah Trapesium-Segitiga dengan nilai *input error yaw* dan *yaw rate* 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*).



Gambar 3. 5 Arsitektur Sistem Kendali Logika *Fuzzy*

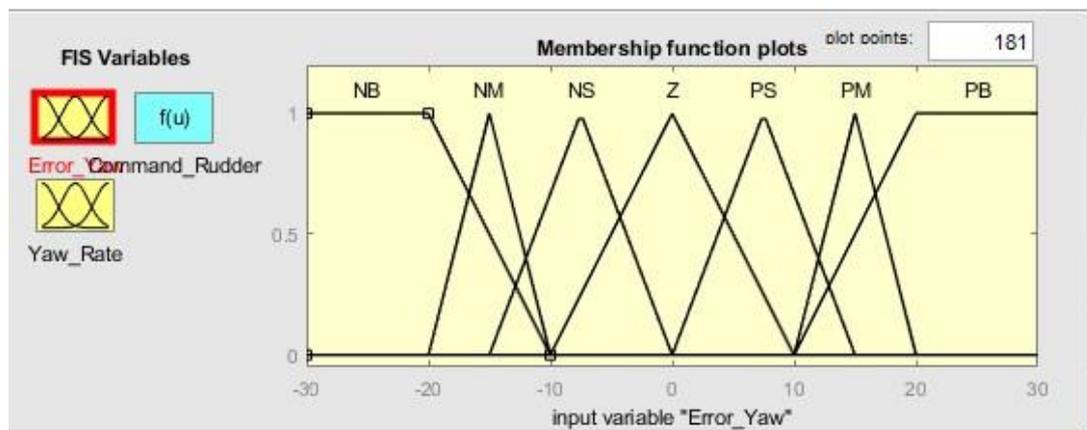
Nilai range untuk variabel *error yaw* adalah -30° sampai 30° , sedangkan nilai range untuk variabel *yaw rate* adalah $-10^\circ/s$ sampai $10^\circ/s$. Tabel 3.7 dibawah ini menunjukkan

perancangan himpunan *fuzzy* dari *input error yaw* dan *yaw rate* berupa range nilai pada setiap fungsi keanggotaan.

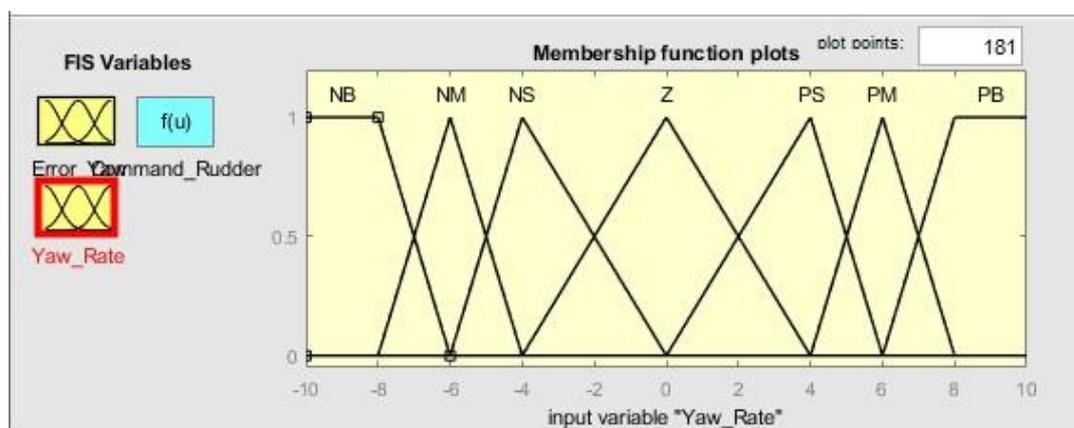
Tabel 3. 7 Himpunan *Fuzzy* pada Perancangan *Input Error Yaw* dan *Yaw Rate*

Fungsi Keanggotaan	Range Error Yaw	Range Yaw Rate
<i>Negative Big</i> (NB)	[-30 -30 -20 -10]	[-10 -10 -8 -6]
<i>Negative Medium</i> (NM)	[-20 -15 -10]	[-8 -6 -4]
<i>Negative Small</i> (NS)	[-15 -7.5 0]	[-6 -4 0]
<i>Zero</i> (Z)	[-10 0 10]	[-4 0 4]
<i>Positive Small</i> (PS)	[0 7.5 15]	[0 4 6]
<i>Positive Medium</i> (PM)	[10 15 20]	[4 6 8]
<i>Positive Big</i> (PB)	[10 20 30 30]	[6 8 10 10]

Arsitektur dari variabel *input error yaw* dan *yaw rate* dapat dilihat pada Gambar 3.6 dan 3.7 sebagai berikut.



Gambar 3. 6 Arsitektur Variabel *Input Error Yaw*



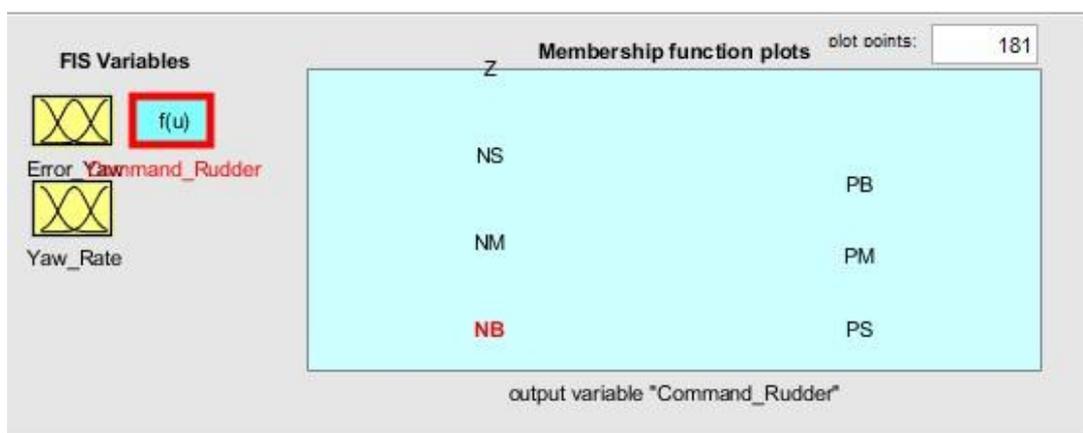
Gambar 3. 7 Arsitektur Variabel *Input Yaw Rate*

Penelitian ini digunakan pengendali logika *fuzzy* tipe Sugeno, sehingga *output* dari setiap fungsi keanggotaan pada variabel *command* rudder berupa *crisp* yang dapat dilihat pada Tabel 3.8.

Tabel 3. 8 Himpunan *Fuzzy* pada Perancangan *Output Command Rudder*

Fungsi Keanggotaan	Range <i>Command Rudder</i> (°)
<i>Negative Big</i> (NB)	[-30]
<i>Negative Medium</i> (NM)	[-20]
<i>Negative Small</i> (NS)	[-10]
Zero (Z)	[0]
<i>Positive Small</i> (PS)	[10]
<i>Positive Medium</i> (PM)	[20]
<i>Positive Big</i> (PB)	[30]

Arsitektur dari variabel *output command* rudder dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Arsitektur Variabel *Output Command Rudder*

b) Rule Base

Rule Base merupakan aturan dasar yang digunakan dalam kendali logika *fuzzy* yang berujuan untuk menentukan sudut haluan AUV yang dikendalikan, serta memiliki fungsi agar AUV dapat bergerak sesuai dengan lintasan yang telah ditentukan. Pembentukan *rule base* pada penelitian yang dilakukan mengacu pada beberapa penelitian terdahulu, akan tetapi terdapat penyempurnaan pada beberapa *rule*. Jumlah *rule* yang digunakan pada penelitian ini yakni sebanyak 49 *rule*. Tabel 3.9 dibawah ini menunjukkan *rule base* yang digunakan pada penelitian yang dilakukan saat ini.

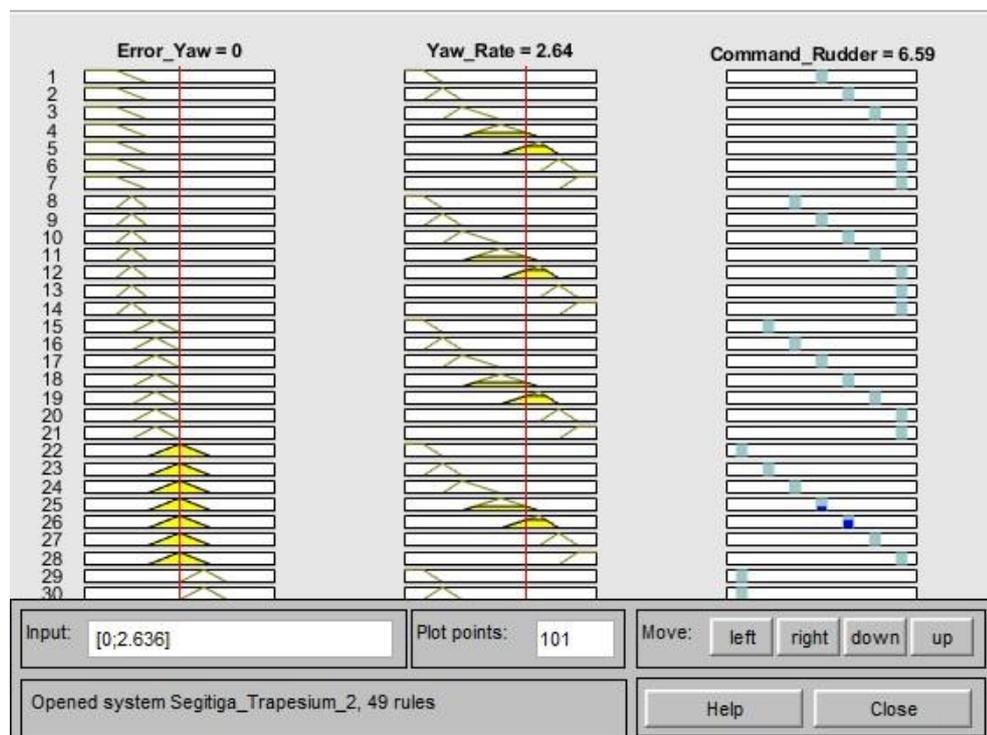
Tabel 3. 9 *Rule Base* Perancangan Sistem Kendali *Heading* AUV

r e	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB
NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
NS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
PM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
PB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z

Hasil respon yang diperoleh dengan menggunakan *rule base* pada penelitian terdahulu menghasilkan respon sistem yang tidak stabil. Terdapat perbedaan hasil respon sistem kontrol yaitu sistem stabil serta mampu mencapai nilai *set point* yang ditentukan pada saat dilakukan perubahan beberapa *rule*.

c) Proses Inferensi *Fuzzy*

Proses inferensi *fuzzy* yang digunakan pada penelitian ini adalah metode sugeno seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9 berikut.

