



TUGAS AKHIR - TF 141581

**DESAIN DAN ANALISA MOTION CONTROL PADA
AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV)
MENGUNAKAN KENDALI ADAPTIVE NEURAL FUZZY
INFERENCE SYSTEM (ANFIS)**

Muhammad Thoriq Azmi
NRP. 02311440000023

Dosen Pembimbing I :
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT.
NIP. 19660116 198903 2 001

Dosen Pembimbing II :
Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D.
NIP. 19751120 200212 1 002

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 141581

**DESIGN AND ANALISYS MOTION CONTROL ON
AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV) USING
ADAPTIVE NEURAL FUZZY INFERENCE SYSTEM CONTROL
(ANFIS)**

Muhammad Thoriq Azmi
NRP. 0231144000023

Supervisor I :
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT.
NIP. 19660116 198903 2 001

Supervisor II :
Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D.
NIP. 19751120 200212 1 002

*Engineering Physics Department
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2018*

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISM

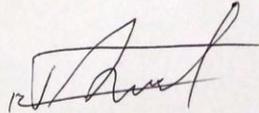
Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Thoriq Azmi
NRP : 0231144000023
Departemen/Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Desain dan Analisa *Motion Control* pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) Menggunakan Kendali *Adaptive Neural Fuzzy Inference System* (ANFIS)” 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 sebenar-benarnya.

Surabaya, 26 Juli 2018
Yang membuat pernyataan,



Muhammad Thoriq Azmi

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN I
TUGAS AKHIR

DESAIN DAN ANALISA *MOTION CONTROL* PADA
AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV)
MENGUNAKAN KENDALI *ADAPTIVE NEURAL FUZZY*
INFERENCE SYSTEM (ANFIS)

Oleh:

Muhammad Thoriq Azmi

NRP. 0231144000023

Surabaya, 26 Juli 2018

Menyetujui,
Dosen Pembimbing I

Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
NIP. 19660116 198903 2 001

Menyetujui,
Dosen Pembimbing II

Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D.
NIP. 19751120 200212 1 002

Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si, Ph.D.
NIP. 19780902 200312 1 002

vii

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN II
TUGAS AKHIR**

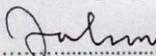
**DESAIN DAN ANALISA *MOTION CONTROL* PADA
AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV)
MENGUNAKAN KENDALI *ADAPTIVE NEURAL FUZZY
INFERENCE SYSTEM (ANFIS)***

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

Muhammad Thoriq Azmi
NRP. 0231144000023

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T  (Pembimbing I)
2. Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D.  (Pembimbing II)
3. Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA.  (Ketua Penguji)
4. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc  (Penguji I)
5. Ir. Zulkifli, M.Sc.  (Penguji II)

**SURABAYA
JULI, 2018**

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESAIN DAN ANALISA *MOTION CONTROL* PADA
AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV)
MENGUNAKAN KENDALI *ADAPTIVE NEURAL FUZZY*
INFERENCE SYSTEM (ANFIS)

Nama : **Muhammad Thoriq Azmi**
NRP : **0231144000023**
Departemen : **Teknik Fisika FTI-ITS**
Dosen Pembimbing I : **Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT.**
Dosen Pembimbing II : **Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D.**

ABSTRAK

Tugas akhir ini meneliti mengenai pengaruh *Adaptive Neural Fuzzy Inference System* (ANFIS) sebagai pengendali kontrol gerak pada kendaraan *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV). ANFIS adalah metode prediksi yang menggabungkan metode *Fuzzy* dan metode *Neural Network* (NN) yang dapat dipakai untuk pengendalian. Dengan menggunakan data input latih dari feedback pengendalian, fungsi keanggotaan dan rules *Fuzzy* ditentukan oleh system hasil dari pelatihan yang dilakukan oleh NN sehingga memiliki hasil lebih baik daripada *Fuzzy* saja atau NN saja. Pengendalian dilakukan terhadap 3 derajat kebebasan yaitu arah *Surge*, *Pitch* dan *Yaw* dimana dari masing-masing derajat kebebasan disimulasi dengan mengendalikan kecepatan arah surge, posisi pada sumbu Y, dan posisi pada sumbu Z. Parameter ANFIS terbaik untuk AUV adalah fungsi keanggotaan berjumlah 5 dengan tipe *G-Bell* pada masing-masing blok pengendalian. Kendali ANFIS mampu menunjukkan performansi respon lebih baik dan stabil daripada kendali PID dibuktikan dengan overshoot yang minimal, waktu menuju settling time yang lebih cepat serta nilai *Integral Absolute Error* (IAE) yang lebih kecil.

Kata kunci : *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV), PID, ANFIS

Halaman ini sengaja dikosongkan

*DESIGN AND ANALYSIS MOTION CONTROL ON
AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV) USING
ADAPTIVE NEURAL FUZZY INFERENCE SYSTEM CONTROL
(ANFIS)*

Name : Muhammad Thoriq Azmi
NRP : 0231144000023
Department : Engineering Physics FTI-ITS
Supervisor I : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT.
Supervisor II : Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D.

ABSTRACT

This final project examines the effect of Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS) as motion control controller on Autonomous Underwater Vehicle (AUV) vehicle. ANFIS is a prediction method that combines the Fuzzy method and the Neural Network (NN) method that can be used for control. Using the input data from feedback controls, membership functions and Fuzzy rules are determined by the system resulting from NN training so that it has better results than Fuzzy only or NN only. Control is performed on 3 degrees of freedom ie the direction of Surge, Pitch and Yaw where from each degree of freedom is simulated by controlling the speed of surge direction, position on the Y axis, and position on the Z axis. The best ANFIS parameter for AUV is the membership function of 5 with the type G-Bell on each control block. ANFIS controls are able to show better and stable response performance than PID control as evidenced by minimal overshoot, time to faster settling time and smaller Integral Absolute Error (IAE) values.

Keywords : Autonomous Underwater Vehicle (AUV), PID, ANFIS

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya Tugas Akhir beserta Laporan Tugas Akhir yang berjudul **ANALISA KESTABILAN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV) MENGGUNAKAN KENDALI ADAPTIVE NEURAL FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS)**.

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian Tugas Akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. dan Bapak Hendro Nurhadi, Dipl-Ing., Ph.D, selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Serta kepada Ibu penulis Siti Zulaichah dan Bapak penulis Saenap, serta saudara penulis Sufildzah Atiqah dan Diana Afifani atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan untuk penulis. Serta kepada Ayah penulis Achmad Subianto (Alm.) yang telah mendidik dan menjadi teladan yang luar biasa bagi penulis.
4. Teman-teman bimbingan Tugas Akhir Ibu Aulia (Gama, Alfian, Mbak Novia, Agil, Niken, Mbak Sarah dan Mbak Chairani) yang telah menjadi teman diskusi yang baik selama satu semester terakhir dan segala dukungan yang kalian berikan.
5. *Support system* yang luar biasa, Farikhanissa Casarus, yang telah rela mengorbankan waktu, tenaga, dan pikirannya untuk membantu dan menjadi salah satu alasan penulis semangat dalam mengerjakan tugas akhir ini.

6. Asisten Laboratorium Instrumentasi dan Kontrol (Lucky, Aisyah, Adista, Yelinda, Resta, Mbah Rizki, Abrori, Ariel, Dio, tambahan Safira) atas segala dukungan dan pembelajaran yang diberikan kepada penulis.
7. Lontong Balap (Iqbal, Kurnia, Ariel, Abrori, Dio, Iqbull, Arief Eng, Dhewangga) yang telah memberikan semangat melalui hinaan dan cacat-mencacatnya.
8. Keluarga besar jamaah F49 yang terdiri dari berbagai lapisan rakyat Indonesia, atas dukungan dan semangat “melbu bareng metu bareng” demi meramaikan #118.
9. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika FTI-ITS atas segala bantuan dan kerjasamanya.
10. Seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung penyelesaian penelitian ini dan tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidaklah sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Selain itu juga semoga dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan Tugas Akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISM ..Error! Bookmark not defined.	
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxiii
DAFTAR NOTASI.....	xxv
1BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan	4
1.4 Lingkup Kerja	4
1.5 Sistematika Laporan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Model Autonomous Underwater Vehicle (AUV).....	7
2.2 Aktuator AUV	16
2.3 Adaptive Neural <i>Fuzzy</i> Inference System.....	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Identifikasi Masalah	22
3.2 Studi Literatur	22
3.3 Pengumpulan Data Spesifikasi AUV.....	23
3.4 Pemodelan Dinamik AUV	25
3.5 Perancangan Pengendali PID.....	28
3.6 Perancangan Kendali ANFIS.....	29
BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN.....	53
4.1 Respon system dengan kendali ANFIS.....	53
4.3 Respon sistem dengan kendali PID	60
4.4 Hasil Simulasi Terhadap Sumbu Y dan Z.....	64
BAB V PENUTUP	69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN.....	75

BIODATA PENULIS 79

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi 6 DOF dan 2 titik koordinat acuan AUV (Khodayari & Balochian, 2015).....	8
Gambar 2.2 Gaya eksternal pada AUV (Khodayari & Balochian, 2015)	13
Gambar 2.3 Aktuator AUV untuk mengendalikan masing-masing DOF (Sutton & Craven, 1998).....	14
Gambar 2.9 Blok diagram ANFIS (Rosyadi, 2011).....	18
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Metode Penelitian.....	21
Gambar 3.2 <i>Flowchart</i> Lanjutan	22
Gambar 3.4 Diagram blok pengendalian AUV arah gerak surge, pitch dan yaw dengan kendali PID	29
Gambar 3.6 Blok diagram proses pelatihan dengan ANFIS	30
Gambar 3.7 Arsitektur ANFIS untuk sistem kendali AUV	32
Gambar.3.8 Struktur ANFIS dengan 5 fungsi keanggotaan.....	33
Gambar 3.9 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error kecepatan surge berjumlah 5 dan bertipe G-Bell	34
Gambar 3.10 Grafik <i>surface</i> ANFIS kecepatan surge berjumlah 5 dan bertipe G-Bell	35
Gambar 3.11 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah yaw berjumlah 5 dan bertipe G-Bell.....	35
Gambar 3.12 Grafik <i>surface</i> ANFIS arah yaw berjumlah 5 dan bertipe G-Bell	36
Gambar 3.13 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Pitch berjumlah 5 dan bertipe G-Bell	36

Gambar 3.14 Grafik <i>surface</i> ANFIS arah pitch berjumlah 5 dan bertipe G-Bell	37
Gambar 3.15 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Surge berjumlah 5 dan bertipe Triangle.....	37
Gambar 3.16 Grafik <i>surface</i> ANFIS arah surge berjumlah 5 dan bertipe Triangle	38
Gambar 3.17 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Yaw berjumlah 5 dan bertipe Triangle.....	38
Gambar 3.18 Grafik <i>surface</i> ANFIS arah yaw berjumlah 5 dan bertipe Triangle	39
Gambar 3.19 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Pitch berjumlah 5 dan bertipe Triangle	39
Gambar 3.20 Grafik <i>surface</i> ANFIS arah pitch berjumlah 5 dan bertipe Triangle	40
Gambar 3.22 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Surge berjumlah 5 dan bertipe Gaussian.....	40
Gambar 3.23 Grafik <i>surface</i> ANFIS arah surge berjumlah 5 dan bertipe Gaussian	41
Gambar 3.24 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Yaw berjumlah 5 dan bertipe Gaussian	41
Gambar 3.25 Grafik <i>surface</i> ANFIS arah yaw berjumlah 5 dan bertipe Gaussian	42
Gambar 3.26 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Pitch berjumlah 5 dan bertipe Gaussian.....	42
Gambar 3.27 Grafik <i>surface</i> ANFIS arah pitch berjumlah 5 dan bertipe Gaussian	43
Gambar 3.29 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Surge berjumlah 3 dan bertipe Generalized-Bell	44
Gambar 3.30 Grafik <i>surface</i> ANFIS arah surge berjumlah 3 dan bertipe G-Bell	44

Gambar 3.31 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Yaw berjumlah 3 dan bertipe Generalized-Bell	45
Gambar 3.32 Grafik <i>surface</i> ANFIS arah yaw berjumlah 3 dan bertipe G-Bell	45
Gambar 3.33 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Pitch berjumlah 3 dan bertipe Generalized-Bell	46
Gambar 3.34 Grafik <i>surface</i> ANFIS arah pitch berjumlah 3 dan bertipe G-Bell	46
Gambar 3.35 struktur layer dengan 8 fungsi keanggotaan	47
Gambar 3.36 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Surge berjumlah 8 dan bertipe Generalized-Bell	48
Gambar 3.37 Grafik <i>surface</i> ANFIS arah surge berjumlah 8 dan bertipe G-Bell	48
Gambar 3.38 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Yaw berjumlah 8 dan bertipe Generalized-Bell	49
Gambar 3.39 Grafik <i>surface</i> ANFIS arah yaw berjumlah 8 dan bertipe G-Bell	49
Gambar 3.40 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Pitch berjumlah 8 dan bertipe Generalized-Bell	50
Gambar 3.41 Grafik <i>surface</i> ANFIS arah pitch berjumlah 8 dan bertipe G-Bell	50
Gambar 4.1 Grafik respon AUV dkendali ANFIS arah Surge dengan 3 tipe fungsi keanggotaan	54
Gambar 4.2 Grafik respon perpindahan AUV kendali ANFIS pada sumbu Y dengan 3 tipe fungsi keanggotaan	55
Gambar 4.3 Grafik respon perpindahan AUV kendali ANFIS pada sumbu Z dengan 3 tipe fungsi keanggotaan	56
Gambar 4.4 Grafik respon Kecepatan AUV pada arah surge kendali ANFIS dengan tipe G-Bell	57

Gambar 4.5 Grafik respon Perpindahan AUV pada sumbu Y kendali ANFIS dengan tipe G-Bell dan 3 jumlah fungsi keanggotaan.....	59
Gambar 4.6 Grafik respon Perpindahan AUV pada sumbu Z kendali ANFIS dengan tipe G-Bell.....	60
Gambar 4.7 Grafik respon kecepatan AUV arah surge dengan kendali PID dan ANFIS.....	62
Gambar 4.8 Grafik respon Perpindahan AUV pada sumbu Y dengan kendali PID dan ANFIS	63
Gambar 4.9 Grafik respon Perpindahan AUV pada sumbu Z dengan kendali PID dan ANFIS	63
Gambar 4.10 Kurva respon AUV perpindahan terhadap sumbu Y	65
Gambar 4.11 Kurva respon sudut elevasi yang dibentuk AUV selama simulasi terhadap sumbu Y	66
Gambar 4.12 Kurva respon AUV perpindahan terhadap sumbu Z	67
Gambar 4.13 Kurva respon sudut elevasi yang dibentuk AUV selama simulasi terhadap sumbu Z	67
Gambar 4.14 Kurva kecepatan arah surge AUV selama simulasi	68

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Simbol Derajat Kebebasan [13].....	7
Tabel 3.1 Data spesifikasi AUV Remus (Milgram et al., 2001) ..	23
Tabel 3.2 Data koefisien hidrodistatis dan hidrodinamis AUV Remus beserta hasil perhitungan Prime System 1 (Milgram et al., 2001).....	24
Tabel 3.3 Karakteristik Propeller (Allen, Vorus, & Prestero, 2000)	25
Tabel 3.4 Perubahan tipe dan jumlah fungsi keanggotaan pada ANFIS	31
Tabel 4.1 karakteristik respon kecepatan surge kendali ANFIS 3 tipe fungsi keanggotaan	54
Tabel 4.2 karakteristik respon perpindahan sumbu Y kendali ANFIS 3 tipe fungsi keanggotaan.....	55
Tabel 4.3 karakteristik respon perpindahan sumbu Z kendali ANFIS 3 tipe fungsi keanggotaan.....	56
Tabel 4.4 karakteristik respon kecepatan surge kendali ANFIS 3 jumlah fungsi keanggotaan	58
Tabel 4.5 karakteristik respon perpindahan pada sumbu Y kendali ANFIS 3 jumlah fungsi keanggotaan.....	58
Tabel 4.6 karakteristik respon perpindahan pada sumbu Z kendali ANFIS 3 jumlah fungsi keanggotaan.....	60
Tabel 4.7 Nilai parameter PID tuning Ziegler Nichols tipe 2	61
Tabel 4.8 karakteristik respon kecepatan surge kendali PID dan ANFIS	61
Tabel 4.9 karakteristik respon perpindahan AUV pada sumbu Y kendali PID dan ANFIS.....	62

Tabel 4.10 karakteristik respon perpindahan AUV pada sumbu Z kendali PID dan ANFIS.....	64
--	----

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR NOTASI

X	: gaya dan momen pada gerak sumbu-x
Y	: gaya dan momen pada gerak sumbu-y
Z	: gaya dan momen pada gerak sumbu-z
K	: gaya dan momen pada rotasi sumbu-x
M	: gaya dan momen pada rotasi sumbu-y
N	: gaya dan momen pada rotasi sumbu-z
u	: kecepatan linier pada sumbu-x
v	: kecepatan linier pada sumbu-y
w	: kecepatan linier pada sumbu-z
p	: kecepatan angular pada sumbu-x
q	: kecepatan angular pada sumbu-y
r	: kecepatan angular pada sumbu-z
x	: posisi pada sumbu-x
y	: posisi pada sumbu-y
z	: posisi pada sumbu-z
ϕ	: sudut euler pada sumbu-x
θ	: sudut euler pada sumbu-y
ψ	: sudut euler pada sumbu-z
M	: matriks inersia (termasuk massa tambahan)
$C(v)$: matriks Coriolis (termasuk massa tambahan)
$D(v)$: matriks redaman
$g(\eta)$: vektor gaya dan momen gravitasi
τ	: vektor input kendali
m	: massa
W	: berat
B	: Daya Apung (<i>buoyancy</i>)
x_G	: <i>center of gravity</i> sumbu-x
y_G	: <i>center of gravity</i> sumbu-y
z_G	: <i>center of gravity</i> sumbu-z
$X_{u u }$: Gaya hambat gerak sumbu x arah <i>surge</i>
$Y_{v v }$: Gaya hambat gerak sumbu y arah <i>sway</i>

$Y_{r r}$: Gaya hambat gerak sumbu y arah <i>yaw</i>
$Z_{w w}$: Gaya hambat gerak sumbu z arah <i>heave</i>
$Z_{q q}$: Gaya hambat gerak sumbu z arah <i>pitch</i>
$K_{p p}$: Gaya hambat rotasi sumbu x arah <i>roll</i>
$M_{w w}$: Gaya hambat rotasi sumbu y arah <i>heave</i>
$M_{q q}$: Gaya hambat rotasi sumbu y arah <i>pitch</i>
$N_{v v}$: Gaya hambat gerak sumbu z arah <i>sway</i>
$N_{r r}$: Gaya hambat gerak sumbu z arah <i>yaw</i>
$X_{\dot{u}}$: Koefisien massa tambahan gerak sumbu x arah <i>surge</i>
$Y_{\dot{v}}$: Koefisien massa tambahan gerak sumbu y arah <i>sway</i>
$Y_{\dot{r}}$: Koefisien massa tambahan gerak sumbu y arah <i>yaw</i>
$Z_{\dot{w}}$: Koefisien massa tambahan gerak sumbu z arah <i>heave</i>
$Z_{\dot{q}}$: Koefisien massa tambahan gerak sumbu z arah <i>pitch</i>
$K_{\dot{p}}$: Koefisien massa tambahan rotasi sumbu x arah <i>roll</i>
$M_{\dot{w}}$: Koefisien massa tambahan rotasi sumbu y arah <i>heave</i>
$M_{\dot{q}}$: Koefisien massa tambahan rotasi sumbu y arah <i>pitch</i>
$N_{\dot{v}}$: Koefisien massa tambahan rotasi sumbu z arah <i>sway</i>
$N_{\dot{r}}$: Koefisien massa tambahan rotasi sumbu z arah <i>yaw</i>
X_{prop}	: Gaya dorong propeler
δ_r	: Sudut defleksi <i>rudder</i>
δ_s	: Sudut defleksi <i>stern</i>
$Y_{uu\delta_r}$: Gaya dan momen angkat fin
$Z_{uu\delta_s}$: Gaya dan momen angkat fin
$M_{uu\delta_s}$: Gaya dan momen angkat fin
$N_{uu\delta_r}$: Gaya dan momen angkat fin
ω_p	: Kecepatan sudut propeler
K_T	: Koefisien <i>thrust</i>
J	: <i>Advance Number</i>
D	: Diameter propeler

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Lautan yang ada di bumi memiliki luasan sekitar 361 juta km² dan menutupi permukaan bumi dengan air sekitar 71% dan sekitar 37% populasi dunia tinggal di dalamnya (Piñeiro, Arribas, & R. Donoso Morillo-V., 2004). Laut juga menyimpan banyak energi yang dapat dimanfaatkan untuk keberlangsungan kehidupan manusia seperti minyak yang tersimpan di dasar laut, hal ini diperlukan adanya eksplorasi laut yang lebih mendalam mengingat kemajuan peradaban dunia baik di bidang teknologi maupun ekonomi menyebabkan kebutuhan akan sumber energi minyak menjadi meningkat drastis. Namun manusia memiliki keterbatasan dalam mengeksplorasi laut dan minyak sehingga membutuhkan bantuan teknologi mesin untuk mempermudah. Maka diciptakan teknologi modern yang berkonsep kendaraan bawah laut tanpa awak dimana kendaraan ini dapat melakukan tugas yang tidak dapat dijangkau oleh manusia.