**Gambar 3. 9** *Rule Viewer* Sistem Kendali dengan Logika *Fuzzy* Tipe Sugeno

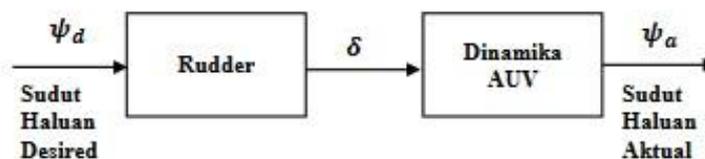
Input dari proses defuzzifikasi ini adalah himpunan *fuzzy* yang diperoleh dari *rule base* yang telah ditentukan. *Output* harus diubah menjadi himpunan *crisp*, hal ini dikarenakan *output* yang diperoleh masih berupa himpunan *fuzzy*. Gambar 3.9 menunjukkan bahwa jika *input fuzzy* dengan *error yaw* (e) bernilai 0 yang termasuk dalam fungsi keanggotaan Z dan *yaw rate* (r) bernilai 2.64 termasuk dalam fungsi keanggotaan PS, maka nilai *output fuzzy* berupa *command rudder* yang dihasilkan yaitu 6.59 yang termasuk dalam fungsi keanggotaan PS. Hal ini dapat dikatakan bahwa pengambilan keputusan sudah sesuai dengan *rule base* yang telah disusun.

3.10 Pengujian Simulasi Sistem Kontrol Heading AUV berbasis Logika Fuzzy

Pengujian hasil perancangan sistem gerak pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) dilakukan dengan menggunakan menggunakan *software* Matlab R2021a. Simulasi ini dilakukan pengujian perancangan kontrol gerak pada sistem AUV dengan menggunakan pengendali logika *fuzzy*, dimana sistem akan disimulasikan dengan dan tanpa *disturbance*. Nilai yang diperoleh menunjukkan performansi kestabilan gerak AUV.

3.10.1 Pengujian Sistem secara *Open Loop*

Tahap simulasi pengujian *open loop* rudder dilakukan terlebih dahulu, hal ini bertujuan untuk mengetahui respon sistem yang dihasilkan oleh *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) pada saat tidak diberikan kontroler. *Input* dari pengujian *open loop* ini adalah sudut haluan AUV yang diinginkan, dengan sudut haluan yang ditentukan adalah sebesar 20° dan 30° .

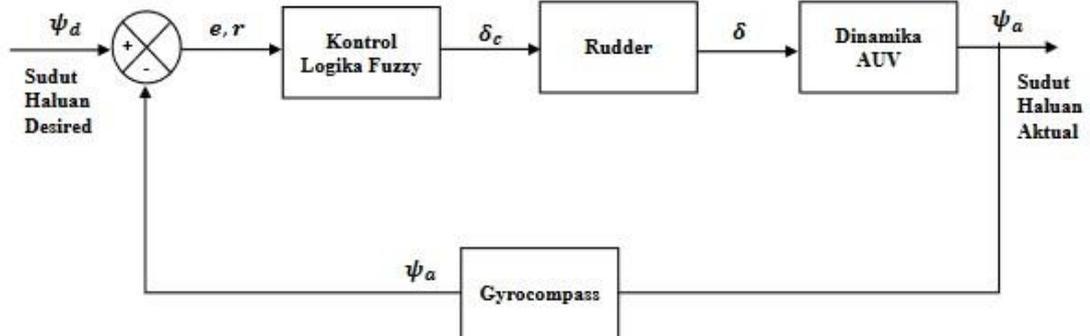


Gambar 3. 10 Diagram Blok Pengujian Sistem secara *Open Loop*

Input sudut haluan pada rudder tersebut bertujuan untuk mengendalikan sudut haluan pada AUV yang kemudian akan diperoleh persamaan dinamika AUV agar dapat bergerak sesuai dengan sudut haluan yang diinginkan. Pengujian sistem secara *open loop* ini, komponen yang digunakan yaitu fungsi transfer rudder pada persamaan 3.21 dan *state space* AUV pada persamaan 3.19.

3.10.2 Pengujian Sistem secara *Close Loop*

Pengujian *close loop* dilakukan dengan cara menambahkan kontroler logika *fuzzy* dengan *input* berupa sudut haluan sebesar 20° dan 30° . Sudut haluan aktual yang terdeteksi oleh *Gyrocompass* akan menjadi *input* dari sistem kontrol logika *fuzzy*, kemudian *output* dari kontrol logika *fuzzy* berupa sinyal kontrol yang diteruskan ke rudder. Persamaan dinamika AUV diperoleh, sehingga AUV dapat bergerak sesuai dengan sudut haluan yang diinginkan.



Gambar 3. 11 Diagram Blok Pengujian Sistem secara *Close Loop*

3.10.3 Pengujian Lintasan AUV

Pengujian lintasan AUV sesuai dengan lintasan yang telah ditentukan dapat dilakukan setelah pengujian sistem secara *close loop*. Pengujian lintasan ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan respon pengendali logika *fuzzy* yang dirancang dalam mempertahankan gerak AUV agar sesuai dengan lintasan yang ditentukan baik tanpa gangguan maupun dengan gangguan arus.

3.11 Analisis Hasil dan Pembahasan Performansi Sistem

Setelah dilakukan simulasi proses sistem kontrol gerak pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) maka akan diperoleh hasil performansi dari sistem tersebut. Tahap analisa ini dilakukan dengan cara mengamati performansi sistem berupa grafik hasil respon kestabilan sistem dan nilai-nilai parameter pengendalian yang diperoleh. Hasil yang diharapkan adalah sistem kontrol gerak pada AUV yang telah dirancang dengan menggunakan logika *fuzzy* memiliki performansi kestabilan yang baik. Nilai-nilai parameter pengendali hasil pengujian *close loop* yang telah diperoleh akan dilihat berdasarkan nilai maksimum *overshoot* pada setiap pengujian sistem. Apabila hasil performansi pengendali yang diperoleh memiliki nilai maksimum *overshoot* yang baik, maka dapat dilanjutkan pada tahap pengujian lintasan. Tahap pengujian lintasan ini akan dilihat berdasarkan *error*

lintasan yang dihasilkan sistem pengendali logika *fuzzy*. AUV dikatakan berhasil mencapai *waypoint* jika berada pada nilai radius aman (ρ) sesuai yang ditentukan.

3.12 Penarikan Kesimpulan dan Saran

Tahap ini dilakukan penarikan kesimpulan dan saran, penarikan kesimpulan dilakukan dengan tujuan untuk memberikan jawaban terhadap rumusan masalah yang sudah dibuat. Pemberian saran oleh penulis dilakukan agar penelitian selanjutnya yang membahas mengenai perancangan sistem kontrol gerak pada AUV dapat menghasilkan *output* yang lebih baik.

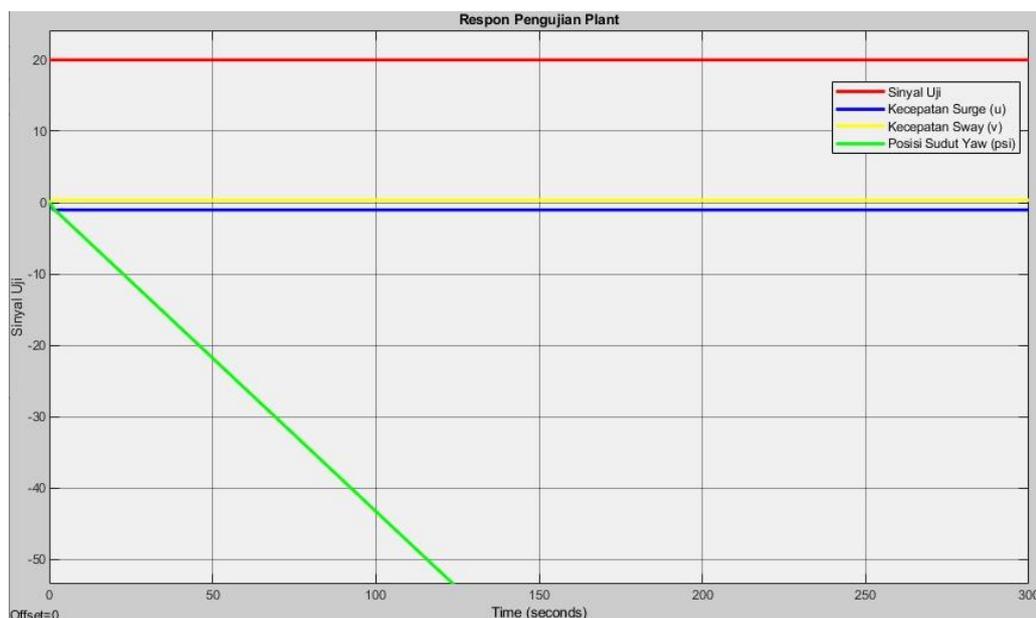
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini membahas mengenai perancangan sistem kontrol gerak pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) tipe Remus dengan pengaruh gangguan arus laut menggunakan metode kontrol logika *fuzzy* tipe-1 Sugeno. Perancangan sistem kontrol gerak AUV ini bertujuan untuk menjaga kestabilan gerak AUV agar tetap berada pada lintasan yang telah ditentukan. Beberapa tahapan yang dilakukan dalam perancangan sistem kontrol ini yaitu diawali dengan melakukan pengujian *open loop* dan *close loop* untuk mengetahui respon pengendali yang digunakan. Setelah melakukan pengujian *open loop* dan *close loop*, maka pengujian lintasan dapat dilakukan untuk mengetahui respon performansi sistem AUV. Pengujian pada sistem kontrol gerak ini dilakukan baik tanpa gangguan dan adanya gangguan arus laut yang diberikan. Pengujian sistem kontrol AUV ini dilakukan dengan menggunakan *software* Simulink Matlab R2022a.

4.1 Analisis Pengujian *Open Loop* pada AUV

Pengujian *open loop* pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui respon sistem yang dihasilkan oleh plant pada saat tidak diberikan kontroler. Pengujian sistem dilakukan dengan memberikan *input* berupa nilai konstan dengan sinyal uji sebesar 20° dan 30° . Pada Gambar 4.1 menunjukkan respon kecepatan *surge* (u), kecepatan *sway* (v), dan sudut haluan (ψ) pada arah gerak *yaw* dari AUV.

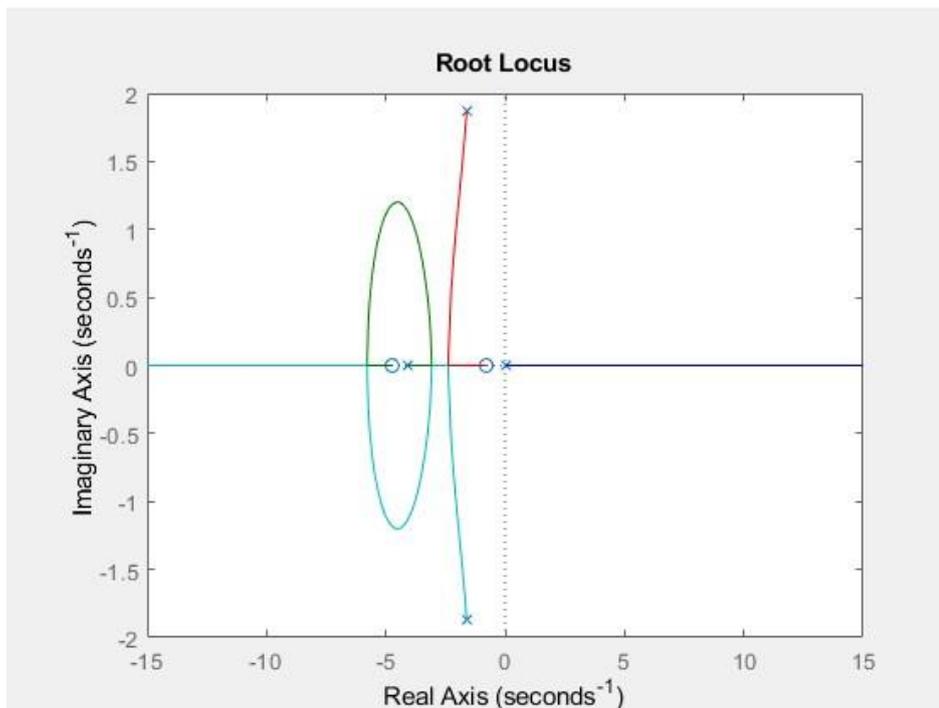


Gambar 4. 1 Respon Pengujian *Plant* secara *Open Loop*

Hasil respon pada Gambar 4.1 menunjukkan bahwa sudut haluan AUV pada arah gerak *yaw* tidak dapat mencapai nilai sinyal uji yang telah ditentukan, sehingga diperlukan tambahan kontroler ke dalam sistem agar dapat dapat mencapai nilai sinyal uji tersebut. Kontroler yang digunakan dalam penelitian ini adalah kontrol logika *fuzzy* tipe-1.

4.2 Analisis Pengujian Kestabilan AUV dengan *Root Locus*

Pengujian kestabilan sistem dilakukan dengan menggunakan metode letak kedudukan akar (*Root Locus*). Metode *Root Locus* merupakan suatu metode yang merepresentasikan akar-akar persamaan karakteristik untuk seluruh nilai dari suatu parameter sistem (Aisjah & Arifin, 2018). Akar-akar untuk suatu nilai tertentu dari parameter tersebut dapat dilihat pada grafik yang diperoleh.



Gambar 4. 2 Hasil Pengujian Kestabilan AUV dengan *Root Locus*

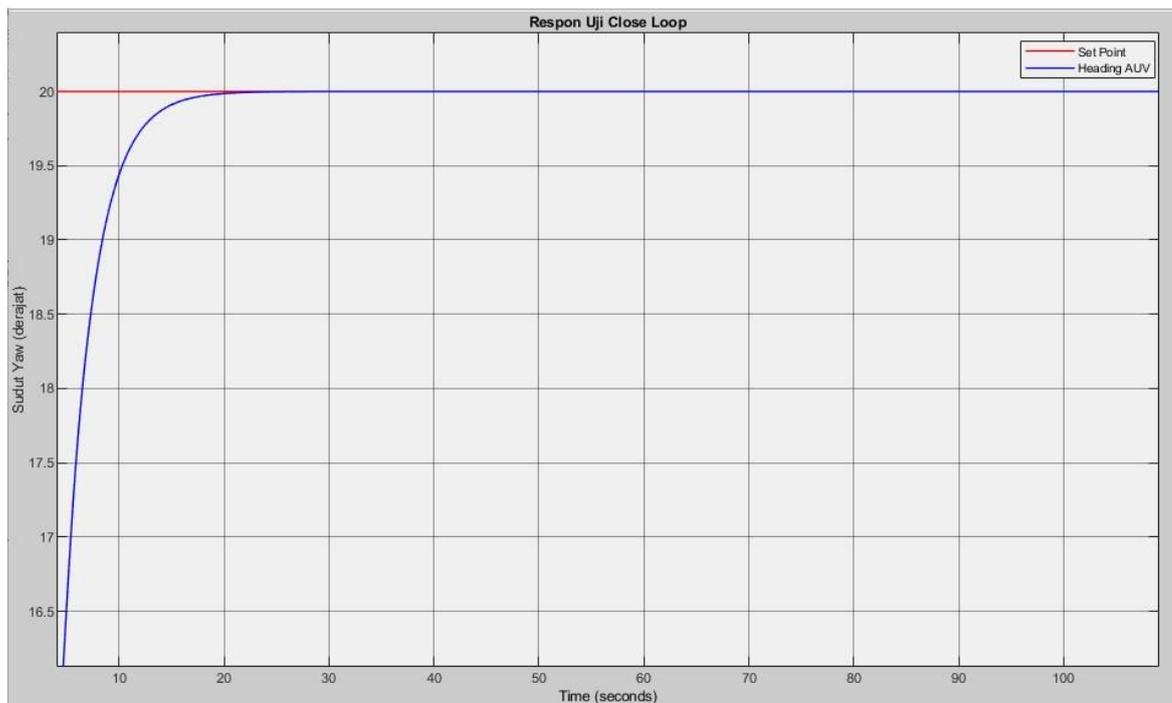
Grafik hasil pengujian *Root Locus* dari Fungsi Transfer AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) model Remus ditunjukkan pada Gambar 4.2. Berdasarkan hasil plot grafik tersebut menunjukkan bahwa letak kedudukan akar-akar baik *pole* maupun *zero* terletak pada sebelah kiri sumbu imajiner, sehingga AUV Remus dikatakan stabil karena akar-akar *pole* bernilai negatif.

4.3 Analisis Pengujian *Close Loop* Sistem Kontrol Logika *Fuzzy* pada AUV

Pengujian *close loop* sistem kendali AUV dilakukan dengan menambahkan kontroler yang telah ditentukan, yaitu kontrol logika *fuzzy* tipe-1 dengan *Fuzzy Inferensi Sistem* (FIS)

milik Sugeno. Pengujian *close loop* ini dilakukan dengan menggunakan *set point* berupa sudut haluan sebesar 20° dan 30° . Pengujian secara *close loop* ini dilakukan dengan menambahkan kontrol logika *fuzzy* dan *feedback* berupa *error yaw* (e) dan *yaw rate* (r).

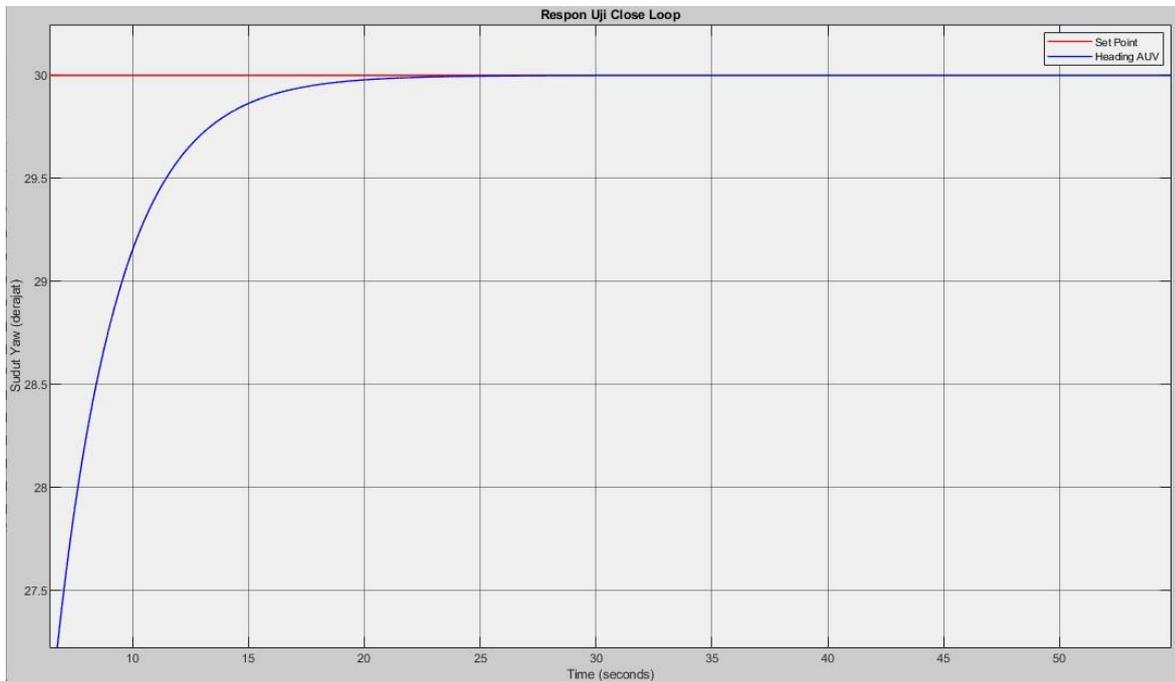
Pengujian *close loop* dengan *input* sudut haluan sebesar 20° berbasis kendali logika *fuzzy*, diperoleh hasil respon sistem yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Garis berwarna biru yang menunjukkan respon *heading* atau respon sudut haluan AUV mampu mencapai *set point* yang telah ditetapkan. Sistem kendali logika *fuzzy* ini dilakukan dengan jenis fungsi keanggotaan Trapesium – Segitiga seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 3.9. Performansi yang dihasilkan berupa nilai *rise time* sebesar 6.1276 detik, *settling time* sebesar 12.8169 detik dan maksimum *overshoot* sebesar 0.27° atau 1.35%. Pengujian sistem ini dilakukan dengan menggunakan *settling time* berupa waktu yang diperlukan respon untuk dapat mencapai kondisi stabil dan memasuki daerah kriteria *error* 2% dari nilai akhir (Ogata, 2010).



Gambar 4. 3 Respon Uji *Close Loop* dengan *Set Point* 20°

Ketika dilakukan pengujian *close loop* dengan *input* sudut haluan sebesar 30° menggunakan kendali logika *fuzzy*, diperoleh hasil respon sistem seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Respon pengujian *close loop* dengan *input* sudut haluan sebesar 30° pada gambar diatas, menunjukkan bahwa respon sudut haluan AUV mampu mencapai *set point* yang telah ditetapkan. Performansi yang didapatkan pada saat menggunakan *input* sudut haluan sebesar 30° memiliki nilai *rise time* sebesar 6.0047 detik, *settling time* sebesar 12.8400 detik dan maksimum *overshoot* sebesar 0.62° atau 2.08%. Nilai maksimum *overshoot* yang dihasilkan

harus sesuai dengan kriteria maksimum *overshoot* yakni memiliki nilai kurang dari 25° . Tahap selanjutnya dapat dilakukan pengujian sistem kontrol logika *fuzzy* pada AUV dengan lintasan yang telah ditentukan.



Gambar 4. 4 Respon Uji *Close Loop* dengan *Set Point* 30°

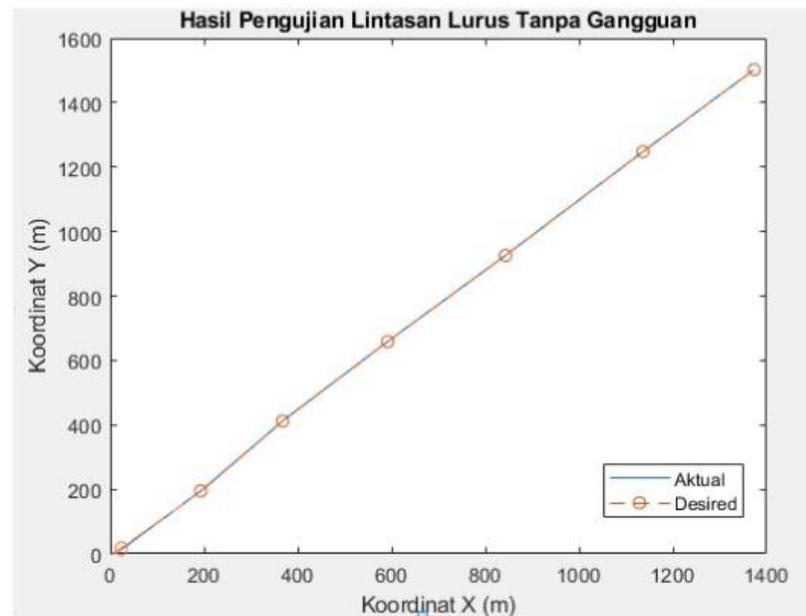
4.4 Analisis Pengujian Sistem Kontrol Logika *Fuzzy* pada AUV Tanpa Gangguan

Rangkaian perancangan sistem kontrol gerak AUV dengan logika *fuzzy* tanpa gangguan ditunjukkan pada Gambar B.5 dan Gambar B.7 yang tertera di lampiran. Terdapat dua jenis lintasan yang digunakan yaitu lintasan lurus dan lintasan belok. Pengujian lintasan ini dikatakan berhasil apabila AUV mencapai *waypoint* yang berada pada nilai radius aman (ρ) sesuai yang ditentukan yaitu sebesar 2 kali panjang AUV dengan nilai *error* rata-rata lintasan harus kurang dari 2.66 meter. Hasil pengujian lintasan pada AUV dengan menggunakan lintasan lurus dan lintasan belok tanpa adanya gangguan arus laut yang diberikan dianalisis pada sub bab 4.4.1 dan 4.4.2.