Perkembangan kapal bawah laut tanpa awak dimulai pada abad ke-16 dan *Unmanned Underwater Vehicle* pertama dirancang pada tahun 1958 oleh Angkatan Laut Amerika Serikat, pertama kalinya *Remote Operation Vehicle* (ROV) dibuat. Penggunaan ROV secara komersial pertama kali dimulai dengan adanya penemuan ladang minyak lepas pantai di laut utara Amerika Serikat (Vervoort, 2009). Pengembangan ROV tidak hanya terbatas pada aplikasi eksplorasi bawah laut, juga digunakan untuk keperluan militer, inspeksi struktur bawah laut, dan juga sebagian besar digunakan di industri pertambangan dan minyak. Banyak negara memiliki program penelitian dan pengembangan UUV (Gonzalez, 2004). ROV pada saat itu memiliki harga yang cukup mahal dan pengoperasiannya yang masih sangat terbatas ditambah sistem keamanan alat yang masih belum terpercaya sehingga kemunculan ROV masih sedikit peminat. Serta masih diragukan mengenai tingkat keakuratan dan tingkat efisiensi kerja UUV dalam menyelesaikan misi bawah laut yang

kompleks mengingat UUV merupakan system yang nonlinier. Kelemahan-kelemahan tersebut membuat para ilmuwan semakin melakukan pengembangan terhadap kendaraan bawah laut tanpa awak yang lebih fleksibel dalam beroperasi dan dapat menyelesaikan tugas *Navigation, Guidance* dan *Control* (NGC) yang biasa disebut *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV).

Unmanned Underwater Vehicle (UUV) memiliki 2 jenis yaitu *Remotely Operated Vehicle* (ROV) dan *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV). Perbedaan dari keduanya adalah ROV terhubung dengan platform yang bertugas memberi perintah yang disambungkan dengan kabel atau sinyal nirkabel. Kabel yang ditambatkan memastikan sinyal pasokan energi dan informasi, dengan cara ini operator dapat terus memantau dan mengendalikan kapal secara akurat dan terus menerus untuk menyelesaikan tugasnya seperti memperbaiki sumur minyak di laut (Vervoort, 2009). Kekurangan dari ROV adalah karena penggunaan kabel maka jangkauan ROV menjadi pendek atau terbatas (Steenon et al., 2014). Kendaraan bawah laut yang bergerak secara otomatis tanpa awak disebut AUV yang di dalamnya sudah tersematkan baterai sebagai pasokan energi untuk meminimalkan penggunaan operator. AUV didesain sedemikian rupa agar dapat tetap bergerak sesuai jalur dan dapat mengatasi gangguan lingkungan bawah laut (Vervoort, 2009).

Saat ini sudah sangat banyak penelitian AUV terutama di bagian rancangan kontroler untuk menciptakan AUV yang memiliki kestabilan tinggi serta *robust* terhadap gangguan arus laut sehingga AUV tetap pada *path* yang sudah diperintahkan. Salah satunya yaitu penelitian mengenai AUV yang menggunakan *Adaptive Neural Fuzzy Inference System* (ANFIS) sebagai pengendali terhadap kestabilan *height control* AUV. Didapatkan respon lebih cepat dan lebih stabil sebesar kurang lebih 30% dibanding dengan kontrol PID (Shi, Chen, Yan, Li, & Auv, 2010). Penelitian lain mengatakan AUV yang di-tunning secara *autopilot* menggunakan *neural-network* berbasis *Fuzzy* memiliki respon lebih cepat sekitar 30%-40% dibanding dengan *tunning autopilot* menggunakan *Fuzzy* (Craven & Sutton, 1998). Penelitian AUV lain yang menggunakan fin, memperoleh kesimpulan bahwa

metode control konvensional tidak bisa memenuhi syarat untuk *motion control* pada AUV dikarenakan pada *motion control* membutuhkan respon yang cepat dan *robust* untuk mengatasi kendala dalam bermanuver (Liang, Pang, Wan, & Wang, 2008).

ANFIS mulai diperkenalkan tahun 1993 oleh Jang (Industri, 2015), dimana menggabungkan kelebihan dari masing-masing sistem *Fuzzy Logic* dengan *Artificial Neural Network* (ANN). Dalam perkembangannya, ANFIS digunakan untuk menyelesaikan bermacam-macam masalah. Sebuah penelitian mengungkapkan ANFIS sebagai metode pengendali level dan temperatur pada *Steam Drum Boiler* didapatkan kesimpulan bahwa ANFIS memiliki *settling time* lebih cepat daripada pengendali PI (Alifia, Triwiyatno, & Wahyudi, 2012). Pada penelitian lain digunakan sebagai pengendali level air dikatakan bahwa ANFIS dengan diberi gangguan pada sistem memiliki respon lebih baik daripada pengendali PID (Wahyunggoro, n.d.). ANFIS juga diterapkan sebagai pengendali *platform* dengan variabel yang dikendalikan adalah *pitch* dan *roll* memiliki nilai *Mean Square Error* (MSE) lebih kecil sekitar 90% daripada pengendali *Fuzzy* PID (Liu et al., 2017). Pada penelitian mengenai pengendali pada getaran kendaraan yang dilakukan dengan membandingkan metode pengendali PID, PSO-PID, dan ANFIS, bahwa ANFIS menghasilkan nilai *settling time* lebih kecil daripada pengendali yang lain (Junyao, Wenping, & Guohai, 2017).

Penelitian Tugas Akhir ini akan dilakukan penelitian terhadap AUV mengenai *motion control* pada arah gerak longitudinal AUV yaitu *surge*, *pitch*, dan *yaw* dimana pemodelan dan analisa yang dilakukan adalah tiap masing-masing axis yaitu *surge*, *pitch*, dan *yaw*. Digunakan metode kendali *Adaptive Neural Fuzzy Inference System* yang akan dibandingkan dengan metode kendali PID untuk menentukan kendali yang memiliki respon lebih cepat dan akurat.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan penelitian yang diangkat dalam pengerjaan tugas akhir ini antara lain.

- a. Berapa nilai parameter pada ANFIS untuk menghasilkan kestabilan *motion control* yang maksimal pada AUV?
- b. Apakah kestabilan sistem menggunakan kendali ANFIS memiliki performansi yang lebih baik dibanding dengan kendali PID?

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian yang ingin dicapai dalam pengerjaan tugas akhir ini antara lain.

- a. Mengetahui nilai parameter pada ANFIS untuk menghasilkan kestabilan *motion control* yang maksimal pada AUV
- b. Mengetahui perbandingan hasil kendali antara kendali *Adaptive Neural Fuzzy Inference System* dengan pengendali PID untuk *motion control* pada AUV.

1.4 Lingkup Kerja

Ruang lingkup yang dikaji dalam tugas akhir ini meliputi:

- a. Objek pengujian yang dilakukan menggunakan AUV berjenis Remus (Milgram, Alt, & Pretero, 2001).
- b. Arah gerak yang dikendalikan adalah 3 DOF yaitu *surge*, *pitch*, dan *yaw*.
- c. Perancangan pengendali menggunakan metode *Adaptive Neural Fuzzy Inference System*.
- d. Pengendali PID sebagai pembandingan dengan hasil simulasi kendali *Adaptive Neural Fuzzy Inference System*.
- e. Perancangan pengendali dan simulasi dilakukan dengan bantuan software MATLAB dan SIMULINK 2015b.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Bab I ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, lingkup kerja dan sistematika laporan.

BAB II Teori Penunjang

Bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti AUV, koefisien hidrostatik dan dinamis, analisa kestabilan root locus, keterkontrolan dan keteramatan, pengendali PID, dan arsitektur ANFIS.

BAB III Metodologi Penelitian

Bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode, dan langkah-langkah dalam penelitian.

BAB IV Analisis Data dan Pembahasan

Bab IV ini berisi tentang data hasil penelitian dari perancangan pengendali PID dan predictor ANFIS sebagai pengendali pada AUV Militus.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Bab V ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan data-data yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

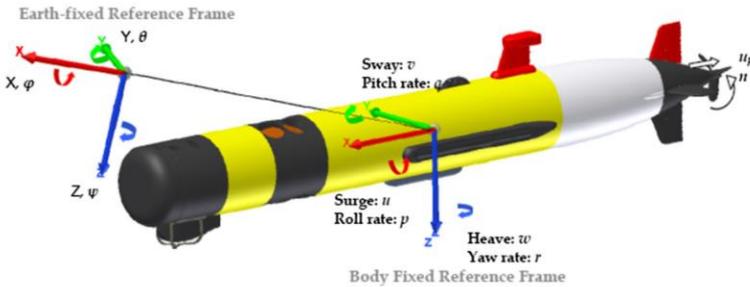
2.1 Model Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

AUV merupakan sebuah kendaraan laut yang memiliki 6 derajat kebebasan yaitu *surge*, *sway*, *heave*, *yaw*, *pitch* dan *roll*. Masing-masing degrees of freedom (DOF) tersebut memiliki besaran posisi, kecepatan, gaya dan momen yang ditunjukkan oleh simbol-simbol dalam Tabel 9.1.

Tabel 2.1 Simbol Derajat Kebebasan [13]

DOF	Gerak	Gaya dan Momen	Kecepatan linier dan sudut	Posisi dan sudut Euler
1	<i>Surge</i>	X	u	x
2	<i>Sway</i>	Y	v	y
3	<i>Heave</i>	Z	w	z
4	<i>Roll</i>	K	p	ϕ
5	<i>Pitch</i>	M	q	θ
6	<i>Yaw</i>	N	r	ψ

AUV memiliki 2 macam acuan sebagai titik koordinat yaitu kerangka bumi (*world-fixed frame*) dan kerangka badan (*body-fixed frame*) yang diberi notasi masing-masing adalah W dan B. Titik awal *B-frame* dan *W-frame* didefinisikan sebagai O_B dan O_W . Acuan titik koordinat tersebut dipakai untuk menentukan persamaan serta menentukan arah gerak AUV yang diilustrasikan pada gambar 9.2



Gambar 2.1 Ilustrasi 6 DOF dan 2 titik koordinat acuan AUV (Khodayari & Balochian, 2015)

Berikut adalah persamaan yang merepresentasikan arah dan orientasi AUV.

Posisi dan sudut Euler

$$\begin{aligned}\eta &= [\eta_W \ \eta_B]^T \\ \eta_W &= [x \ y \ z]^T \\ \eta_B &= [\phi \ \theta \ \psi]^T\end{aligned}\quad (2.1)$$

η_W merupakan vector posisi AUV pada koordinat *earth-fixed*, sedangkan η_B adalah vector posisi dilihat dari koordinat *body-fixed*.

Kecepatan Linier dan angular

$$\begin{aligned}v &= [v_W \ v_B]^T \\ v_W &= [u \ v \ w]^T \\ v_B &= [p \ q \ r]^T\end{aligned}\quad (2.2)$$

v_W merupakan vector kecepatan linier AUV pada koordinat *earth-fixed*, sedangkan v_B adalah vector kecepatan angular dilihat dari koordinat *body-fixed*.

2.1.1 Kinematika AUV

AUV bergerak berdasarkan 2 titik acuan sehingga penting untuk menemukan hubungan antara 2 koordinat acuan tersebut. Sehingga vektor kecepatan AUV yang terdiri dari kecepatan angular dan linier mengacu pada titik koordinat *body-fixed*

sedangkan posisi dan orientasi mengacu pada titik koordinat *earth-fixed*. Berikut adalah transformasi kecepatan berdasarkan titik koordinat acuannya.

a) Transformasi Kecepatan Linier

Gerak kendaraan yang berpacu pada titik koordinat *earth-fixed* menghasilkan transformasi kecepatan sebagai berikut :

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

$J_1(\eta_B)$ adalah matriks transformasi dari sudut euler yaitu *Roll* ϕ , *Pitch* θ , dan *Yaw* ψ .

Apa bila koordinat rotasi berputar terhadap sumbu x, y dan z yang mengacu pada titik koordinat *earth-fixed* maka transformasi rotasinya menjadi :

$$J_1(\eta_B) = \begin{bmatrix} C\theta C\psi & -C\phi S\psi + S\phi S\theta S\psi & S\phi S\psi + C\phi S\theta C\psi \\ C\theta S\psi & C\phi C\psi + S\phi S\theta S\psi & -S\phi C\psi + C\phi S\theta S\psi \\ -S\theta & S\phi C\theta & C\phi C\theta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

b) Transformasi Kecepatan Sudut

Vector kecepatan sudut yang merupakan $v_B = [p \ q \ r]^T$ yakni berpacu pada koordinat *body-fixed* dan vector laju sudut Euler $\dot{\eta}_B = [\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ memiliki transformasi kecepatan sudut menjadi :

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2(\eta_B) \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Dimana orientasi koordinat *body-fixed* yang berpacu pada koordinat *earth-fixed* ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$J_2(\eta_B) = \begin{bmatrix} 1 & S\varphi T\theta & C\varphi T\theta \\ 0 & C\varphi & -S\varphi \\ 0 & S\varphi/C\theta & C\varphi/C\theta \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Sehingga matriks transformasi sudut Euler menjadi :

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta_B) & 0 \\ 0 & J_2(\eta_B) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

2.1.2 Persamaan Dinamika AUV

Berdasarkan hukum Newton 2, diperoleh persamaan gerak AUV yang diasumsikan sebagai benda tegar, jumlah gaya yang bekerja sama dengan massa dikali dengan percepatan benda yang kemudian didapatkan persamaan dinamik AUV yang telah ditulis oleh Fossen(Fossen, 2011) sebagai persamaan kapal *submarine* dengan arah gerak 6 *Degree of Freedom* sebagai berikut :

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(\dot{q} + pr)] &= \Sigma X \\ m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(\dot{r} + qp)] &= \Sigma Y \\ m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(\dot{p} + rq)] &= \Sigma Z \\ I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})rq - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + \\ m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= \Sigma K \\ I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + pq)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} + \\ m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= \Sigma M \\ I_z\dot{r} + (I_y - I_z)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{xz} + \\ m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= \Sigma N \end{aligned} \quad (2.9)$$

Tiga persamaan 2.9 di atas ΣX , ΣY , dan ΣZ adalah persamaan dinamik dalam arah translasi sedangkan tiga persamaan bawahnya ΣK , ΣM , dan ΣN adalah persamaan dinamik dalam arah rotasi.

2.1.3 Gaya Hidrostatik

AUV mengalami gaya dan momen hidrostatik adalah akibat adanya pengaruh antara berat dan daya apung dari badan AUV. Maka berat AUV dapat dicari dengan rumus $W = mg$ dimana m adalah massa AUV. Sedangkan daya apung AUV dapat dicari dengan rumus $B = \rho \nabla g$ dimana ρ adalah massa jenis fluida medium AUV dan ∇ total volume yang berpindah melewati AUV.

Persamaan gaya dan momen hidrostatik menyeimbangkan pada arah *pitch* dan *roll* dan dapat ditunjukkan pada persamaan (2.19) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 X_{HS} &= -(W - B)\sin\theta \\
 Y_{HS} &= (W - B)\cos\theta \sin\phi \\
 Z_{HS} &= (W - B)\cos\theta \cos\phi \\
 K_{HS} &= -(y_G W - y_B B)\cos\theta \cos\phi - (z_G W - z_B B)\cos\theta \sin\phi \\
 M_{HS} &= -(z_G W - z_B B)\sin\theta - (x_G W - x_B B)\cos\theta \cos\phi \\
 N_{HS} &= -(x_G W - x_B B)\cos\theta \sin\phi - (y_G W - y_B B)\sin\theta
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

2.1.4 Gaya Hidrodinamika

Gaya hidrodinamik berhubungan dengan kecepatan dan percepatan objek. Bahkan, untuk memodelkan gaya hidrodinamik adalah dengan cara menentukan koefisien-koefisien yang berhubungan dengan gaya-gaya hidrodinamika. Setelah mendapatkan nilai koefisien ini, kita dapat menghitung gaya hidrodinamik sesuai dengan rumus empiris jika kita telah mengetahui kecepatan dan percepatan AUV . Selama pergerakan, gaya hidrodinamik pada AUV dapat diartikan menjadi 3 bagian: gaya karena massa tambahan (*added mass force*), gaya hambat (*drag force*) dan gaya angkat (*lift force*).

a) Gaya Hambat (*Drag Force*)

Dalam dinamika fluida, *drag* atau hambatan adalah gaya yang menolak pergerakan benda padat melalui medium cair. *Drag* terdiri dari gaya gesekan dan gaya tekan. Untuk lebih detail, jenis drag umumnya dibagi menjadi empat kategori: redaman potensial akibat radiasi karena gaya osilasi *body*, gesekan permukaan *body*, gaya

hambat akibat gelombang dan gaya tarik akibat *vortex shedding* (Yang, 2007).

Gaya yang akan dihitung merupakan gaya *drag* yang sejajar dengan sumbu x yang merupakan hambatan aksial, dan gaya *drag* yang tegak lurus dengan sumbu x yang merupakan hambatan *crossflow*. *Axial drag* ditunjukkan melalui persamaan berikut :

$$X_{u|u} = \frac{1}{2} \rho C_D A_f \quad (2.11)$$

ρ adalah massa jenis cairan, C_d adalah parameter gaya *axial drag*, A_f adalah luas penampang yang menimbulkan gaya *drag*.

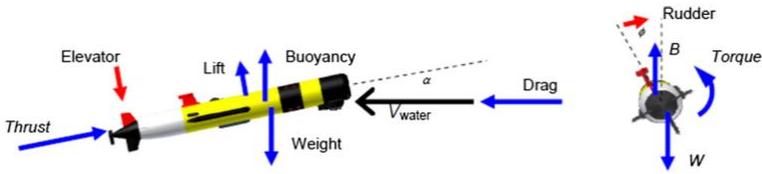
$$C_d = \frac{C_{ss} \pi A_p}{A_f} \left[1 + 60 \left(\frac{d}{l} \right)^3 + 0.0025 \left(\frac{d}{l} \right) \right] \quad (2.12)$$

Dimana A_p adalah luasan penampang atas AUV, d adalah diameter maksimum, l adalah panjang total AUV dan C_{ss} adalah angka Schoneherr untuk gesekan pada plat tipis dapat dilihat pada (Edward V Lewis, 1988).

Untuk persamaan *crossflow drag force* adalah sebagai berikut :

$$M_{q|q} = N_{r|r} = -\frac{1}{2} \rho C_{dc} \int_{x_t}^{x_{b2}} 2x^3 R(x) dx - 2x_{fin}^3 \left(\frac{1}{2} \rho C_{df} S_{fin} \right) \quad (2.13)$$

Dimana ρ adalah massa jenis cairan, C_{dc} koefisien drag untuk objek silinder yang telah diestimasi oleh Hoerner (Milgram et al., 2001), $R(x)$ adalah radius lambung kapal sebagai fungsi posisi axial, S_{fin} adalah luas plat fin yang dikontrol, dan C_{df} adalah koefisien *crossflow drag* pada fin yang telah diturunkan oleh Whicker (Whicker, 1958).