4.4.1 Analisis Respon Trayektori pada Lintasan Lurus Tanpa Gangguan

Pengujian lintasan yang pertama dilakukan adalah pada pengujian lintasan lurus tanpa adanya pengaruh gangguan arus laut. Titik-titik koordinat yang digunakan dalam bentuk *Universal Transverse Mercator* (UTM) yang telah disederhanakan, data titik koordinat lintasan lurus dapat dilihat pada Tabel 3.5. Wilayah perairan yang digunakan adalah Perairan Selayar dengan titik referensi yang dimulai dari (0,0). Hasil respon pengujian pada lintasan

lurus tanpa gangguan dapat diamati pada Gambar 4.5, dilakukan analisis dengan cara mengamati jarak antara nilai pada setiap titik yang diinginkan (X_d, Y_d) dengan titik aktual (X_a, Y_a) yang dilalui oleh AUV.



Gambar 4. 5 Hasil Pengujian Lintasan Lurus Tanpa Gangguan

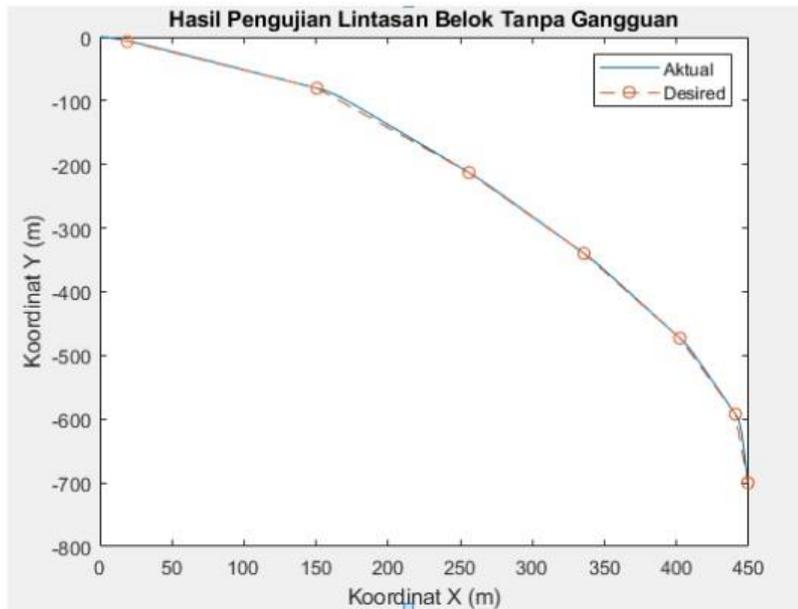
Hasil respon pengujian pada Gambar 4.5 dapat diketahui bahwa sistem kendali yang dirancang dapat mempertahankan gerak AUV untuk tetap berada di titik-titik lintasan yang telah ditentukan. Lintasan lurus ini terdiri dari 7 titik lintasan, dimana nilai *error* setiap titik lintasan dapat diamati pada Tabel 4.1 dibawah ini. Nilai rata-rata *error* pada pengujian lintasan lurus tanpa gangguan adalah sebesar 0.73 meter, sedangkan nilai *error* terbesar berada pada titik ke-7 yaitu 2.25 meter.

Tabel 4. 1 Analisis *Error* Pengujian Lintasan Lurus Tanpa Gangguan

Titik Lintasan	<i>Desired Waypoint</i>		<i>Actual Waypoint</i>		<i>Error</i> Lintasan (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	193.06	194.71	193.04	194.69	0.03
3	367.86	411.76	367.53	411.35	0.53
4	591.72	658.59	591.07	657.88	0.96
5	843.15	925.85	844.04	926.80	1.30
6	1136.45	1247.74	1136.47	1247.76	0.03
7	1373.5	1502.62	1371.96	1500.98	2.25
Rata-rata <i>Error</i> Lintasan					0.73

4.4.2 Analisis Respon Trayektori pada Lintasan Belok Tanpa Gangguan

Pengujian lintasan kedua yang dilakukan adalah pengujian pada lintasan belok tanpa adanya pengaruh gangguan arus laut. Data titik-titik koordinat yang digunakan pada lintasan belok ini dapat dilihat pada Tabel 3.6, wilayah perairan yang digunakan adalah Perairan Selayar dengan titik referensi yang dimulai dari (0,0). Hasil respon pengujian pada lintasan belok tanpa gangguan dapat diamati pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Hasil Pengujian Lintasan Belok Tanpa Gangguan

Analisis respon pengujian dilakukan dengan cara mengamati jarak antara nilai pada setiap titik yang diinginkan (X_d, Y_d) dengan titik aktual (X_a, Y_a) yang dilalui oleh AUV. Hasil respon pengujian pada Gambar 4.6 diketahui bahwa sistem kendali yang dirancang dapat mempertahankan gerak AUV untuk tetap berada di titik-titik lintasan yang telah ditentukan.

Tabel 4. 2 Analisis *Error* Pengujian Lintasan Belok Tanpa Gangguan

Titik Lintasan	<i>Desired Waypoint</i>		<i>Actual Waypoint</i>		<i>Error Lintasan (m)</i>
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	150.6	-80.36	150.89	-80.53	0.34
3	255.93	-212.62	255.75	-212.38	0.30
4	335.69	-339.78	335.88	-340.09	0.36
5	402.25	-472.86	402.14	-472.62	0.26
6	440.74	-592.25	440.46	-591.31	0.98
7	449.32	-700.12	449.18	-697.38	2.74
Rata-rata <i>Error</i> Lintasan					0.71

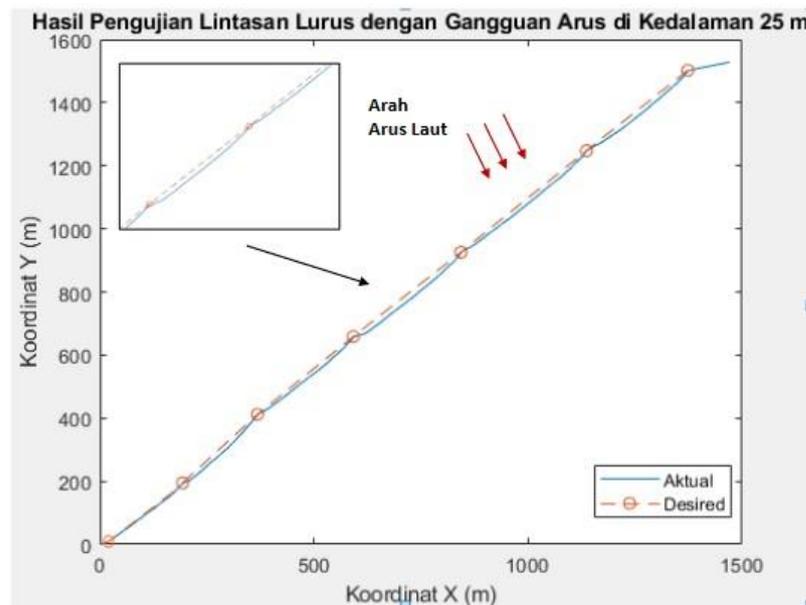
Nilai *error* terbesar berada pada titik ke-7 yaitu 2.74 meter, sedangkan nilai rata-rata *error* pada pengujian lintasan belok tanpa gangguan adalah sebesar 0.71 meter. Nilai *error* setiap titik lintasan pada pengujian lintasan belok tanpa gangguan dapat diamati pada Tabel 4.2.

4.5 Analisis Pengujian Sistem Kontrol Logika *Fuzzy* pada AUV dengan Gangguan Arus

Perancangan sistem kontrol gerak AUV dengan logika *fuzzy* dilakukan dengan memberikan gangguan lingkungan berupa arus laut pada lintasan lurus dan lintasan belok. Hal ini dikarenakan arus laut memiliki pengaruh yang tinggi terhadap kestabilan gerak AUV. Perancangan sistem kontrol ditunjukkan pada Gambar B.6 dan B.8 yang tertera di lampiran.

4.5.1 Analisis Respon Trayektori Lintasan Lurus dengan Gangguan Arus di Kedalaman 25 Meter

Pengujian lintasan ketiga yang dilakukan adalah pengujian pada lintasan lurus dengan gangguan arus di kedalaman 25 meter dengan kecepatan arus sebesar 0.45 m/s. Data titik-titik koordinat yang digunakan sebagai referensi dalam melakukan pelacakan titik lintasan ini dapat dilihat pada Tabel 3.5 pada kolom penyederhanaan UTM. Hasil pengujian lintasan lurus dengan gangguan arus di kedalaman 25 meter ini dapat dilihat pada Gambar 4.7 sebagai berikut.



Gambar 4. 7 Hasil Pengujian Lintasan Lurus dengan Gangguan Arus ($d = 25$ m)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa AUV mampu mengikuti titik-titik referensi yang diinginkan, walaupun terdapat penyimpangan pada saat AUV bergerak menuju titik lintasan. Penyimpangan ini terjadi karena adanya pengaruh gangguan arus laut sebesar 0.45 m/s. Arus

laut tersebut datang dari arah utara (atas), sehingga menyebabkan AUV mengalami pergeseran ke arah selatan (bawah). Nilai *error* setiap titik lintasan dapat diamati pada Tabel 4.3 dibawah. Nilai rata-rata *error* pada pengujian lintasan lurus dengan gangguan arus di kedalaman 25 meter adalah sebesar 1.10 meter, sedangkan nilai *error* terbesar berada pada titik ke-7 yaitu 2.44 meter.