Gambar 2.2 Gaya eksternal pada AUV (Khodayari & Balochian, 2015)

b) Gaya Angkat (Lift Force)

Ketika AUV berpindah melalui cairan dan membentuk sudut terhadap cairan tersebut, maka cairan akan terpisah. Tekanan di atas permukaan AUV menurun dan tekanan di bawah permukaan AUV meningkat. Daya angkat yang dibangkitkan tegak lurus terhadap aliran air yang mengenai bagian luar AUV. Jika titik angkat efektif yang digunakan tidak tepat pada koordinat *body-fixed*, maka akan terjadi momen. Besarnya gaya dan momen *body lift* dan *fin lift* dicari menggunakan Persamaan berikut

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

$$M_{uwl} = -N_{uwl} = -\frac{1}{2}\rho C_{y\alpha\beta} x_{cp} \quad (2.14)$$

Persamaan di atas adalah momen dan *body lift* dimana $C_{y\alpha\beta} = 0.003$ yang telah diturunkan oleh Hoerner (Yang, 2007). Sedangkan persamaan momen dan fin lift adalah sebagai berikut.

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

$$M_{uu\delta_s} = N_{uu\delta_r} = \rho C_{L\alpha} S_{fin} x_{fin} \quad (2.15)$$

c) Gaya Massa Tambahan (Added Mass Force)

Dalam mekanika fluida, objek yang dipercepat atau diperlambat gerakannya maka akan menimbulkan perpindahan sejumlah volume cairan di sekitarnya ketika bergerak melewati, karena objek dan cairan tidak dapat menempati ruang fisik yang sama secara bersamaan. Bahkan, kendaraan yang bergerak dengan medium cairan akan memaksa seluruh cairan bergerak bersama.

Fenomena ini sama dengan menambahkan inersia ke sistem objek dan penambahan inersia tersebut disebut dengan istilah massa tambahan (*Added Mass*). Untuk menyederhanakan dapat dimodelkan sebagai volume cairan yang bergerak bersama objek, meskipun dalam kenyataannya "semua" cairan akan dipercepat.

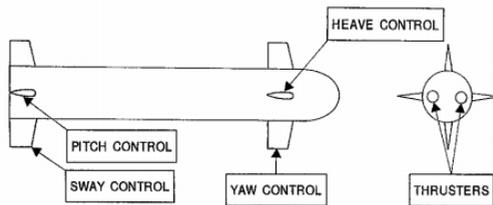
Di sisi lain, ada distribusi tekanan di permukaan luar AUV ketika bergerak melalui cairan. Menurut persamaan Bernoulli, tekanan ΔP pada permukaan luar ΔS ditentukan oleh kecepatan partikel fluida di sekitar area ini dan kedalaman fluida. Gaya eksternal dan momen karena tekanan dianggap sebagai kekuatan dan momen yang dihasilkan oleh massa tambahan.

Dalam perhitungan gaya massa tambahan dibagi menjadi tiga arah yaitu *axial*, *crossflow* dan *rolling*.

$$X_{\dot{u}} = -\frac{4\alpha\rho\pi}{3}\left(\frac{l}{2}\right)\left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (2.16)$$

$$M_{\dot{q}} = N_{\dot{r}} = -\int_{x_{tail}}^{x_{fin}} x^2 m_a(x) dx - \int_{x_{fin}}^{x_{fin2}} x^2 m_{af}(x) dx - \int_{x_{fin2}}^{x_{bow2}} x^2 m_a(x) dx \quad (2.17)$$

Persamaan 2.24 Dan 2.25 Diatas adalah persamaan added mass axial dan crossflow secara berurutan. $m_a(x) = \rho\pi R(x)^2$ adalah massa tambahan per satuan panjang objek silinder (Yang, 2007). Sedangkan $m_{af}(x) = \rho\pi(a_{fin}^2 - R(x)^2 + \frac{R(x)^4}{a_{fin}^2})$ adalah ketinggian maksimum dari garis tengah pada fin (Yang, 2007).



Gambar 2.3 Aktuator AUV untuk mengendalikan masing-masing DOF (Sutton & Craven, 1998)

2.1.5 Gaya Dorong (*Thrust Force*)

Arah gerak AUV dikendalikan oleh Fin yang bias bergerak terhadap sumbu Y ataupun sumbu Z, namun untuk arah terhadap sumbu X maka diperlukan gaya dorong untuk menggerakkan AUV. Propeller bertugas untuk memberi energy agar AUV tetap bias bergerak maju.

Dalam menentukan gaya dorong AUV maka dipengaruhi oleh energy yang diberikan oleh propeller dan motor. Maka persamaan gaya dorong("ChenY," n.d.) adalah sebagai berikut :

$$X_{prop} = \frac{1}{2} \rho D^4 K_T (J) |\omega_p| \omega_p \quad (2.18)$$

Dimana ρ adalah massa jenis fluida, ω_p adalah kecepatan sudut dari propeller dan D adalah diameter dari propeller. Sedangkan K_T dan J koefisien dorong dan *advance number* dimana nilai koefisien dorong akan semakin menurun seiring meningkatnya nilai *advance number* (Husaini, Samad, & Arshad, 2004).

Maka total gaya dan momen yang bekerja pada AUV dengan menggabungkan persamaan gaya hidrostatis, gaya hidrodinamik, gaya massa tambahan, momen dan gaya angkat dapat ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$\Sigma X = X_{HS} + X_{u|u|}u|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{qq}qq + X_{wq}wq + X_{rr}rr + X_{vr}vr + X_{prop}$$

$$\Sigma Y = Y_{HS} + Y_{v|v|}v|v| + Y_{r|r|}r|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{vu}vu + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r$$

$$\Sigma Z = Z_{HS} + Z_{w|w|}w|w| + Z_{q|q|}q|q| + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{uu\delta_s}u^2\delta_s$$

$$\Sigma K = K_{HS} + K_{p|p|}p|p| + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{prop}$$

$$\Sigma M = M_{HS} + M_{w|w|}w|w| + M_{q|q|}q|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uu\delta_s}u^2\delta_s$$

$$\begin{aligned} \Sigma N = & N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + \\ & N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{vu}vu + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r \end{aligned} \quad (2.19)$$

2.2 Aktuator AUV

Pada AUV Remus memiliki 2 jenis actuator yaitu propeller dan fin. Propeller digunakan untuk mendorong maju AUV sedangkan fin digunakan untuk menentukan arah dari AUV sehingga dapat bergerak belok ke arah sumbu Y atau Z.

Sistem propulsi pada AUV adalah sistem yang mengatur kecepatan propeller AUV ketika melakukan manuver. Dalam sistem ini, alat yang digunakan untuk mengatur kecepatan baling-baling adalah motor dc. Ini adalah transduser yang berfungsi sebagai aktuator. Jadi dalam hal ini kontrol dilakukan pada model matematika pendekatan AUV dari motor dc. Model matematik motor Dc adalah persamaan diferensial linear dua tingkat non-homogen. Ini seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (Ningsih, Subchan, & Nurhadi, 2016)

$$P_{dc}(s) = \frac{0.3}{0.01s^2 + 0.201s + 0.11} \quad (2.20)$$

Dimana input dari motor DC ini adalah berupa tegangan (volt) dan outputnya adalah kecepatan sudut propeller (ω).

Sedangkan untuk Sistem Fin pada AUV adalah sistem yang berfungsi untuk mengatur posisi sudut fininAUV ketika melakukan gerakan memutar. Alat yang digunakan untuk mengatur posisi sudut sirip dalam sistem sirip AUV adalah servomotor. Servo motor adalah transduser yang berfungsi sebagai aktuator. Model matematika dari servomotor adalah persamaan diferensial linear non-homogeneous three-tingkat yang ditunjukkan oleh persamaan (Amir, 2010)

$$P_s(s) = \frac{0.311}{8.816 \times 10^{-9}s^3 + 1.40304 \times 10^{-5}s^2 + 0.000980494s} \quad (2.21)$$

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

2.3 Adaptive Neural *Fuzzy* Inference System

Sistem Neuro *Fuzzy* berstruktur ANFIS (Adaptive Neuro *Fuzzy* Inference Sistem atau biasa disebut juga Adaptive Network based *Fuzzy* Inference Sistem) termasuk dalam kelas jaringan neural namun berdasarkan fungsinya sama dengan *Fuzzy* Inference System. Pada sistem Neuro *Fuzzy*, proses belajar pada neural network dengan sejumlah pasangan data yang berguna untuk memperbaharui parameter-parameter *Fuzzy* Inference System (Fariza, 2007).

Sebagai contoh, untuk model *Fuzzy* Sugeno Orde-Satu, aturan yang umum dengan dua aturan *Fuzzy* IF THEN sebagai berikut:

RULE 1 : IF x is A_1 AND y is B_1 , THEN $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

RULE 2 : IF x is A_2 AND y is B_2 , THEN $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$;

dengan x dan y adalah masukan tegas pada node ke i , A_i dan B_i adalah label linguistik (rendah, sedang, tinggi, dan lain-lain) yang dinyatakan dengan fungsi keanggotaan yang sesuai, sedangkan p_i , q_i , dan r_i adalah parameter consequent ($i = 1$ atau 2) (Rosyadi, 2011).

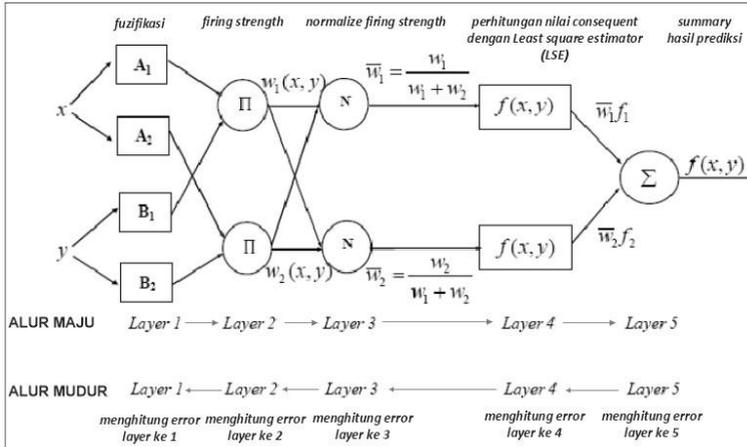
Data yang digunakan untuk proses pembelajaran (training) terdiri dari data masukan, parameter ANFIS, dan data test yang berada pada priode training ANFIS yang kemudian dilakukan proses pembelajaran terhadap data-data tersebut sehingga nantinya diperoleh output berupa hasil prediksi.

Training dengan ANFIS menggunakan algoritma belajar hybrid, dimana dilakukan penggabungan metode Least-Squares Estimator (LSE) untuk menghitung nilai consequent pada alur maju dan menggunakan Error Backpropagation (EBP) dan gradient descent pada alur mundur untuk menghitung error yang terjadi pada tiap layer (Fariza, 2007).

2.3.1 Arsitektur ANFIS

ANFIS dapat menggabungkan mekanisme *Fuzzy inference system* yang digambarkan dalam arsitektur jaringan syaraf. *Neuro Fuzzy* model ANFIS ini terdiri dari 5 *layer* atau lapisan jaringan untuk menerapkan sebuah *Fuzzy* sistem tipe Takagi Sugeno Kang

orde satu dengan pertimbangan kesederhanaan dan kemudahan komputasi. Sistem ANFIS ini dapat memproses *Fuzzy rule* dengan jumlah yang besar.



Gambar 2.9 Blok diagram ANFIS (Rosyadi, 2011)

ANFIS terdiri dari lima layer. Pada layer pertama terdiri dari proses fuzzifikasi dimana data masukan dan target dipetakan dalam derajat keanggotaannya. Pada layer kedua dan ketiga dilakukan proses inferensi yang digunakan untuk menentukan rule *Fuzzy* menggunakan inferensi Sugeno dimana hasilnya akan diproses pada perhitungan selanjutnya. Pada layer 4 dilakukan proses pencarian nilai consequent dengan menggunakan LSE. Pada layer 5 dilakukan proses summary dari dua keluaran pada layer 4.

Pada ANFIS, *Fuzzy Inference System* (FIS) terletak pada layer 1, 2, 3 dan 4 dimana FIS adalah sebagai penentu hidden node yang terdapat pada sistem neural network (Fariza, 2007).

Setelah perhitungan alur maju dilakukan perhitungan alur mundur untuk menghitung nilai error tiap layer dan mengubah nilai parameter masukan menggunakan gradient descent. Proses perhitungan di atas akan berulang terus menerus sampai nilai error memenuhi nilai error maksimum yang telah ditentukan. Alur

proses dari sebuah sistem ANFIS yang terdiri dari lima layer digambarkan pada Gambar 2.3.

Berikut ini adalah algoritma Adaptive Neuro *Fuzzy* Inference System yang digunakan untuk memprediksi data runtun waktu:

1. Melakukan inialisasi terhadap parameter ANFIS, yaitu laju pembelajaran (lr), momentum (mc), batasan kesalahan (err), dan maksimum iterasi (Max Epoch).
2. Tahap pertama yang dilakukan adalah lajur maju yang berisi beberapa tahap untuk mencari nilai consequent dari aturan yang dibuat dan melakukan penjumlahan terhadap semua masukan pada layer terakhir. Adapun tahapan lajur maju adalah sebagai berikut:
 - a) Setiap node i pada layer satu merupakan node adaptive dengan fungsi node sebagai berikut:

$$\begin{aligned} O_{1,i} &= \mu A_i(x_1) && \text{untuk } i = 1, 2 \\ O_{1,i} &= \mu B_i(x_2) && \text{untuk } i = 3, 4 \end{aligned} \quad (2.22)$$

dimana:

x atau y : input dari node i

A_i atau B_i : sebuah label linguistik yang terhubung dengan node i .

$O_{1,i}$: derajat keanggotaan sebuah himpunan *Fuzzy* dengan fungsi kurva Gbell.

Fungsi keanggotaan yang digunakan adalah fungsi Generalized- Bell yang dirumuskan:

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}} \quad (2.23)$$

- b) Setiap node i pada layer kedua berupa node tetap yang keluarannya adalah hasil dari masukan. Operator yang digunakan adalah operator AND. Tiap-tiap node merepresentasikan α predikat dari aturan ke- i . Keluaran dari layer ini disebut dengan firing strength.

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \mu_{B_{i-2}}(y), \text{ dimana } i = 1, 2 \quad (2.24)$$

- c) Tiap-tiap node pada layer ketiga berupa node tetap yang merupakan hasil penghitungan rasio dari α predikat (\bar{w}), dari aturan ke- i terhadap jumlah dari keseluruhan α predikat. Dimana hasilnya dinamakan dengan normalized firing strength.

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1, 2 \quad (2.25)$$

- d) Tiap-tiap node pada layer keempat merupakan node adaptive terhadap suatu keluaran.

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), i = 1, 2 \quad (2.26)$$

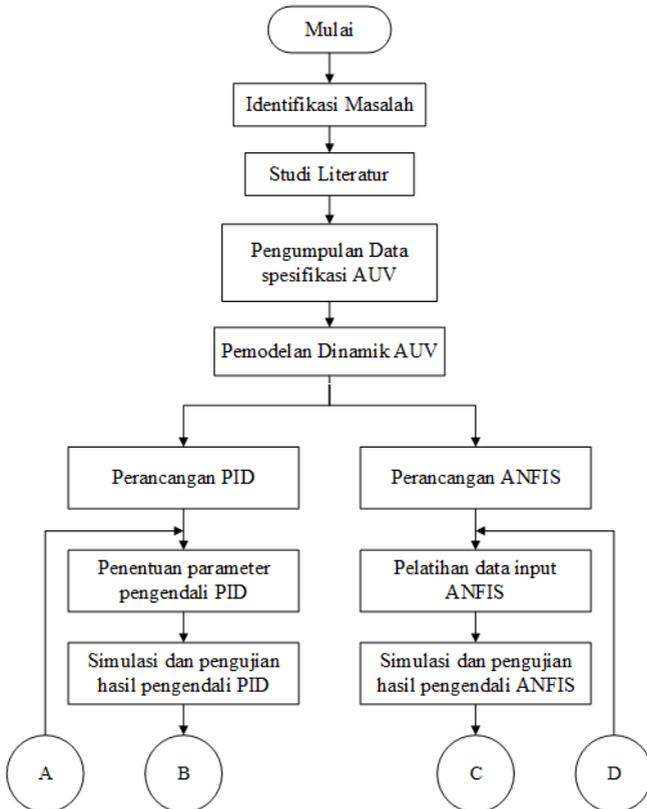
Dengan \bar{w} adalah normalized firing strength pada layer ketiga dan $\{p_i, q_i, r_i\}$ adalah parameter-parameter pada node tersebut yang dinamakan consequent parameters.

- e) Tiap-tiap *neuron* pada lapisan ke lima adalah node tetap yang merupakan jumlahan dari semua masukan.

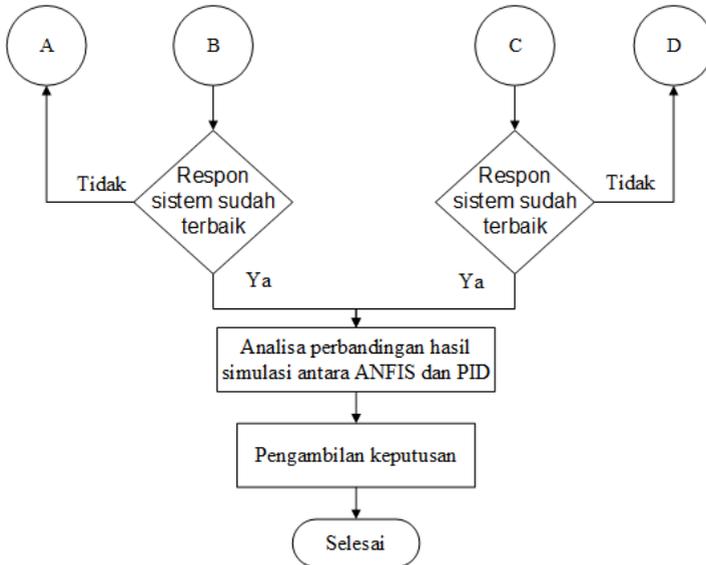
$$O_{5,i} = y = \sum_i \bar{W}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (2.27)$$

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan penelitian yang digunakan pada proposal tugas akhir ini disusun seperti diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Berdasarkan diagram alir pada gambar 3.1, tahapan-tahapan pelaksanaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 *Flowchart* Metode Penelitian



Gambar 3.2 Flowchart Lanjutan

3.1 Identifikasi Masalah

AUV merupakan sistem yang non linear dengan lingkungan operasi yang sangat tidak menentu membuat AUV membutuhkan pengendali yang akurat, cepat dan stabil dalam melakukan operasinya. Berkembangnya macam-macam metode pengendalian membuat pengendali PID yang selama ini sering dipasang pada AUV perlu dibandingkan dengan metode pengendali yang lain untuk didapatkan pengendali terbaik. Pengendali PID sebagai pengendali konvensional akan dibandingkan dengan pengendali *Adaptive Neural Fuzzy Inference System* (ANFIS) sebagai metode pengendali *expert*.

3.2 Studi Literatur

Penyusunan laporan tugas akhir ini diperlukan konsep dan ide awal untuk pelaksanaannya. Studi literature yang dimaksud adalah membangun pemahaman secara mendetail mengenai *Autonomous Underwater Vehicle*. Pemahaman mengenai pemodelan dinamik AUV beserta aktuatornya juga sangat diperlukan guna untuk menentukan pengendali yang tepat. Pengendali PID adalah

pengendali konvensional yang perlu dipelajari karakteristiknya sehingga nantinya bisa dibandingkan dengan pengendali *expert* yaitu *Adaptive Neural Fuzzy Inference System* sehingga diperlukan pemahaman mengenai dua metode pengendali tersebut. Studi literatur dilakukan dengan mencari sumber referensi melalui buku dan jurnal penelitian yang sudah pernah dilakukan terkait poin-poin pada topik tugas akhir kali ini. Penelitian ini dilakukan secara simulasi dengan menggunakan *software* MATLAB R2015b maka diperlukan studi pembelajaran tentang pemrograman yang akan dijalankan.