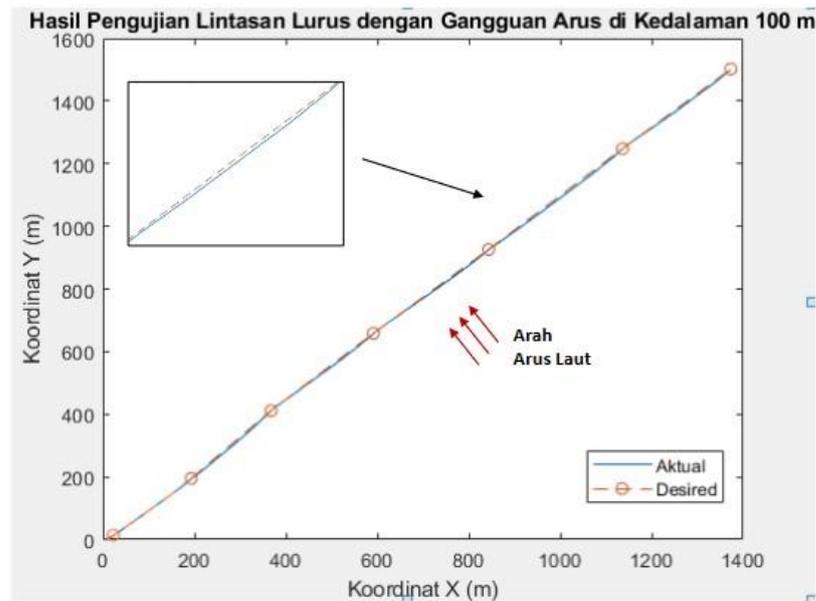
Tabel 4. 3 Analisis *Error* Pengujian Lintasan Lurus dengan Gangguan Arus di Kedalaman 25 Meter

Titik Lintasan	<i>Desired Waypoint</i>		<i>Actual Waypoint</i>		<i>Error</i> Lintasan (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	193.06	194.71	193.56	194.92	0.54
3	367.86	411.76	368.27	412.71	1.03
4	591.72	658.59	591.77	659.89	1.30
5	843.15	925.85	844.6	926.35	1.53
6	1136.45	1247.74	1137.35	1247.78	0.90
7	1373.5	1502.62	1375.7	1503.67	2.44
Rata-rata <i>Error</i> Lintasan					1.10

4.5.2 Analisis Respon Trayektori Lintasan Lurus dengan Gangguan Arus di Kedalaman 100 Meter

Pengujian lintasan keempat yang dilakukan adalah pengujian pada lintasan lurus dengan gangguan arus di kedalaman 100 meter dengan kecepatan arus sebesar 0.2 m/s. Data titik-titik koordinat yang digunakan sebagai referensi dalam melakukan pelacakan titik lintasan ini dapat dilihat pada Tabel 3.5 pada kolom penyederhanaan titik koordinat dengan UTM. Hasil pengujian lintasan lurus dengan gangguan arus di kedalaman 100 meter ini dapat dilihat pada Gambar 4.8.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa AUV mampu mengikuti titik-titik referensi yang diinginkan dengan nilai *error* pada setiap titik lintasan dapat dilihat pada Tabel 4.4. Nilai *error* terbesar pada pengujian lintasan lurus dengan gangguan arus di kedalaman 100 meter adalah berada pada titik ke-7 yaitu 2.93 meter, sedangkan nilai rata-rata *error* yang diperoleh sebesar 0.67 meter.



Gambar 4. 8 Hasil Pengujian Lintasan Lurus dengan Gangguan Arus ($d = 100$ m)

Nilai *error* setiap titik lintasan pada pengujian lintasan lurus dengan gangguan arus di kedalaman 100 meter dapat diamati pada Tabel 4.4 berikut.

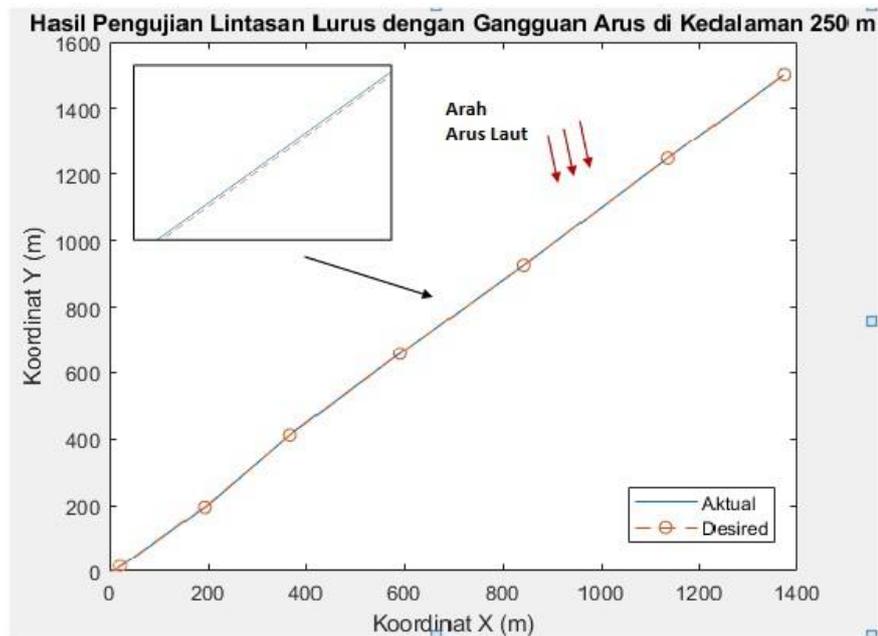
Tabel 4. 4 Analisis *Error* Pengujian Lintasan Lurus dengan Gangguan Arus di Kedalaman 100 Meter

Titik Lintasan	<i>Desired Waypoint</i>		<i>Actual Waypoint</i>		<i>Error</i> Lintasan (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	193.06	194.71	193.54	194.76	0.48
3	367.86	411.76	368.05	411.88	0.22
4	591.72	658.59	591.93	658.59	0.21
5	843.15	925.85	843.49	925.95	0.35
6	1136.45	1247.74	1136.75	1248.10	0.47
7	1373.50	1502.62	1372.49	1499.87	2.93
Rata-rata <i>Error</i> Lintasan					0.67

4.5.3 Analisis Respon Trayektori Lintasan Lurus dengan Gangguan Arus di Kedalaman 250 Meter

Pengujian lintasan kelima yang dilakukan adalah pengujian pada lintasan lurus dengan gangguan arus di kedalaman 250 meter dengan kecepatan arus sebesar 0.05 m/s. Data titik-titik koordinat yang digunakan sebagai referensi dalam melakukan pelacakan titik lintasan ini dapat dilihat pada Tabel 3.5 pada kolom penyederhanaan UTM. Hasil pengujian

lintasan lurus dengan gangguan arus di kedalaman 250 meter ini dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Hasil Pengujian Lintasan Lurus dengan Gangguan Arus ($d = 250$ m)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa AUV mampu mengikuti titik-titik referensi yang diinginkan. Nilai *error* setiap titik lintasan dapat diamati pada Tabel 4.5 sebagai berikut.

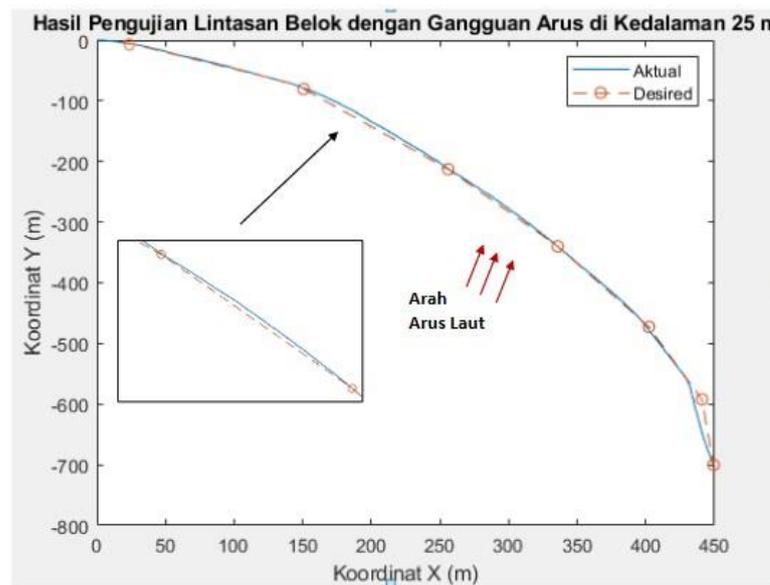
Tabel 4. 5 Analisis *Error* Pengujian Lintasan Lurus dengan Gangguan Arus di Kedalaman 250 Meter

Titik Lintasan	<i>Desired Waypoint</i>		<i>Actual Waypoint</i>		<i>Error Lintasan (m)</i>
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	193.06	194.71	193.14	194.80	0.12
3	367.86	411.76	369.02	413.21	1.86
4	591.72	658.59	591.21	658.08	0.72
5	843.15	925.85	844.50	927.24	1.94
6	1136.45	1247.74	1137.6	1247.08	1.33
7	1373.5	1502.62	1371.87	1501.02	2.28
Rata-rata <i>Error</i> Lintasan					1.18

Nilai rata-rata *error* pada pengujian lintasan lurus dengan gangguan arus di kedalaman 250 meter adalah sebesar 1.18 meter, sedangkan nilai *error* terbesar berada pada titik ke-7 yaitu 2.28 meter.

4.5.4 Analisis Respon Trayektori Lintasan Belok dengan Gangguan Arus di Kedalaman 25 Meter

Pengujian lintasan keenam yang dilakukan adalah pengujian pada lintasan belok dengan gangguan arus di kedalaman 25 meter dengan kecepatan arus sebesar 0.45 m/s. Data titik-titik koordinat yang digunakan sebagai referensi dalam melakukan pelacakan titik lintasan ini dapat dilihat pada Tabel 3.6 pada kolom penyederhanaan titik koordinat dengan UTM. Hasil pengujian lintasan belok dengan gangguan arus di kedalaman 25 meter ini dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Hasil Pengujian Lintasan Belok dengan Gangguan Arus ($d = 25$ m)

Nilai error setiap titik lintasan pada pengujian lintasan belok dengan gangguan arus di kedalaman 25 meter ditunjukkan pada Tabel 4.6 berikut.

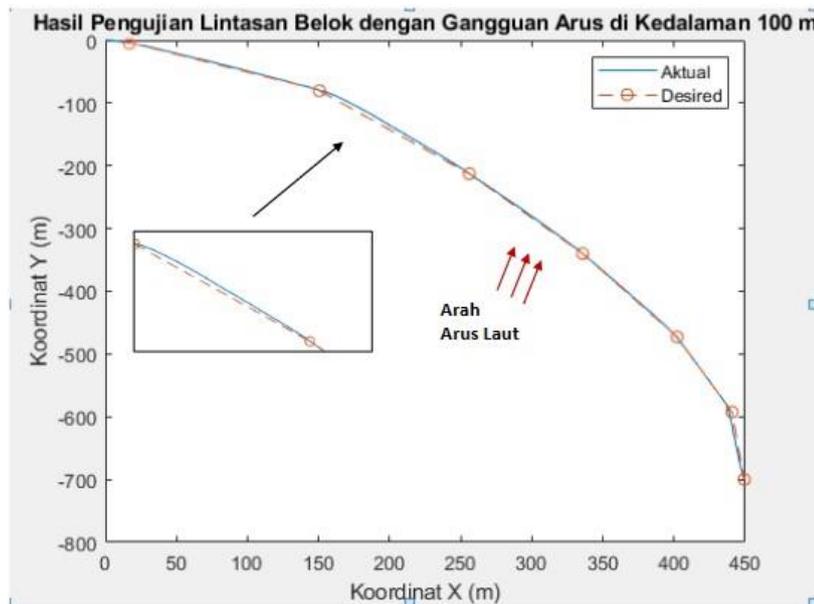
Tabel 4. 6 Analisis *Error* Pengujian Lintasan Belok dengan Gangguan Arus di Kedalaman 25 Meter

Titik Lintasan	<i>Desired Waypoint</i>		<i>Actual Waypoint</i>		<i>Error Lintasan (m)</i>
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	150.60	-80.36	151.93	-81.59	1.81
3	255.93	-212.62	255.72	-213.68	1.08
4	335.69	-339.78	335.76	-340.15	0.38
5	402.25	-472.86	402.75	-472.97	0.51
6	440.74	-592.25	441.09	-594.20	1.98
7	449.32	-700.12	449.05	-699.00	1.15
Rata-rata <i>Error</i> Lintasan					0.99

Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan bahwa AUV mampu mengikuti titik-titik referensi yang diinginkan, walaupun terdapat penyimpangan pada saat AUV bergerak menuju titik lintasan seperti pada Gambar 4.10. Penyimpangan ini terjadi karena adanya pengaruh gangguan arus laut sebesar 0.45 m/s. Arus laut tersebut datang dari arah selatan (bawah), sehingga menyebabkan AUV mengalami pergeseran ke arah utara (atas). Nilai *error* terbesar pada pengujian lintasan belok dengan gangguan arus di kedalaman 25 meter ini berada pada titik ke-6 yaitu 1.98 meter. Nilai rata-rata *error* yang diperoleh adalah sebesar 0.99 meter.