3.3 Pengumpulan Data Spesifikasi AUV

Autonomous Underwater Vehicle yang dipakai adalah model Remus. Data yang diperlukan adalah data spesifikasi body dari AUV, data spesifikasi dari Fin dan Thruster yang digunakan untuk menentukan koefisien hidrostatis dan hidrodinamis.

Tabel 3.1 menunjukkan data spesifikasi bentuk fisik dari AUV Remus yang diteliti oleh Presteron yang kemudian data-data tersebut digunakan untuk menghitung nilai parameter model yakni koefisien hidrostatis dan hidrodinamis dari AUV.

Tabel 3.1 Data spesifikasi AUV Remus (Milgram et al., 2001)

Name	Value	Unit
Weight	30	Kg
density	1025	Kg/L
Long	1.33	m
Wide	0.19	m
High	0.19	m
Diameter	0.19	m
Normal speed	1.51	m/s

Table 3.2 menunjukkan koefisien hidrostatis dan hidrodinamis yang diperlukan untuk pemodelan AUV terhadap 3 DOF yakni *surge*, *pitch* dan *yaw*.

Tabel 3.2 Data koefisien hidrodinamis dan hidrodinamis AUV Remus beserta hasil perhitungan Prime System 1 (Milgram et al., 2001)

Parameter	Value	Unit
Xui	-0.93	Kg
Mwi	-1.93	Kg.m
Xqq	-1.93	Kg.m/rad
Xrr	-1.93	Kg.m/rad
Mqi	-4.88	Kg.m ² /rad
Nri	-4.88	Kg.m ² /rad
Xuu	-1.62	Kg/m
Mqq	-0.0188	Kg.m ² /rad ²
Xprop	3.86	Kg.m/s ²
Muuds	-6.15	Kg/rad
Nuudr	-6.15	Kg/rad
Muq	-2	Kg.m/rad
Nur	-2	Kg.m/rad
Nrr	-0.94	Kg.m ² /rad ²
Ixx	0.177	Kg.m ²
Iyy	3.45	Kg.m ²
Izz	3.45	Kg.m ²

Sedangkan data spesifikasi propeller AUV Remus pada penelitian selanjutnya yang dilakukan oleh tim Presterio yakni ditunjukkan pada table sebagai berikut.

Tabel 3.3 Karakteristik Propeller (Allen, Vorus, & Prestero, 2000)

Name	Value
Diameter (in)	5,5
Propeller (RPM)	1525
Torsi (Nm)	0,286
QPC (efisiensi)	0,811

3.4 Pemodelan Dinamik AUV

AUV Remus bergerak di dalam air dengan menggunakan aktuator berupa propeller yang terpasang di belakang serta fin untuk dapat bergerak berbelok kanan kiri atau atas bawah. Sehingga dalam bergerak AUV Remus mengandalkan pengaturan kecepatan propeller serta sudut defleksi yang dihasilkan oleh fin. Sehingga untuk mendapatkan model yang sederhana maka model dinamik AUV dilinerisasi terhadap 3 DOF yakni *surge*, *pitch* dan *yaw* sehingga AUV dapat bergerak menuju arah yang bebas dari satu titik menuju titik yang lain.

Persamaan dinamik AUV didapatkan dari persamaan kapal *submarine* yang telah ditulis oleh Fossen (Fossen, 2011) yakni pada persamaan 2.18 dan 2.16. Pemodelan dinamik AUV dan gaya luar yang mempengaruhi telah dilakukan oleh Prestero (Milgram et al., 2001), kemudian didapatkan pemodelan nonlinear untuk 3 DOF sebagai motion control untuk yaitu *surge*, *pitch* dan *yaw*. Linierisasi dilakukan dengan mengasumsikan bahwa variable selain *surge* (u), *pitch* (q), dan *yaw* (r) dianggap tidak mempengaruhi laju AUV atau $v = w = p = 0$.

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

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(\dot{q} + pr)] = X_{HS} + X_{u|u}|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{qq}qq + X_{wq}wq + X_{rr}rr + X_{vr}vr + X_{prop} \quad (3.1)$$

Dari persamaan di atas variable selain *surge*, *pitch* dan *yaw* dianggap sama dengan 0 sehingga persamaan di atas menjadi sebagai berikut.

$$(m - X_{\dot{u}})(\dot{u}) - my_G(\dot{r}) + mz_G(\dot{q}) = X_{res} + X_{u|u}|u|u| + X_{qq}qq + X_{rr}rr + X_{prop} + mx_G(q^2 + r^2) \quad (3.2)$$

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

$$I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + pq)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M_{HS} + M_{w|w}|w|w| + M_{q|q}|q|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_q\dot{q} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uu\delta_s}u^2\delta_s \quad (3.3)$$

Dari persamaan di atas variable selain *surge*, *pitch* dan *yaw* dianggap sama dengan 0 sehingga persamaan di atas menjadi sebagai berikut.

$$(I_{yy} - M_{\dot{q}})(\dot{q}) + mz_G(\dot{u}) = M_{res} + M_{q|q}|q|q| + M_{uq}uq + M_{uu\delta}u^2\delta_s - mx_G(-uq) \quad (3.4)$$

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

$$I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{xz} + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N_{HS} + N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{vu}vu + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r \quad (3.5)$$

Dari persamaan di atas variable selain *surge*, *pitch* dan *yaw* dianggap sama dengan 0 sehingga persamaan di atas menjadi sebagai berikut.

$$(I_z - N_{\dot{r}})(\dot{r}) + my_G(\dot{u}) = N_{res} + N_{r|r}|r|r| + N_{ur}ur + N_{uu\delta}u^2\delta_r - mx_G(ur) \quad (3.6)$$

Persamaan 3.2, 3.4, 3.6 di atas diubah ke bentuk matriks seperti persamaan 3.7.

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & mz_G & -my_G & 0 & 0 \\ mz_G & I_{yy} - M_{\dot{q}} & 0 & 0 & 0 \\ my_G & 0 & I_z - N_{\dot{r}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \\
& = \begin{bmatrix} (-W - B)\sin\theta + X_{u|u}|u|u| + X_{qq}qq + X_{rr}rr + X_{prop} \\ (z_G W)\sin\theta + M_{q|q}|q|q| + M_{uq}uq + M_{uu\delta}u^2\delta_s \\ N_{r|r}|r|r| + N_{ur}ur + N_{uu\delta}u^2\delta_r \\ q \\ r \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Ditentukan bahwa $A = m - X_{\dot{u}}$, $D = mz_G$, $C = -F = -my_G$, $E = I_{yy} - M_{\dot{q}}$, $G = I_z - N_{\dot{r}}$. Penyederhanaan pengerjaan persamaan di atas dapat dituliskan ke dalam persamaan 3.5 yang telah dipindah ruas. Variabel gaya dorong X_{prop} diganti dengan persamaan gaya dorong 2.26.

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \\
& = \begin{bmatrix} -GE & BG & CE & 0 & 0 \\ DG & CF - AG & -CD & 0 & 0 \\ FE & -BF & BD - AE & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (-W - B)\sin\theta + X_{u|u}|u|u| + X_{qq}qq + X_{rr}rr + \frac{1}{2}\rho D^4 K_T(J)\omega_p^2 \\ (z_G W)\sin\theta + M_{q|q}|q|q| + M_{uq}uq + M_{uu\delta}u^2\delta_s \\ N_{r|r}|r|r| + N_{ur}ur + N_{uu\delta}u^2\delta_r \\ q \\ r \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Dimana X_{HS} , M_{HS} , dan N_{HS} merupakan persamaan gaya hidrostatis yang telah dilinierisasi terhadap variable selain arah *surge*, *pitch* dan *yaw*.

$$\begin{aligned}
X_{res} &= -(W - B)\theta \\
M_{res} &= -z_g W\theta \\
N_{res} &= 0
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Didapatkan pemodelan ruang keadaan AUV dalam arah gerak *surge*, *pitch* dan *yaw*.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -GE & BG & CE & 0 & 0 \\ DG & CF-AG & -CD & 0 & 0 \\ FE & -BF & BD-AE & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2X_{u|u|} \\ M_{uq} \\ N_{ur} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2X_{qq} & 2X_{rr} & (-W-B) & 0 \\ 2M_{q|q|} + M_{uq} & 0 & (z_G W) & 0 \\ 0 & 2N_{r|r|} + N_{ur} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ q \\ r \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -GE & BG & CE & 0 & 0 \\ DG & CF-AG & -CD & 0 & 0 \\ FE & -BF & BD-AE & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{z} \rho D^4 K_r(J) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2M_{uu\delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2N_{um\delta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_s \\ \delta_r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

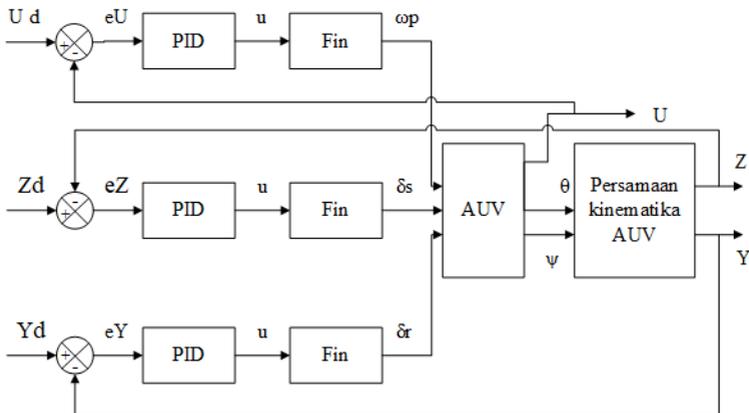
Nilai hidrostatik dan hidrodinamik dimasukkan ke dalam pemodelan *state-space* sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1003 & -0.1203 & -0.125 & -19.6 & 0 \\ -0.233 & -0.2361 & 0.008821 & 2.087 & 0 \\ -0.2401 & 0 & -0.4658 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ q \\ r \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.698 \times 10^{-5} & 0.04216 & 0 & 0 & 0 \\ -1.199 \times 10^{-6} & -2.218 & 0 & 0 & 0 \\ -0.2401 & 0 & -2.215 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_p \\ \delta_s \\ \delta_r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Model ruang keadaan tersebut memiliki 3 input system yaitu kecepatan sudut propeller untuk arah gerak *surge*, sudut elevasi stern dan rudder untuk arah gerak *pitch* dan *yaw*. Sedangkan outputnya memiliki lima variable yaitu kecepatan arah *surge*, *pitch* dan *yaw* serta posisi sudut *pitch* dan *yaw*.

3.5 Perancangan Pengendali PID

Perancangan pengendali PID dilakukan di SIMULINK MATLAB 2015b. Perancangan berbentuk diagram *close-loop* pada plant AUV terhadap masing-masing DOF. Perancangan pengendalian dilakukan untuk mengendalikan kecepatan arah maju AUV, posisi kedalaman AUV dan posisi AUV dalam bidang horizontal.

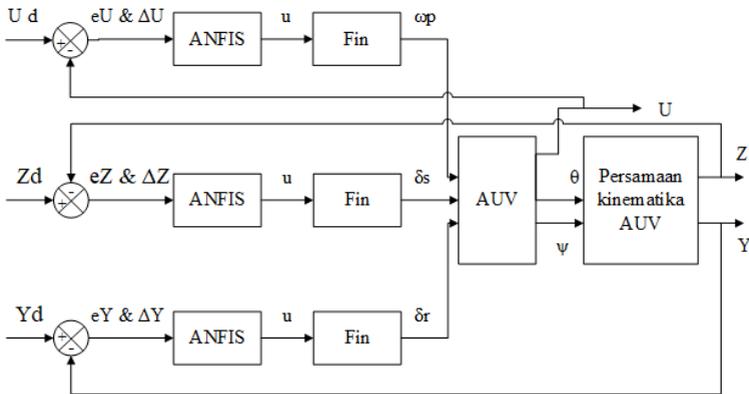


Gambar 3.4 Diagram blok pengendalian AUV arah gerak surge, pitch dan yaw dengan kendali PID

Tuning nilai parameter PID dilakukan dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols tipe 2 dengan cara mencari respon system sehingga didapatkan nilai K_{cr} atau gain kritis dan P_{cr} atau periode antar titik puncak pada respon.

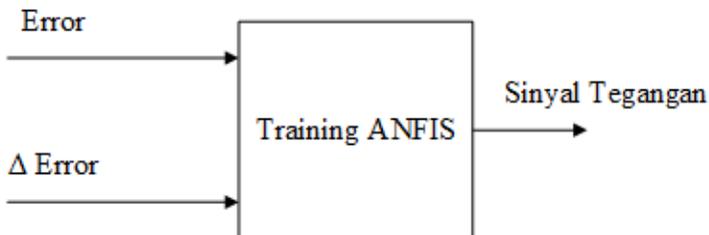
3.6 Perancangan Kendali ANFIS

Setelah didapatkan pengendalian close loop menggunakan kendali PID, maka selanjutnya dapat menyusun kendali ANFIS. Penyusunan algoritma ANFIS dilakukan dengan menggunakan data input kontroler error dan Δ error dan keluaran sinyal tegangan yang menuju aktuator.



Gambar 3.5 Diagram blok pengendalian AUV arah gerak surge, pitch dan yaw dengan kendali ANFIS

Data yang diambil untuk dilatih dalam algoritma ANFIS adalah error dan Δ error serta sinyal tegangan sebagai keluaran sistem ANFIS. Skema diagram data input yang dilatih oleh ANFIS dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Blok diagram proses pelatihan dengan ANFIS

Perancangan kendali ANFIS memiliki beberapa opsi untuk menentukan tipe fungsi keanggotaan dan jumlah fungsi keanggotaan, sehingga dalam pemilihannya dilakukan pendekatan dengan melihat jumlah data yang akan dilatih dan rentang selisih data yang akan dilatih sehingga dapat diperkirakan tipe dan jumlah fungsi keanggotaan yang akan digunakan. Pada penelitian ini akan diuji menggunakan 3 tipe fungsi keanggotaan dan 3 jenis jumlah fungsi keanggotaan pada masing-masing blok kendali pada masing-masing DOF.

Tipe fungsi keanggotaan G-Bell, Triangle dan Gaussian dipilih karena kemiripan karakter dalam menentukan derajat keanggotaan dimana Triangle memiliki derajat abu-abu lebih banyak dibanding G-Bell. Sedangkan jumlah fungsi keanggotaan dipilih 3, 5 dan 8 dipilih karena hipotesa dari rentang data yang dilatih oleh ANFIS dengan nilai epoch pada setiap pelatihan data yaitu 500.

Tabel 3.4 Perubahan tipe dan jumlah fungsi keanggotaan pada ANFIS

Blok Kendali	Tipe Fungsi Keanggotaan			Jumlah Fungsi Keanggotaan tipe G-Bell		
	G-Bell	Triangle	Gaussian	3	5	8
<i>Surge</i>	G-Bell	Triangle	Gaussian	3	5	8
<i>Pitch</i>	G-Bell	Triangle	Gaussian	3	5	8
<i>Yaw</i>	G-Bell	Triangle	Gaussian	3	5	8

Pelatihan ANFIS dilakukan pada masing-masing DOF sebanyak 500 epoch agar menghasilkan keluaran ANFIS dengan nilai yang presisi dan akurat. Jumlah serta tipe fungsi keanggotaan pada ANFIS dapat ditentukan namun untuk rentang dalam fungsi keanggotaan tidak bisa diubah karena ANFIS sifatnya adalah melatih data yang kemudian menentukan rentang fungsi keanggotan sendiri.

Pengambilan data dilakukan sebanyak 1000 data pada masing-masing DOF dengan rentang waktu pengambilan adalah 0.1 detik. Kemudian data dinormalisasi terlebih dahulu agar menghasilkan nilai MSE terkecil pada algoritma ANFIS. Rumus normalisasi dapat dilihat sebagai berikut (Kinasih, Nhita, Komputasi, Informatika, & Telkom, 2015) :

$$x' = \left\{ \left(\frac{x_{act} - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \right) 0.8 \right\} + 0.1 \quad (3.12)$$

Dimana,

x' = nilai setelah dinormalisasi

x_{act} = nilai actual sebelum dinormalisasi

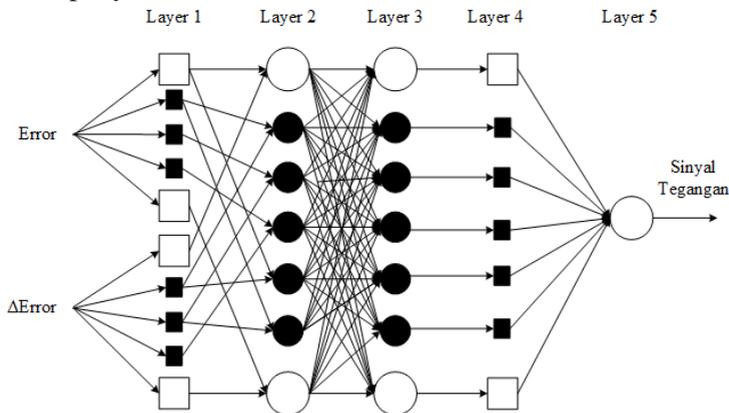
X_{min} = nilai minimum dalam satu variable data

X_{max} = nilai maksimum dalam satu variable data

Perancangan pengendali ANFIS menggunakan software komputasi SIMULINK pada MATLAB 2015b. Data yang dilatih dalam ANFIS adalah data yang sudah dinormalisasi sehingga pada SIMULINK perlu diterapkan rumus denormalisasi pada keluaran kendali ANFIS.

3.6.1 Arsitektur kendali ANFIS

Arsitektur ANFIS secara umum telah dijelaskan pada bab sebelumnya dimana memiliki 5 layer dengan fungsi berbeda-beda pada tiap layer.



Gambar 3.7 Arsitektur ANFIS untuk sistem kendali AUV

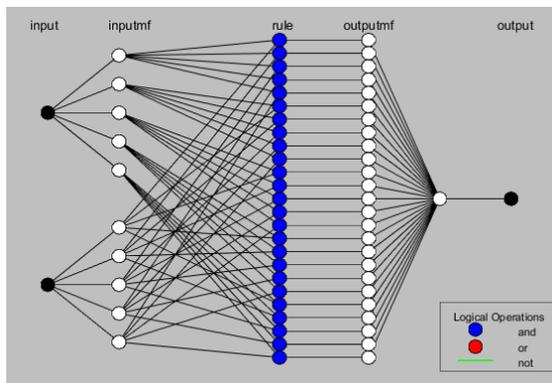
Layer pertama merupakan fuzzyfikasi yang jumlah nodenya mengikuti dengan jumlah fungsi keanggotaan yang diinginkan pada masing-masing input. Layer kedua merupakan firing strength dengan jumlah node mengikuti jumlah fungsi keanggotaan pada masing-masing input. Apabila input memiliki 5 jumlah fungsi keanggotaan maka node pada layer kedua akan berjumlah 25. Demikian halnya pada layer ketiga yaitu normalize firing strength yang memiliki jumlah node yang sama dengan layer kedua. Layer keempat adalah perhtiungan nilai konsekuen pada tiap node hasil layer ketiga. Layer kelima merupakan defuzzyfikasi dengan menjumlahkan semua nilai dari layer keempat. Pengambilan keputusan berupa sinyal tegangan untuk aktuator.

Layer pertama dan layer keempat memiliki node berbentuk kotak sedangkan lainnya berbentuk lingkaran, hal ini menandakan bahwa layer tersebut bersifat adaptif yang artinya nilai di dalamnya dapat berubah-ubah untuk mendapatkan nilai error terkecil dari pelatihan dimana telah dijelaskan pada bab sebelumnya.

Arsitektur ANFIS pada masing-masing loop memiliki komposisi yang berbeda-beda seperti terdapat perbedaan pada jumlah fungsi keanggotaan, perbedaan pada tipe fungsi keanggotaan serta perbedaan pada data yang perlu dinormalisasi dan data yang tidak perlu dinormalisasi. Berikut penjelasan dari masing-masing perancangan ANFIS pada masing-masing close loop pengendalian.