4.5.5 Analisis Respon Trayektori Lintasan Belok dengan Gangguan Arus di Kedalaman 100 Meter

Pengujian lintasan ketujuh yang dilakukan adalah pengujian pada lintasan belok dengan gangguan arus di kedalaman 100 meter dengan kecepatan arus sebesar 0.2 m/s. Data titik-titik koordinat yang digunakan sebagai referensi dalam melakukan pelacakan titik lintasan ini dapat dilihat pada Tabel 3.6 pada kolom penyederhanaan UTM. Hasil pengujian lintasan belok dengan gangguan arus di kedalaman 100 meter ini dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Hasil Pengujian Lintasan Belok dengan Gangguan Arus ($d = 100$ m)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa AUV mampu mengikuti titik-titik referensi yang diinginkan, walaupun terdapat penyimpangan pada saat AUV bergerak menuju titik lintasan. Penyimpangan ini terjadi karena adanya pengaruh gangguan arus laut sebesar 0.2 m/s. Arus laut tersebut datang dari arah selatan (bawah), sehingga menyebabkan AUV mengalami pergeseran ke arah utara (atas). Nilai *error* setiap titik lintasan dapat diamati pada Tabel 4.7.

Nilai rata-rata *error* pada pengujian lintasan belok dengan gangguan arus di kedalaman 100 meter adalah sebesar 0.81 meter, sedangkan nilai *error* terbesar berada pada titik ke-5 yaitu 1.28 meter.

Tabel 4. 7 Analisis *Error* Pengujian Lintasan Belok dengan Gangguan Arus di Kedalaman 100 Meter

Titik Lintasan	<i>Desired Waypoint</i>		<i>Actual Waypoint</i>		<i>Error</i> Lintasan (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	150.60	-80.36	150.87	-79.98	0.47
3	255.93	-212.62	256.09	-212.57	0.17
4	335.69	-339.78	336.31	-338.71	1.24
5	402.25	-472.86	402.92	-473.95	1.28
6	440.74	-592.25	441.00	-593.48	1.26
7	449.32	-700.12	449.09	-698.87	1.27
Rata-rata <i>Error</i> Lintasan					0.81

4.5.6 Analisis Respon Trayektori Lintasan Belok dengan Gangguan Arus di Kedalaman 250 Meter

Pengujian lintasan kedelapan yang dilakukan adalah pengujian pada lintasan belok dengan gangguan arus di kedalaman 250 meter dengan kecepatan arus sebesar 0.05 m/s. Data titik-titik koordinat yang digunakan sebagai referensi dalam melakukan pelacakan titik lintasan ini dapat dilihat pada Tabel 3.6 pada kolom penyederhanaan UTM. Hasil pengujian lintasan belok dengan gangguan arus di kedalaman 250 meter ini dapat dilihat pada Gambar 4.12.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa AUV mampu mengikuti titik-titik referensi yang diinginkan, walaupun terdapat sedikit penyimpangan pada saat AUV bergerak menuju titik lintasan. Penyimpangan ini terjadi karena adanya pengaruh gangguan arus laut sebesar 0.05 m/s. Arus laut tersebut datang dari arah selatan (bawah), sehingga menyebabkan AUV mengalami pergeseran ke arah utara (atas). Nilai *error* terbesar pada pengujian lintasan belok dengan gangguan arus di kedalaman 100 berada pada titik ke-7 yaitu sebesar 2.86 meter. Sedangkan nilai rata-rata *error* yang diperoleh yaitu sebesar 0.90 meter, untuk nilai *error* setiap titik lintasan dapat diamati pada Tabel 4.8.



Gambar 4. 12 Hasil Pengujian Lintasan Belok dengan Gangguan Arus ($d = 250$ m)

Nilai *error* setiap titik lintasan pada pengujian lintasan belok dengan gangguan arus di kedalaman 250 meter dapat dilihat pada Tabel 4.8 sebagai berikut.

Tabel 4. 8 Analisis *Error* Pengujian Lintasan Belok dengan Gangguan Arus di Kedalaman 250 m

Titik Lintasan	<i>Desired Waypoint</i>		<i>Actual Waypoint</i>		<i>Error</i> Lintasan (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	150.6	-80.36	149.78	-79.89	0.95
3	255.93	-212.62	256.09	-212.84	0.27
4	335.69	-339.78	335.77	-339.94	0.18
5	402.25	-472.86	402.96	-472.05	1.08
6	440.74	-592.25	440.86	-593.22	0.98
7	449.32	-700.12	449.03	-697.27	2.86
Rata-rata <i>Error</i> Lintasan					0.90

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian yang telah dilakukan mengenai “Perancangan Sistem Kontrol Gerak pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) dengan Pengaruh Gangguan Arus Laut berbasis Logika *Fuzzy*”, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a) Arsitektur pengendali logika *fuzzy* yang terbaik pada penelitian ini adalah dengan menggunakan *Fuzzy Inferensi Sistem* (FIS) Sugeno yang memiliki 7 fungsi keanggotaan dengan bentuk Trapesium-Segitiga.
- b) Sistem pengendali yang dirancang dikatakan memiliki nilai performansi yang baik, dimana kriteria maksimum *overshoot* yang dihasilkan oleh sistem harus kurang dari 25°. Parameter kontrol pada *input* 20° yang dihasilkan berupa nilai *rise time* sebesar 6.1276 detik, *settling time* sebesar 12.8169 detik dan maksimum *overshoot* sebesar 0.27° atau 1.35%. Parameter kontrol pada *input* 30° yang dihasilkan berupa nilai *rise time* sebesar 6.0047 detik, *settling time* sebesar 12.8400 detik dan maksimum *overshoot* sebesar 0.62° atau 2.08%.
- c) Perancangan sistem pengendali yang diajukan mampu mempertahankan kestabilan gerak AUV pada saat melakukan pemanduan pada lintasan lurus dan lintasan belok di Perairan Selayar baik tanpa gangguan dan dengan adanya gangguan arus. Hal ini dibuktikan dengan nilai *error* yang dihasilkan pada masing-masing lintasan masih berada dalam rentang nilai radius aman (ρ) yang diizinkan. Nilai radius aman (ρ) pada penelitian ini adalah sebesar <2.66 ($<2L_{pp}$ AUV).

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan penulis untuk pengembangan penelitian selanjutnya:

- a) Metode perancangan sistem kontrol AUV dapat dilakukan dengan menggunakan logika *fuzzy* tipe-2 ataupun jaringan syaraf tiruan agar dapat memberikan performansi yang lebih baik.
- b) Perancangan sistem kontrol AUV dapat dikembangkan terhadap arah gerak 6 DOF (*Degree of Freedom*).
- c) Variasi gangguan lingkungan dapat ditambahkan, seperti kecepatan arus laut dengan berbagai variasi, gelombang laut, dan sebagainya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Aisjah, A. S., & Arifin, S. (2018). *Sistem pengendalian otomatis*.
- Allen, B., Vorus, W. S., & Prestero, T. (2000). Propulsion system performance enhancements on REMUS AUVs. *Oceans Conference Record (IEEE)*, 3, 1869–1873. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2000.882209>
- Coordinating Ministry for Maritime of The Republic of Indonesia. (2012). [MARITIM] Kebijakan Kelautan Indonesia 2012. *Kebijakan Kelautan Indonesia 2012*.
- Cox, E. (2013). The Fuzzy Systems Handbook. *Africa's Potential for the Ecological Intensification of Agriculture*, 53(9), 1689–1699.
- Fossen, T. I. (2011). Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. In *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. <https://doi.org/10.1002/9781119994138>
- Herlambang, T. (2016). *Desain Dan Analisa Sistem Gerak Autonomous Underwater Vehicle*.
- Ibrahim, D. (2016). An Overview of Soft Computing. *Procedia Computer Science*, 102(August), 34–38. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.366>
- Imaduddin, I. R., & Agustinah, T. (2016). Desain Kontrol Tracking Underactuated Autonomous Underwater Vehicle (AUV) dengan Pengaruh Gangguan Arus Laut. *Journal of Applied Intelligent System*, 1(3), 191–209. <http://publikasi.dinus.ac.id/index.php/jais/article/view/1253>
- Kadir, A. M. A., Kasno, M. A., Aras, M. S. M., Tumari, M. Z. M., & Saat, S. (2018). Fuzzy logic controller design for autonomous underwater vehicle (Auv)-yaw control. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(5), 1608–1614.
- Kumar, G. V. N., Sobhan, P. V. S., Rao, K. A. G., & Chowdary, D. D. (2008). Robustness of fuzzy logic based controller for unmanned autonomous underwater vehicle. *IEEE Region 10 Colloquium and 3rd International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2008, January 2017*. <https://doi.org/10.1109/ICIINFS.2008.4798420>
- Liang, X., Pang, Y., Wan, L., & Wang, B. (2009). Dynamic Modelling and Motion Control for Underwater Vehicles with Fins. *Underwater Vehicles*, December. <https://doi.org/10.5772/6720>
- Nag, A., Patel, S. S., & Akbar, S. A. (2013). Fuzzy logic based depth control of an autonomous underwater vehicle. *Proceedings - 2013 IEEE International Multi Conference on Automation, Computing, Control, Communication and Compressed*

Sensing, IMac4s 2013, July 2016, 117–123.
<https://doi.org/10.1109/iMac4s.2013.6526393>

Nedelcu, A. T., Buzbuchi, N., Faităr, C., & Stan, L. (2018). Underwater vehicle - Their past, present and future development. *Journal of Physics: Conference Series*, 1122(1), 0–8.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1122/1/012019>

Ngatini, Apriliani, E., & Nurhadi, H. (2017). Ensemble and Fuzzy Kalman Filter for position estimation of an autonomous underwater vehicle based on dynamical system of AUV motion. *Expert Systems with Applications*, 68, 29–35.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.10.003>

Ningsih, W., Subchan, & Nurhadi, H. (2016). Design and analysis of motion control system in the fin and the propulsion system of the Autonomous Underwater Vehicle (AUV) using Cross Coupled Control. *ICAMIMIA 2015 - International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation, Proceeding - In Conjunction with Industrial Mechatronics and Automation Exhibition, IMAE, 2015(Icamimia)*, 137–142. <https://doi.org/10.1109/ICAMIMIA.2015.7508018>

Ogata, K. (2010). Modern control engineering. In *Modern Control Engineering*.
<https://doi.org/10.1201/9781315214573>

Perez, T., & Fossen, T. (2010). *Motion Control of Marine Craft*.
<https://doi.org/10.1201/b10382-40>

Prestero, T. (2001). Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. *Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle*.
<https://doi.org/10.1575/1912/3040>

Rofiq, S. A., Elektro, J. T., Perkapalan, J. T., Industri, F. T., & Kelautan, T. (2014). *Perancangan Sistem Pengaturan Kestabilan Autonomous Underwater Vehicle (AUV) untuk Gerak Lateral Menggunakan Sliding Mode Control (SMC)*. 3(1), 1–6.

Sutarto, H., & Budiyo, A. (2011). Development of linear parameter varying control system for autonomous underwater vehicle. *Indian Journal of Marine Sciences*, 40(2), 275–286.

Ullah, B., Ovinis, M., Baharom, M. B., Ali, S. S. A., Khan, B., & Javaid, M. Y. (2020). Effect of waves and current on motion control of underwater gliders. *Journal of Marine Science and Technology (Japan)*, 25(2), 549–562. <https://doi.org/10.1007/s00773-019-00660-1>

Von Alt, C. (2003). *Prepared for the Autonomous Underwater Lagrangian Platforms and*

- Sensors Workshop*. 1–5.
- Wang, L.-X. (1997). A COURSE IN ' FUZZY A Course in Fuzzy Systems and Control. *Design*, 448. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=248374&dl=>
- Wang, X., & Wu, G. (2020). Modified LOS path following strategy of a portable modular AUV based on lateral movement. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/JMSE8090683>
- Widarma, A., & Kumala, H. (2019). Sistem Pendukung Keputusan Dalam Menentukan Pengguna Listrik Subsidi Dan Nonsubsidi Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani (Studi Kasus : PT. PLN Tanjung Balai). *Jurnal Teknologi Informasi*, 2(2), 165. <https://doi.org/10.36294/jurti.v2i2.432>
- Xiang, X., Yu, C., Lapiere, L., Zhang, J., & Zhang, Q. (2018). Survey on Fuzzy-Logic-Based Guidance and Control of Marine Surface Vehicles and Underwater Vehicles. *International Journal of Fuzzy Systems*, 20(2), 572–586. <https://doi.org/10.1007/s40815-017-0401-3>
- Xu, H., Zhang, G. C., Sun, Y. S., Pang, S., Ran, X. R., & Wang, X. Bin. (2019). Design and experiment of a plateau data-gathering AUV. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10). <https://doi.org/10.3390/jmse7100376>
- Yang, C. (2007). *Modular Modeling and Control for Autonomous Underwater Vehicle (Auv)*.
- Yu, C., Xiang, X., Lapiere, L., & Zhang, Q. (2017). Nonlinear guidance and fuzzy control for three-dimensional path following of an underactuated autonomous underwater vehicle. *Ocean Engineering*, 146(July), 457–467. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.10.001>

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

A. Skenario Pengendali Logika *Fuzzy*

Terdapat 5 skenario perancangan sistem kontrol logika *fuzzy* dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1) Skenario 1 (Gaussian MF)

Fungsi Keanggotaan	Range Error Yaw	Range Yaw Rate	Nilai Tunggal Command Rudder
<i>Negative Big</i> (NB)	[4.247 -30]	[1.416 -10]	[-30]
<i>Negative Medium</i> (NM)	[4.247 -20]	[1.416 -6.666]	[-20]
<i>Negative Small</i> (NS)	[4.247 -10]	[1.416 -3.334]	[-10]
<i>Zero</i> (Z)	[4.247 0]	[1.416 0]	[0]
<i>Positive Small</i> (PS)	[4.247 10]	[1.416 3.334]	[10]
<i>Positive Medium</i> (PM)	[4.247 20]	[1.416 6.666]	[20]
<i>Positive Big</i> (PB)	[4.247 30]	[1.416 10]	[30]

Berdasarkan perancangan *fuzzy* dengan skenario 1 menggunakan *input* sudut haluan sebesar 20° diperoleh hasil performansi sistem berupa nilai *rise time* sebesar 8.6082 detik, *settling time* sebesar 19.8794 detik dan maksimum *overshoot* sebesar 0.00046%. Sedangkan jika digunakan *input* sudut haluan sebesar 30° diperoleh hasil performansi sistem berupa nilai *rise time* sebesar 7.2531 detik, *settling time* sebesar 18.4484 detik dan maksimum *overshoot* sebesar 3.18%. Pada saat dilakukan pengujian lintasan, respons yang dihasilkan menunjukkan bahwa skenario *fuzzy* ke-1 hanya bisa membaca lintasan lurus, sedangkan lintasan belok tidak dapat terbaca oleh sistem.

2) Skenario 2 (Gbell MF)

Fungsi Keanggotaan	Range Error Yaw	Range Yaw Rate	Nilai Tunggal Command Rudder
<i>Negative Big</i> (NB)	[5 2.5 -30]	[1.667 2.5 -10]	[-30]
<i>Negative Medium</i> (NM)	[5 2.5 -20]	[1.667 2.5 -6.666]	[-20]
<i>Negative Small</i> (NS)	[5 2.5 -10]	[1.667 2.5 -3.334]	[-10]
<i>Zero</i> (Z)	[5 2.5 0]	[1.667 2.5 0]	[0]
<i>Positive Small</i> (PS)	[5 2.5 10]	[1.667 2.5 3.334]	[10]
<i>Positive Medium</i> (PM)	[5 2.5 20]	[1.667 2.5 6.666]	[20]
<i>Positive Big</i> (PB)	[5 2.5 30]	[1.667 2.5 10]	[30]

Berdasarkan perancangan *fuzzy* dengan skenario 2 menggunakan *input* sudut haluan sebesar 20° diperoleh hasil performansi sistem berupa nilai *rise time* sebesar 11.0832 detik, *settling time* sebesar 32.0056 detik dan maksimum *overshoot* sebesar 0.00071%. Sedangkan jika digunakan *input* sudut haluan sebesar 30° diperoleh hasil performansi sistem berupa nilai *rise time* sebesar 8.2751 detik, *settling time* sebesar 28.6078 detik dan maksimum *overshoot* sebesar 0.0041%. Pada saat dilakukan pengujian lintasan, respons yang dihasilkan menunjukkan bahwa skenario *fuzzy* ke-2 hanya bisa membaca lintasan lurus, sedangkan lintasan belok tidak dapat terbaca oleh sistem.

3) Skenario 3 (Segitiga MF)

Fungsi Keanggotaan	Range Error Yaw	Range Yaw Rate	Nilai Tunggal Command Rudder
<i>Negative Big</i> (NB)	[-30 -20 -10]	[-10 -8 -6]	[-30]
<i>Negative Medium</i> (NM)	[-20 -10 -5]	[-8 -6 -4]	[-20]
<i>Negative Small</i> (NS)	[-10 -5 0]	[-6 -4 0]	[-10]
<i>Zero</i> (Z)	[-5 0 5]	[-4 0 4]	[0]
<i>Positive Small</i> (PS)	[0 5 10]	[0 4 6]	[10]
<i>Positive Medium</i> (PM)	[5 10 20]	[4 6 8]	[20]
<i>Positive Big</i> (PB)	[10 20 30]	[6 8 10]	[30]

Berdasarkan perancangan *fuzzy* dengan skenario 2 menggunakan *input* sudut haluan sebesar 20° diperoleh hasil performansi sistem berupa nilai *rise time* sebesar 4.8560 detik, *settling time* sebesar 10.1479 detik dan maksimum *overshoot* sebesar 1.97%. Sedangkan jika digunakan *input* sudut haluan sebesar 30° hasil performansi yang diperoleh menunjukkan sistem tidak stabil dan tidak dapat mencapai nilai *set point* yang telah ditentukan. Tidak dilakukan pengujian lintasan pada skenario *fuzzy* ke-3, hal ini dikarenakan sistem yang menggunakan skenario tersebut memiliki performansi yang tidak stabil.

4) Skenario 4 (Trapesium-Segitiga MF ke-1)

Fungsi Keanggotaan	Range Error Yaw	Range Yaw Rate	Nilai Tunggal Command Rudder
<i>Negative Big</i> (NB)	[-30 -30 -20 -10]	[-10 -10 -8 -6]	[-30]
<i>Negative Medium</i> (NM)	[-20 -15 -10]	[-8 -6 -4]	[-20]
<i>Negative Small</i> (NS)	[-15 -7.5 0]	[-6 -4 0]	[-10]
<i>Zero</i> (Z)	[-10 0 10]	[-4 0 4]	[0]
<i>Positive Small</i> (PS)	[0 7.5 15]	[0 4 6]	[10]

<i>Positive Medium</i> (PM)	[10 15 20]	[4 6 8]	[20]
<i>Positive Big</i> (PB)	[10 20 30 30]	[6 8 10 10]	[30]

Berdasarkan perancangan *fuzzy* dengan skenario 2 menggunakan *input* sudut haluan sebesar 20° diperoleh hasil performansi sistem berupa nilai *rise time* sebesar 6.1276 detik, *settling time* sebesar 12.8169 detik dan maksimum *overshoot* sebesar 1.35%. Sedangkan jika digunakan *input* sudut haluan sebesar 30° diperoleh hasil performansi sistem berupa nilai *rise time* sebesar 6.0047 detik, *settling time* sebesar 12.8400 detik dan maksimum *overshoot* sebesar 2.08%. Pada saat dilakukan pengujian lintasan, respons yang dihasilkan menunjukkan bahwa skenario *fuzzy* ke-4 berhasil membaca lintasan lurus dan lintasan belok pada sistem, sehingga skenario tersebut digunakan sebagai perancangan pada penelitian yang dilakukan.

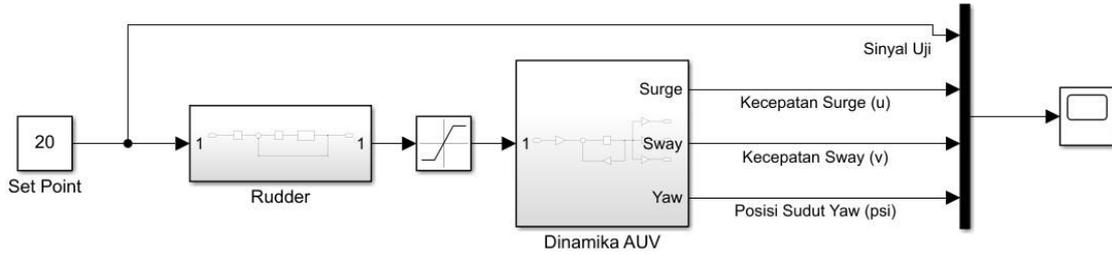
5) Skenario 5 (Trapezium-Segitiga MF ke-2)

Fungsi Keanggotaan	<i>Range Error Yaw</i>	<i>Range Yaw Rate</i>	Nilai Tunggal <i>Command Rudder</i>
<i>Negative Big</i> (NB)	[-30 -30 -25 -20]	[-10 -10 -8 -6]	[-30]
<i>Negative Medium</i> (NM)	[-25 -20 -10]	[-8 -6 -4]	[-20]
<i>Negative Small</i> (NS)	[-20 -10 0]	[-6 -4 0]	[-10]
<i>Zero</i> (Z)	[-5 0 5]	[-4 0 4]	[0]
<i>Positive Small</i> (PS)	[0 10 20]	[0 4 6]	[10]
<i>Positive Medium</i> (PM)	[10 20 25]	[4 6 8]	[20]
<i>Positive Big</i> (PB)	[20 25 30 30]	[6 8 10 10]	[30]

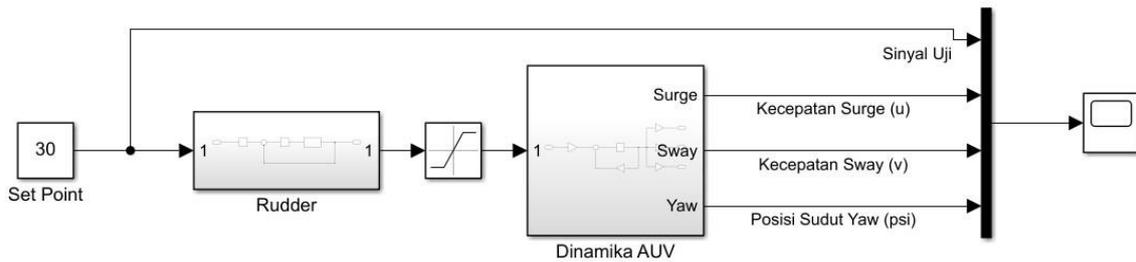
Berdasarkan perancangan *fuzzy* dengan skenario 2 menggunakan *input* sudut haluan sebesar 20° diperoleh hasil performansi sistem berupa nilai *rise time* sebesar 6.2046 detik, *settling time* sebesar 14.1787 detik dan maksimum *overshoot* sebesar 2.42%. Sedangkan jika digunakan *input* sudut haluan sebesar 30° diperoleh hasil performansi sistem berupa nilai *rise time* sebesar 5.6606 detik, *settling time* sebesar 13.5326 detik dan maksimum *overshoot* sebesar 1.61%. Pada saat dilakukan pengujian lintasan, respons yang dihasilkan menunjukkan bahwa skenario *fuzzy* ke-5 tidak bisa membaca lintasan lurus, sedangkan lintasan dapat terbaca pada sistem.