A. Perubahan tipe fungsi keanggotaan

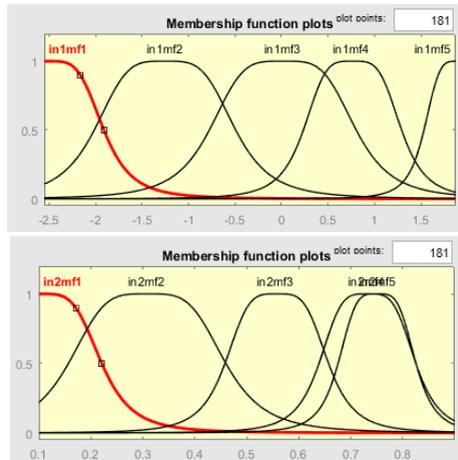
Pengujian pertama dilakukan dengan menggunakan jumlah fungsi keanggotaan 5 dengan tipe fungsi keanggotaan yang dipakai adalah G-Bell pada masing-masing blok kendali.



Gambar.3.8 Struktur ANFIS dengan 5 fungsi keanggotaan

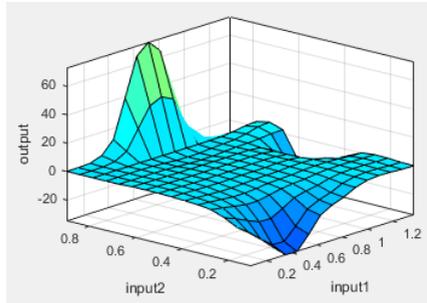
Pada setiap input ANFIS berjumlah 2 dan memiliki 5 fungsi keanggotaan pada masing-masing input maka akan memiliki struktur layer seperti pada gambar. Dimana layer ke 0 adalah input berupa nilai error dan Δ error yang selanjutnya di layer kedua difuzzyfikasi menjadi 5 bagian pada masing-masing fungsi keanggotaan. Pada layer ketiga yaitu pembentukan *rules* yang

secara otomatis terbentuk akibat pelatihan data yang dilakukan oleh NN sehingga apabila memiliki 2 input 5 fungsi keanggotaan maka akan terbentuk 25 rules dengan fungsi yang digunakan adalah *and*. Pada layer keempat adalah penentuan parameter konsekuen yang kemudian pada layer kelima dilakukan defuzzyfikasi.



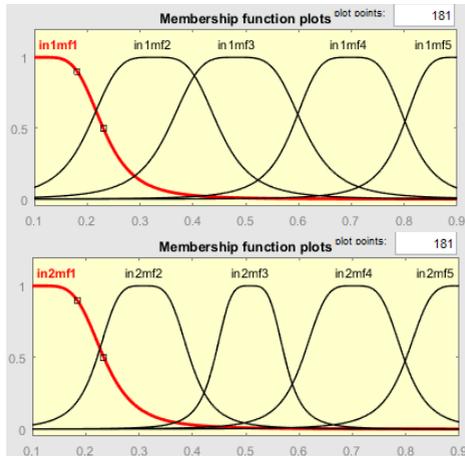
Gambar 3.9 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error kecepatan surge berjumlah 5 dan bertipe G-Bell

Gambar 3.9 menunjukkan fungsi keanggotaan input error dan input Δ error untuk kendali ANFIS pada close loop pengendalian kecepatan arah *surge*. Kedua input tersebut memiliki jumlah fungsi keanggotaan yakni berjumlah 5 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu Generalized bell.

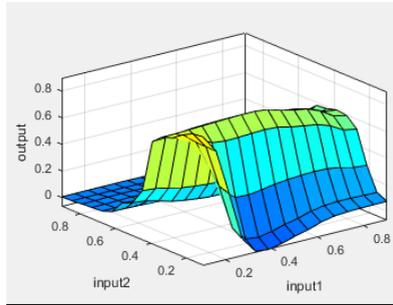


Gambar 3.10 Grafik *surface* ANFIS kecepatan surge berjumlah 5 dan bertipe G-Bell

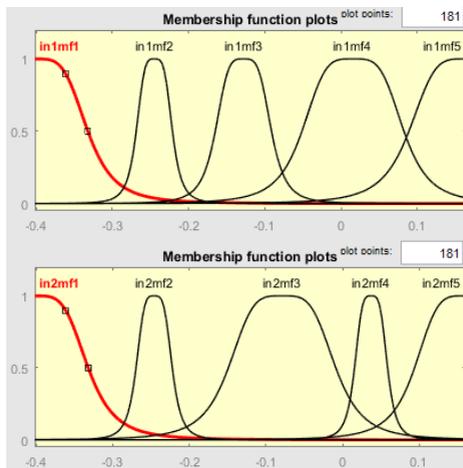
Gambar 3.11 menunjukkan fungsi keanggotaan input error dan input Δ error untuk kendali ANFIS pada close loop pengendalian arah *yaw*. Kedua input tersebut memiliki jumlah fungsi keanggotaan yakni berjumlah 5 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu Generalized Bell serta memiliki rentang fungsi keanggotaan yang sama yaitu antara 0,1 sampai 0,9.



Gambar 3.11 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah *yaw* berjumlah 5 dan bertipe G-Bell

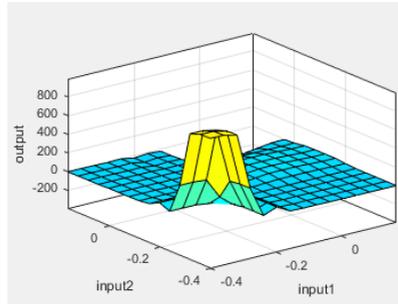


Gambar 3.12 Grafik *surface* ANFIS arah yaw berjumlah 5 dan bertipe G-Bell



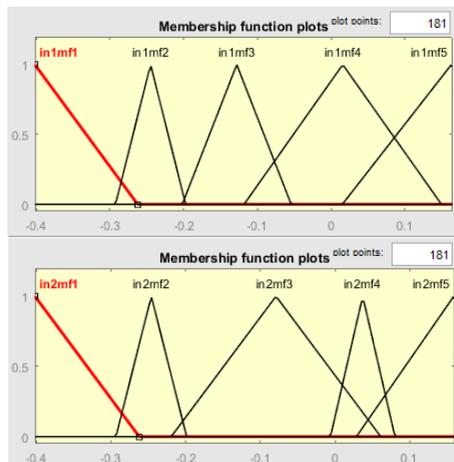
Gambar 3.13 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Pitch berjumlah 5 dan bertipe G-Bell

Gambar 3.13 menunjukkan fungsi keanggotaan input error dan input Δ error untuk kendali ANFIS pada close loop pengendalian arah *Pitch*. Kedua input tersebut memiliki jumlah fungsi keanggotaan yakni berjumlah 5 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu Generalized-Bell namun memiliki rentang fungsi keanggotaan yang berbeda dikarenakan data yang dilatih merupakan tanpa melalui proses normalisasi data.



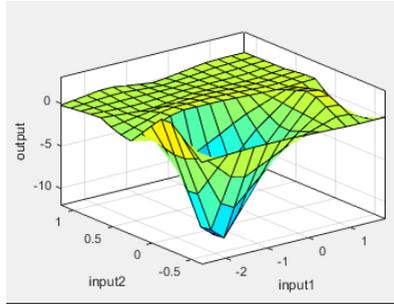
Gambar 3.14 Grafik *surface* ANFIS arah pitch berjumlah 5 dan bertipe G-Bell

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan jumlah fungsi keanggotaan 5 dengan tipe fungsi keanggotaan yang dipakai adalah Triangle pada masing-masing blok kendali.



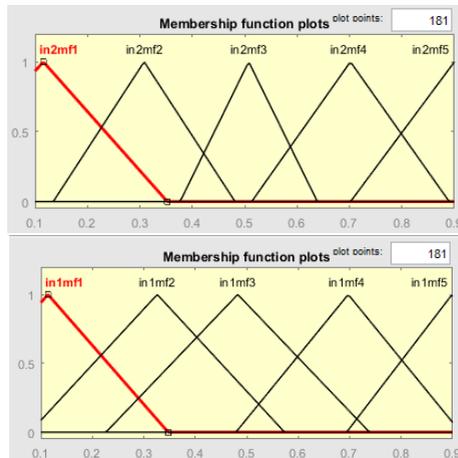
Gambar 3.15 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Surge berjumlah 5 dan bertipe Triangle

Gambar 3.15 menunjukkan fungsi keanggotaan input error dan input Δ error untuk kendali ANFIS pada close loop pengendalian arah *Surge*. Kedua input tersebut memiliki jumlah fungsi keanggotaan yakni berjumlah 5 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu Triangle.

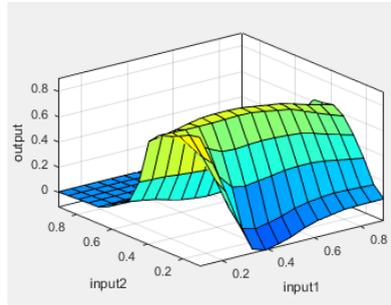


Gambar 3.16 Grafik *surface* ANFIS arah surge berjumlah 5 dan bertipe Triangle

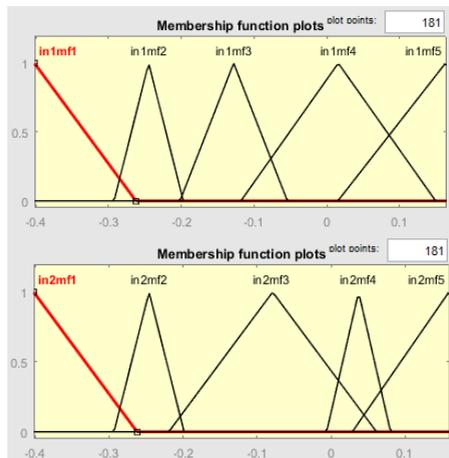
Gambar 3.16 menunjukkan fungsi keanggotaan input error dan input Δ error untuk kendali ANFIS pada close loop pengendalian arah *Yaw*. Kedua input tersebut memiliki jumlah fungsi keanggotaan yakni berjumlah 5 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu Triangle.



Gambar 3.17 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah *Yaw* berjumlah 5 dan bertipe Triangle

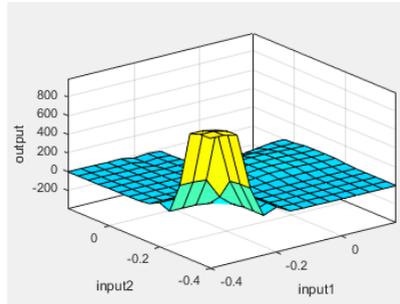


Gambar 3.18 Grafik *surface* ANFIS arah yaw berjumlah 5 dan bertipe Triangle



Gambar 3.19 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Pitch berjumlah 5 dan bertipe Triangle

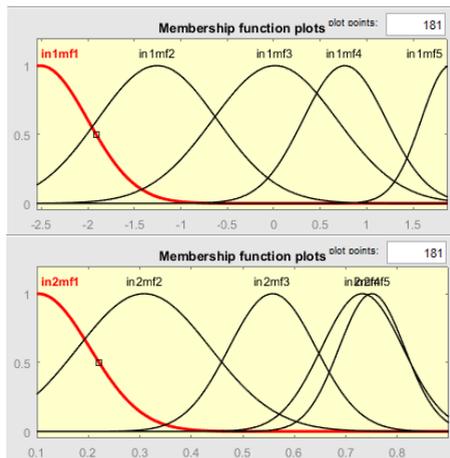
Gambar 3.19 menunjukkan fungsi keanggotaan input error dan input Δ error untuk kendali ANFIS pada close loop pengendalian arah *Pitch*. Kedua input tersebut memiliki jumlah fungsi keanggotaan yakni berjumlah 5 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu Triangle namun memiliki rentang fungsi keanggotaan yang berbeda dikarenakan data yang dilatih merupakan tanpa melalui proses normalisasi data.



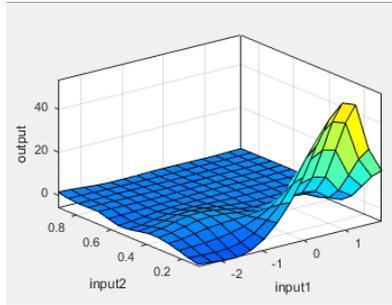
Gambar 3.20 Grafik *surface* ANFIS arah pitch berjumlah 5 dan bertipe Triangle

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan jumlah fungsi keanggotaan 5 dengan tipe fungsi keanggotaan yang dipakai adalah Gaussian pada masing-masing blok kendali.

Gambar 3.21 menunjukkan fungsi keanggotaan input error dan input Δ error untuk kendali ANFIS pada close loop pengendalian arah *Surge*. Kedua input tersebut memiliki jumlah fungsi keanggotaan yakni berjumlah 5 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu Gaussian.

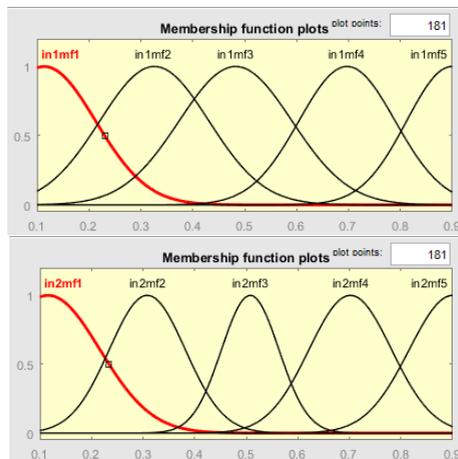


Gambar 3.22 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Surge berjumlah 5 dan bertipe Gaussian

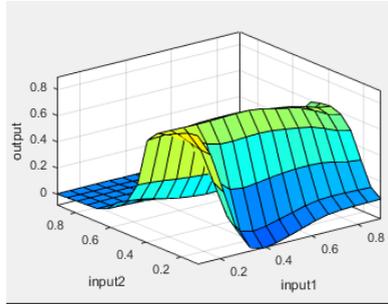


Gambar 3.23 Grafik *surface* ANFIS arah surge berjumlah 5 dan bertipe Gaussian

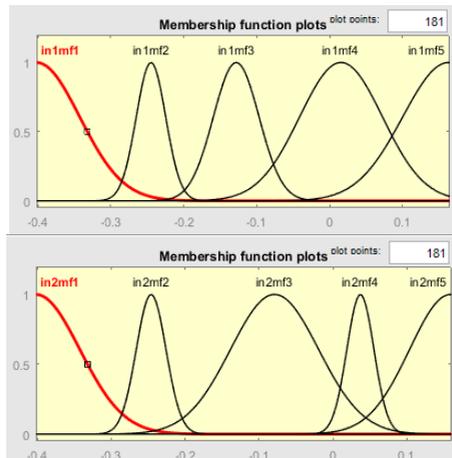
Gambar 3.24 menunjukkan fungsi keanggotaan input error dan input Δ error untuk kendali ANFIS pada close loop pengendalian arah *Yaw*. Kedua input tersebut memiliki jumlah fungsi keanggotaan yakni berjumlah 5 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu Gaussian.



Gambar 3.24 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah *Yaw* berjumlah 5 dan bertipe Gaussian

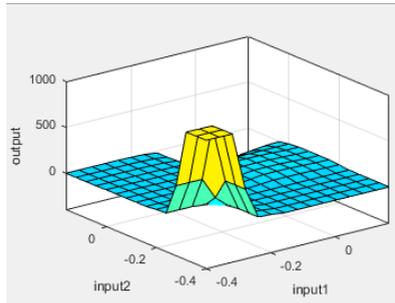


Gambar 3.25 Grafik *surface* ANFIS arah yaw berjumlah 5 dan bertipe Gaussian



Gambar 3.26 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Pitch berjumlah 5 dan bertipe Gaussian

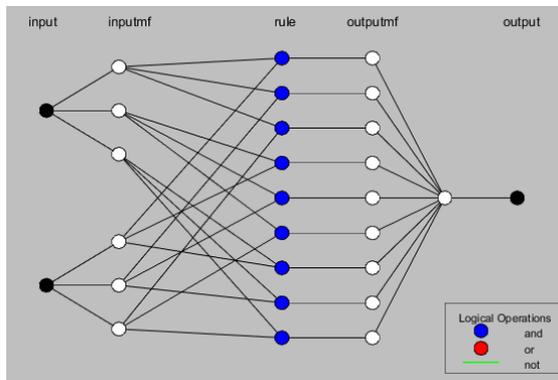
Gambar 3.26 menunjukkan fungsi keanggotaan input error dan input Δ error untuk kendali ANFIS pada close loop pengendalian arah *Pitch*. Kedua input tersebut memiliki jumlah fungsi keanggotaan yakni berjumlah 5 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu Gaussian namun memiliki rentang fungsi keanggotaan yang berbeda dikarenakan data yang dilatih merupakan tanpa melalui proses normalisasi data.



Gambar 3.27 Grafik *surface* ANFIS arah pitch berjumlah 5 dan bertipe Gaussian

B. Perubahan jumlah fungsi keanggotaan

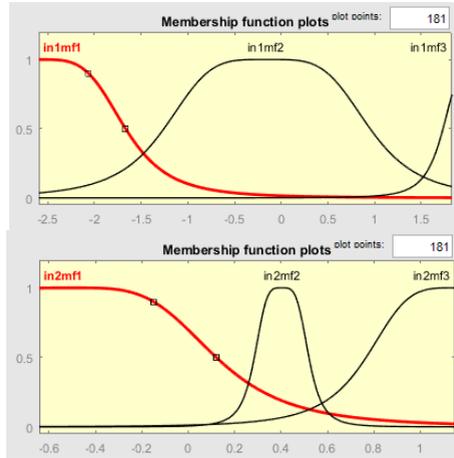
Pengujian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan jumlah fungsi keanggotaan 3 dengan tipe fungsi keanggotaan yang dipakai adalah Generalized-Bell pada masing-masing blok kendali.



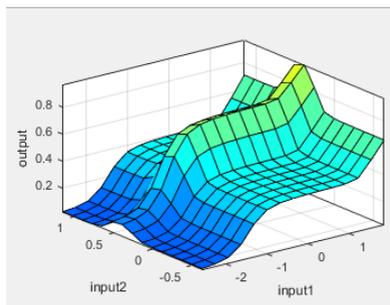
Gambar 3.28 struktur layer dengan 3 fungsi keanggotaan

Pada setiap input ANFIS berjumlah 2 dan memiliki 3 fungsi keanggotaan pada masing-masing input maka akan memiliki struktur layer seperti pada gambar. Dimana layer ke 0 adalah input berupa nilai error dan Δ error yang selanjutnya di layer kedua difuzzyfikasi menjadi 3 bagian pada masing-masing fungsi

keanggotaan. Pada layer ketiga yaitu pembentukan *rules* yang secara otomatis terbentuk akibat pelatihan data yang dilakukan oleh NN sehingga apabila memiliki 2 input 3 fungsi keanggotaan maka akan terbentuk 9 rules. Pada layer keempat adalah penentuan parameter konsekuen yang kemudian pada layer kelima dilakukan defuzzyfikasi.

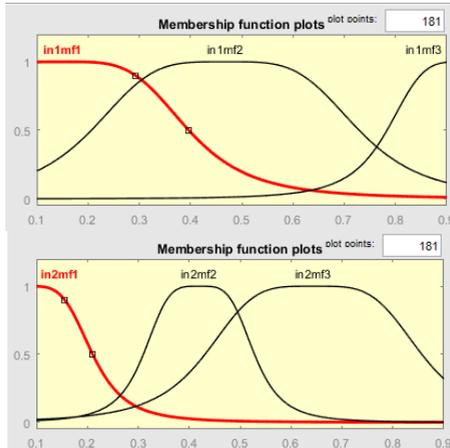


Gambar 3.29 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Surge berjumlah 3 dan bertipe Generalized-Bell

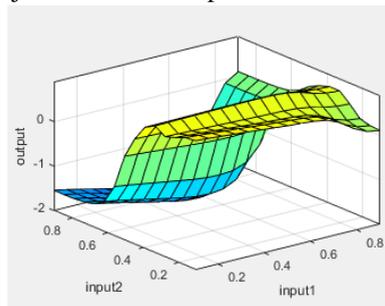


Gambar 3.30 Grafik *surface* ANFIS arah surge berjumlah 3 dan bertipe G-Bell

Gambar 3.28 menunjukkan fungsi keanggotaan input error dan input Δ error untuk kendali ANFIS pada close loop pengendalian arah *Surge*. Kedua input tersebut memiliki jumlah fungsi keanggotaan yakni berjumlah 3 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu Generalized-Bell.



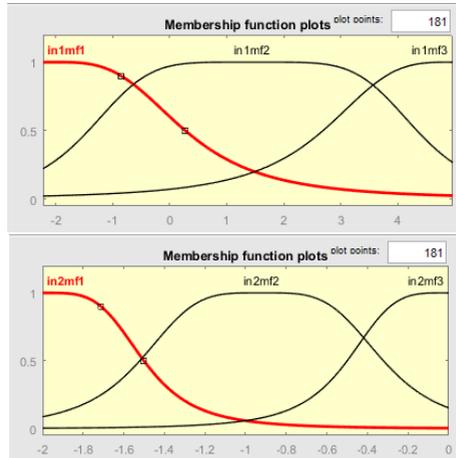
Gambar 3.31 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Yaw berjumlah 3 dan bertipe Generalized-Bell



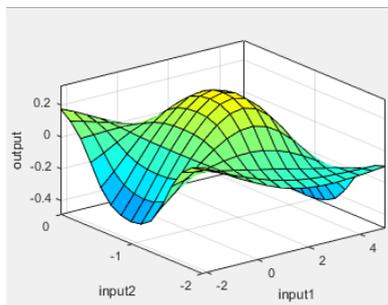
Gambar 3.32 Grafik *surface* ANFIS arah yaw berjumlah 3 dan bertipe G-Bell

Gambar 3.31 menunjukkan fungsi keanggotaan input error dan input Δ error untuk kendali ANFIS pada close loop pengendalian arah *Yaw*. Kedua input tersebut memiliki jumlah fungsi keanggotaan yakni berjumlah 3 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu Generalized-Bell.

Gambar 3.33 menunjukkan fungsi keanggotaan input error dan input Δ error untuk kendali ANFIS pada close loop pengendalian arah *Pitch*. Kedua input tersebut memiliki jumlah fungsi keanggotaan yakni berjumlah 3 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu Generalized-Bell namun memiliki rentang fungsi keanggotaan yang berbeda dikarenakan data yang dilatih merupakan tanpa melalui proses normalisasi data.

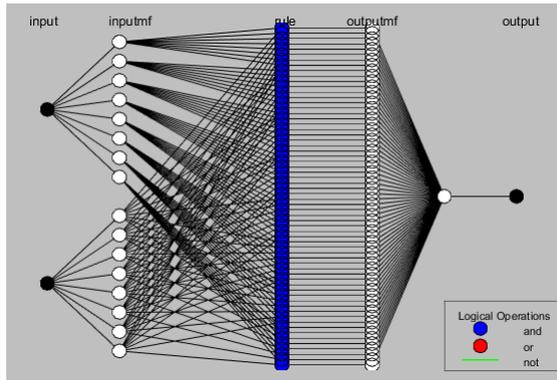


Gambar 3.33 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah *Pitch* berjumlah 3 dan bertipe Generalized-Bell



Gambar 3.34 Grafik *surface* ANFIS arah *pitch* berjumlah 3 dan bertipe G-Bell

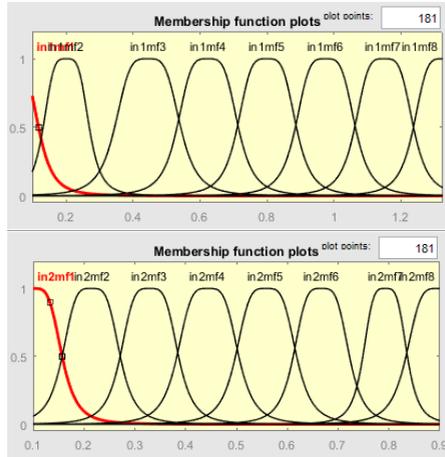
Pengujian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan jumlah fungsi keanggotaan 8 dengan tipe fungsi keanggotaan yang dipakai adalah Generalized-Bell pada masing-masing blok kendali.



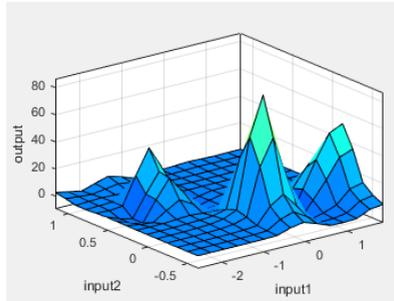
Gambar 3.35 struktur layer dengan 8 fungsi keanggotaan

Pada setiap input ANFIS berjumlah 2 dan memiliki 8 fungsi keanggotaan pada masing-masing input maka akan memiliki struktur layer seperti pada gambar. Dimana layer ke 0 adalah input berupa nilai error dan Δ error yang selanjutnya di layer kedua difuzzyfikasi menjadi 3 bagian pada masing-masing fungsi keanggotaan. Pada layer ketiga yaitu pembentukan *rules* yang secara otomatis terbentuk akibat pelatihan data yang dilakukan oleh NN sehingga apabila memiliki 2 input 8 fungsi keanggotaan maka akan terbentuk 64 rules. Pada layer keempat adalah penentuan parameter konsekuen yang kemudian pada layer kelima dilakukan defuzzyfikasi.

Gambar 3.36 menunjukkan fungsi keanggotaan input error dan input Δ error untuk kendali ANFIS pada close loop pengendalian arah *Surge*. Kedua input tersebut memiliki jumlah fungsi keanggotaan yakni berjumlah 8 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu Generalized-Bell.

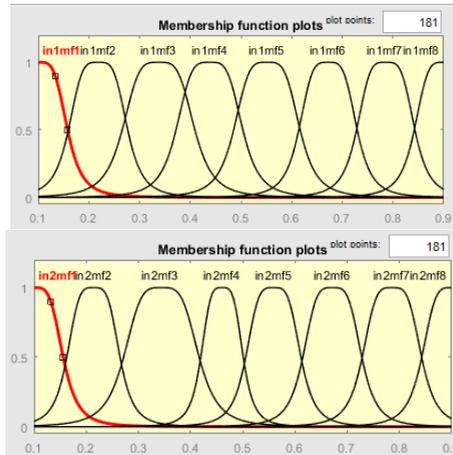


Gambar 3.36 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Surge berjumlah 8 dan bertipe Generalized-Bell

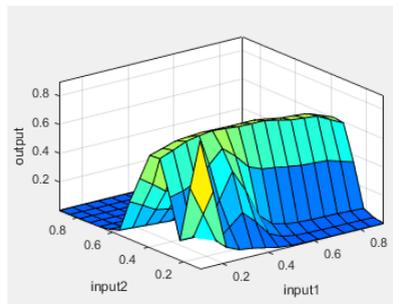


Gambar 3.37 Grafik *surface* ANFIS arah surge berjumlah 8 dan bertipe G-Bell

Gambar 3.38 menunjukkan fungsi keanggotaan input error dan input Δ error untuk kendali ANFIS pada close loop pengendalian arah *Yaw*. Kedua input tersebut memiliki jumlah fungsi keanggotaan yakni berjumlah 8 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu Generalized-Bell.

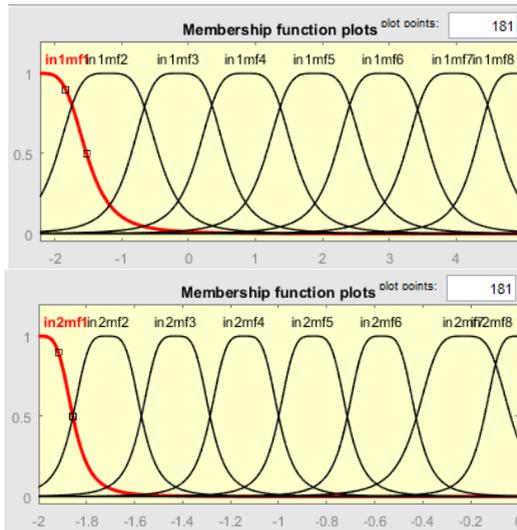


Gambar 3.38 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Yaw berjumlah 8 dan bertipe Generalized-Bell

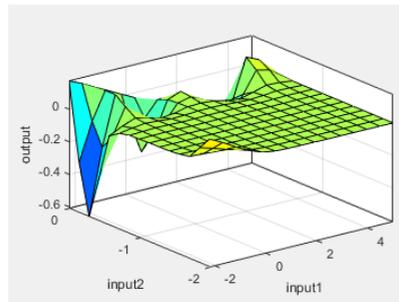


Gambar 3.39 Grafik *surface* ANFIS arah yaw berjumlah 8 dan bertipe G-Bell

Gambar 3.40 menunjukkan fungsi keanggotaan input error dan input Δ error untuk kendali ANFIS pada close loop pengendalian arah *Pitch*. Kedua input tersebut memiliki jumlah fungsi keanggotaan yakni berjumlah 8 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu Generalized-Bell namun memiliki rentang fungsi keanggotaan yang berbeda dikarenakan data yang dilatih merupakan tanpa melalui proses normalisasi data.



Gambar 3.40 fungsi keanggotaan input error dan input Δ error arah Pitch berjumlah 8 dan bertipe Generalized-Bell



Gambar 3.41 Grafik *surface* ANFIS arah pitch berjumlah 8 dan bertipe G-Bell

3.7 Uji Simulasi

Setelah melakukan pemodelan AUV dan perancangan pengendali maka selanjutnya dilakukan uji simulasi menggunakan software MATLAB 2015b. uji simulasi dilakukan dengan menggunakan fungsi step sebagai *setpoint* pada masing-masing DOF yaitu *surge*, *pitch* dan *yaw* yang nantinya dapat diketahui nilai performansi karakteristik dari setiap respon.

Nilai performansi respon yang baik dapat ditentukan dari nilai *overshoot*, *settling time* dan *Integral Absolute Error* (IAE). Nilai *overshoot* dari respon tidak boleh melebihi angka 25% karena jika melebihi dapat mengakibatkan kerusakan pada actuator. Sedangkan *settling time* dan IAE diambil nilai terendah yaitu *settling time* tercepat dan nilai error yang paling sedikit.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Respon system dengan kendali ANFIS

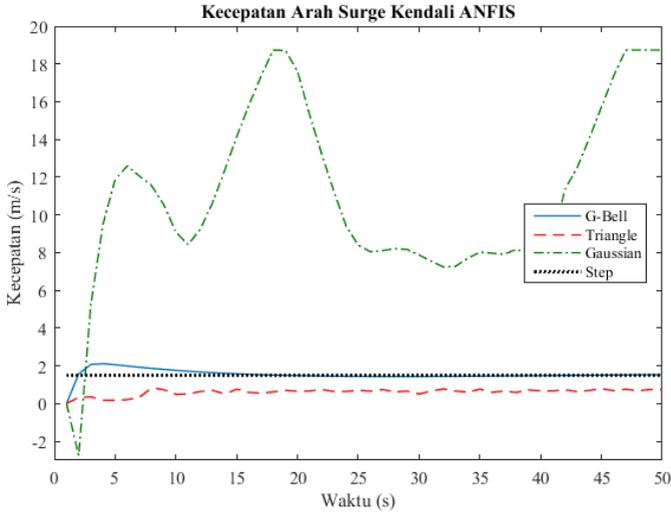
Perancangan Kendali ANFIS dilakukan perancangan 3 macam kendali ANFIS untuk mengendalikan masing-masing DOF yaitu kecepatan arah *surge*, posisi sumbu Y dan posisi sumbu Z dimana pengambilan data untuk dilatih di dalam ANFIS adalah nilai error, Δ error dan sinyal kontrol pada masing-masing DOF.

Perancangan dilakukan dengan menguji ANFIS pada beberapa keadaan dengan variabel manipulasinya yaitu jumlah fungsi keanggotaan dan tipe fungsi keanggotaan seperti yang telah dijelaskan pada tabel 3. untuk didapatkan respon AUV terbaik dari setiap nilai parameter ANFIS tersebut.

4.1.1 Uji Tipe Fungsi Keanggotaan

Pengujian pertama dilakukan dengan menggunakan variabel manipulasi tipe fungsi keanggotaan yaitu G-Bell, Triangle, dan Gaussian dan variabel kontrolnya adalah jumlah epoch 500 dan jumlah fungsi keanggotaan sebanyak 5.

Pada gambar 4.1 adalah respon kendali ANFIS terhadap AUV pada arah gerak *Surge* dengan tipe fungsi keanggotaan G-Bell, Triangle dan Gaussian dan jumlah fungsi keanggotaan sebanyak 5. *Setpoint* yang digunakan pada uji kecepatan arah *surge* adalah kecepatan AUV pada kondisi operasi normal yaitu 1,5 m/s. Dari kurva di atas terlihat bahwa pengendali ANFIS dengan tipe Gaussian memiliki respon yang sangat jauh dari *setpoint* dan beresilasi menjauh dari *setpoint*. Sedangkan tipe fungsi keanggotaan Triangle memiliki respon yang tidak mencapai *setpoint* sampai pada detik ke 100. Tipe fungsi keanggotaan G-Bell memiliki respon mencapai *setpoint* karakteristik respon yang dapat dilihat pada table 4.1.



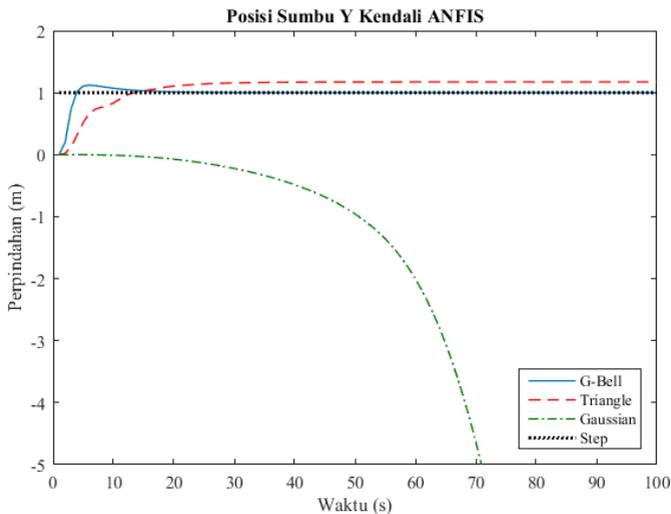
Gambar 4.1 Grafik respon AUV dikendalikan ANFIS arah Surge dengan 3 tipe fungsi keanggotaan

Tabel 4.1 karakteristik respon kecepatan surge kendali ANFIS 3 tipe fungsi keanggotaan

Parameter (satuan)	Tipe Fungsi Keanggotaan		
	G-Bell	Triangle	Gaussian
Maximum <i>Overshoot</i> (%)	41	-	-
<i>Rise time</i> (s)	2	-	-
<i>Settling time</i> (s)	-	-	-
IAE	12,858	86,59	506,708

Pada gambar 4.2 adalah respon kendali ANFIS terhadap AUV pada sumbu Y dengan tipe fungsi keanggotaan G-Bell, Triangle dan Gaussian dan jumlah fungsi keanggotaan sebanyak 5. *Setpoint* yang digunakan pada uji perpindahan terhadap sumbu Y adalah 1 m. Dari kurva di atas terlihat bahwa pengendali ANFIS dengan tipe Gaussian memiliki respon yang jauh bahkan semakin menjauhi *setpoint* ke arah sumbu $-Y$. Fungsi keanggotaan Triangle memiliki respon mendekati *setpoint* namun sampai detik ke 100 tidak tepat pada titik *setpoint* yang diinginkan yaitu 1,173 m. Fungsi

keanggotaan G-Bell memiliki respon mencapai *setpoint* dengan *overshoot* dan karakteristik respon dapat dilihat pada table 4.2.



Gambar 4.2 Grafik respon perpindahan AUV kendali ANFIS pada sumbu Y dengan 3 tipe fungsi keanggotaan

Tabel 4.2 karakteristik respon perpindahan sumbu Y kendali ANFIS 3 tipe fungsi keanggotaan

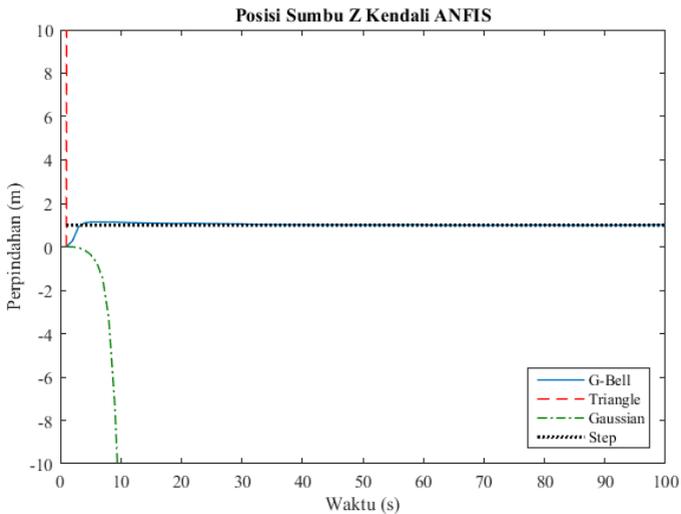
Parameter (satuan)	Tipe Fungsi Keanggotaan		
	G-Bell	Triangle	Gaussian
Maximum <i>Overshoot</i> (%)	12,2	17,3	-
<i>Rise time</i> (s)	4	13	-
<i>Settling time</i> (s)	17	-	-
	2,509	19,557	-

Pada gambar 4.3 adalah respon kendali ANFIS terhadap AUV pada sumbu Z dengan tipe fungsi keanggotaan G-Bell, Triangle dan Gaussian dan jumlah fungsi keanggotaan sebanyak 5. *Setpoint* yang digunakan pada uji perpindahan terhadap sumbu Z adalah 1 m. Dari kurva tersebut terlihat bahwa pengendali ANFIS dengan tipe Gaussian dan Triangle memiliki respon yang jauh bahkan

semakin menjauhi *setpoint* seperti kurva eksponensial yaitu ke arah sumbu $-Z$ dan ke arah $+Z$. Fungsi keanggotaan G-Bell memiliki respon mencapai *setpoint* dengan *overshoot* dan karakteristik respon dapat dilihat pada table 4.3 .

Tabel 4.3 karakteristik respon perpindahan sumbu Z kendali ANFIS 3 tipe fungsi keanggotaan

Parameter (satuan)	Tipe Fungsi Keanggotaan		
	G-Bell	Triangle	Gaussian
Maximum <i>Overshoot</i> (%)	14,1	-	-
<i>Rise time</i> (s)	3,45	-	-
<i>Settling time</i> (s)	33	-	-
IAE	4,9242	-	-

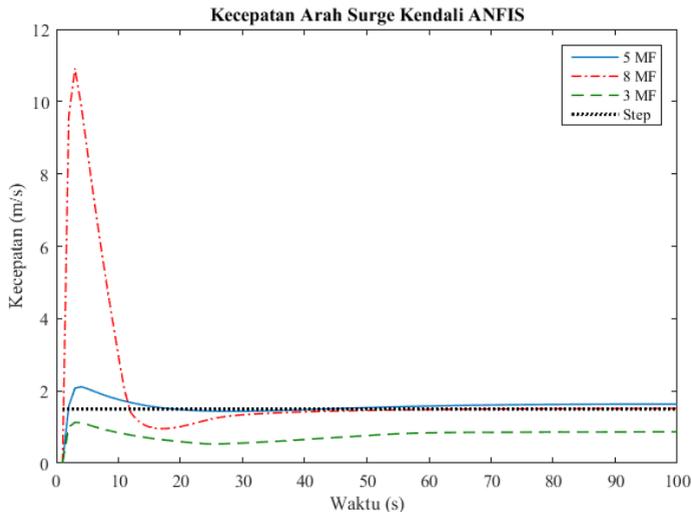


Gambar 4.3 Grafik respon perpindahan AUV kendali ANFIS pada sumbu Z dengan 3 tipe fungsi keanggotaan

4.1.2 Uji Jumlah Fungsi Keanggotaan

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan variabel manipulasi jumlah fungsi keanggotaan yaitu 3, 5 dan 8

variabel kontrolnya adalah jumlah epoch 500 dan tipe fungsi keanggotaan yaitu G-Bell.



Gambar 4.4 Grafik respon Kecepatan AUV pada arah surge kendali ANFIS dengan tipe G-Bell

Pada gambar 4.4 adalah respon kendali ANFIS terhadap kecepatan AUV pada arah gerak *Surge* dengan tipe fungsi keanggotaan G-Bell dan jumlah fungsi keanggotaan 3, 5 dan 8. *Setpoint* yang digunakan pada uji kecepatan arah *surge* adalah kecepatan AUV pada kondisi operasi normal yaitu 1,5 m/s. Dari kurva di atas terlihat bahwa pengendali ANFIS dengan 3 fungsi keanggotaan memiliki respon tidak dapat mencapai *setpoint* sampai pada detik ke 100. Sedangkan fungsi keanggotaan berjumlah 8 memiliki respon yang mencapai *setpoint* namun dengan *overshoot* yang sangat tinggi dan *settling* yang lebih lama dengan nilai RPM maksimum mencapai 4000 rpm sedangkan maksimum rpm pada propeller adalah 1525 rpm sehingga grafik kecepatan tersebut dinilai tidak mungkin dapat dicapai oleh aktuator. Fungsi keanggotaan berjumlah 5 memiliki respon

mencapai *setpoint* dengan *overshoot* lebih kecil dan *settling time* lebih cepat. Karakteristik respon dapat dilihat pada table 4.4.

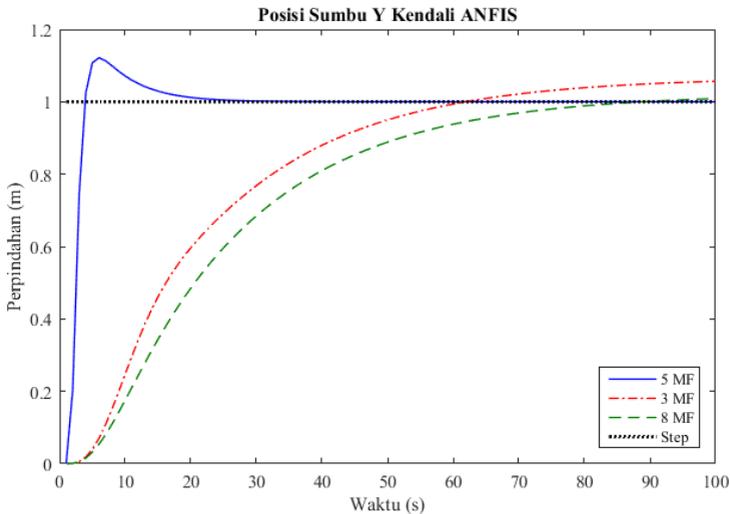
Tabel 4.4 karakteristik respon kecepatan surge kendali ANFIS 3 jumlah fungsi keanggotaan

Parameter (satuan)	Jumlah Fungsi Keanggotaan		
	3	5	8
Maximum <i>Overshoot</i> (%)	-	41	100+
<i>Rise time</i> (s)	-	2	1,205
<i>Settling time</i> (s)	-	-	47
IAE	62,143	12,858	73,483

Pada gambar 4.5 adalah respon kendali ANFIS terhadap perpindahan AUV pada sumbu Y dengan tipe fungsi keanggotaan G-Bell dan jumlah fungsi keanggotaan 3, 5 dan 8. *Setpoint* yang digunakan pada uji perpindahan terhadap sumbu Y adalah 1 m. Dari kurva di atas terlihat bahwa pengendali ANFIS dengan fungsi keanggotaan berjumlah 3 memiliki respon mencapai *setpoint* namun terus naik melebihi *setpoint* sampai pada detik ke 100. Sedangkan fungsi keanggotaan berjumlah 8 memiliki respon yang mencapai *setpoint* namun dengan *settling* yang lebih lama. Fungsi keanggotaan berjumlah 5 memiliki respon mencapai *setpoint* dengan *overshoot* lebih besar namun *settling time* lebih cepat. Karakteristik respon dapat dilihat pada table 4.5.

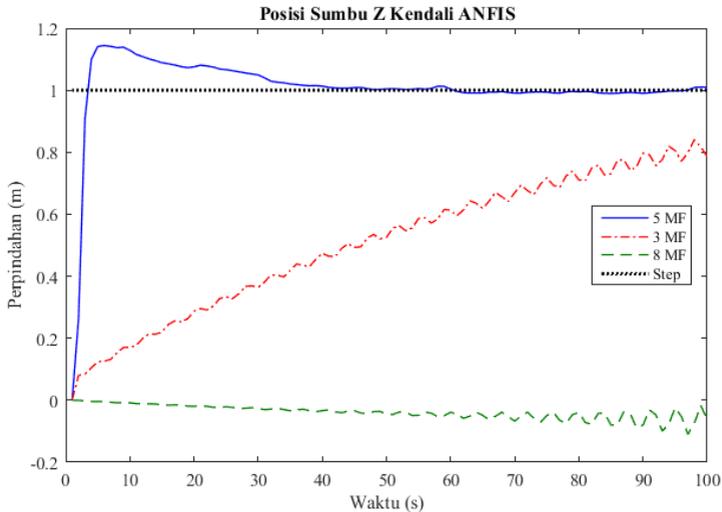
Tabel 4.5 karakteristik respon perpindahan pada sumbu Y kendali ANFIS 3 jumlah fungsi keanggotaan

Parameter (satuan)	Jumlah Fungsi Keanggotaan		
	3	5	8
Maximum <i>Overshoot</i> (%)	5,6	12,2	0,8
<i>Rise time</i> (s)	62	4	88
<i>Settling time</i> (s)	-	17	-
IAE	21,76	2,509	25,244



Gambar 4.5 Grafik respon Perpindahan AUV pada sumbu Y kendali ANFIS dengan tipe G-Bell dan 3 jumlah fungsi keanggotaan

Pada gambar 4.6 adalah respon kendali ANFIS terhadap perpindahan AUV pada sumbu Z dengan tipe fungsi keanggotaan G-Bell dan jumlah fungsi keanggotaan 3, 5 dan 8. *Setpoint* yang digunakan pada uji perpindahan terhadap sumbu Z adalah 1 m. Dari kurva di atas terlihat bahwa pengendali ANFIS dengan fungsi keanggotaan berjumlah 3 memiliki respon yang berhasil dan tetap terus naik menuju *setpoint* namun sangat lama untuk menuju *settling time*. Sedangkan fungsi keanggotaan berjumlah 8 memiliki respon yang sama berhasil namun tidak mencapai *setpoint* bahkan menjauhi *setpoint*. Fungsi keanggotaan berjumlah 5 memiliki respon mencapai *setpoint* dengan *overshoot* namun *settling time* lebih cepat. Karakteristik respon dapat dilihat pada table 4.6.



Gambar 4.6 Grafik respon Perpindahan AUV pada sumbu Z kendali ANFIS dengan tipe G-Bell

Tabel 4.6 karakteristik respon perpindahan pada sumbu Z kendali ANFIS 3 jumlah fungsi keanggotaan

Parameter (satuan)	Jumlah Fungsi Keanggotaan		
	3	5	8
Maximum <i>Overshoot</i> (%)	-	14,1	-
<i>Rise time</i> (s)	-	3,5	-
<i>Settling time</i> (s)	-	33	-
IAE	49,4263	4,9242	106,04

4.3 Respon sistem dengan kendali PID

Perancangan PID pada plant AUV menggunakan metode Ziegler Nichols karena kemudahan dalam penalaan. Penggunaan Ziegler Nichols tipe 2 membutuhkan respon yang berosilasi secara periodik sehingga didapatkan nilai K_{cr} dan P_{cr} . Nilai K_{cr} dan nilai P_{cr} serta nilai parameter K_p , K_i dan K_d setelah dilakukan perhitungan adalah sebagai berikut.

Tabel 4.7 Nilai parameter PID tuning Ziegler Nichols tipe 2

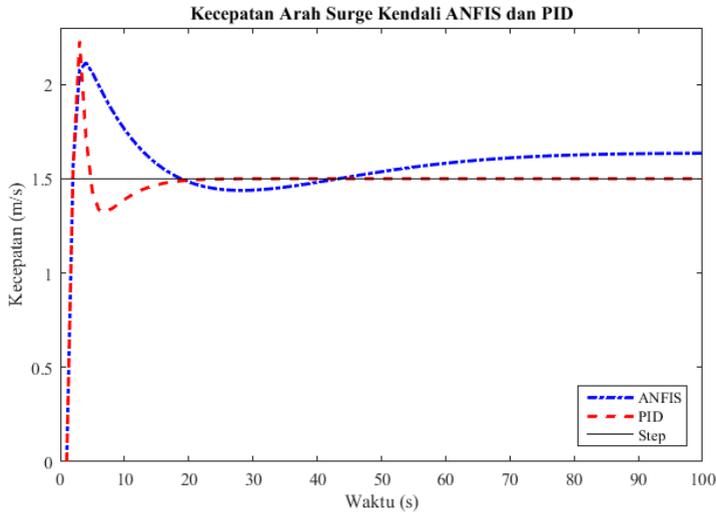
Close-loop	Kcr	Pcr	Kp	Ti	Td
<i>Surge</i>	138	0.407	82.8	0.4912	0.05899
<i>Pitch</i>	-104.6	1.12	-62.76	0.04675	0.14
<i>Yaw</i>	-33.995	11.208	-20.39	-	5.604

Uji respon kendali PID dilakukan pada masing-masing DOF dengan plot grafik berupa kecepatan arah *surge*, perpindahan posisi sumbu Y dan Z dengan *setpoint* kecepatan *surge* sebesar 1,5 m/s dan *setpoint* perpindahan posisi adalah 1 m. Hasil respon PID akan dibandingkan dengan hasil terbaik dari ANFIS yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya untuk menentukan respon terbaik antara kendali ANFIS dan kendali PID.

Gambar 4.7 Adalah respon kecepatan AUV pada arah *surge* dengan kendali PID dan ANFIS dimana parameter yang dipakai pada ANFIS adalah tipe fungsi keanggotaan G-Bell dan berjumlah 5. Didapatkan respon bahwa kendali PID memiliki *overshoot* sedikit lebih tinggi namun lebih cepat menuju *settling time* daripada ANFIS. Respon kendali ANFIS menunjukkan respon yang lebih *slow* namun sampai detik ke 100 respon melebihi *setpoint* yaitu 1,635 m/s yang artinya memiliki error 9% dari *setpoint*.

Tabel 4.8 karakteristik respon kecepatan surge kendali PID dan ANFIS

Parameter (satuan)	Jenis Kendali	
	PID	ANFIS
Maximum <i>Overshoot</i> (%)	48,6	41
<i>Rise time</i> (s)	2	2
<i>Settling time</i> (s)	19	-
IAE	3,70834	12,85828

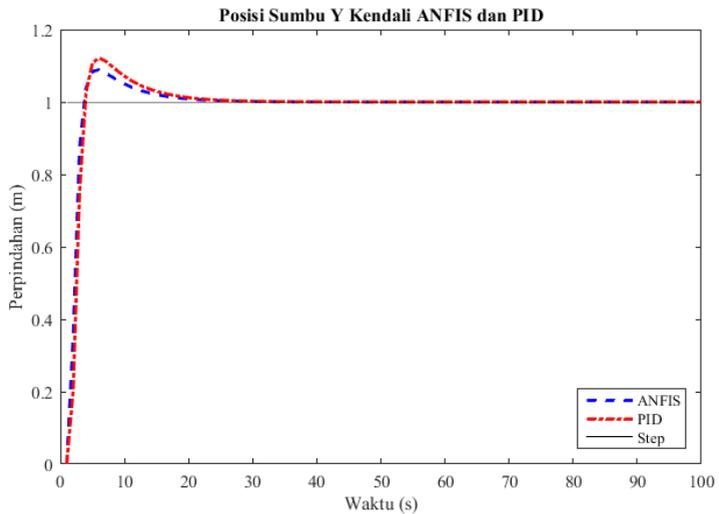


Gambar 4.7 Grafik respon kecepatan AUV arah surge dengan kendali PID dan ANFIS

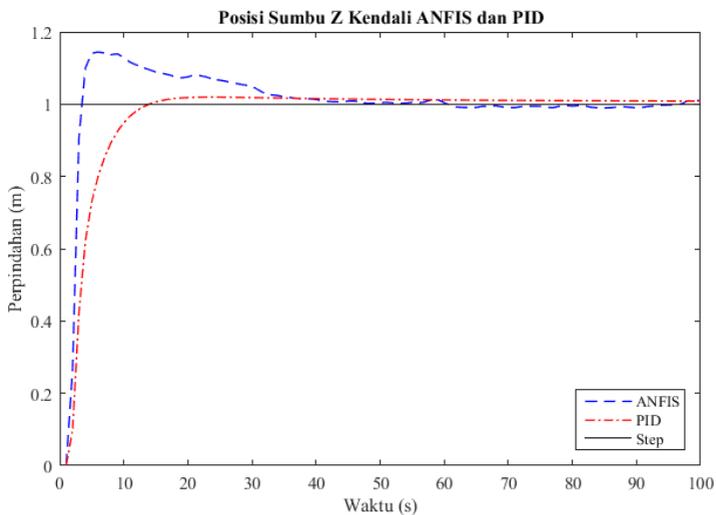
Gambar 4.8 Adalah respon perpindahan AUV pada sumbu Y dengan kendali PID dan ANFIS dimana parameter yang dipakai pada ANFIS adalah tipe fungsi keanggotaan G-Bell dan berjumlah 5. Didapatkan hasil yang tidak jauh berbeda antara kendali ANFIS dan PID, hanya saja selisih ada pada *overshoot* yang sangat kecil yaitu 0,033 m.

Tabel 4.9 karakteristik respon perpindahan AUV pada sumbu Y kendali PID dan ANFIS

Parameter (satuan)	Jenis Kendali	
	PID	ANFIS
Maximum <i>Overshoot</i> (%)	12,2	8,6
<i>Rise time</i> (s)	4	4
<i>Settling time</i> (s)	15	15
IAE	3,038416	2,509



Gambar 4.8 Grafik respon Perpindahan AUV pada sumbu Y dengan kendali PID dan ANFIS



Gambar 4.9 Grafik respon Perpindahan AUV pada sumbu Z dengan kendali PID dan ANFIS

Gambar 4.9 Adalah respon perpindahan AUV pada sumbu Y dengan kendali PID dan ANFIS dimana parameter yang dipakai pada ANFIS adalah tipe fungsi keanggotaan G-Bell dan berjumlah 5. Didapatkan hasil respon ANFIS memiliki *rise time* lebih cepat namun memiliki *overshoot* lebih tinggi sedangkan kendali PID memiliki *rise time* lebih lama namun hampir tidak memiliki *overshoot* sehingga menuju *settling time* lebih cepat.

Tabel 4.10 karakteristik respon perpindahan AUV pada sumbu Z kendali PID dan ANFIS

Parameter (satuan)	Jenis Kendali	
	PID	ANFIS
Maximum <i>Overshoot</i> (%)	1,9	14,1
<i>Rise time</i> (s)	14	3,5
<i>Settling time</i> (s)	14	33
IAE	4,882277	4,9242

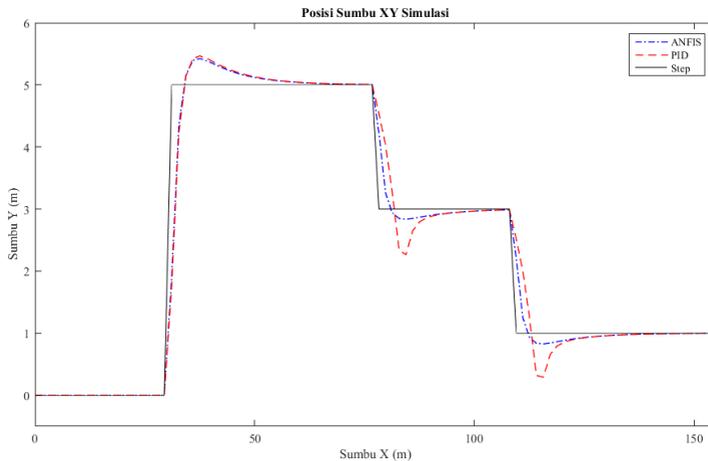
4.4 Hasil Simulasi Terhadap Sumbu Y dan Z

Simulasi pengendalian AUV terhadap arah *Yaw* dan *Pitch* yaitu pengendalian perpindahan AUV terhadap sumbu Y atau biasa disebut dengan gerak heading dan terhadap sumbu Z atau *diving/rising*. AUV disimulasikan pada sumbu Y yaitu bermanuver berbelok ke kiri sejauh 5 meter berbelok ke kanan sejauh 2 meter kemudian berbelok ke kanan lagi sejauh 2 meter. Sedangkan pada sumbu Z disimulasikan bergerak *diving* sejauh 5 meter kemudian *rising* sejauh 2 meter dan *rising* lagi sejauh 2 meter. Sistem pengendalian diberi input *setpoint* dalam bentuk step. Dari pengendalian tersebut didapatkan grafik respon AUV terhadap kecepatan pada arah *surge*, respon sudut elevasi AUV pada arah *yaw* dan *pitch* serta respon perpindahan AUV pada sumbu XY dan sumbu XZ. Grafik respon tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah.

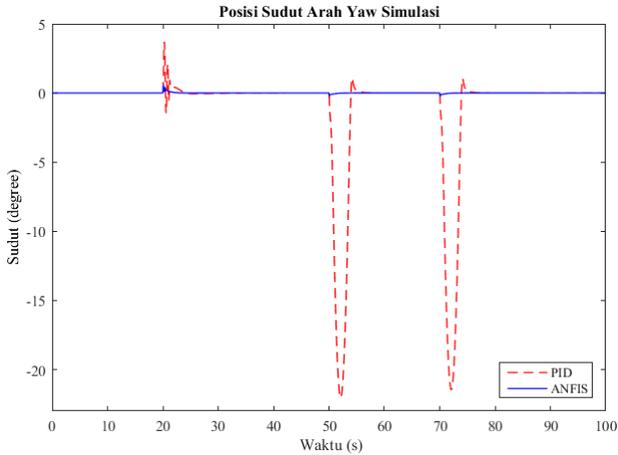
Pada gambar 4.10 Sampai 4.16 adalah respon penegndalian perpindahan AUV pada sumbu Y. Garis warna hitam merupakan simulasi *setpoint* pergerakan maneuver AUV sedangkan garis

warna merah adalah respon system dengan kendali PID dan garis warna biru dengan kendali ANFIS.

Dari gambar 4.10 tersebut didapatkan bahwa kendali PID dan ANFIS memiliki respon dengan *rise time* dan *settling time* tidak jauh beda namun perbedaan ada pada nilai *overshoot*. Ketika AUV dibelokkan ke kiri sejauh 5 meter sumbu Y kendali PID dan ANFIS mampu mencapai *setpoint* pada waktu yang bersamaan dengan pencapaian *overshoot* masing-masing 9,32% dan 8,4%. Selanjutnya AUV dibelokkan ke kiri sejauh 2 meter sumbu Y dalam waktu 20 detik kendali PID mampu mencapai *setpoint* pada jarak ke 81,7 meter dari titik awal sedangkan kendali ANFIS mampu mencapai dalam waktu 81,05 meter dari titik awal. Kemudian dibelokkan ke kiri lagi sejauh 2 meter sumbu Y dengan respon hamper sama dengan sebelumnya. Menunjukkan bahwa kendali ANFIS mampu lebih cepat dalam mencapai *setpoint* sekaligus memiliki *overshoot* lebih kecil daripada dengan kendali PID.



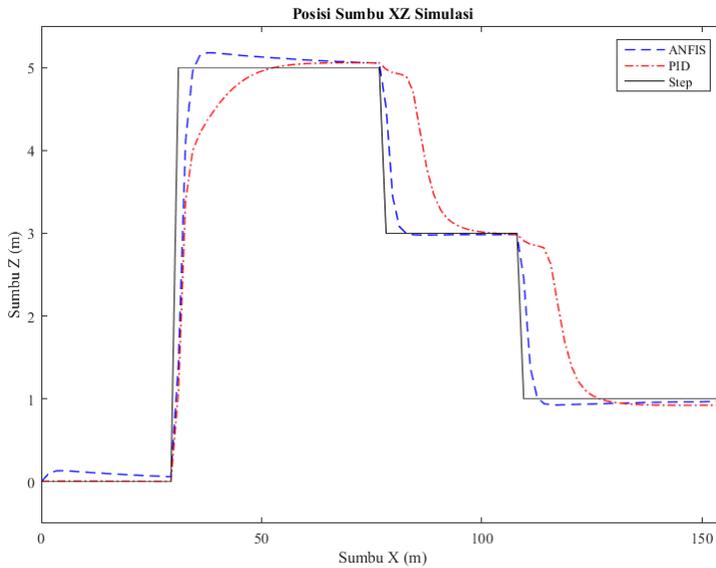
Gambar 4.10 Kurva respon AUV perpindahan terhadap sumbu Y



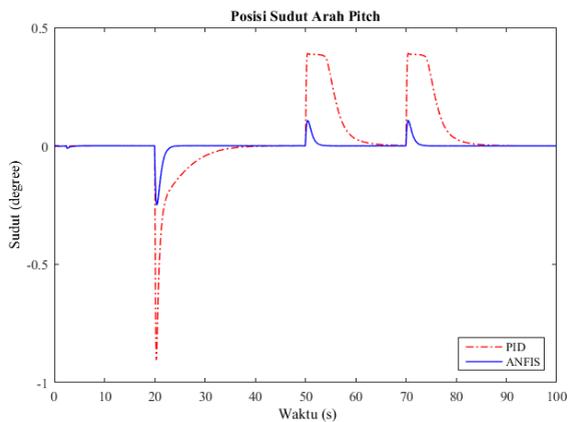
Gambar 4.11 Kurva respon sudut elevasi yang dibentuk AUV selama simulasi terhadap sumbu Y

Dari penjelasan mengenai gambar 4.10 Didukung pula oleh grafik pada gambar 4.11 Yang menunjukkan respon posisi sudut AUV pada saat dibelokkan terhadap waktu. Didapatkan ketika menggunakan kendali PID rentang pembelokan sudut yang dibentuk mencapai 20° sedangkan ketika menggunakan kendali ANFIS sudut yang dibentuk maksimal $0,5^\circ$.

Gambar 4.12 Menunjukkan respon kendali PID dan kendali ANFIS pada saat dilakukan simulasi dimana respon kendali ANFIS berwarna biru dan kendali PID berwarna merah. Terlihat kendali ANFIS memiliki *rise time* yang lebih cepat dibanding kendali PID namun dengan *overshoot* yang tinggi juga. Pada 20 detik pertama AUV bermanuver ke bawah sejauh 5 meter dengan respon kendali PID mencapai *setpoint* pada jarak 51,57 meter dari titik awal sedangkan kendali ANFIS mampu mencapai 34,38 meter dari titik awal. Pada rising selanjutnya yaitu sejauh 2 meter sebanyak 2 kali, kendali PID dan kendali ANFIS memiliki respon hamper sama seperti sebelumnya namun perbedaannya adalah respon kendali ANFIS tidak memiliki *overshoot* pada saat bermanuver secara *rising*.



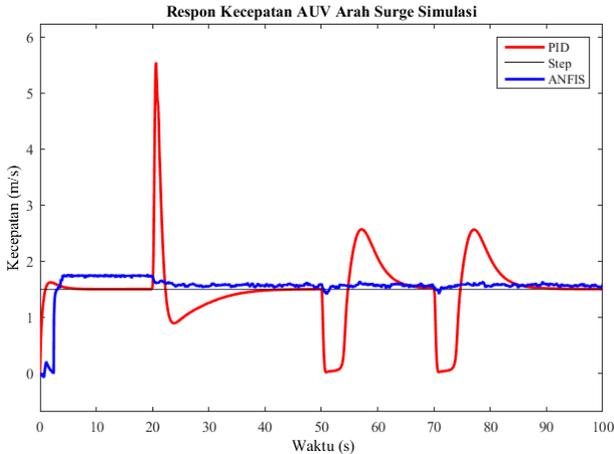
Gambar 4.12 Kurva respon AUV perpindahan terhadap sumbu Z



Gambar 4.13 Kurva respon sudut elevasi yang dibentuk AUV selama simulasi terhadap sumbu Z

Dari penjelasan mengenai gambar 4.12 Didukung pula oleh grafik pada gambar 4.13 Yang menunjukkan respon posisi sudut

AUV pada saat bermanuver terhadap waktu. Didapatkan ketika menggunakan kendali PID rentang pembelokan sudut yang dibentuk mencapai 0.9° sedangkan ketika menggunakan kendali ANFIS sudut yang dibentuk maksimal $0,24^\circ$.



Gambar 4.14 Kurva kecepatan arah surge AUV selama simulasi

Gambar 4.14 menunjukkan grafik kecepatan AUV arah *surge* dengan pengendali PID (warna merah) dan pengendali ANFIS (warna biru). Pengendali PID menunjukkan perubahan kecepatan secara drastis pada saat AUV bermanuver dan kembali ke kecepatan *setpoint* saat AUV sudah mencapai *setpoint* pada sumbu tersebut. Berbeda dengan kendali ANFIS, memiliki osilasi yang terus menerus sampai pada akhir detik ke 100, dengan nilai yang tidak tepat pada titik *setpoint* tapi tetap mendekati nilai *setpoint*. Nilai IAE dari kedua respon tersebut menunjukkan kendali PID memiliki nilai sebesar 33,263 sedangkan kendali ANFIS memiliki nilai sebesar 14,385. Kendali ANFIS menunjukkan *overshoot* yang minimal pada saat AUV bermanuver daripada kendali PID.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapatkan dari perancangan pengendali PID dan prediktor ANFIS sebagai pengendali AUV Remus:

- a. Nilai parameter ANFIS yakni dengan pengambilan data untuk dilatih sebanyak 1000 data atau per 0,1 detik pengambilan data dengan nilai epoch sebanyak 500 dan memiliki jumlah 5 fungsi keanggotaan dengan tipe G-Bell pada masing-masing blok pengendalian.
- b. Perbandingan hasil respon antara kendali PID dan ANFIS memiliki hasil bahwa kendali ANFIS memiliki respon lebih stabil daripada kendali PID terbukti dengan minimnya *overshoot*, waktu respon menuju *settling time* serta nilai IAE yang lebih kecil.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya antara lain :

Sebaiknya penelitian mengenai *Autonomous Underwater Vehicle* lebih dikembangkan dengan metode ANFIS dengan system multi input dan multi output (MIMO). Selain itu perlu dikembangkan penelitian mengenai pengendalian AUV terhadap 6 DOF.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Alifia, F. A., Triwiyatno, A., & Wahyudi. (2012). Desain Sistem Kontrol Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (Anfis) Studi Kasus : Pengontrolan Ketinggian Air Dan Temperatur Uap Steam Drum Boiler, 1–8.
- 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>
- Amir, A. (2010). Estimasi Parameter Servomotor DC Menggunakan Proses Optimasi.
- Craven, P. J., & Sutton, R. (1998). A neural network based fuzzy autopilot design for an autonomous underwater vehicle. *Intelligent Autonomous Vechicles 1998 (Iav'98)*, 31(3), 569–574. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)44146-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)44146-2)
- Edward V Lewis. (1988). *Principle of Naval Architecture Second Revision* (Vol. III).
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. <https://doi.org/10.1002/9781119994138>
- Gonzalez, L. A. LA. (2004). Design , Modelling and Control of an Autonomous Underwater Vehicle. *BE Thesis, The University of Western Australia*, 156. Retrieved from <http://www.mendeley.com/research/design-modelling-control-autonomous-underwater-vehicle-associate-professor-thomas-br-aunl/%5Cnhttp://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.85.6699&rep=rep1&type=pdf>
- Husaini, M., Samad, Z., & Arshad, M. R. (2004). Autonomous Underwater Vehicle Propeller Simulation using Computational Fluid Dynamic.

- Industri, F. T. (2015). MENENTUKAN PRODUKTIVITAS PANEN SAYURAN KUBIS PUTIH (*Brassica oleracea* var . *capitata*) DI KARANGPLOSODESIGN OF WEATHER PREDICTION SYSTEM WITH ANFIS METHOD TO DETERMINE THE CROP HARVEST PRODUCTIVITY OF WHITE.
- Junyao, F., Wenping, X., & Guohai, L. (2017). Vibration control for vehicle active suspension based on ANFIS method. *Chinese Control Conference, CCC*, 9602–9606. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2017.8028889>
- Khodayari, M. H., & Balochian, S. (2015). Modeling and control of autonomous underwater vehicle (AUV) in heading and depth attitude via self-adaptive fuzzy PID controller. *Journal of Marine Science and Technology (Japan)*, 20(3), 559–578. <https://doi.org/10.1007/s00773-015-0312-7>
- Kinasih, S., Nhita, F., Komputasi, I., Informatika, F., & Telkom, U. (2015). PREDIKSI CURAH HUJAN MENGGUNAKAN ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYTEM (ANFIS), 2(1), 1860–1873.
- Liang, X., Pang, Y., Wan, L., & Wang, B. (2008). Dynamic Modelling and Motion Control for Underwater Vehicles with Fins. *Underwater Vehicles*, (December). Retrieved from http://cdn.intechopen.com/pdfs/6230/InTech-Dynamic_modelling_and_motion_control_for_underwater_vehicles_with_fins.pdf
- Liu, F., Wang, H. U. A., Shi, Q., Wang, H., Zhang, M., & Zhao, H. (2017). Comparison of an ANFIS and Fuzzy PID Control Model for Performance in a Two-Axis Inertial Stabilized Platform, 5, 12951–12962.
- Milgram, J., Alt, C. Von, & Prester, T. (2001). Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle by in partial fulfillment of the requirements for the degrees of and at the Chairperson ,

Committee on Graduate Students Verification of a Six-Degree of F.

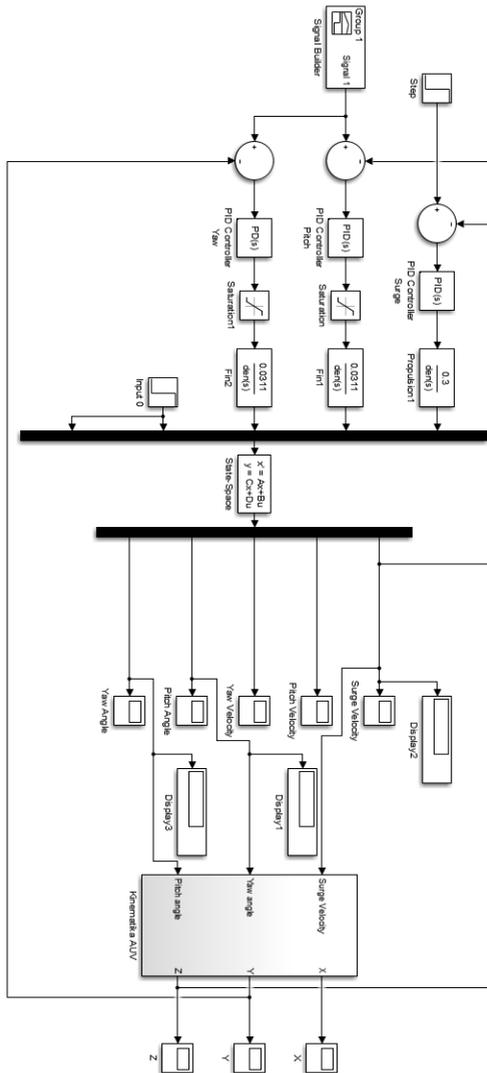
- Ningsih, W., Subchan, & Nurhadi, H. (2016). Design and analysis of motion control system in the fin and the propulsion system of the Autonomous Underwater Vehicle (AUV) using Cross Coupled Control. *ICAMIMIA 2015 - International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation, Proceeding - In Conjunction with Industrial Mechatronics and Automation Exhibition, IMAE, 2015(Icamimia)*, 137–142. <https://doi.org/10.1109/ICAMIMIA.2015.7508018>
- Piñeiro, a. L., Arribas, F. P., & R. Donoso Morillo-V., R. T. F. (2004). *Automation for the Maritime Industries Automation for the Maritime Industries*. Retrieved from http://digital.csic.es/bitstream/10261/2906/1/Maritime_Industries.pdf
- Shi, X., Chen, J., Yan, Z., Li, T., & Auv, A. R. (2010). Design of AUV Height Control Based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, 1646–1651.
- Stenson, L. V., Turnock, S. R., Phillips, A. B., Harris, C., Furlong, M. E., Rogers, E., ... Evans, D. W. (2014). Model predictive control of a hybrid autonomous underwater vehicle with experimental verification. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 228(2), 166–179. <https://doi.org/10.1177/1475090213506185>
- Sutton, R., & Craven, P. J. (1998). The ANFIS approach applied to AUV autopilot design. *Neural Computing and Applications*, 7(2), 131–140. <https://doi.org/10.1007/BF01414165>
- Vervoort, J. H. A. M. (2009). Modeling and Control of an Unmanned Underwater Vehicle. *Master Traineeship Report*, 5–15. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2017.0019>
- Wahyunggoro, O. (n.d.). Simulasi Aplikasi Anfis (Adaptive

Neuro-Fuzzy Inference System) Tiruan Pid Pada Pengendalian Tinggi Permukaan Air, 1–6.

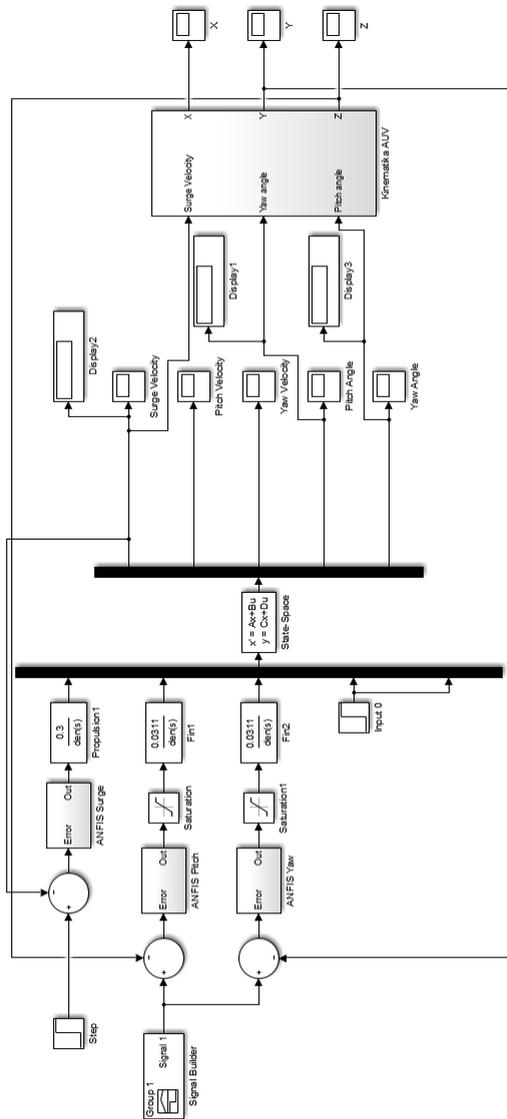
Whicker, L. F. (1958). Free-Stream Characteristics A Family of Low-Aspect-Ratio, All-Movable Control Surfaces for Application to Ship Design, (December).

Yang, C. (2007). MODULAR MODELING AND CONTROL FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV), 93.

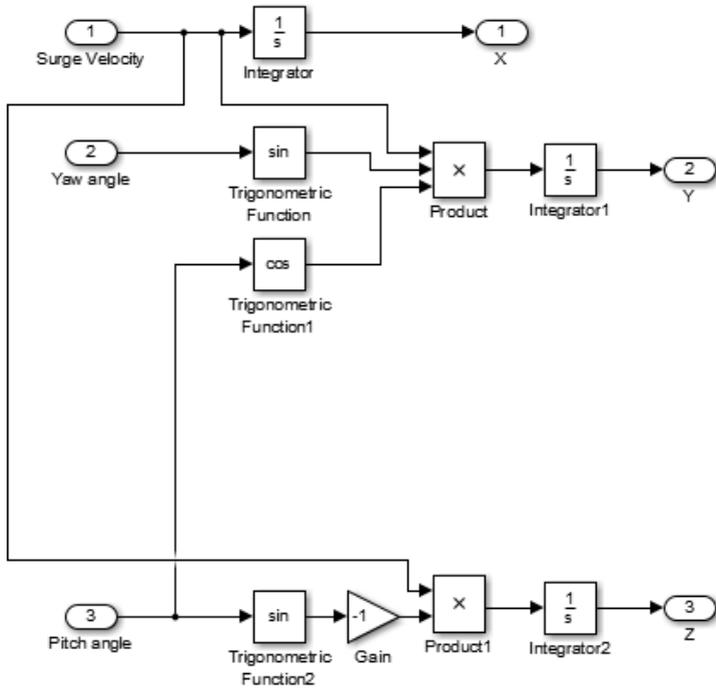
LAMPIRAN



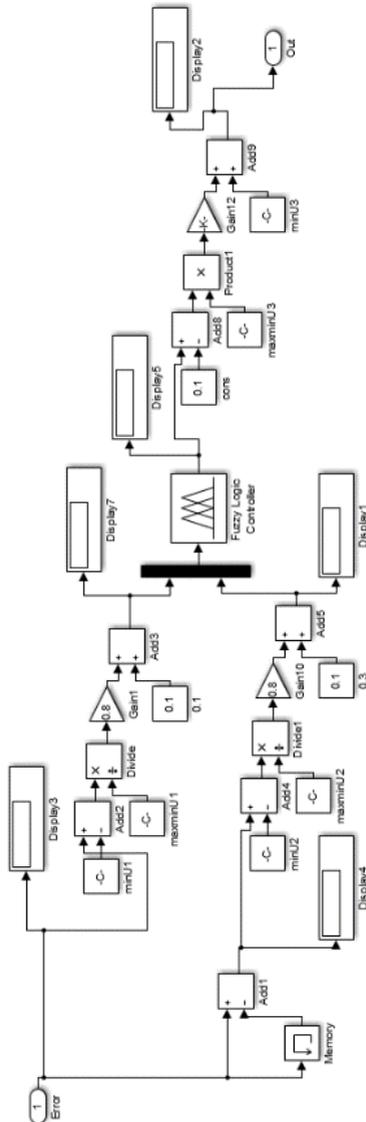
Gambar Diagram SIMULINK kendali PID



Gambar Diagram SIMULINK kendali ANFIS



Gambar Diagram SIMULINK persamaan kinematika AUV



Gambar Diagram SIMULINK normalisasi dan denormalisasi untuk kendali ANFIS

BIODATA PENULIS

Penulis Lahir di Gresik, Jawa Timur pada tanggal 4 Agustus 1996.



Tamat MINU Tratee Putera Gresik (2008), SMPN 1 Gresik (2011), SMAN 1 Gresik (2014). Setelah tamat SMA penulis melanjutkan studinya di Teknik Fisika ITS. Bidang minat yang diambil penulis pada saat menempuh perkuliahan adalah bidang Instrumentasi dan kontrol. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif sebagai asisten Laboratorium Instrumentasi dan control (LARINS). Pada tahun 2017, karya yang dihasilkan oleh penulis mengenai penelitian

DSSC dan Pengabdian Masyarakat di Pulau Gili Gending, Sumenep. Pengabdian Masyarakat yang dilakukan adalah mengusulkan panel surya untuk penerangan ekowisata di Pantai Sembilan dengan inovasi pendinginan otomatis untuk menjaga PV agar bertahan lama. Pada tahun 2017, penulis melakukan *internship* di PT Pertamina RU IV (Persero) di Cilacap. Laporan yang dihasilkan adalah mempelajari alur pembangkitan dan penonaktifan *Boiler* menggunakan PLC teknologi mutakhir. Selain aktif dalam kegiatan penelitian dan proyek, penulis juga aktif pada bidang organisasi kemahasiswaan, yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika (HMTF ITS) pada pelaksanaan kegiatan terbesar yaitu Engineering Physics Week. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email mthorIQazmi@gmail.com.