B. Perancangan Sistem Kontrol Logika *Fuzzy* pada AUV

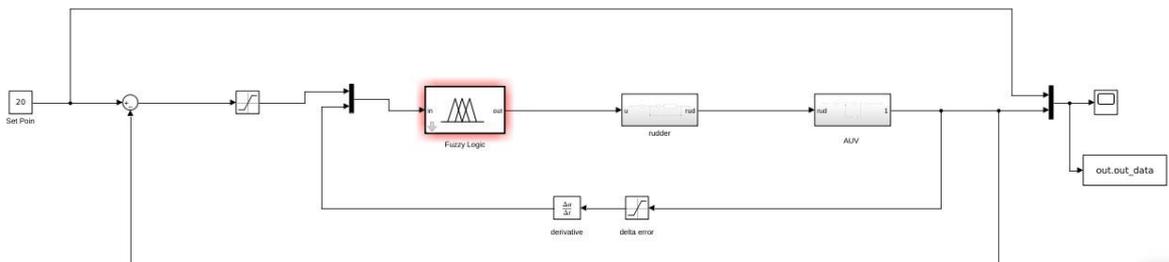
Berikut merupakan gambar rancangan sistem kendali gerak AUV yang dikerjakan dengan menggunakan Simulink pada Software Matlab R2022a.



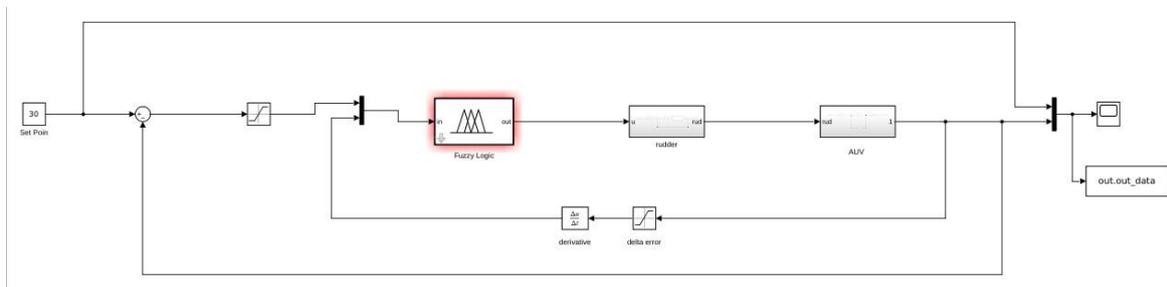
Gambar B. 1 Pengujian Sistem secara *Open Loop* dengan *Input* 20°



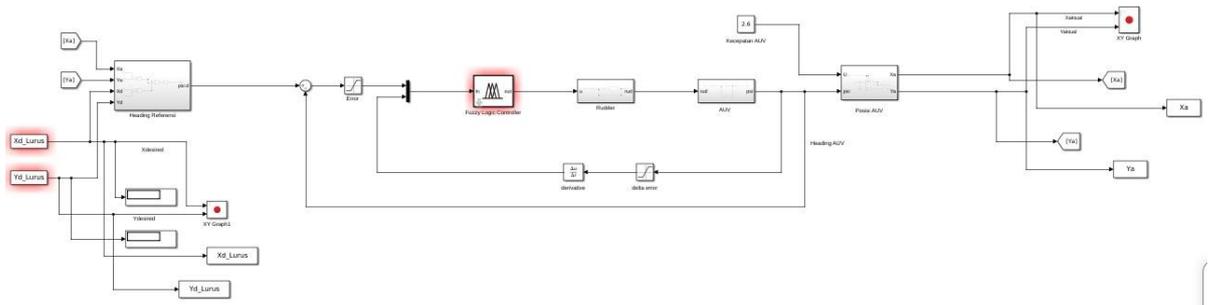
Gambar B. 2 Pengujian Sistem secara *Open Loop* dengan *Input* 30°



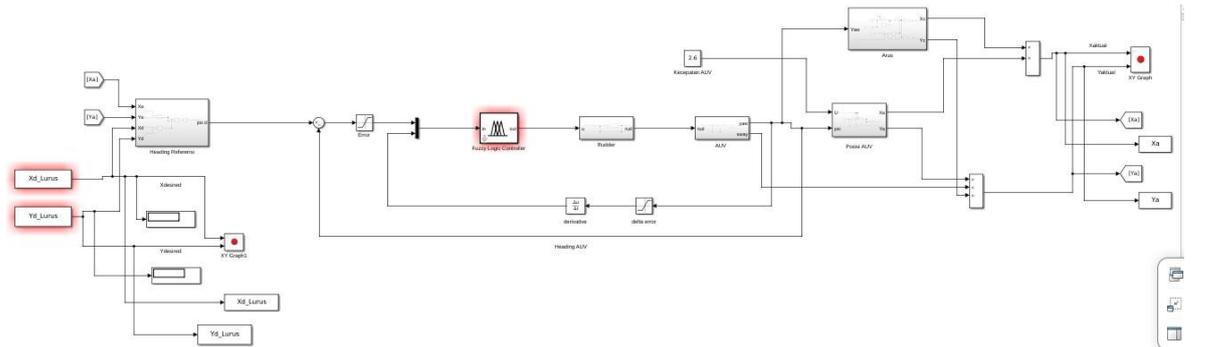
Gambar B. 3 Pengujian secara *Close Loop* dengan *Input* 20°



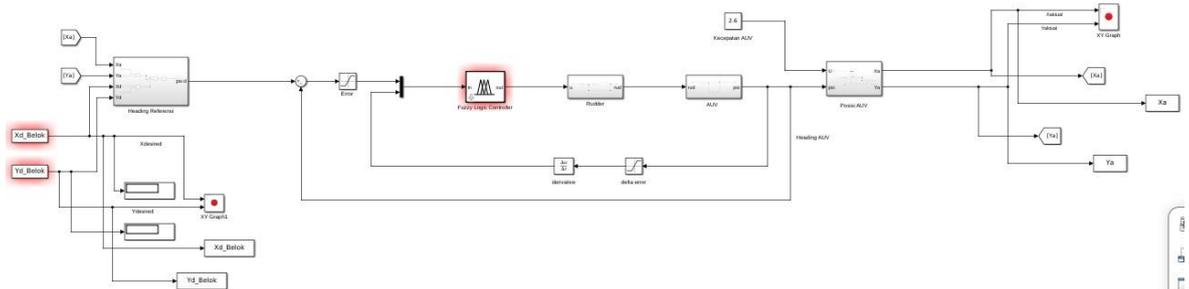
Gambar B. 4 Pengujian secara *Close Loop* dengan *Input* 30°



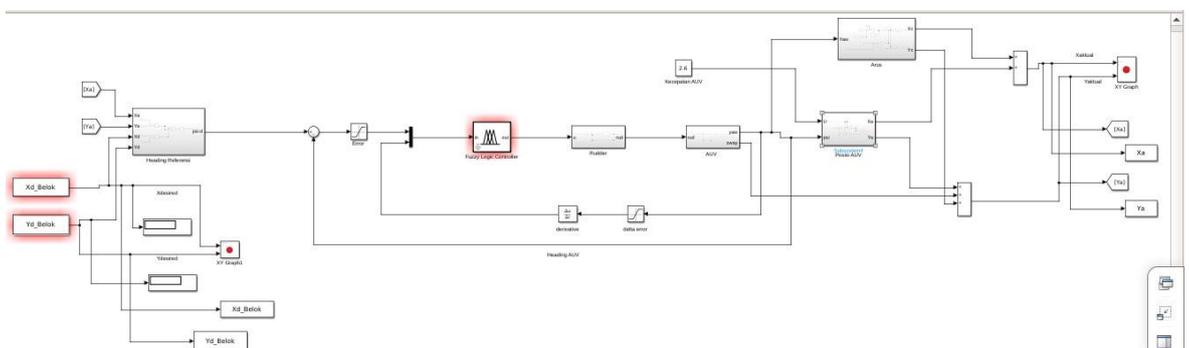
Gambar B. 5 Pengujian Lintasan Lurus Tanpa Gangguan



Gambar B. 6 Pengujian Lintasan Lurus dengan Gangguan



Gambar B. 7 Pengujian Lintasan Belok Tanpa Gangguan



Gambar B. 8 Pengujian Lintasan Belok dengan Gangguan

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis dengan nama lengkap Agnes Ivonne Margaretha merupakan anak pertama dari dua bersaudara yang lahir di Surabaya pada tanggal 14 Maret 2000. Penulis telah menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SDN Lakarsantri 1/472 Surabaya pada tahun 2012, pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMPN 28 Surabaya pada tahun 2015, dan pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMAN 22 Surabaya pada tahun 2018. Pada tahun 2018 pula, penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Departemen Teknik Fisika ITS melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan organisasi kemahasiswaan, seperti menjadi Staff di Departemen Kesejahteraan Mahasiswa HMTF ITS periode 2019/2020, Staff Kementerian Kebijakan Kampus BEM ITS periode 2020/2021, dan Sekretaris Kementerian Kebijakan Kampus BEM ITS periode 2021/2022. Selain itu, penulis juga aktif dalam kegiatan akademik yakni bergabung sebagai asisten Laboratorium Rekayasa Instrumentasi, Kontrol, dan Optimisasi Teknik Fisika ITS sejak tahun 2019. Penulis memiliki pengalaman program *internship* selama 1 bulan di PT. Pertamina EP Asset 4 Field Sukowati, Tuban, Jawa Timur pada tahun 2021. Bidang minat tugas akhir yang didalami penulis adalah rekayasa instrumentasi dan kontrol. Pada bulan Juni 2022 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan Judul **“Perancangan Sistem Kontrol Gerak pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) dengan Pengaruh Gangguan Arus Laut berbasis Logika Fuzzy”**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran, atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi penulis melalui email: agnesivonne14@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan