



TUGAS AKHIR - TF 181801

PERANCANGAN SISTEM *TRAJECTORY GUIDANCE* PADA KAPAL  
BERBASIS *TYPE-2 FUZZY PID* BERDASARKAN PERUBAHAN  
DINAMIKA KAPAL AKIBAT GANGGUAN KONDISI LINGKUNGAN

DIAN PERMANA

NRP. 02311840000076

Dosen Pembimbing:

Prof. Dr. Ir. AULIA SITI AISJAH, M.T.

Dr. Ir. A. A. MASROERI, M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2022

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - TF 181801**

***DESIGN OF TRAJECTORY GUIDANCE SYSTEM ON SHIP BASED ON TYPE-2 FUZZY PID DUE TO CHANGES IN SHIP DYNAMICS AS THE IMPACT ENVIRONMENTAL DISTURBANCES***

DIAN PERMANA  
NRP. 02311840000076

Supervisors:  
Prof. Dr. Ir. AULIA SITI AISJAH, M.T.  
Ir. A. A. MASROERI, M.Eng. D.Eng.

*Department Of Engineering Physics  
Faculty of Industrial Technology and System Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Dian Permana  
NRP : 0231184000076  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “**PERANCANGAN SISTEM *TRAJECTORY GUIDANCE* PADA KAPAL BERBASIS *TYPE-2 FUZZY PID* BERDASARKAN PERUBAHAN DINAMIKA KAPAL AKIBAT GANGGUAN KONDISI LINGKUNGAN**” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 13 Juli 2022

Yang membuat pernyataan,



Dian Permana

NRP. 0231184000076

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN SISTEM *TRAJECTORY GUIDANCE* PADA KAPAL  
BERBASIS *TYPE-2 FUZZY PID* BERDASARKAN PERUBAHAN  
DINAMIKA KAPAL AKIBAT GANGGUAN KONDISI LINGKUNGAN**

**Oleh:**

**Dian Permana**

**NRP. 02311840000076**

**Surabaya,**

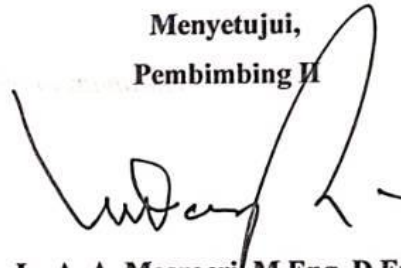
**Menyetujui,  
Pembimbing I**



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

**NIP. 19660116 198903 2 001**

**Menyetujui,  
Pembimbing II**



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

**NIP. 19580807 198403 1 004**

**Mengetahui,**

**Kepala Departemen  
Teknik Fisika FTIRS – ITS**



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

**NIP. 19711113 19512 1 002**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## LEMBAR PENGESAHAN

### PERANCANGAN SISTEM *TRAJECTORY GUIDANCE* PADA KAPAL BERBASIS *TYPE-2 FUZZY PID* BERDASARKAN PERUBAHAN DINAMIKA KAPAL AKIBAT GANGGUAN KONDISI LINGKUNGAN

#### TUGAS AKHIR

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


Oleh:

**DIAN PERMANA**

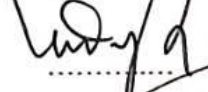
**NRP. 0231184000076**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

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

  
..... (Pembimbing I)

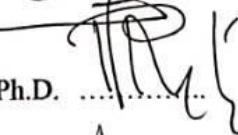
2. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng., D.Eng.

  
..... (Pembimbing II)

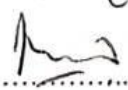
3. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.

  
..... (Ketua Penguji)

4. Prof. Totok Ruki Biyanto S.T., M.T., Ph.D.

  
..... (Penguji I)

5. Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc.

  
..... (Penguji II)

**SURABAYA**

**2022**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* (FTC) PADA  
*REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* DENGAN  
MOTOR BLDC UNTUK APLIKASI MOBIL LISTRIK  
DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR**

**Nama** : Dian Permana  
**NRP** : 0231184000076  
**Departemen** : Teknik Fisika FTIRS – ITS  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.  
Ir. A. A. Masroeri, M.Eng., D.Eng.

**ABSTRAK**

Sistem kemudi kapal memiliki peranan penting agar kapal dapat sampai ke tempat tujuan. Penelitian ini mengusulkan rancangan sistem kemudi kapal sebagai *trajectory guidance*. Sistem kendali dirancang menggunakan pengendali *Type-2 Fuzzy PID (T2FPID)*. Sistem ini bekerja dengan pengendali *Type-2 Fuzzy* yang dapat menentukan nilai parameter pengendalian PID yaitu  $K_p$ ,  $T_i$ , dan  $T_d$  yang sesuai dengan kondisi kapal pada saat di lautan. Perancangan sistem kendali dengan obyek kapal *Ferry Ro-Ro*, untuk melalui lintasan antara pelabuhan Ketapang Gilimanuk. Perancangan dilakukan dengan simulasi komputer. Pengujian hasil rancangan dilakukan saat ada gangguan. Gangguan yang digunakan berupa arus laut sebesar 0, 3, dan 7 knot serta gelombang laut setinggi 1 m dan 2 m. Hasil uji menunjukkan kriteria yang memenuhi standar IMO sistem kemudi sudah sesuai dengan standar *International Maritime Organization* (IMO), yaitu besarnya overshoot tidak melebihi  $25^\circ$ . Hasil simulasi saat *trajectory guidance* pada semua lintasan dengan gangguan yang sudah ditetapkan memiliki nilai *error* pada masing-masing lintasan yang masih berada dalam rentang nilai *permitted radius* kapal.

**Kata Kunci:** *Type-2 Fuzzy PID (T2FPID)*, *Trajectory Guidance*, Sistem Kemudi Kapal

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

***DESIGN OF TRAJECTORY GUIDANCE SYSTEM ON SHIP  
BASED ON TYPE-2 FUZZY PID DUE TO CHANGES IN SHIP  
DYNAMICS AS THE IMPACT ENVIRONMENTAL  
DISTURBANCES***

***Name*** : Dian Permana  
***NRP*** : 0231184000076  
***Department*** : Engineering Physics FTIRS – ITS  
***Supervisors*** : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.  
Ir. A. A. Masroeri, M.Eng., D.Eng.

**ABSTRACT**

*The ship's steering system has a vital role. This study proposes the ship's steering system design as trajectory guidance using a control system with a Type-2 Fuzzy PID controller (T2FPID). This system works with a Type-2 Fuzzy controller that can determine the value of the PID control parameters, namely  $K_p$ ,  $T_i$ , and  $T_d$ , according to the ship's condition at sea. Design a control system with the object of the Ferry Ro-Ro ship to pass through the trajectory between the Ketapang Gilimanuk port. The design control uses computer simulation. Testing of the design results gets when there is a disturbance. The disturbances are ocean currents of 0, 3, and 7 knots and sea waves as high as 1 m and 2 m. The test results show the criteria that meet the IMO standard, and the steering system is by the International Maritime Organization (IMO) standard. The amount of overshoot does not exceed 25%. The results of trajectory guidance on all trajectories with a predetermined disturbance have an error value on each trajectory that is still within the range of the ship's permitted radius value.*

***Keywords:*** *Type-2 Fuzzy PID (T2FPID). Trajectory Guidance, ship steering system*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji serta syukur semoga selalu tercurahkan kepada Allah SWT, kaena atas rahmat dan hidayahnya, sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Perancangan Sistem *Trajectory Guidance* Pada Kapal Berbasis *Type-2 Fuzzy PID* Berdasarkan Perubahan Dinamika Kapal Akibat Gangguan Kondisi Lingkungan”**. Saya mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang membantu dalam penyusunan tugas akhir. Khususnya kepada:

1. Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS yang bertanggung jawab atas pelaksanaan kegiatan tugas akhir.
2. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. dan Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng. D.Eng. selaku pembimbing yang telah membimbing dalam pengerjaan Tugas Akhir.
3. Bapak dan Ibu dosen serta staff tata usaha Teknik Fisika yang telah membantu penulis selama masa perkuliahan.
4. Kedua Orang Tua yang selalu membantu dan memberikan doa kepada penulis.
5. Pihak Warung Energi yang telah memberikan keluangan waktu untuk mengerjakan tugas akhir selama magang.

Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Penulis menyadari masih terdapat kekurangan dalam penulisan tugas akhir ini sehingga diperlukan saran dan masukan bersifat membangun. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 13 Juli 2022

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI .....	v
LEMBAR PENGESAHAN .....	vii
LEMBAR PENGESAHAN .....	ix
ABSTRAK .....	xi
ABSTRACT .....	xiii
KATA PENGANTAR .....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR .....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
DAFTAR NOTASI.....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka .....	5
2.2 Sistem Logika <i>Fuzzy</i> .....	7
2.3 <i>Fuzzy Inference System (FIS)</i> .....	8
2.4 <i>Fuzzy Tipe 2</i> .....	9
2.5 <i>Type-2 Fuzzy PID</i> .....	10
2.6 Pemodelan Dinamika Kapal .....	11
2.7 Pemodelan Propeller Kapal .....	14
2.8 Pemodelan Rudder Kapal .....	15
2.9 Penentuan Sistem Pemanduan .....	16
2.10 Pemodelan Gangguan Lingkungan.....	16

2.11	<i>Tuning Parameter PID</i> .....	19
2.12	Standar <i>International Maritime Organization (IMO)</i> .....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....		21
3.1	Studi literatur .....	21
3.2	Pengambilan Data Lintasan Kapal .....	22
3.3	Pengambilan Data Data Gangguan .....	25
3.4	Pengambilan Data Spesifikasi Kapal .....	25
3.5	Pemodelan Propeller Kapal .....	26
3.6	Pemodelan Rudder Kapal .....	26
3.7	Pemodelan Dinamika Kapal .....	27
3.8	Pemodelan Kapal dengan gangguan .....	29
3.9	Perancangan Sistem <i>Trajectory Guidance</i> dengan Gangguan .....	30
3.10	Pengujian Sistem .....	41
3.11	Analisis Performansi Sistem .....	42
3.12	Penyusunan Laporan .....	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....		43
4.1	Spesifikasi Hasil Rancangan .....	43
4.2	Analisis Sistem Pengendali Propeller .....	44
4.3	Sistem Pengendali Rudder .....	46
4.4	Analisis <i>Trajectory</i> Kapal .....	51
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		63
5.1	Kesimpulan .....	63
5.2	Saran .....	63
DAFTAR PUSTAKA .....		65
LAMPIRAN .....		69
BIODATA PENULIS .....		77

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Struktur sistem <i>fuzzy</i> .....	7
<b>Gambar 2.2</b> <i>Fuzzy Set</i> tipe 2 .....	9
<b>Gambar 2.3</b> Blok diagram Kontrol logika <i>fuzzy</i> tipe 2.....	10
<b>Gambar 2.4</b> Struktur kontrol <i>Type-2 Fuzzy PID</i> (T2FPID) .....	11
<b>Gambar 2.5</b> <i>Six-degree-of-freedom (6DOF) ship motion</i> .....	11
<b>Gambar 2.6</b> Blok diagram Rudder kapal .....	15
<b>Gambar 2.7</b> Konsep Pemanduan Kapal .....	16
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Metodologi Penelitian .....	21
<b>Gambar 3.2</b> Lintasan Kapal .....	22
<b>Gambar 3.3</b> Blok Diagram pemodelan sistem Rudder Kapal .....	27
<b>Gambar 3.4</b> Diagram Blok Sistem Pengendalian .....	32
<b>Gambar 3.5</b> Blok pengendali kecepatan .....	33
<b>Gambar 3.6</b> Fungsi keanggotaan variabel <i>input error heading</i> ( $e$ ) .....	34
<b>Gambar 3.7</b> Fungsi keanggotaan variabel <i>input jarak kapal</i> ( $s$ ) .....	34
<b>Gambar 3.8</b> Fungsi keanggotaan variabel <i>output "U"</i> .....	34
<b>Gambar 3.9</b> Blok Sistem pengendali <i>type 2 fuzzy untuk scaling factor</i> .....	36
<b>Gambar 3.10</b> Fungsi keanggotaan variabel <i>Input "e"</i> .....	36
<b>Gambar 3.11</b> Fungsi keanggotaan variabel " $\Delta e$ " .....	36
<b>Gambar 3.12</b> Fungsi keanggotaan variabel <i>Output "A"</i> .....	37
<b>Gambar 3.13</b> Fungsi keanggotaan variabel <i>Output "B"</i> .....	37
<b>Gambar 3.14</b> Blok <i>Fuzzy</i> Untuk Variabel $K_p'$ dan $K_d'$ .....	39
<b>Gambar 3.15</b> Fungsi keanggotaan variabel output $K_p'$ .....	39
<b>Gambar 3.16</b> Fungsi keanggotaan variabel output $K_d'$ .....	39
<b>Gambar 3.17</b> Fungsi keanggotaan variabel output $\alpha$ .....	40
<b>Gambar 4.1</b> Respon Sistem pengendali Propeller .....	46
<b>Gambar 4.2</b> Respon Sistem Uji Open loop .....	47
<b>Gambar 4.3</b> Hasil Respon Sistem Stabil Kritis .....	48
<b>Gambar 4.4</b> Respon Sistem pengendali Rudder .....	50
<b>Gambar 4.5</b> Respon Parameter $K_p$ $K_d$ $K_i$ .....	51

<b>Gambar 4.6</b> <i>Trajectory Guidance</i> Lintasan A .....	52
<b>Gambar 4.7</b> <i>Trajectory Guidance</i> Lintasan B (H=1 m) .....	53
<b>Gambar 4.8</b> <i>Trajectory Guidance</i> Lintasan B (H=2 m) .....	55
<b>Gambar 4.9</b> <i>Trajectory Guidance</i> Lintasan C (H=1 m) .....	57
<b>Gambar 4.10</b> <i>Trajectory Guidance</i> Lintasan C (H=2 m) .....	58
<b>Gambar 4.11</b> <i>Trajectory Guidance</i> Lintasan B-C (H=1 m) .....	60

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Notasi yang Digunakan pada dinamika transportasi laut .....	12
<b>Tabel 2.2</b> Variabel normalisasi pada <i>Prime-System I</i> .....	14
<b>Tabel 2.3</b> Standar IMO .....	20
<b>Tabel 3.1</b> Titik Koordinat Lintasan A .....	23
<b>Tabel 3.2</b> Titik Koordinat Lintasan B .....	24
<b>Tabel 3.3</b> Titik Koordinat Lintasan C .....	25
<b>Tabel 3.4</b> Data Spesifikasi Kapal <i>Ferry Ro Ro</i> .....	26
<b>Tabel 3.5</b> Data Spesifikasi Kapal <i>Nondimensional</i> .....	27
<b>Tabel 3.6</b> Koefisien Hidrodinamika <i>ferry ro-ro</i> .....	28
<b>Tabel 3.7</b> <i>Rule base</i> Sistem <i>Fuzzy</i> Kecepatan .....	35
<b>Tabel 3.8</b> <i>Rule Base</i> Sistem <i>Fuzzy</i> Faktor Penyekala <i>output A</i> .....	38
<b>Tabel 3.9</b> <i>Rule Base</i> Sistem <i>Fuzzy</i> Faktor Penyekala <i>output B</i> .....	38
<b>Tabel 3.10</b> <i>Rule Base</i> Untuk Variabel <i>Output K<sub>p</sub>'</i> .....	40
<b>Tabel 3.11</b> <i>Rule Base</i> Untuk Variabel <i>Output K<sub>d</sub>'</i> .....	41
<b>Tabel 3.12</b> <i>Rule Base</i> Untuk Variabel <i>Output Alfa</i> .....	41
<b>Tabel 4.1</b> Skenario pemilihan jenis fungsi keanggotaan pengendali propeller ....	45
<b>Tabel 4.2</b> Skenario pemilihan <i>FoU</i> pada pengendali propeller .....	45
<b>Tabel 4.3</b> Skenario pemilihan parameter pengendali Rudder .....	49
<b>Tabel 4.4</b> Analisis <i>Trajectory Guidance</i> Lintasan A.....	52
<b>Tabel 4.5</b> Analisis <i>Trajectory Guidance</i> Lintasan B (H=1 m) .....	54
<b>Tabel 4.6</b> Analisis <i>Trajectory Guidance</i> Lintasan B (H=2 m) .....	56
<b>Tabel 4.7</b> Analisis <i>Trajectory Guidance</i> Lintasan C (H=1 m) .....	57
<b>Tabel 4.8</b> Analisis <i>Trajectory Guidance</i> Lintasan C (H=2 m) .....	59
<b>Tabel 4.9</b> Analisis <i>Trajectory Guidance</i> Lintasan B-C (H=1 m) .....	60

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR NOTASI

$\eta$	=	vektor orientasi arah
$x$	=	posisi surge (m)
$y$	=	posisi sway (m)
$z$	=	posisi heave (m)
$\phi$	=	sudut roll (deg)
$\theta$	=	sudut pitch (deg)
$\psi$	=	sudut yaw (deg)
$\psi_L$	=	sudut yaw frekuensi rendah (deg)
$\psi_H$	=	sudut yaw frekuensi tinggi (deg)
$u$	=	kecepatan surge (m/s)
$v$	=	kecepatan sway (m/s)
$w$	=	kecepatan heave (m/s)
$p$	=	kecepatan roll (deg/s)
$q$	=	kecepatan pitch (deg/s)
$r$	=	kecepatan yaw (deg/s)
$\dot{u}$	=	percepatan surge (m/s <sup>2</sup> )
$\dot{v}$	=	percepatan sway (m/s <sup>2</sup> )
$\dot{r}$	=	percepatan yaw (deg/s <sup>2</sup> )
$X$	=	gaya surge (N)
$Y$	=	gaya sway (N)
$Z$	=	gaya heave (N)
$N$	=	momen yaw (Nm)
$M$	=	matriks inersia
$D$	=	matriks redaman
$m$	=	massa kapal
$X\dot{u}$	=	turunan gaya arah surge terhadap $u$ (Ndet <sup>2</sup> /m)
$Y\dot{v}$	=	turunan gaya arah sway terhadap $v$ (Ndet <sup>2</sup> /m)
$N\dot{r}$	=	turunan momen yaw terhadap $r$ (Ndet <sup>2</sup> )

$Xu$	=	turunan gaya arah surge terhadap $u$ (Ndet/m)
$Yv$	=	turunan gaya arah sway terhadap $v$ (Ndet/m)
$Yr$	=	turunan momen sway terhadap $r$ (N/det)
$Nv$	=	turunan momen yaw terhadap $v$ (N/det)
$Nr$	=	turunan momen yaw terhadap $v$ (Ndet2)
$Nr$	=	turunan momen yaw terhadap $r$ (Ndet2)
$uc$	=	Kecepatan arah surge (m/detik)
$\beta c$	=	Arah arus laut (deg)
$vc$	=	Kecepatan arus arah sway (m/detik)
$rc$	=	Kecepatan arus arah yaw (deg/detik)
$\delta$	=	defleksi rudder (derajat)
$xG$	=	pusat massa (m)
$\rho$	=	rapat massa air laut (1014 kg/m3)
$g$	=	percepatan gravitasi bumi (9.8 m/det2)
$L$	=	panjang kapal (m)
$U$	=	kecepatan servis kapal (m/det)
$B$	=	lebar kapal (m)
$T$	=	kedalaman kapal (m)
$\nabla$	=	displacement (m3)
$CB$	=	koefisien blok
$X'$	=	Gaya surge non dimensi
$Y'$	=	gaya sway non dimensi
$N'$	=	momen yaw non dimensi
$VL$	=	vektor kecepatan kapal frekuensi rendah (m/det)
$Vc$	=	vektor kecepatan arus (m/det)
$\xi x$	=	posisi surge akibat gelombang frekuensi tinggi (m)
$\xi y$	=	posisi sway akibat gelombang frekuensi tinggi (m)
$\xi y$	=	posisi yaw pada gelombang frekuensi tinggi (deg)
$xH$	=	laju surge akibat gelombang frekuensi tinggi (m/detik)
$Y'_{\dot{v}}$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap $\dot{v}$ non dimensional
$Y'_{\dot{r}}$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap $\dot{r}$ non dimensional



$N'_{\dot{v}}$	=	turunan momen <i>yaw</i> terhadap $\dot{v}$ non dimensional
$N'_{\dot{r}}$	=	turunan momen <i>yaw</i> terhadap $\dot{r}$ non dimensional
$Y'_v$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap $v$ non dimensional
$Y'_r$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap $r$ non dimensional
$N'_v$	=	turunan momen <i>yaw</i> terhadap $v$ non dimensional
$N'_r$	=	turunan momen <i>yaw</i> terhadap $r$ non dimensional
$X\dot{u}$	=	turunan gaya arah <i>surge</i> terhadap $\dot{u}$
$Xu$	=	turunan gaya arah <i>surge</i> terhadap $u$
$M$	=	matriks inersia
$N$	=	matriks redaman
$m$	=	Massa kapal (kg)
$\tau_L$	=	vector kendali gaya dan momen
$b$	=	matriks gaya dan momen
$u_0$	=	kecepatan servis <i>marine surface vehicles</i>
$\delta$	=	sudut propulsi <i>Rudder</i> ( $^\circ$ )
$x_g$	=	<i>center of gravity</i> (m)
$\rho$	=	massa jenis air laut ( $\text{kg/m}^3$ )
$L_{pp}$	=	Panjang kapal (m)
$B$	=	Lebar kapal (m)
$T$	=	Kedalaman kapal (m)
$U$	=	Kecepatan kapal (m/s)
$\Delta$	=	<i>Displacement</i> (ton)
$C_b$	=	<i>Coefficient block</i>
$R$	=	Jari-jari girasi (m)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Transportasi laut memiliki peranan penting untuk Indonesia. Selain untuk berpindah tempat, transportasi memiliki peran yang sangat penting dalam meningkatkan perekonomian. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik Nasional tentang Statistik Transportasi Laut menjelaskan bahwa jumlah pengguna transportasi laut cenderung mengalami kenaikan (Badan Pusat Statistik, 2020). Pentingnya transportasi laut untuk masyarakat di Indonesia menyebabkan perlu dikembangkan transportasi laut agar dapat digunakan secara maksimal. Transportasi laut yang sering digunakan yaitu kapal. Hal yang membuat masyarakat menggunakan kapal adalah karena tidak adanya jembatan penyeberangan laut. Kapal sering digunakan untuk mengangkut penumpang dan barang. Salah satu kapal yang sering digunakan untuk mengangkut penumpang dan barang adalah kapal *ferry*. Pada umumnya kapal *ferry* memiliki satu buah pintu rampa untuk akses keluar masuk (Budianto, 2017).

Dengan meningkatnya jumlah penumpang tiap tahunnya maka meningkat juga jumlah armada kapal yang dioperasikan. Pada tahun 2020 kunjungan kapal di Pelabuhan Indonesia mencapai 715.670 unit dan jumlah penumpang kapal laut mencapai 12.280.000 penumpang (Badan Pusat Statistik, 2020). Hal tersebut menunjukkan Transportasi laut di Indonesia memiliki tingkat kepadatan yang tinggi sehingga sering terjadi kecelakaan dikarenakan kapal yang tabrakan. Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 1 Tahun 1998 tentang Pemeriksaan Kecelakaan Kapal menjelaskan Kecelakaan kapal yang sering dialami yaitu Kapal tenggelam, Kapal terbakar, Kapal tubrukan, dan Kapal kandas. Berdasarkan data dari Departemen Perhubungan Laut tahun 2009 menjelaskan bahwa faktor paling tinggi yang menyebabkan kecelakaan transportasi laut adalah faktor alam dengan nilai persentase sebesar 38% (Komite Nasional Keselamatan Transportasi, 2009). Untuk mengatasi permasalahan kecelakaan transportasi laut dapat dilakukan dengan meningkatkan kualitas kapal. Perancangan sistem kemudi otomatis merupakan

salah satu bentuk peningkatan kualitas kapal. Pelopor sistem ini yaitu penelitian teori penerapan pengendali PID pada kemudi kapal untuk membangun sistem kemudi otomatis (Minorsky, 1922). Dengan dirancangnya sistem ini diharapkan kapal dapat selamat ke Pelabuhan tujuan. Dalam perancangan sistem dilakukan pengendalian Rudder dan Propeller Kapal. Rudder adalah sistem kapal untuk melakukan perpindahan arah kapal, sedangkan propeller merupakan sistem untuk mengatur kecepatan pada kapal. Banyak penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem kemudi otomatis. Pada tahun 2018 dilakukan Penelitian kemudi otomatis yang dilakukan oleh Liu, penelitian ini membuat sistem *trajectory* kapal agar berlayar sesuai dengan jalur dengan gangguan angin dan arus transversal dengan metode *sliding mode control*, metode ini masih mempunyai kelemahan, yaitu timbulnya *chattering* pada sinyal kontrol (Liu, 2018). Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Tomera merancang metode pengendalian pada *autopilot* kapal. Pengendali *Fuzzy* PID diterapkan pada sistem ini, yang mana pada penerapannya nilai awal parameter PID dihitung dengan menggunakan teori kendali linier klasik dan metode *mapping*. Kontroler PID disintesis menggunakan model dinamika kapal Nomoto yang diidentifikasi berdasarkan *manuver zigzag* standar *Kempf* dan algoritma *Ant Colony Optimization (ACO)* (Tomera, 2017). Pengendali logika *fuzzy* dapat dianggap sebagai kontroler PID *nonlinear* yang parameternya dapat ditentukan berdasarkan sinyal kesalahan dan turunan atau perbedaan waktunya (Zhao, 1993). Dalam beberapa tahun terakhir, Pengendali logika *fuzzy* telah berhasil diterapkan di banyak bidang praktis dan sistem *fuzzy* telah terbukti unggul dalam kinerja untuk beberapa sistem konvensional. Sebuah kemudi otomatis kapal berdasarkan kombinasi dari pengendali logika *fuzzy* dan pengendali PID memiliki keuntungan yaitu kemudahan konstruksi dan adaptif terhadap variasi parameter dan efek lingkungan (Nguyen, 2020).

Penelitian yang akan dilakukan merupakan pengembangan dari penelitian sebelumnya. Penelitian ini dilakukan untuk membuat sistem kemudi otomatis pada kapal yang disusun berdasarkan algoritma pengendali *Type-2 Fuzzy PID (T2FPID)* yang adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan berupa arus dan gelombang laut yang dapat merubah dinamika kapal penyebab kapal tidak sampai ke pelabuhan tujuan. Pengendali yang adaptif yaitu pengendali yang dapat merubah nilai

parameter untuk menentukan nilai parameter pengendalian PID yaitu  $K_p$ ,  $T_i$ , dan  $T_d$  yang sesuai untuk kondisi operasional plant sesuai dengan kondisi lingkungan. Sehingga kapal dapat merespon dengan cepat terhadap perubahan kondisi lingkungan berupa arus dan gelombang laut. Algoritma pengendali *Type-2 Fuzzy PID (T2FPID)* dipilih karena pengendali PID dapat secara efektif melemahkan *chattering* dan perkiraan sinyal kontrol terputus-putus. Sedangkan struktur kontrol *fuzzy* tipe-2 dapat menangani ketidakpastian parameter yang tidak diketahui dalam tahap gerak (Mao, 2020). Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan sistem pengendalian kapal otomatis yang dapat memandu kapal dengan optimal menuju pelabuhan tujuan sesuai *trajectory* yang ditentukan di bawah pengaruh gangguan lingkungan berupa arus dan gelombang laut.

## 1.2 Rumusan Masalah

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

- a) Bagaimana merancang pengembangan sistem pengendali *Type-2 Fuzzy PID (T2FPID)* pada sistem *trajectory guidance*?
- b) Bagaimana hasil performansi sistem pengendali *Type-2 Fuzzy PID (T2FPID)* pada sistem *trajectory guidance*?

## 1.3 Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

- a) Menentukan parameter pengendali *Type-2 Fuzzy PID (IT2FPID)* pada sistem *trajectory guidance* agar berjalan optimal.
- b) Mengevaluasi hasil performansi sistem pengendali *Type-2 Fuzzy PID (IT2FPID)* dengan adanya gangguan cuaca.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

- a) Sistem pengendali yang digunakan berbasis *Type-2 Fuzzy PID (T2FPID)*.
- b) Himpunan *fuzzy* yang digunakan adalah himpunan *fuzzy* tipe-2.

- c) Metode *Fuzzy Inference System (FIS)* yang digunakan adalah metode Sugeno dan Mamdani
- d) Variabel yang dikendalikan adalah nilai parameter dari pengendali rudder dan propeller kapal.
- e) Objek yang diteliti adalah *kapal ferry Ro-Ro*.
- f) Perancangan dan simulasi sistem pengendalian menggunakan software MATLAB 2020a.

### 1.5 Sistematika Laporan

Berikut merupakan sistematika laporan pada penelitian ini untuk mempermudah pembaca dalam memahami isi laporan

- a) BAB I Pendahuluan, berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika laporan
- b) BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori, berisi tentang *review* penelitian sebelumnya dan dasar teori yang digunakan dalam penelitian.
- c) BAB III Metodologi Penelitian, berisi tentang langkah langkah yang dilakukan dalam penelitian.
- d) BAB IV Hasil dan Pembahasan, berisi tentang analisis terhadap hasil penelitian.
- e) BAB V Penutup, berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil penelitian yang dilakukan.

## **BAB II**

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

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

##### **2.1.1 Pengendalian pada Kapal**

Penelitian tentang *trajectory guidance* pada kapal sangat sulit dilakukan karena efek dari *underactivity* dan karakteristik *nonholonomic* pada kapal, selain itu, dikarenakan adanya dampak *nonlinearity*, *uncertainty*, serta angin. Biasanya kapal-kapal ini tidak dilengkapi dengan *side thruster*, yang hanya digunakan saat mendekati atau meninggalkan pelabuhan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah membuat sistem *trajectory* kapal agar berlayar sesuai dengan jalur dengan gangguan angin dan arus transversal, sistem kontrol *Trajectory* kapal yang dirancang adalah sistem umpan balik loop tertutup, yang tujuannya adalah untuk mengurangi kesalahan pelacakan. Setelah kesalahan pelacakan memenuhi persyaratan akurasi, program menjalankan langkah berikutnya hingga selesai. Untuk mempertimbangkan akurasi dan stabilitas digunakan metode *Runge-Kutta* orde keempat untuk menyelesaikan sistem persamaan diferensial biasa. Parameter utama yaitu *hull*, *propeller* and *rudder*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa sistem memiliki error yang kecil dan tanpa overshoot atau hentakan, sementara arah dan sudut kemudi beresilasi dengan nilai tetap (Liu, 2018).

Penelitian lain membangun suatu metode pelacakan lintasan MSV dengan akurasi tinggi dan konsumsi energi yang rendah dalam waktu yang terbatas di bawah berbagai faktor yang tidak pasti dan gangguan eksternal. Yang mana hal tersebut dapat memaksimalkan keselamatan dan efisiensi sampai batas tertentu. Metode *Neural Network* (NN) digunakan pada penelitian ini untuk merekonstruksi ketidakpastian dinamis pada kendaraan dengan jumlah batas atas kesalahan aproksimasi dan gangguan eksternal yang tidak diketahui diperkirakan dengan merancang hukum adaptif. Dalam upaya mengurangi konservatisme skema kontrol yang disajikan yang disebabkan oleh perkiraan batas atas, *multivariate sliding mode finite-time disturbance observer* (MSMFTDO) dirancang untuk memperkirakan gangguan eksternal yang tidak diketahui dan bagian yang tidak sepenuhnya

direkonstruksi oleh NN, dan kemudian dirancang undang-undang kontrol pelacakan lintasan *finite-time neural adaptif* berbasis MSMFTDO. Dari penelitian yang telah dilakukan, memberikan efektivitas yang baik dari sistem yang dikembangkan. (Qiang, 2019)

Penelitian lain membahas terkait persoalan metode kontrol pada *autopilot* kendali kapal. *Fuzzy PID controllers* diterapkan pada sistem ini yang mana pada penerapannya, nilai awal parameter PID dihitung dengan menggunakan teori kendali linier klasik dan metode penempatan. Kontroler PID disintesis menggunakan model dinamika kapal Nomoto yang diidentifikasi berdasarkan manuver *zigzag* standar *Kempf* dan algoritma *Ant Colony Optimization (ACO)*. Algoritma ACO adalah metode optimasi *bio-inspired* yang telah terbukti keberhasilannya melalui berbagai masalah optimasi kombinatorial. Dari penelitian yang telah dilakukan, hasil uji coba skala penuh telah mengungkapkan bahwa skema yang diusulkan memiliki *overshoot* yang lebih kecil dan waktu penyelesaian yang lebih singkat (Tomera, 2017).

### **2.1.2 Dynamic Positioning (DP)**

Penentuan *dynamic positioning* (DP) sangat diperlukan seperti membantu dalam peletakan pipa di lepas pantai dan ekstraksi metana klatrat. DP dapat dipengaruhi gaya eksternal sehingga posisi dan kecepatan kapal dapat menyimpang dari posisi dan kecepatan yang direncanakan, akibatnya, kapal mengalami masalah DP. Oleh karena itu diperlukan sistem untuk mempertahankan posisi dan heading yang stabil. Dalam Paper ini bertujuan untuk menjelaskan tentang pengembangan Sistem DP portabel yang terdiri dari penggerak, yang kecepatan rotasinya dikendalikan dengan menggunakan algoritma *neuro-fuzzy* sistem ini dapat menghasilkan gaya untuk melawan gaya eksternal dari lingkungan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah membuat sistem *Dynamic Position* berdasarkan algoritma logika *neuro-fuzzy (ANFIS)*. Hasil penelitian menunjukkan keuntungan dari teknik ini untuk kontrol DP, terutama untuk mempertahankan posisi dan heading secara akurat di laut. Hasil menunjukan bahwa Sistem *DP neuro-fuzzy* menunjukkan keuntungan dari deviasi posisi rendah dan kebutuhan

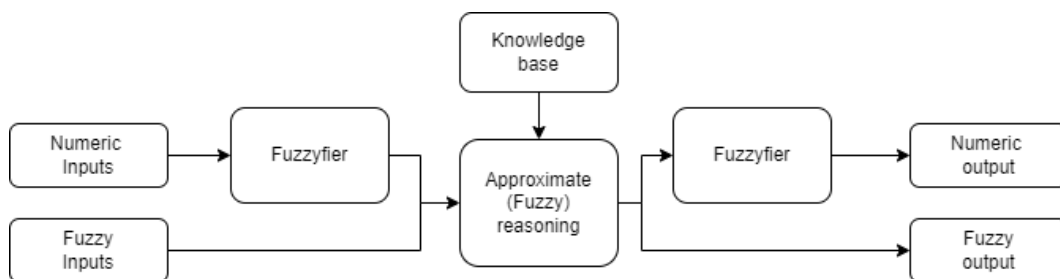


gaya dorong yang kecil secara bersamaan. Dengan kata lain, sistem *DP neuro-fuzzy* dapat mencapai kontrol efisiensi tinggi di sebagian besar kondisi (Fang, 2016).

## 2.2 Sistem Logika *Fuzzy*

Teori Logika *Fuzzy* dimulai pada tahun 1965, oleh Lotfi A. Zadeh, profesor ilmu komputer di *University of California* di Berkeley. Pada dasarnya, Logika *Fuzzy* adalah logika multinilai, yang memungkinkan nilai menengah didefinisikan antara evaluasi konvensional seperti benar atau salah, ya atau tidak, dan tinggi atau rendah. Gagasan seperti agak tinggi atau sangat cepat dapat dirumuskan secara matematis dan diproses oleh komputer, untuk menerapkan cara berpikir yang lebih mirip manusia dalam pemrograman komputer. Sistem *fuzzy* adalah alternatif dari gagasan tradisional tentang keanggotaan himpunan dan logika yang berasal dari filsafat Yunani kuno (Zadeh, 2009).

Teori himpunan *fuzzy* dan logika *fuzzy* dapat merepresentasikan secara matematis dan pemrosesan informasi yang efisien. Istilah sistem biasanya dipahami sebagai seperangkat komponen yang berinteraksi dengan struktur yang terdefinisi dengan baik dan terorganisir sebagai keseluruhan yang rumit yang dapat dibedakan dari lingkungan "eksternal".



**Gambar 2.1** Struktur sistem *fuzzy* (Czabanski, 2017)

Sebuah sistem berkomunikasi dengan lingkungan melalui apa yang disebut *input* dan *output*. Sistem *fuzzy* adalah struktur berdasarkan teknik *fuzzy* yang berorientasi pada pemrosesan informasi, di mana penggunaan teori himpunan klasik dan logika *biner* tidak mungkin atau sulit. Dalam literatur, istilah seperti sistem *fuzzy*, model *fuzzy*, sistem berdasarkan aturan *fuzzy*, pengontrol *fuzzy*, atau memori asosiatif *fuzzy* digunakan secara bergantian tergantung pada jenis aplikasi. Karakteristik utama melibatkan representasi pengetahuan simbolik dalam bentuk

aturan kondisional (jika-maka). Struktur khas dari sistem *fuzzy* terdiri dari empat blok fungsional: *fuzzifier*, *fuzzy inference engine*, *rule base*, dan *defuzzifier*. Nilai linguistik (didefinisikan oleh himpunan *fuzzy*) dan *crisp* (numerik) dapat digunakan sebagai *input* untuk sistem *fuzzy*. Jika menggunakan data *crisp*, maka proses *inferensi* didahului oleh fuzzifikasi. Nilai-nilai variabel *input* dipetakan ke dalam nilai-nilai linguistik dari variabel *output* melalui metode penalaran perkiraan (*inference engine*) yang sesuai dengan pengetahuan ahli. Selain nilai-nilai linguistik, data numerik diperlukan sebagai keluaran sistem *fuzzy*. Dalam kasus tersebut metode *defuzzifikasi* digunakan, yang menetapkan data *crisp* yang representatif ke himpunan keluaran *fuzzy* (Czabanski, 2017).

### 2.3 Fuzzy Inference System (FIS)

*Fuzzy Inference System (FIS)* adalah suatu cara untuk memetakan masukan ke keluaran dengan menggunakan logika. *Fuzzy Logic* banyak digunakan karena kemampuannya untuk mengungkapkan ketidakjelasan dan informasi yang tidak akurat. FIS terdiri dari beberapa *input*, *output*, *rule base* dan metode *defuzzifikasi*. Dua model FIS yang paling populer adalah Mamdani FIS (MFIS) dan Sugeno FIS (SFIS) (Sirwan 2013).

#### 2.3.1 Fuzzy tipe Mamdani

MFIS dikenal luas dan digunakan dalam mengembangkan model *fuzzy*. Memiliki struktur secara umum dengan bentuk berikut "*IF (X1 is A1) AND (X2 is B1) AND (X3 is C1) THEN Y is F*", di mana X1, X2, dan X3 adalah *input*, Y adalah *output*, kemudian A1, B1, C1, dan F adalah suku-suku linguistik dengan MFs *Triangular*, *Trapezium*, dan *Gaussian*. Implikasi diterapkan untuk setiap aturan, umumnya operator min yang mewakili logika (AND) dan (OR) digunakan untuk implikasi. Agregasi digunakan untuk menyatukan keluaran dari semua aturan sehingga menghasilkan himpunan *fuzzy* tunggal. Fungsi keluaran ter agregasi *defuzzifikasi* dalam satu bilangan tegas menggunakan metode *defuzzifikasi*. (Sirwan 2013).

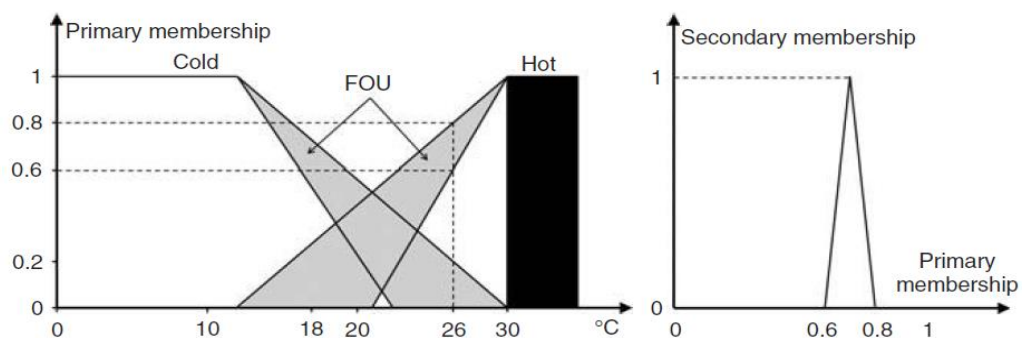
#### 2.3.2 Fuzzy tipe Sugeno

SFIS tidak jauh berbeda dengan MFIS. Salah satu perbedaan yang signifikan antara MFIS dan SFIS adalah bahwa *membership functions* keluaran

SFIS adalah linier atau konstan. Aturan SFIS memiliki struktur secara umum sebagai berikut: IF (X1 IS A1) AND (X2 IS B1) AND (X3 IS C1) THEN Y =F(X1, X2, X3) Dimana *membership functions* masukan untuk A1, B1, C1, di bagian premis dan *membership functions* linier keluaran di bagian konsekuen. MFIS menggunakan teknik defuzzifikasi output fuzzy, SFIS menggunakan rata-rata tertimbang untuk menghitung output *crisp*. SFIS memiliki waktu pemrosesan yang lebih baik karena rata-rata tertimbang menggantikan proses defuzzifikasi yang memakan waktu. Karena sifat dasar aturan yang dapat ditafsirkan dan intuitif, FIS tipe Mamdani banyak digunakan khususnya untuk aplikasi pendukung keputusan. Perbedaan lainnya adalah FIS Mamdani memiliki keluaran fungsi keanggotaan sedangkan FIS Sugeno tidak memiliki keluaran fungsi keanggotaan. Mamdani FIS kurang fleksibel dalam desain sistem dibandingkan dengan Sugeno FIS karena tidak dapat diintegrasikan dengan alat ANFIS untuk mengoptimalkan *output*. (Kaur, 2012).

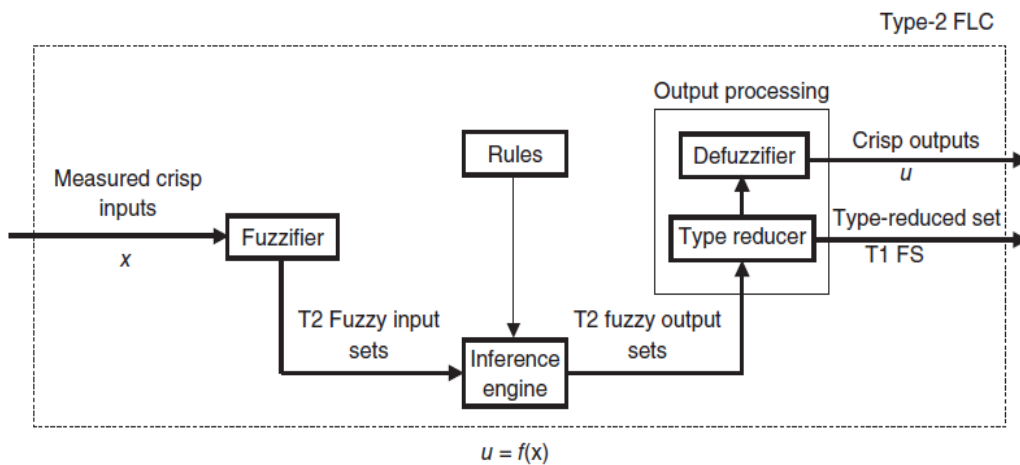
## 2.4 Fuzzy Tipe 2

*Fuzzy Set* tipe 2 ditandai dengan nilai keanggotaan untuk setiap elemen dari himpunan ini sendiri merupakan himpunan *fuzzy* [0,1]. *Membership Function* dari Himpunan *fuzzy* tipe-2 adalah tiga dimensi (3D) dan termasuk *footprint of uncertainty (FOU)*. *FOU* memberikan derajat kebebasan tambahan yang memungkinkan untuk secara langsung memodelkan dan menangani ketidakpastian *Membership Function*. Berbeda dengan *Fuzzy Set* tipe 1 yang merupakan *crisp* dan presisi tetapi tidak memungkinkan adanya ketidakpastian nilai keanggotaan (Mendel, 2014).



**Gambar 2.2** *Fuzzy Set* tipe 2 (Mendel, 2014).

Kontrol logika fuzzy tipe 2 memiliki lima komponen yaitu: *fuzzifier*, *rules*, *inference engine*, *reducer*, dan *defuzzifier*. Dalam *Fuzzy Logic Controller* tipe-2 *input* dan/atau *output* diwakili oleh *Fuzzy Set* Tipe 2, dan beroperasi sebagai berikut: *input crisp* diperoleh dari sensor *input*, kemudian dilakukan *difuzzified* ke *input Fuzzy Set* tipe 2, yang kemudian mengaktifkan *inference engine* yang menggunakan aturan yang sama yang digunakan dalam *Fuzzy Logic Controller* tipe 1 untuk menghasilkan keluaran *Fuzzy Set* Tipe 2. Reducer memproyeksikan *Fuzzy Set* Tipe 2 menjadi *Fuzzy Set* Tipe 1 setelah itu *Fuzzy Set* Tipe 1 *didefuzzifikasi* untuk menghasilkan keluaran *crisp* (Mendel, 2006).



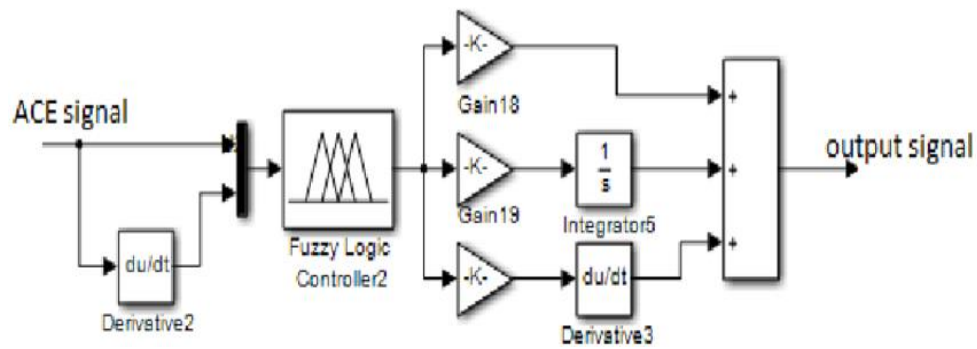
**Gambar 2.3** Blok diagram Kontrol logika fuzzy tipe 2 (Mendel, 2006)

### 2.5 Type-2 Fuzzy PID

*Type-2 Fuzzy PID* (T2FPID) memiliki *input* dari *error* (*e*) dan turunan dari *error* (*de*) dan *output* adalah sinyal kontrol (*u*) seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.4. Keluaran dari T2FPID didefinisikan sebagai berikut

$$u = \alpha U + \beta \int U dt , \tag{2.1}$$

Parameter desain struktur pengontrol T2FPID dapat diringkas dalam dua kelompok, parameter struktural dan parameter tuning. Parameter struktural meliputi variabel *input* dan *output* untuk *fuzzy inference*, *fuzzy set*, *membership functions*, *fuzzy rules*, dan mekanisme *inferensi*. Parameter tuning meliputi *scaling factor input/output* (SF) dan parameter *membership functions* (MF) (Kumbasar, 2015).

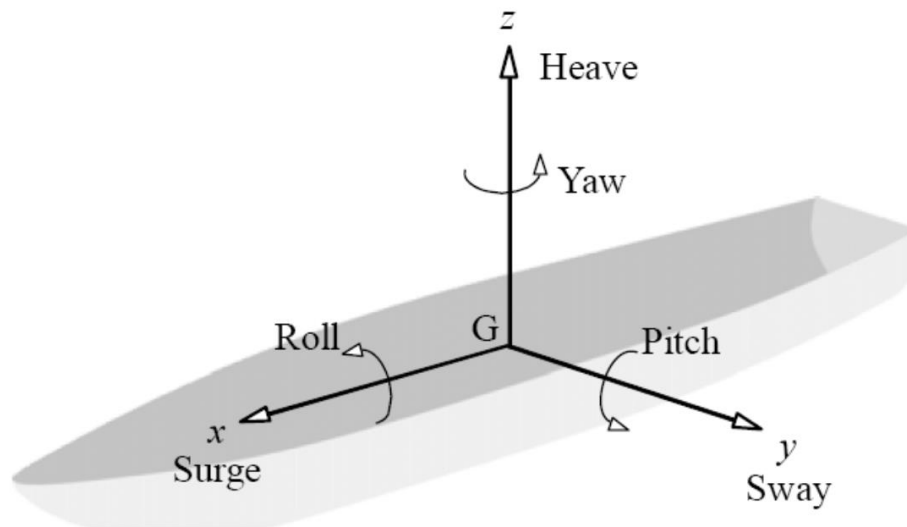


**Gambar 2.4** Struktur kontrol *Type-2 Fuzzy PID* (T2FPID) (Kumbasar, 2015).

struktur pengontrol T2FPID yang memiliki *scaling factor input* dan *output*. *Input Scaling Factor*  $K_e$  (untuk *error* ( $e$ )) dan  $K_d$  (untuk perubahan *error* ( $e$ )) menormalkan *input* ke interval umum, yang mana fungsi keanggotaan dari *input* dilakukan normalisasi menjadi  $E$  dan  $\Delta E$ . Sementara *output* FLC ( $U$ ) dipetakan ke masing-masing domain *output* aktual ( $u$ ) oleh *output scaling factor* (Kumbasar, 2015).

## 2.6 Pemodelan Dinamika Kapal

Pemodelan kapal melibatkan 2 variabel diantaranya pergerakan statis dan pergerakan dinamis. Berikut merupakan gambar arah pergerakan kapal



**Gambar 2.5** *Six-degree-of-freedom (6DOF) ship motion* (Tanaka, 2018)

Kapal memiliki 6 derajat kebebasan (*degree of freedom*) yang terbagi menjadi 3 gerak translasi dan 3 gerak rotasi. Direpresentasikan dengan persamaan (2.2) berikut

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + g_0 + w \quad (2.2)$$

Derajat kebebasan (*degree of freedom*) berfungsi untuk menentukan posisi dan orientasi dari kapal. Tiga koordinat pertama yaitu *Surge*, *sway* dan *heave* digunakan untuk menyatakan posisi dan gerak translasi sepanjang sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z. Tiga koordinat terakhir yaitu *roll*, *pitch*, *yaw* digunakan sebagai orientasi dan gerak rotasi pada kapal. Notasi yang digunakan untuk menyatakan posisi, sudut *Euler*, gaya, momen, serta kecepatan linier dan angular ditunjukkan pada tabel berikut. (Fossen, 1994)

**Tabel 2.1** Notasi yang Digunakan pada dinamika transportasi laut (Fossen, 1994)

<i>DOF</i>	<b>Pergerakan</b>	<b>Gaya dan Momen</b>	<b>Kecepatan Linear dan Angular</b>	<b>Posisi dan Euler Angles</b>
1	<i>Surge</i> (Arah sumbu x)	<i>X</i>	<i>u</i>	<i>x</i>
2	<i>Sway</i> (Arah sumbu y)	<i>Y</i>	<i>v</i>	<i>y</i>
3	<i>Heave</i> (Arah sumbu z)	<i>Z</i>	<i>w</i>	<i>z</i>
4	<i>Roll</i> (Rotasi terhadap sumbu x)	<i>K</i>	<i>p</i>	$\phi$
5	<i>Pitch</i> (Rotasi terhadap sumbu y)	<i>M</i>	<i>q</i>	$\theta$
6	<i>Yaw</i> (Rotasi terhadap sumbu z)	<i>N</i>	<i>r</i>	$\psi$

Persamaan dinamika kapal berdasarkan pemodelan Davidson dan Schiff (2006) untuk *sway* dan *yaw* dapat dilihat pada persamaan (2.3) dan (2.4) (T. Fossen, 1994).

$$m(\dot{u} + u_0r + x_G\dot{r}) = Y \quad (2.3)$$

$$I_z\dot{r} + mx_G(u + u_0r) = N \quad (2.4)$$

Berdasarkan teori linearitas menyatakan bahwa gaya dan momen hidrodinamik pada pemodelan dinamika kapal Davidson dan Schiff dengan sumbu gerak *sway* dan *yaw* dapat dimodelkan dengan persamaan (2.5) dan (2.6).

$$Y = Y_{\dot{u}}\dot{u} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_u u + Y_r r + Y_{\delta}\delta_R \quad (2.5)$$

$$N = N_{\dot{u}}\dot{u} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_u u + N_r r + N_{\delta}\delta_R \quad (2.6)$$

Persamaan dinamika kapal yang ditunjukkan pada persamaan (2.3) dapat ditunjukkan dengan bentuk persamaan (2.7).

$$M\dot{v} + N(u_0)v = b\delta_R \quad (2.7)$$

dimana Matriks M merupakan matriks inersia.  $v = [u, r, \psi]^T$  adalah vektor keadaan (*state vector*),  $\delta_R$  adalah sudut dari *rudder*. dan matriks N penjumlahan matriks *damping* D dan matriks *Coriolis* C( $u_0$ ). Koefisien matriks inersia (M), dan matrik redaman (N) dapat dilihat pada persamaan (2.8), (2.9) (2.10).

$$M = \begin{bmatrix} m' - Y'_{\dot{v}} & m'x'_g - Y'_r & 0 \\ m'x'_g - N'_{\dot{v}} & I'_z - N'_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$N = \begin{bmatrix} -Y'_{\dot{v}} & m' - Y'_r & 0 \\ -N'_{\dot{v}} & m'x'_g - N'_r & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$b = \begin{bmatrix} Y'_{\delta} \\ N'_{\delta} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Persamaan matrik (2.7) merupakan persamaan pemodelan dinamika kapal untuk menggerakkan aktuator yaitu *rudder* berdasarkan *input* defleksi sudut *rudder* ( $\delta R$ ). Koefisien hidrodinamika yang digunakan untuk menyusun model dinamika kapal dengan menggunakan koefisien hidrodinamika yang ditulis pada persamaan (2.11) sampai persamaan (2.18) di bawah ini (Lewis, 1988)

$$\frac{-Y'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0,16 \frac{C_B B}{T} - 5,1(B/L)^2 \quad (2.11)$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = 0,67 \frac{B}{L} - 0,0033(B/T)^2 \quad (2.12)$$

$$\frac{-N'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1,1 \frac{B}{L} - 0,041 \left(\frac{B}{T}\right) \quad (2.13)$$

$$\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0,017 \frac{C_B B}{T} - 0,33 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.14)$$

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0,4 \frac{C_B B}{T} \quad (2.15)$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2,2 \frac{B}{L} - 0,08 \left(\frac{B}{T}\right) \quad (2.16)$$

$$\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2,4 \frac{T}{L} \quad (2.17)$$

$$\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{4} + 0,039 \frac{B}{T} - 0,56 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.18)$$

**Tabel 2.2** Variabel normalisasi pada *Prime-System I* (T. Fossen, 1994)

<i>Unit</i>	<i>Prime-System I</i>
Panjang	L
Massa	$\frac{1}{2}\rho L^3$
Momen Inersia	$\frac{1}{2}\rho L^5$
Waktu	L/U
Area Referensi	L <sup>2</sup>
Posisi	L
Sudut	1
Kecepatan Linier	U
Kecepatan Sudut	U/L
Percepatan Linier	U <sup>2</sup> /L
Percepatan Sudut	U <sup>2</sup> /L <sup>2</sup>
Gaya	$\frac{1}{2}\rho U^2/L^2$
Momen	$\frac{1}{2}\rho U^2/L^3$

## 2.7 Pemodelan Propeller Kapal

Propeller merupakan bagian penting dari sistem propulsi kapal yang terdiri dari mesin utama, poros transmisi, dan baling-baling. *Propeller* digunakan untuk menggerakkan kapal berdasarkan daya yang dihasilkan dan ditransmisikan dari mesin utama (Carlton, 2012). *Propeller* kapal dapat dimodelkan secara matematis



dengan menggunakan pendekatan oleh Horigome, Hara, Hotta dan Hotsu pada tahun 1990 sebagai bentuk matematis orde 1 seperti pada persamaan (2.19)

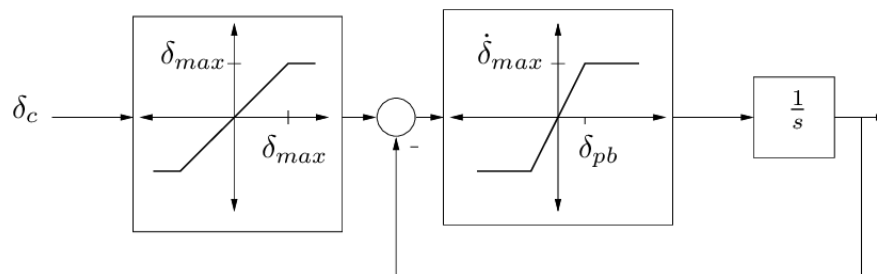
$$\frac{Q_m}{Y}(S) = \frac{K_y}{1 + T_y s} \quad (2.19)$$

Dengan nilai  $T_y$  ditunjukkan pada persamaan

$$T_y \approx 0.9 \frac{2\pi}{n} \quad (2.20)$$

## 2.8 Pemodelan Rudder Kapal

Rudder adalah aktuator yang berfungsi untuk kemudi kapal otomatis (Rawson 2001). Pada pemodelan Rudder menggunakan pemodelan Van Amerongen dengan memiliki spesifikasi bukaan sudut antara  $-35^\circ$  sampai dengan  $35^\circ$ . Selain itu pemodelan ini memiliki variasi laju bukaan antara  $-7^\circ/s$  sampai dengan  $7^\circ/s$  (Christopher, 1996). Diagram blok rudder yang paling umum model dalam desain autopilot dan simulasi komputer adalah model yang disederhanakan seperti pada gambar berikut.



**Gambar 2.6** Blok diagram *Rudder* kapal (Santoso, 2013)

Gambar 2.6 menunjukkan model yang ditunjukkan oleh diagram blok. Model ini mewakili efek penting yang dihasilkan oleh kemudi (Santoso, 2013)

1. *Magnitude saturation*: gerakan kemudi terbatas dalam sudut maksimum tertentu.
2. *Slew rate saturation* : gerakan laju kemudi terbatas dengan nilai maksimum  $\delta_{max}$  (rad/sec)
3. *Time delay*: servo utama menghasilkan sebagian besar penundaan antara perintah kemudi ( $\delta_c$ ) dan sudut kemudi sebenarnya

Secara matematis rudder dapat dimodelkan dengan persamaan (2.21) dan (2.22)

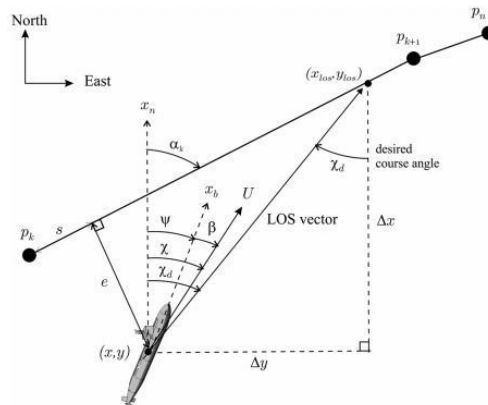
$$K'_g = \frac{K_g L}{U} \tag{2.21}$$

$$K_g = \frac{\delta_m}{\delta_{emax}} \tag{2.22}$$

Dengan  $\delta_m$  adalah Sudut maksimum rudder dan  $\delta_{emax}$  adalah *Input* maksimum *error*.

### 2.9 Penentuan Sistem Pemanduan

Pemanduan yang dilakukan pada transportasi laut bertujuan untuk melakukan perpindahan dengan menentukan jarak, arah, kecepatan, serta posisi kapal. Sehingga sistem ini akan menentukan set point sistem kendali pada kapal. Komponen penyusun sistem ini yaitu sensor yang berupa GPS, compass dan sebagainya. Gambar 2.7 menunjukkan konsep pemanduan kapal.



**Gambar 2.7** Konsep Pemanduan Kapal ( Fossen, 1994)

Pemanduan *Line of Sight* (LOS) diklasifikasikan sebagai skema panduan tiga titik karena melibatkan titik referensi yang biasanya stasioner selain interceptor dan target. LOS dapat digunakan untuk menentukan heading untuk mencapai *waypoint* selanjutnya. Untuk menghitung nilai heading dapat digunakan persamaan (2.23).

$$\psi_{ref}(degree) = \tan^{-1} \left( \frac{y_k - y(t)}{x_k - x(t)} \right) \tag{2.23}$$

### 2.10 Pemodelan Gangguan Lingkungan

Pemodelan sistem selama simulasi, memerlukan model gangguan lingkungan agar hasil dari simulasi mendekati kondisi yang sesungguhnya. Gangguan

lingkungan yang mungkin mengganggu keberhasilan kapal dalam mencapai waypoint pada lintasan yang sudah ditentukan yaitu gelombang dan arus laut. Gangguan gelombang dibagi menjadi 2 yaitu frekuensi rendah dan frekuensi tinggi. Berikut merupakan penjelasan dari tiap gangguan.

### 2.10.1 Gelombang Frekuensi Rendah

Gaya *coriolis* dengan nonlinear *damping* diabaikan merupakan gangguan gelombang dengan frekuensi rendah. Model dinamika kapal dengan frekuensi rendah dinyatakan pada persamaan (2.24) (T. Fossen, 1994).

$$M\dot{v}_L + D(v_L - v_C) = \tau_L + \omega_L \quad (2.24)$$

Dengan asumsi teori *slender body* sehingga persamaan 2.24 dapat disusun menjadi persamaan (2.25) dan (2.36).

$$M = \begin{bmatrix} m' - Y'_v & m'x'_g - Y'_r & 0 \\ m'x'_g - N'_v & I'_z - N'_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$D = \begin{bmatrix} -X'_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y'_v & Y'_r \\ 0 & -N'_v & -N'_r \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Dengan pendekatan model kontrol DP  $\psi_L - \psi_d$  sangat kecil, sehingga didapat persamaan kapal pada gelombang frekuensi rendah sesuai dengan persamaan (2.27).

$$\dot{x}_L = A_L x_L + B_L \tau_L + E_L w_L \quad (2.27)$$

dengan

$$\dot{x}_L = [u_L \ v_L \ r_L \ x_L \ y_L \ \psi_L]^T. \quad (2.28)$$

$$A_L = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & -M^{-1}D \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$B_L = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}b \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$E_L = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

### 2.10.2 Gelombang Frekuensi Tinggi

Pemodelan gangguan kapal gelombang frekuensi tinggi dapat dilihat pada persamaan (2.32) (T. Fossen, 1994).

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{\xi}_x \\ \dot{\xi}_y \\ \dot{\xi}_\psi \\ \dot{x}_H \\ \dot{y}_H \\ \dot{\psi}_H \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2\zeta\omega_0 & 0 & 0 & -\omega_0^2 & 0 & 0 \\ 0 & -2\zeta\omega_0 & 0 & 0 & -\omega_0^2 & 0 \\ 0 & 0 & -2\zeta\omega_0 & 0 & 0 & -\omega_0^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_x \\ \xi_y \\ \xi_\psi \\ x_H \\ y_H \\ \psi_H \end{bmatrix} \\
&+ K_w \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ w_x \\ w_y \\ w_\psi \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.32}$$

dengan

$$\omega_0 = 0.4 \sqrt{\frac{g}{H}} \tag{2.33}$$

$$K_w = 2\zeta\omega_0\tau_w \tag{2.34}$$

Setelah pemodelan gangguan gelombang frekuensi tinggi dan rendah di dapatkan kemudian dilakukan penjumlahan kedua gangguan tersebut dengan persamaan (2.35) (Aisjah, 2010).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_L \\ \dot{x}_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_L & 0 \\ 0 & A_H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_L \\ x_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_L \\ 0 \end{bmatrix} \tau_L + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_L \\ w_H \end{bmatrix} \tag{2.35}$$

### 2.10.3 Arus Laut

Arus laut adalah sistem sirkulasi horizontal dan vertikal air laut yang dihasilkan oleh gravitasi, gesekan angin, dan variasi kerapatan air di berbagai bagian laut. Selain arus yang dihasilkan angin, pertukaran panas di permukaan laut bersama dengan perubahan salinitas, mengembangkan komponen arus laut tambahan, biasanya disebut sebagai arus termohalin. Peta dunia yang menunjukkan arus permukaan laut terbesar ditemukan di Defant (1961). Lautan mudah dibagi menjadi dua bidang air, bidang air dingin dan hangat. Karena Bumi berotasi, gaya Coriolis akan berusaha membelokkan arus utama ke Timur di belahan bumi utara dan Barat di belahan bumi selatan. Akhirnya, sirkulasi laut utama juga akan memiliki komponen pasang surut yang timbul dari interaksi planet. Di daerah

pesisir, komponen pasang surut dapat mencapai kecepatan yang sangat tinggi. kecepatan arus laut dapat dimodelkan dengan persamaan (2.36) (T. Fossen, 1994).

$$\dot{V}_c(t) + \mu_0 V_c(t) = \omega(t) \quad (2.36)$$

Penyelesaian persamaan (2.36) menggunakan deret Euler sehingga didapatkan persamaan (2.37):

$$V_c(t) = \frac{V_c(0)}{0!} + \frac{t}{1!} \cdot \frac{\partial V_c}{\partial t} \quad (2.37)$$

### 2.11 Tuning Parameter PID

Perancangan kendali *type 2 fuzzy PID* adalah kendali *type 2 fuzzy* yang bertujuan untuk melakukan *tuning* terhadap parameter pengendali PID. Penentuan rentang nilai pengendali PID yang sesuai dilakukan dengan *tuning* parameter PID terlebih dahulu menggunakan metode *tuning Ziegler-Nichols* (Zhao, 1993). Hasil *tuning* yang digunakan berupa nilai  $K_{cr}$  dan  $T_{cr}$ , dimana  $K_{cr}$  adalah *gain* kritis dan  $T_{cr}$  adalah periode kritis. persamaan (3.38) sampai (2.40) Digunakan untuk menentukan nilai parameter PID.

$$K_p = (K_{p \max} - K_{p \min})K_p' + K_{p \min} \quad (2.38)$$

$$K_d = (K_{d \max} - K_{d \min})K_d' + K_{d \min} \quad (2.39)$$

$$K_i = \frac{K_p^2}{(\alpha K_d)} \quad (2.40)$$

Dimana  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $\alpha$  (alfa) adalah variabel keluaran sistem logika *fuzzy*. Digunakan persamaan (2.41) sampai (2.44) untuk mendapatkan nilai minimum dan maksimum dari  $K_p$  dan  $K_d$  (Zhao, 1993).

$$K_{p \max} = 0.6K_{cr} \quad (2.41)$$

$$K_{p \min} = 0.3K_{cr} \quad (2.42)$$

$$K_{d \max} = 0.15K_{cr}T_{cr} \quad (2.43)$$

$$K_{d \min} = 0.08K_{cr}T_{cr} \quad (2.44)$$

### 2.12 Standar International Maritime Organization (IMO)

*International Maritime Organization (IMO)* adalah badan khusus Perserikatan Bangsa-Bangsa yang bertugas mengkoordinasikan “pengiriman yang

aman, terjamin, dan efisien di lautan yang bersih.”. IMO dibuat dari semua negara anggota dan merupakan badan pengatur tertinggi, dewan, dan lima komite yang terdiri dari perwakilan negara-negara anggota: Komite Keselamatan Maritim, Komite Perlindungan Lingkungan Laut, Komite Hukum, Komite Kerjasama Teknis, dan Komite Fasilitasi. Dalam melakukan perancangan digunakan standar *International Maritime Organization* (IMO) seperti pada Tabel 2.3 berikut

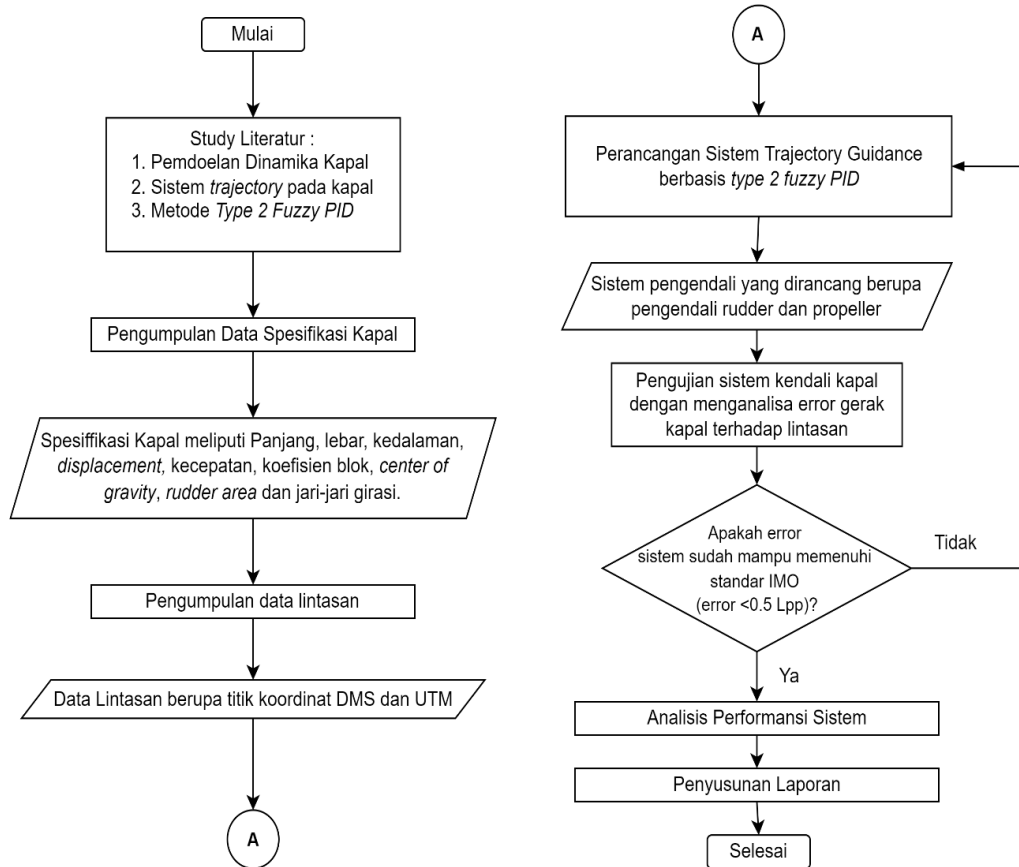
**Tabel 2.3** Standar IMO (*International Maritime Organization, 2002*)

<i>Item</i>	<i>Test</i>	<i>Criteria</i>
<i>Turning ability</i>	<i>Turning test with max. rudder angle (35°)</i>	<i>Advance &lt; 4.5L</i> <i>Tactical diameter &lt; 5.0L</i>
<i>Initial turning ability</i>	<i>10°/10° Z-test</i>	<i>Distance ship run before 2<sup>nd</sup> Rudder execution &lt; 2.5L</i>
<i>Course-keeping and yaw-checking ability</i>	<i>10°/10° Z-test</i>	<i>1<sup>st</sup> overshoot</i> <i>&lt; 10° (L/U &lt; 10s)</i> <i>&lt; (5 + 0.5L/U)° (10s &lt; L/U &lt; 30s)</i> <i>&lt; 20° (30s &lt; L/U) (30s &lt; L/U)</i>
		<i>2<sup>nd</sup> overshoot</i> <i>&lt; 25° (L/U &lt; 10s)</i> <i>&lt; (17.5 + 0.75(L/U))° (10s &lt; L/U &lt; 30s)</i> <i>&lt; 40° (30s &lt; L/U)</i>
	<i>20°/20° Z-test</i>	<i>1<sup>st</sup> overshoot, &lt; 25°</i>

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini dilakukan tahap-tahap penelitian yang ditunjukkan pada diagram alir pada Gambar 3.1



**Gambar 3.1** Diagram Alir Metodologi Penelitian.

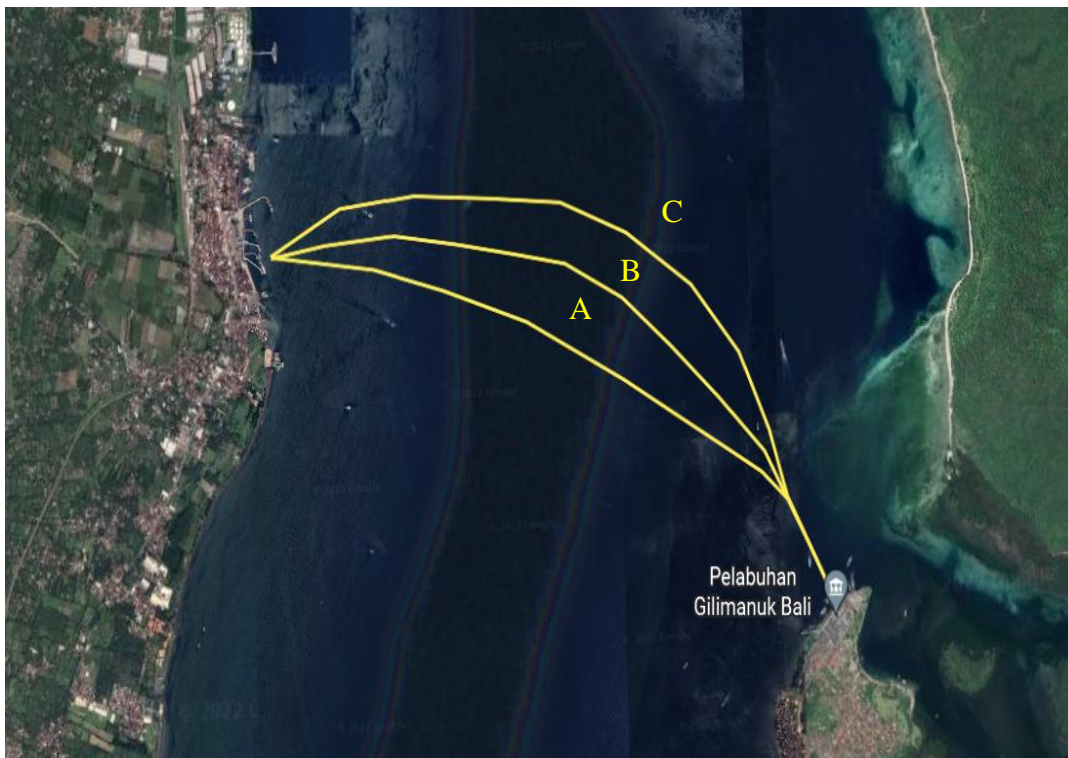
#### 3.1 Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai permasalahan dan dasar teori penelitian yang akan dilakukan. Sumber dari studi literatur diperoleh dari mempelajari buku, jurnal skala internasional dan nasional, penelitian-penelitian sebelumnya serta sumber lain yang dapat dipertanggungjawabkan kebenarannya. pada penelitian ini topik utama yang dipelajari mengenai sistem *trajectory* pada kapal, pengendali PID, metode kontrol logika *fuzzy* untuk sistem kemudi otomatis, aktuator pada kapal dan pemodelan

sistem. Serta diperlukan pembelajaran tentang Software MATLAB dikarenakan penelitian ini dilakukan secara simulasi dengan menggunakan software MATLAB. Hasil studi literatur telah dituliskan di BAB 2 dan dipilih metode yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian.

### 3.2 Pengambilan Data Lintasan Kapal

Dikumpulkan data berupa lintasan kapal dari satu Pelabuhan ke Pelabuhan lainnya data yang diambil dalam bentuk titik koordinat latitude dan longitude. Data lintasan digunakan agar rudder dapat mengarahkan kapal ke arah sesuai lintasan. Data lintasan yang digunakan berada di lintasan antar pelabuhan Ketapang dan Gilimanuk. Dengan titik keberangkatan dari pelabuhan Ketapang dan berakhir di Pelabuhan Gilimanuk. Penentuan titik lintasan kapal yang digunakan pada penelitian ini menggunakan perangkat lunak *Google Earth*. Berikut merupakan data lintasan kapal yang digunakan pada penelitian ini.



**Gambar 3.2** Lintasan Kapal

Gambar 3.2 menunjukkan terdapat 3 lintasan yang digunakan yaitu lintasan A B dan C. Lintasan A digunakan sebagai referensi saat kapal berlayar pada kondisi tenang. Lintasan B digunakan saat arus laut memiliki kecepatan 3 knot. Lintasan C



digunakan saat arus laut memiliki kecepatan 7 knot. Ketiga lintasan ini digunakan dengan arah arus laut berasal dari utara.

**Tabel 3. 1** Titik Koordinat Lintasan A

Titik Lintasan	DMS (Degree Minute Second)		UTM (Universal Transverse Mercator)		Setting UTM	
	Bujur	Lintang	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
Ketapang	114° 24' 09.93" BT	08° 08' 32.31" LS	213726.80	9098868.20	0.00	0.00
1	114° 24' 19.90" BT	08° 08' 40.17" LS	214098.34	9098810.81	371.54	-57.39
2	114° 24' 30.76" BT	08° 08' 42.09" LS	214431.43	9098753.91	704.63	-114.29
3	114° 24' 46.63" BT	08° 08' 45.59" LS	214918.35	9098649.37	1191.55	-218.83
4	114° 24' 56.71" BT	08° 08' 48.79" LS	215227.75	9098553.11	1500.95	-315.09
5	114° 25' 05.23" BT	08° 08' 51.45" LS	215489.11	9098473.02	1762.31	-395.18
6	114° 25' 19.82" Bt	08° 08' 57.85" LS	215937.14	9098279.03	2210.34	-589.17
7	114° 25' 31.55" BT	08° 09' 04.18 " LS	216297.80	9098086.77	2571.00	-781.43
8	114° 25' 42.06" BT	08° 09' 09.82" LS	216620.72	9097915.62	2893.92	-952.58
9	114° 25' 56.83" BT	08° 09' 18.70" LS	217074.91	9097645.30	3348.11	-1222.90
11	114° 26' 03.33" BT	08° 09' 24.45" LS	217275.30	9097469.70	3548.50	-1398.50
Gilimanuk	114° 26' 11.70" BT	08° 09' 38.30" LS	217534.20	9097045.70	3807.40	-1822.50

Data yang diperoleh dari Google Earth berbentuk koordinat DMS (*Degree Minute Second*). Kemudian untuk mempermudah dalam penelitian data dari google earth di konversi menjadi koordinat UTM (*Universal Transverse Mercator*).

Kemudian dilakukan penyederhanaan dengan pelabuhan awal yaitu ketapang menjadi koordinat (0,0). Setelah itu data diolah menggunakan metode *Line of sight* (LOS) untuk menentukan *Heading reference* pada kapal sebagai set point sistem kontrol. Koordinat lintasan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.1 untuk lintasan A, Tabel 3.2 untuk lintasan B dan Tabel 3.3 untuk lintasan C.

**Tabel 3.2** Titik Koordinat Lintasan B

Titik Lintasan	DMS (Degree Minute Second)		UTM (Universal Transverse Mercator)		Setting UTM	
	Bujur	Lintang	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
Ketapang	114° 24' 07.90" BT	08° 08' 38.03" LS	213730.5	9098874	0	0
1	114° 24' 20.32" BT	08° 08' 36.95" LS	214110.8	9098909.7	380.28	35.7
2	114° 24' 34.75" BT	08° 08' 36.38" LS	214552.6	9098930.1	822.03	56.08
3	114° 24' 48.98" BT	08° 08' 37.33" LS	214988.7	9098903.6	1258.16	29.6
4	114° 25' 01.86" BT	08° 08' 38.86" LS	215383.7	9098859.3	1653.16	-14.7
5	114° 25' 14.15" BT	08° 08' 42.18" LS	215760.8	9098759.4	2030.23	-114.61
6	114° 25' 26.08" BT	08° 08' 48.09" LS	216127.2	9098580.3	2396.63	-293.71
7	114° 25' 37.43" BT	08° 08' 55.89" LS	216476.3	9098342.5	2745.72	-531.44
8	114° 25' 47.81" BT	08° 09' 04.84" LS	216796.1	9098069.5	3065.59	-804.47
9	114° 25' 57.62" BT	08° 09' 14.36" LS	217098.4	9097778.8	3367.9	-1095.18
10	114° 26' 06.71" BT	08° 09' 30.26" LS	217380	9097291.7	3649.51	-1582.26
Gilimanuk	114° 26' 12.11" BT	08° 09' 38.76" LS	217547.1	9097031.6	3816.56	-1842.41

**Tabel 3.3** Titik Koordinat Lintasan C

Titik Lintasan	DMS (Degree Minute Second)		UTM (Universal Transverse Mercator)		Setting UTM	
	Bujur	Lintang	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
Ketapang	114° 24' 07.78" BT	08° 08' 38.22" LS	213726.8	9098868.2	0	0
1	114° 24' 23.12" BT	08° 08' 31.41" LS	214195.3	9099080.6	468.48	212.42
2	114° 24' 40.48" BT	08° 08' 29.35" LS	214726.8	9099147.2	999.97	279.03
3	114° 24' 56.95" BT	08° 08' 30.23" LS	215231.4	9099123.6	1504.58	255.4
4	114° 25' 12.99" BT	08° 08' 31.55" LS	215723.2	9099086.1	1996.33	217.85
5	114° 25' 27.69" BT	08° 08' 36.99" LS	216174.5	9098921.8	2447.62	53.55
6	114° 25' 42.39" BT	08° 08' 46.25" LS	216626.6	9098640	2899.71	-228.21
7	114° 25' 53.23" BT	08° 08' 57.27" LS	216960.7	9098303.3	3233.85	-564.95
8	114° 25' 58.87" BT	08° 09' 10.94" LS	217136.2	9097884.2	3409.34	-984.02
9	114° 26' 03.33" BT	08° 09' 24.45" LS	217275.3	9097469.7	3548.45	-1398.55
Gilimanuk	114° 26' 11.70" BT	08° 09' 38.30" LS	217534.2	9097045.7	3807.37	-1822.55

### 3.3 Pengambilan Data Data Gangguan

Data yang dikumpul berupa data kecepatan gelombang dan kecepatan arus pada lintasan trayektori. Pengambilan data gangguan ini bertujuan agar hasil simulasi yang dilakukan dapat mendekati hasil kondisi sebenarnya di laut. Data kondisi cuaca Selat Bali Utara diambil dari situs resmi BMKG maritim pada 26 mei 2022. Selat Bali Utara memiliki ketinggian gelombang laut berkisar 0.25 – 2 meter, dan memiliki kecepatan arus berkisar 0 – 7 knots.

### 3.4 Pengambilan Data Spesifikasi Kapal

Pada tahap ini dilakukan pengambilan data spesifikasi kapal yang digunakan pada penelitian. Kapal yang digunakan adalah kapal *Ferry Ro Ro*. Spesifikasi kapal yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.4

**Tabel 3.4** Data Spesifikasi Kapal *Ferry Ro Ro* (Aisjah, 2021)

<b>L<sub>pp</sub> (Panjang)</b>	73.15 meter
<b>B (Lebar)</b>	15.2 meter
<b>T (Kedalaman)</b>	3.6 meter
<b>U (Kecepatan maksimum)</b>	4.63 m/s (9 Knot)
<b>m (massa kapal)</b>	2940 Ton
<b>C<sub>b</sub> (Koefisien Balok)</b>	0.734
<b>A<sub>δ</sub> (Rudder area)</b>	4.6 m <sup>2</sup>
<b>R (jari-jari)</b>	16.458 meter
<b>X<sub>g</sub> (Center of Gravity)</b>	3.045 meter

### 3.5 Pemodelan Propeller Kapal

Propeller kapal dimodelkan secara matematis dengan menggunakan pendekatan oleh Horigome, Hara, Hotta dan Hotsu sebagai bentuk matematis orde 1 seperti pada persamaan (2.20). Nilai parameter perhitungan yaitu untuk yaitu  $K_y$  (*gain constant*) sebesar 1 dan  $T_y$  (*time constant*) didapatkan dengan menggunakan persamaan (2.19) dengan nilai  $n$  (kecepatan putaran propeller) sebesar 150 RPM atau sebesar 2.5 RPS sehingga didapatkan nilai  $T_y$  sebesar 2.26195. Sehingga didapatkan pemodelan fungsi alih propeller seperti pada persamaan (3.2)

$$T_y \approx 0.9 \frac{2\pi}{n} = 0.9 \frac{2\pi}{2,5} = 2.26195 \quad (3.1)$$

$$\frac{Q_m}{Y}(s) = \frac{1}{1 + 2.26195s} \quad (3.2)$$

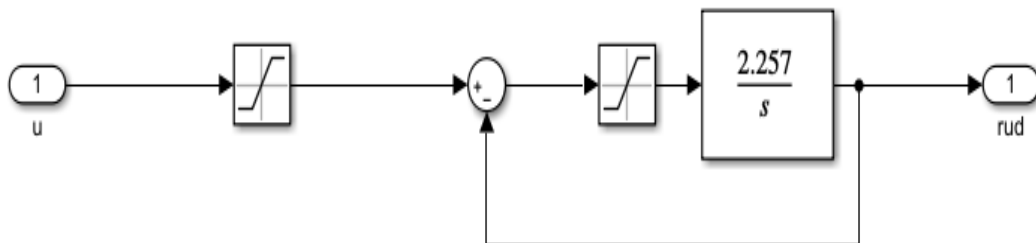
### 3.6 Pemodelan Rudder Kapal

Rudder kapal dimodelkan secara matematis dengan menggunakan pendekatan Van Amerongen. Pada pemodelan Rudder Van Amerongen memiliki spesifikasi bukaan sudut antara  $-35^\circ$  sampai dengan  $35^\circ$ . Selain itu pemodelan ini

memiliki variasi laju bukaan antara  $-7^\circ/s$  sampai dengan  $7^\circ/s$ . kemudian dilakukan perhitungan menggunakan persamaan (2.21) dengan  $L$  sebesar 73.15,  $U$  sebesar 4.63, dan  $K_g$  sebesar 0.1428. Nilai  $K_g$  didapatkan dengan menggunakan persamaan (2.22). dari nilai parameter yang telah diketahui sehingga didapatkan nilai  $K_g'$  sebesar 2.257 seperti pada persamaan (3.4). Sehingga didapatkan blok diagram rudder seperti pada Gambar 3.3

$$K_g = \frac{\delta_m}{\delta_{emax}} = \frac{1}{7} = 0.2857 \quad (3.3)$$

$$K_g' = \frac{K_g L}{U} = \frac{0.2857 * 73.15}{4.63} = 2.257 \quad (3.4)$$



**Gambar 3.3** Blok Diagram pemodelan sistem Rudder Kapal

### 3.7 Pemodelan Dinamika Kapal

Pada tahap ini dilakukan pemodelan dinamika kapal menggunakan pemodelan Davidson dan Schiff (2006) untuk sway dan yaw dapat dilihat pada persamaan (2.3) dan (2.4) (T. Fossen, 1994). Dengan menggunakan data spesifikasi kapal yang telah didapatkan sebelumnya. Kemudian dilakukan perhitungan perhitungan *nondimensional* kapal dari massa dan center of gravity. Berikut merupakan data hasil perhitungan variabel *non dimensional* kapal

**Tabel 3.5** Data Spesifikasi Kapal *Non Dimensional*

$m'$ (Massa)	0.0000147
$X_g'$ (Center of Gravity)	0.04163

Setelah itu, dilakukan perhitungan koefisien hidrodinamika kapal dengan menggunakan persamaan (2.11) sampai (2.18). Didapatkan tabel data hasil perhitungan koefisien hidrodinamika kapal *ferry ro-ro* yang ditunjukkan pada Tabel 3.6.

**Tabel 3.6** Koefisien Hidrodinamika *ferry ro-ro*

Koefisien	Nilai
$Y'_v$	-0.01704
$Y'_r$	0.00289
$N'_v$	-0.00470
$N'_r$	-0.00227
$Y'_{\dot{v}}$	-0.00971
$Y'_{\dot{r}}$	-0.00061
$N'_{\dot{v}}$	-0.00042
$N'_{\dot{r}}$	-0.00051
$Y'_\delta$	0.01371
$N'_\delta$	-0.00686
$I'_z$	0.00397
$I'_r$	0.00411

Setelah didapatkan nilai koefisien hidrodinamika kapal, kemudian dilakukan perhitungan dinamika kapal menggunakan persamaan (2.8), (2.9) dan (2.10) dengan hasil sebagai berikut

$$M = \begin{bmatrix} 0.009722 & 0.000612 & 0 \\ 0.000422 & 0.004483 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$N = \begin{bmatrix} 0.017041 & -0.002882 & 0 \\ 0.004703 & 0.0022704 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$b = \begin{bmatrix} 0.013712 \\ -0.006856 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Setelah nilai M N dan b didapatkan, kemudian disubstitusikan ke persamaan (2.6) sehingga didapat persamaan berikut

$$\begin{bmatrix} 0.00972 & 0.00061 & 0 \\ 0.00042 & 0.00448 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.01704 & -0.00288 & 0 \\ 0.00470 & 0.00227 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01371 \\ -0.00686 \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (3.8)$$

Untuk mendapatkan persamaan state space, nilai M, N dan b disubstitusikan ke dalam persamaan (2.7). Sehingga didapatkan persamaan state space sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.69704 & 0.33029 & 0 \\ -0.88908 & -0.53754 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.5159 \\ -1.67215 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R \quad (3.9)$$

### 3.8 Pemodelan Kapal dengan gangguan

Pada tahap ini dilakukan pemodelan gangguan lingkungan agar hasil dari simulasi mendekati kondisi yang sesungguhnya. Gangguan kondisi cuaca selat bali utara yang diambil dari situs resmi BMKG maritim. Selat Bali Utara memiliki ketinggian gelombang laut berkisar 0.25 – 2 meter, dan memiliki kecepatan arus berkisar 0 – 7 knot. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Aisjah tahun 2010 Gangguan gelombang dibagi menjadi 2 yaitu frekuensi rendah dan frekuensi tinggi (Aisjah, 2010). Berikut merupakan pemodelan gangguan cuaca pada penelitian ini.

#### 3.8.1 Pemodelan Arus Laut

Pada tahap ini dilakukan pemodelan arus laut. Pada penelitian ini digunakan kecepatan arus laut sebesar 3 knot dan 7 knot kemudian nilai  $\mu_o$  sebesar 0.1. Untuk memodelkan arus laut digunakan persamaan (2.40) untuk mendapatkan nilai  $V_c(t)$

$$V_c(t) = 1.5433 + t(\omega(t) - 0.15433) \quad (3.10)$$

$$V_c(t) = 3.6011 + t(\omega(t) - 0.36011) \quad (3.11)$$

Persamaan (3.10) merupakan pemodelan arus dengan kecepatan 3 knot atau 1.5433 m/s sedangkan persamaan (3.11) merupakan pemodelan arus dengan kecepatan 7 knot atau 3.6011 m/s. pada penelitian ini arus mengarah dari utara ke selatan dan asumsikan 1 arah sehingga nilai  $\beta$  adalah  $60^\circ$ . Kemudian laut dimodelkan dengan persamaan (2.41) dan (2.42) sehingga didapatkan pemodelan berikut. Pemodelan kecepatan arus 3 knot yang ditunjukkan pada persamaan (3.12) dan (3.13)

$$u(t) = (1.5433 + t(\omega(t) - 0.36011))\sin(\beta - \psi) \quad (3.12)$$

$$v_c(t) = (1.5433 + t(\omega(t) - 0.36011))\sin(\beta - \psi) \quad (3.13)$$

Pemodelan kecepatan arus 7 knot yang ditunjukkan pada persamaan (3.14) dan (3.15)

$$u(t) = (3.6011 + t(\omega(t) - 0.36011))\sin(\beta - \psi) \quad (3.14)$$

$$v_c(t) = (3.6011 + t(\omega(t) - 0.36011))\sin(\beta - \psi) \quad (3.15)$$

#### 3.8.2 Pemodelan Gelombang Frekuensi Rendah

Pada tahap ini dilakukan pemodelan gelombang frekuensi rendah. Dilakukan perhitungan persamaan *state space* menggunakan persamaan (2.29), (2.30) dan (2.31). Didapatkan persamaan (3.16), (3.17) dan (3.18)

$$A_L = \begin{bmatrix} -1.69704 & 0.33029 & 0 \\ -0.88908 & -0.53754 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$B_L = \begin{bmatrix} 1.5159 \\ -1.67215 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$E_L = \begin{bmatrix} 1.5159 \\ -1.67215 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Kemudian persamaan *state space* yang telah didapatkan di masukan kedalam persamaan (2.27) sehingga didapatkan persamaan (3.19)

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_L \\ \dot{v}_L \\ \dot{r}_L \\ \dot{x}_L \\ \dot{y}_L \\ \dot{\psi}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1.69704 & 0.330286 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.88908 & -0.53754 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ r_L \\ x_L \\ y_L \\ \psi_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1.5159 \\ -1.67215 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\delta_R + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1.5159 \\ -1.67215 \\ 0 \end{bmatrix} w_L$$

### 3.8.3 Pemodelan Gelombang Frekuensi Tinggi

Pada tahap ini dilakukan pemodelan gelombang frekuensi tinggi. Untuk memodelkan gelombang frekuensi tinggi terlebih dahulu dilakukan perhitungan untuk mencari  $\omega_0$  dan  $K_w$  menggunakan persamaan (2.33) dan (2.34) dengan nilai  $\zeta$  yaitu 1 dan  $\tau_w=3.16$  sehingga didapatkan persamaan berikut

$$\omega_0 = 0.12522H^{-0.5} \quad (3.14)$$

$$K_w = 0.79139H^{-0.5} \quad (3.15)$$

Kemudian didapatkan pemodelan gelombang frekuensi tinggi pada persamaan (3.16). Setelah itu, Pemodelan gelombang frekuensi rendah dan frekuensi tinggi digunakan untuk model plant secara lengkap dengan menggunakan persamaan (2.35). Hasil model ditunjukkan pada persamaan (3.17)

### 3.9 Perancangan Sistem *Trajectory Guidance* dengan Gangguan

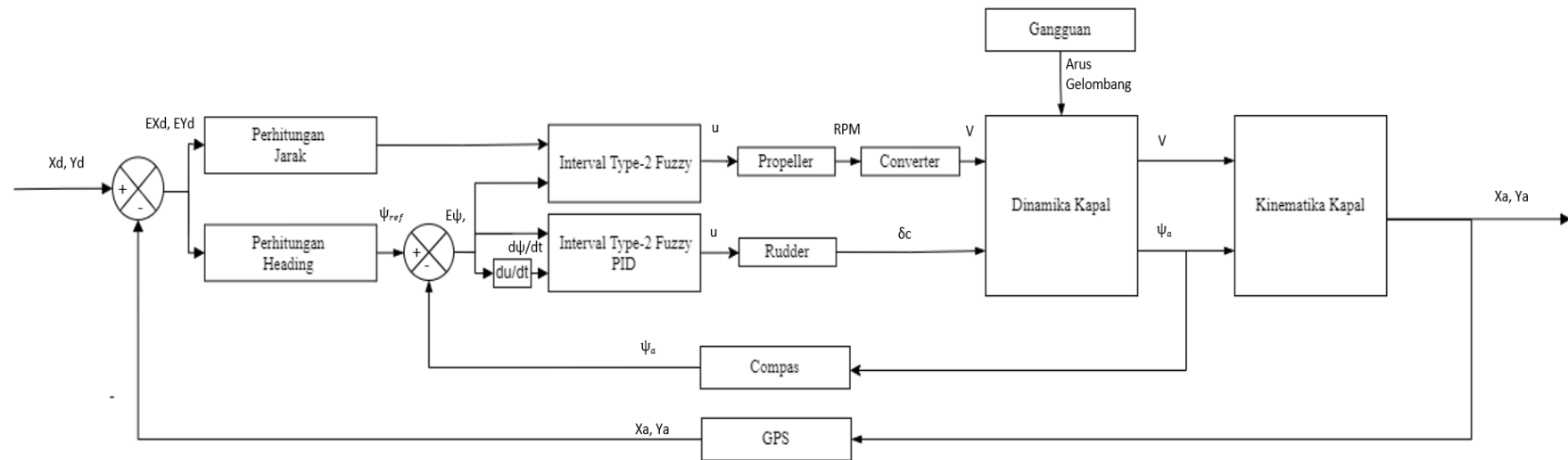
Tahap perancangan *Trajectory Guidance* ini diawali dengan perancangan diagram blok yang menjelaskan proses pengendalian, terdapat sistem pengendalian dengan menggunakan *Type-2 Fuzzy PID* (T2FPID), parameter yang dikendalikan



$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_x \\ \dot{\xi}_y \\ \dot{\xi}_\psi \\ \dot{x}_H \\ \dot{y}_H \\ \dot{\psi}_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -0.25044H^{-0.5} & 0 & 0 & -1.568H^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & -0.25044H^{-0.5} & 0 & 0 & -1.568H^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & -0.25044H^{-0.5} & 0 & 0 & -1.568H^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_x \\ \xi_y \\ \xi_\psi \\ x_H \\ y_H \\ \psi_H \end{bmatrix} + 0.79139H^{-0.5} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ w_x \\ w_y \\ w_\psi \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_L \\ \dot{v}_L \\ \dot{r}_L \\ \dot{x}_L \\ \dot{y}_L \\ \dot{\psi}_L \\ \dot{\xi}_x \\ \dot{\xi}_y \\ \dot{\xi}_\psi \\ \dot{x}_H \\ \dot{y}_H \\ \dot{\psi}_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1.69704 & 0.33029 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.88908 & -0.53754 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ & & & & & & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & -0.25044H^{-0.5} & 0 & 0 & -1.568H^{-1} & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & -0.25044H^{-0.5} & 0 & 0 & -1.568H^{-1} & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 & -0.25044H^{-0.5} & 0 & 0 & -1.568H^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ r_L \\ x_L \\ y_L \\ \psi_L \\ \xi_x \\ \xi_y \\ \xi_\psi \\ x_H \\ y_H \\ \psi_H \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1.5159 \\ -1.67215 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1.5159 \\ -1.67215 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.79139H^{-0.5} \\ 0.79139H^{-0.5} \\ 0.79139H^{-0.5} \end{bmatrix} w$$



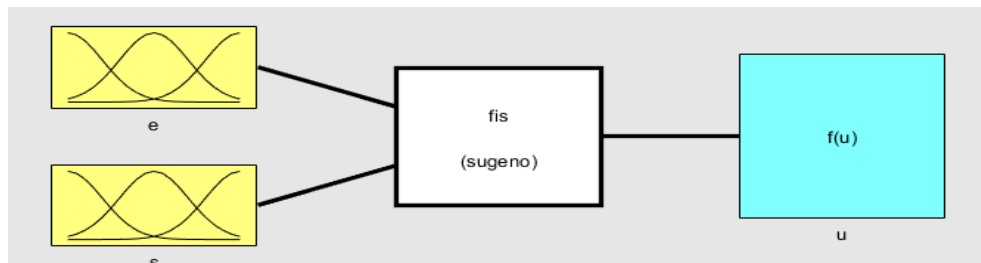
**Gambar 3.4** Diagram Blok Sistem Pengendalian

yaitu sudut haluan kapal dan kecepatan kapal. Kemudian dibuat simulasi menggunakan Simulink sesuai dengan desain dan pemodelan yang dibuat. Berikut merupakan diagram blok sistem pada penelitian ini yang dapat dilihat pada Gambar 3.4.

Perancangan dilakukan menggunakan Simulink dengan diagram blok seperti pada Gambar 3.4. Input yang digunakan berupa titik koordinat ( $X_d$ ,  $Y_d$ ), kemudian nilai *error* koordinat digunakan untuk menghitung *heading* dan jarak terhadap titik tujuan. Pada sistem pengendalian *propeller* menggunakan himpunan *fuzzy* tipe 2 Metode Sugeno. Pada pengendali *propeller* memiliki variabel masukan berupa jarak dan *error heading* dan variabel keluarannya adalah sinyal kontrol untuk mengendalikan *propeller*. Pada pengendali *rudder* menggunakan 2 buah *input* yaitu *error* ( $e$ ) dan delta *error* ( $\Delta e$ ). Kedua variabel *input* akan dikalikan dengan *Scaling Factor*. Setelah  $e$  dan  $\Delta e$  dikalikan dengan *scaling factor*, maka kedua variabel tersebut akan masuk ke dalam sistem logika *fuzzy*. Kemudian *Output* dari sistem logika *fuzzy* akan diteruskan ke sistem pengendali PID. Sistem Logika *Fuzzy* akan melakukan *tuning* untuk menentukan parameter pengendali PID sehingga pengendali PID menjadi adaptif. Pada sistem ini juga digunakan gangguan berupa arus dan gelombang laut yang dapat memengaruhi dinamika kapal.

### 3.9.1 Perancangan pengendali *type 2 fuzzy* mengatur Kecepatan Kapal

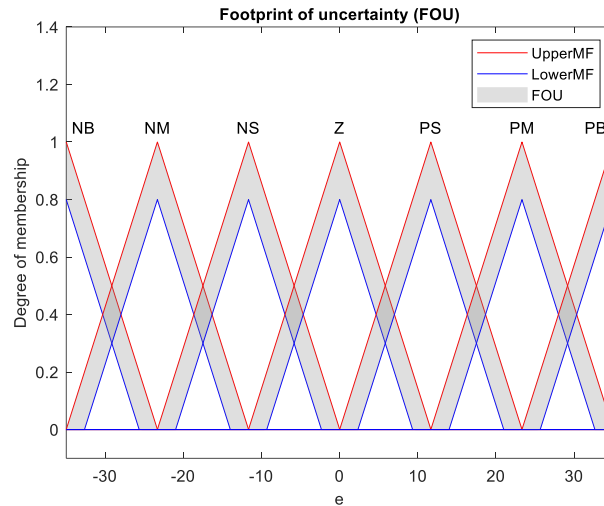
Pada tahap ini dilakukan perancangan sistem pengendali *type 2 fuzzy logic* untuk mengatur kecepatan kapal menggunakan *Fuzzy Inference System (FIS)* metode sugeno. Sistem pengendali ini memiliki 2 variabel masukan dan 1 variabel keluaran. Pada Gambar 3.5 merupakan blok sistem pengendali kecepatan



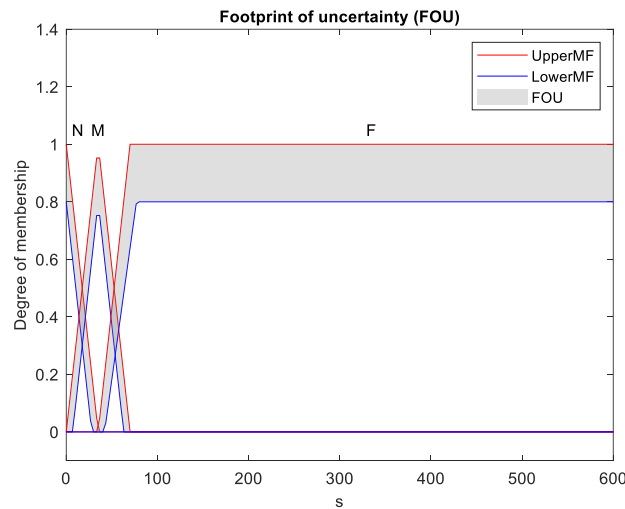
**Gambar 3.5** Blok pengendali kecepatan

Gambar 3.5 menunjukkan Sistem *Type 2 Fuzzy logic* ini memiliki variabel masukan berupa *error heading* ( $e$ ) dan jarak kapal ( $s$ ). Sedangkan keluaran berupa sinyal kontrol kecepatan ( $U$ ). Sinyal kontrol ini akan diteruskan ke propeller kapal

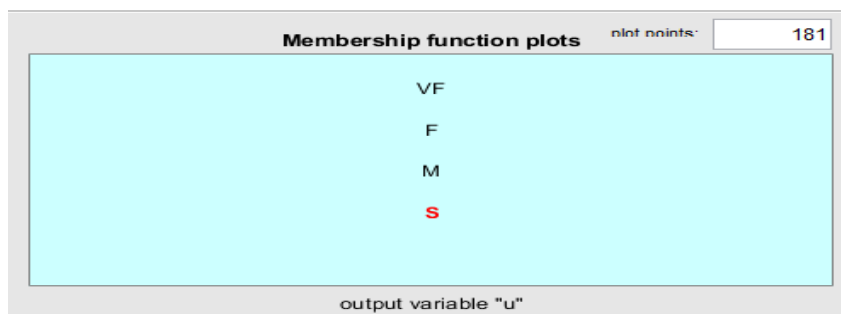
untuk menentukan kecepatan kapal. *Type reducer* yang digunakan yaitu *Enhanced Iterative Algorithm with Stop Condition (EIASC)* dikarenakan EIASC memiliki komputasi yang lebih cepat dibandingkan *type reducer* lainnya (Wu, 2011). Berikut merupakan *membership function* pada kontrol kecepatan



**Gambar 3.6** Fungsi keanggotaan variabel *input error heading (e)*



**Gambar 3.7** Fungsi keanggotaan variabel *input jarak kapal (s)*



**Gambar 3.8** Fungsi keanggotaan variabel *output “U”*

Berdasarkan Gambar 3.6, Gambar 3.7 dan Gambar 3.8 pada variabel *error heading* (*e*) memiliki 7 *Membership function* yaitu NB (*Negative Small*), NM (*Negative Medium*), NS (*Negative Small*), Z (*Zero*), PS (*Positive Small*), PM (*Positive Medium*) dan PB (*Positive Big*). Bentuk *Membership function* pada variabel *error heading* (*e*) yaitu *trimf* dengan rentang antara -35 sampai 35. Pada variabel jarak (*s*) kapal memiliki 3 *Membership function* yaitu N (*Near*), M (*Medium*), dan F (*Far*). Bentuk *Membership function* pada variabel jarak kapal yaitu *trimf* dengan rentang antara 0 sampai 600. Sedangkan pada variabel U memiliki 4 *Membership function* berupa konstanta, yaitu S (*Slow*), M (*Medium*) dan F (*Fast*) dan VF (*Very Fast*). Keluaran dari sistem *type 2 fuzzy* untuk kecepatan adalah berupa sinyal kontrol dengan satuan RPM. Kemudian akan dikonversi menjadi satuan m/s menggunakan persamaan (3.18).

$$V(m/s) = r \times \frac{2\pi}{60} \times N(RPM) \quad (3.18)$$

Masing-masing dari ketiga fungsi keanggotaan variabel U ini memiliki nilai 35 RPM, 75 RPM, 100 RPM dan 150 RPM. Berikut merupakan *rule base* untuk sistem *type 2 fuzzy* pengendali kecepatan dapat dilihat pada Tabel 3.7 Berikut

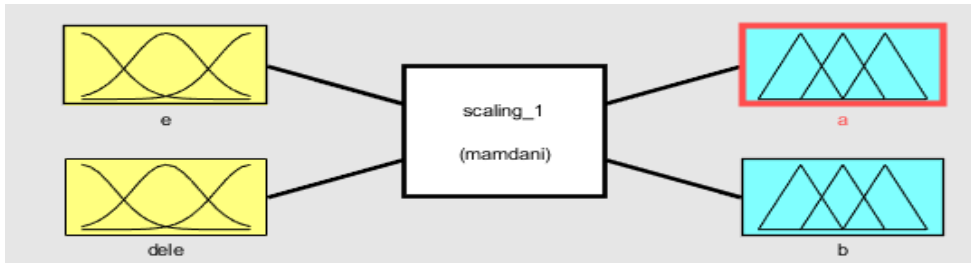
**Tabel 3.7** *Rule base* Sistem *Fuzzy* Kecepatan

e \ s	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
N	S	S	S	M	S	S	S
M	S	M	M	F	M	M	S
F	S	M	F	VS	F	M	S

### 3.9.2 Perancangan *Scaling Factor* dengan pengendali *type 2 Fuzzy*

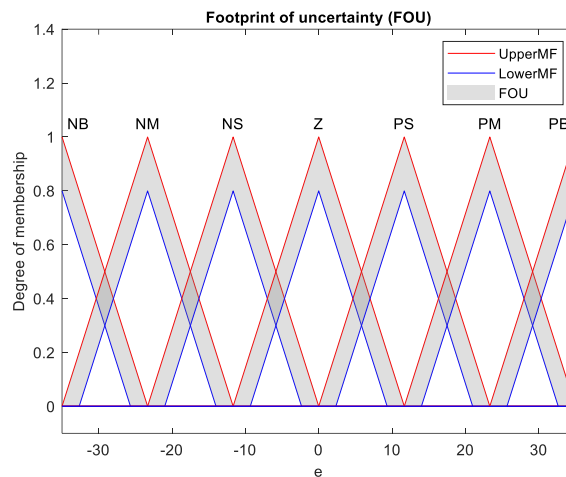
Pada tahap ini dilakukan perancangan *Scaling Factor* dengan pengendali *type 2 Fuzzy* hal ini bertujuan untuk meningkatkan keadaptifan dari sistem pengendali rudder. Pada *scaling factor* bekerja dengan memberikan angka pengali pada variabel *input* dari sistem pengendali rudder, yaitu nilai *error* (*e*) dan *delta error* ( $\Delta e$ ). *Scaling Factor* ini menggunakan *Fuzzy Inference System* (FIS) tipe mamdani. Sistem pengendali *type 2 fuzzy* untuk *scaling factor* memiliki 2 *input* dan 2 *output*. *Input* sistem berupa nilai *error* (*e*) dan *delta error* ( $\Delta e$ ) sedangkan *output*nya yaitu A dan B. *Output* sistem pengendali ini berfungsi sebagai pengali,

dimana nilai A merupakan pengali dari nilai *error* ( $e$ ) sedangkan nilai B merupakan pengali nilai *delta error* ( $\Delta e$ ). Blok *fuzzy* PID untuk *scaling factor* dapat dilihat pada Gambar 3.9 berikut

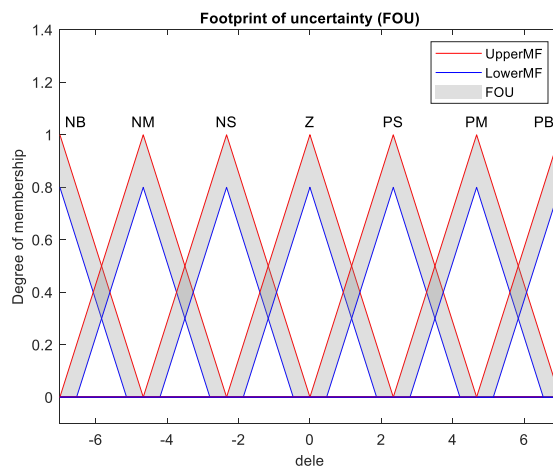


**Gambar 3.9** Blok sistem pengendali *type 2 fuzzy* untuk *scaling factor*

*Type reducer* yang digunakan yaitu *Enhanced Iterative Algorithm with Stop Condition (EIASC)* dikarenakan *EIASC* memiliki komputasi yang lebih cepat dibandingkan *type reducer* lainnya (Wu, 2011). Berikut merupakan *Membership function* pada sistem pengendali *type 2 fuzzy* untuk *scaling factor*

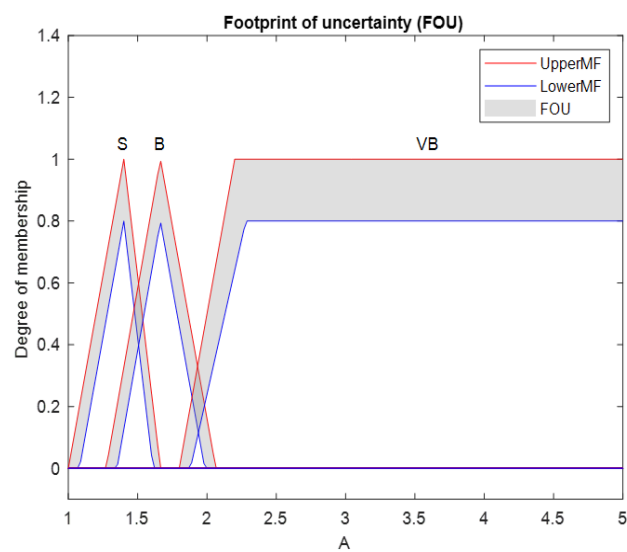


**Gambar 3.10** Fungsi keanggotaan variabel *Input* “ $e$ ”

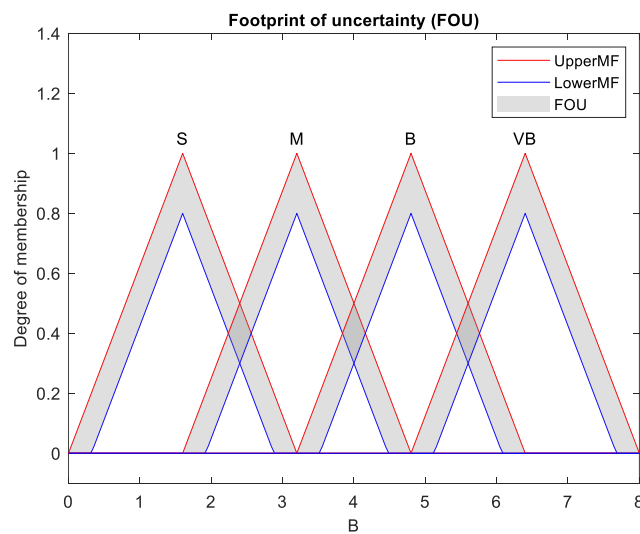


**Gambar 3.11** Fungsi keanggotaan variabel *Input* “ $\Delta e$ ”

Berdasarkan Gambar 3.10 dan Gambar 3.11 Variabel *input* pada sistem ini, yaitu  $e$  dan  $\Delta e$ , memiliki 7 fungsi keanggotaan. 7 Fungsi keanggotaan yang dimiliki oleh kedua variabel ini adalah NB (*Negative Small*), NM (*Negative Medium*), NS (*Negative Small*), Z (*Zero*), PS (*Positive Small*), PM (*Positive Medium*) dan PB (*Positive Big*). Keseluruhan fungsi keanggotaan, baik itu pada variabel  $e$  maupun  $\Delta e$ , memiliki bentuk fungsi keanggotaan *trimf*. Nilai variabel  $e$  memiliki rentang nilai  $-35^\circ$  sampai dengan  $35^\circ$ , sedangkan nilai variabel  $\Delta e$  memiliki rentang nilai  $-7^\circ$  sampai dengan  $7^\circ$ .



**Gambar 3.12** Fungsi keanggotaan variabel *Output* "A"



**Gambar 3.13** Fungsi keanggotaan variabel *Output* "B"

Berdasarkan Gambar 3.12 dan Gambar 3.13, variabel *output* pada sistem kendali *type 2 fuzzy* untuk *scaling factor* memiliki 2 variabel. Kedua variabel *output* tersebut adalah A dan B. Variabel *output* A memiliki 3 fungsi keanggotaan, yaitu S (*Small*), B (*Big*) dan VB (*Very Big*). Sedangkan variabel *output* B memiliki 4 fungsi keanggotaan, yaitu S (*Small*), M (*Medium*), B (*Big*) dan VB (*Very Big*). *Rule Base* yang digunakan pada sistem *type 2 fuzzy* untuk *scaling factor* juga dapat dilihat pada Tabel 3.8 dan Tabel 3.9

**Tabel 3.8** *Rule Base* Sistem Fuzzy Faktor Penyekala output A

$\Delta e$ \ e	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	B	VB	B	B	B	B	B
NM	B	VB	B	B	B	B	B
NS	B	VB	B	S	B	B	B
Z	B	VB	S	S	S	VB	B
PS	B	VB	B	S	B	VB	B
PM	B	B	B	B	B	VB	B
PB	B	B	B	B	B	VB	B

**Tabel 3.9** *Rule Base* Sistem Fuzzy Faktor Penyekala output B

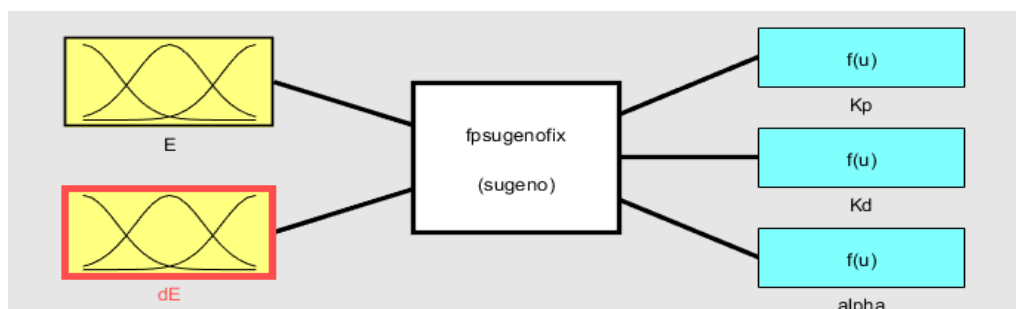
$\Delta e$ \ e	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	S	S	S	S	S	S	S
NM	M	M	S	S	S	M	M
NS	B	M	M	S	M	M	B
Z	VB	VB	B	S	B	VB	VB
PS	B	M	M	S	M	M	B
PM	M	M	S	S	S	M	M
PB	S	S	S	S	S	S	S

Pada Tabel 3.8 dan Tabel 3.9 merupakan *rule base* yang digunakan untuk menentukan variabel output, yaitu A dan B. Keluaran dari sistem *fuzzy* ini sebagai angka pengali pada variabel *input* dari sistem pengendali rudder, yaitu nilai *error* ( $e$ ) dan *delta error* ( $\Delta e$ ).



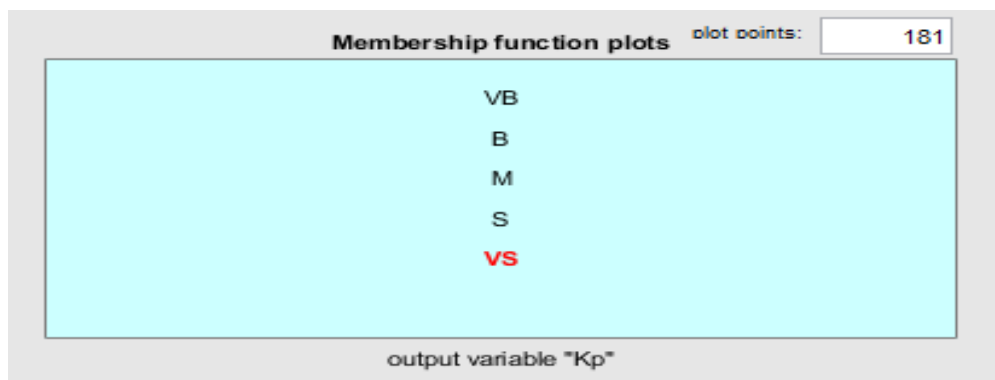
### 3.9.3 Perancangan Pengendali fuzzy tipe 2 PID

Pada pengendali *system* logika fuzzy tipe 2 untuk *tuning PID* memiliki variabel *input* yang digunakan berupa  $e$  dan  $\Delta e$  dari *heading* kapal. *Membership function* variabel *input*  $e$  dan  $\Delta e$ , dapat dilihat pada Gambar 3.10 dan Gambar 3.11. Selain itu, sistem ini memiliki variabel *output* berupa  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $\alpha$  untuk mendapatkan parameter PID menggunakan persamaan (2.38) sampai (2.40). Sistem *type 2 fuzzy logic* untuk *tuning PID* ini menggunakan *Fuzzy Inference System* (FIS) tipe Sugeno. Arsitektur sistem yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Blok Fuzzy Untuk Variabel  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $\alpha$

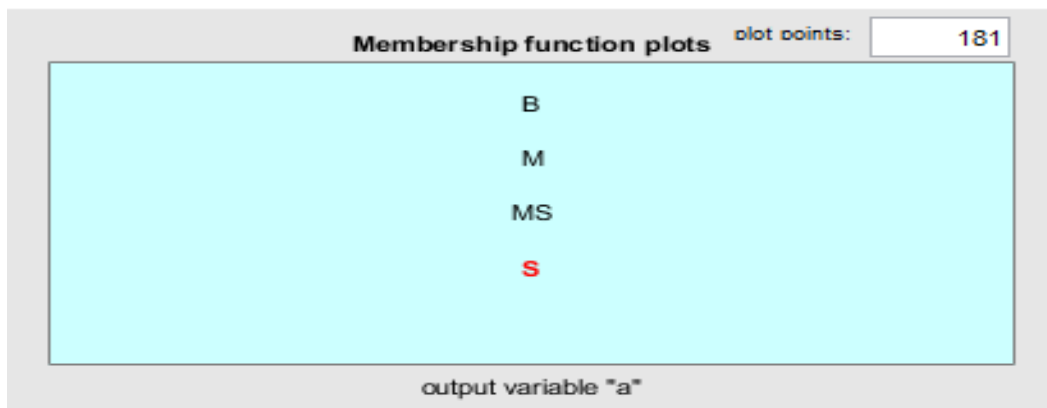
Berikut merupakan *membership function output* yang digunakan



Gambar 3.15 Fungsi keanggotaan variabel *output*  $K_p'$



Gambar 3.16 Fungsi keanggotaan variabel *output*  $K_d'$



**Gambar 3.17** Fungsi keanggotaan variabel *output alpha*

Berdasarkan Gambar 3.15 dan Gambar 3.16, dapat diketahui bahwa variabel *output*  $K_p'$  dan  $K_d'$  disusun dengan 5 fungsi keanggotaan, yaitu VS (*Very Small*), S (*Small*), M (*Medium*), B (*Big*) dan VB (*Very Big*). Kedua variabel *output* juga memiliki rentang nilai yang sama, yaitu berkisar antara 0-1. Kemudian pada gambar 3.17, variabel *Output*  $\alpha$  memiliki empat fungsi keanggotaan yaitu S (*Small*), MS (*Medium Small*), M (*Medium*), dan B (*Big*). Masing-masing dari fungsi keanggotaan memiliki nilai konstanta sebesar 15, 20, 30 dan 40 secara berturut-turut. Berikut merupakan rule base yang digunakan pada *type 2 fuzzy PID*.

Pada Tabel 3.10, Tabel 3.1 dan Tabel 3.12 merupakan *rule base* yang digunakan untuk menentukan variabel *output*, yaitu  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $\alpha$ . Keluaran dari sistem *fuzzy* ini akan digunakan untuk menentukan parameter  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $K_i'$  seperti pada persamaan (2.38) dan (2.40).

**Tabel 3.10** Rule Base Untuk Variabel *Output*  $K_p'$

$\Delta e$ \ e	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	M	S	VS	S	VS	S	M
NM	B	M	S	M	S	M	B
NS	VB	B	B	B	B	B	VB
Z	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB
PS	VB	B	B	B	B	B	VB
PM	B	M	S	M	S	M	B
PB	M	S	VS	S	VS	S	M

**Tabel 3.11** Rule Base Untuk Variabel Output  $K_d'$ 

$\Delta e$ \ e	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	S	M	B	VB	B	B	S
NM	VS	S	M	VB	M	S	VS
NS	VS	VS	S	VB	S	VS	VS
Z	VS	VS	VS	VB	VS	VS	VS
PS	VS	VS	S	VB	S	VS	VS
PM	VS	S	M	VB	M	S	VS
PB	S	M	B	VB	B	M	S

**Tabel 3.12** Rule Base Untuk Variabel Output Alfa

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

### 3.10 Pengujian Sistem

Pada tahap ini dilakukan pengujian sistem dengan melakukan simulasi sistem *trajectory guidance* yang telah dirancang. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software MATLAB 2020a* yang bertujuan untuk mendapatkan data hasil simulasi yang merupakan representasi dari kondisi sebenarnya di lautan dengan adanya pengaruh gangguan lingkungan. Pengujian dilakukan dengan mengamati *error* lintasan antara *desired waypoint* ( $X_d, Y_d$ ) dan *actual waypoint* ( $X_a, Y_a$ ). Nilai *error* diperoleh dengan mencari nilai perbedaan jarak antara nilai

*actual waypoint*  $(X_a, Y_a)$  dari kapal dengan nilai *desired waypoint*  $(X_d, Y_d)$  trayektori yang dilewati oleh kapal.

### 3.11 Analisis Performansi Sistem

Pada tahap ini dilakukan analisis berdasarkan hasil parameter karakteristik performansi sistem baik secara *open loop* maupun *close loop* untuk selanjutnya dibandingkan dengan standar yang telah ditetapkan oleh IMO (*International Maritime Organization*). Keberhasilan sistem ditentukan dengan nilai *error trajectory* terhadap nilai *circle of acceptance* pada standar IMO.

### 3.12 Penyusunan Laporan

Setelah dilakukan analisis performansi sistem, maka tahap berikutnya adalah melakukan penyusunan laporan tugas akhir berdasarkan hasil analisis yang telah diperoleh. Laporan disusun dengan sistematika sebagai berikut

- a) BAB I Pendahuluan, berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika laporan
- b) BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori, berisi tentang review penelitian sebelumnya dan dasar teori yang digunakan dalam penelitian.
- c) BAB III Metodologi Penelitian, berisi tentang langkah langkah yang dilakukan dalam penelitian.
- d) BAB IV Hasil dan Pembahasan, berisi tentang analisis terhadap hasil penelitian.
- e) BAB V Penutup, berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil penelitian yang dilakukan.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan perancangan sistem trajectory guidance pada kapal dengan menggunakan metode pengendalian type 2 *fuzzy* PID. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan parameter pengendali Interval Type-2 *Fuzzy* PID (IT2FPID) pada sistem *trajectory guidance* agar berjalan optimal dan Mengevaluasi hasil performansi sistem pengendali Interval *Type-2 Fuzzy PID (IT2FPID)* dengan adanya gangguan cuaca.

#### 4.1 Spesifikasi Hasil Rancangan

Perancangan dilakukan menggunakan Simulink dengan diagram blok seperti pada Gambar 3.4. Input yang digunakan berupa titik koordinat ( $X_d$ ,  $Y_d$ ), kemudian nilai error koordinat digunakan untuk menghitung heading dan jarak terhadap titik tujuan. Pada sistem pengendalian propeller menggunakan himpunan *fuzzy* tipe 2 Metode Sugeno. Pada pengendali propeller memiliki variabel masukan berupa jarak dan *error heading*. Sedangkan variabel keluarannya adalah sinyal kontrol untuk mengendalikan propeller. Pada pengendali rudder menggunakan 2 buah sistem *fuzzy logic*, *fuzzy logic* untuk *scaling factor* dan *fuzzy logic* untuk *tuning parameter PID*. *fuzzy logic* untuk *scaling factor* menggunakan input yaitu *error* ( $e$ ) dan *delta error* ( $\Delta e$ ). Kemudian *output* dari sistem ini akan dikalikan dengan dua variabel input. Setelah  $e$  dan  $\Delta e$  dikalikan dengan *scaling factor*, maka kedua variabel tersebut akan masuk ke dalam sistem logika fuzzy. Kemudian Output dari sistem logika fuzzy akan diteruskan ke sistem dan *fuzzy logic* untuk *tuning parameter PID*. Sistem Logika Fuzzy akan melakukan tuning untuk menentukan parameter pengendali PID sehingga pengendali PID menjadi adaptif.

Sistem pengendalian propeller memiliki 2 input, yaitu variabel *error heading* ( $e$ ) dengan 7 *Membership function* yaitu NB (*Negative Small*), NM (*Negative Medium*), NS (*Negative Small*), Z (*Zero*), PS (*Positive Small*), PM (*Positive Medium*) dan PB (*Positive Big*). Bentuk *Membership function* pada variabel *error heading* ( $e$ ) yaitu *trimf* dengan rentang antara -35 sampai 35. Pada variabel jarak ( $s$ ) kapal memiliki 3 *Membership function* yaitu N (*Near*), M (*Medium*), dan F (*Far*).

Bentuk *Membership function* pada variabel jarak kapal yaitu trimf dengan rentang antara 0 sampai 600. Sedangkan pada variabel U memiliki 4 *Membership function* berupa konstanta, yaitu S (*Slow*), M (*Medium*) dan F (*Fast*) dan VF (*Very Fast*).

Sistem *fuzzy logic* untuk *scaling factor* memiliki variabel *input*, yaitu  $e$  dan  $\Delta e$ , dengan 7 fungsi keanggotaan. 7 Fungsi keanggotaan yang dimiliki oleh kedua variabel ini adalah NB (*Negative Small*), NM (*Negative Medium*), NS (*Negative Small*), Z (*Zero*), PS (*Positive Small*), PM (*Positive Medium*) dan PB (*Positive Big*). Keseluruhan fungsi keanggotaan, baik itu pada variabel  $e$  maupun  $\Delta e$ , memiliki bentuk fungsi keanggotaan *trimf*. Nilai variabel  $e$  memiliki rentang nilai  $-35^\circ$  sampai dengan  $35^\circ$ , sedangkan nilai variabel  $\Delta e$  memiliki rentang nilai  $-7^\circ$  sampai dengan  $7^\circ$ . Variabel *output* pada sistem ini memiliki 2 variabel. Kedua variabel *output* tersebut adalah A dan B. Variabel *output* A memiliki 3 fungsi keanggotaan, yaitu S (*Small*), B (*Big*) dan VB (*Very Big*). Sedangkan variabel *output* B memiliki 4 fungsi keanggotaan, yaitu S (*Small*), M (*Medium*), B (*Big*) dan VB (*Very Big*).

Sistem *fuzzy logic* untuk *tuning parameter PID* memiliki variabel *input*, yaitu  $e$  dan  $\Delta e$ , dengan 7 fungsi keanggotaan. 7 Fungsi keanggotaan yang dimiliki oleh kedua variabel ini adalah NB (*Negative Small*), NM (*Negative Medium*), NS (*Negative Small*), Z (*Zero*), PS (*Positive Small*), PM (*Positive Medium*) dan PB (*Positive Big*). Keseluruhan fungsi keanggotaan, baik itu pada variabel  $e$  maupun  $\Delta e$ , memiliki bentuk fungsi keanggotaan *trimf*. Nilai variabel  $e$  memiliki rentang nilai  $-35^\circ$  sampai dengan  $35^\circ$ , sedangkan nilai variabel  $\Delta e$  memiliki rentang nilai  $-7^\circ$  sampai dengan  $7^\circ$ . Variabel *output*  $K_p'$  dan  $K_d'$  disusun dengan 5 fungsi keanggotaan, yaitu VS (*Very Small*), S (*Small*), M (*Medium*), B (*Big*) dan VB (*Very Big*). Kedua variabel *output* juga memiliki rentang nilai yang sama, yaitu berkisar antara 0-1. Kemudian pada gambar 3.17, variabel *Output* alpha memiliki empat fungsi keanggotaan yaitu S (*Small*), MS (*Medium Small*), M (*Medium*), dan B (*Big*). Masing-masing dari fungsi keanggotaan memiliki nilai konstanta sebesar 15, 20, 30 dan 40 secara berturut-turut.

## 4.2 Analisis Sistem Pengendali Propeller

Sistem *Type 2 Fuzzy logic* pada pengendali Propeller memiliki variabel masukan berupa *error heading* dan jarak kapal (s) terhadap *waypoint*. Sedangkan

keluarannya berupa sinyal kontrol kecepatan (U), Sinyal kontrol ini akan diteruskan ke propeller kapal untuk menentukan kecepatan kapal. *Type reducer* yang digunakan yaitu *Enhanced Iterative Algorithm with Stop Condition (EIASC)* dikarenakan EIASC memiliki komputasi yang lebih cepat dibandingkan *type reducer* lainnya (Wu, 2011). Kemudian dilakukan skenario untuk memilih *membership function* pada pengendali *Type 2 Fuzzy* dengan *Footprint of uncertainty (FOU) Lower Scale 0.5* dan *Lower Lag 0.5*. *Membership* yang digunakan berjumlah berjumlah 7 *membership function* karena semakin banyak *membership function* hasil yang didapatkan semakin baik (Dwisaputra, 2016). Skenario yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut

**Tabel 4.1** Skenario pemilihan jenis fungsi keanggotaan pengendali propeller

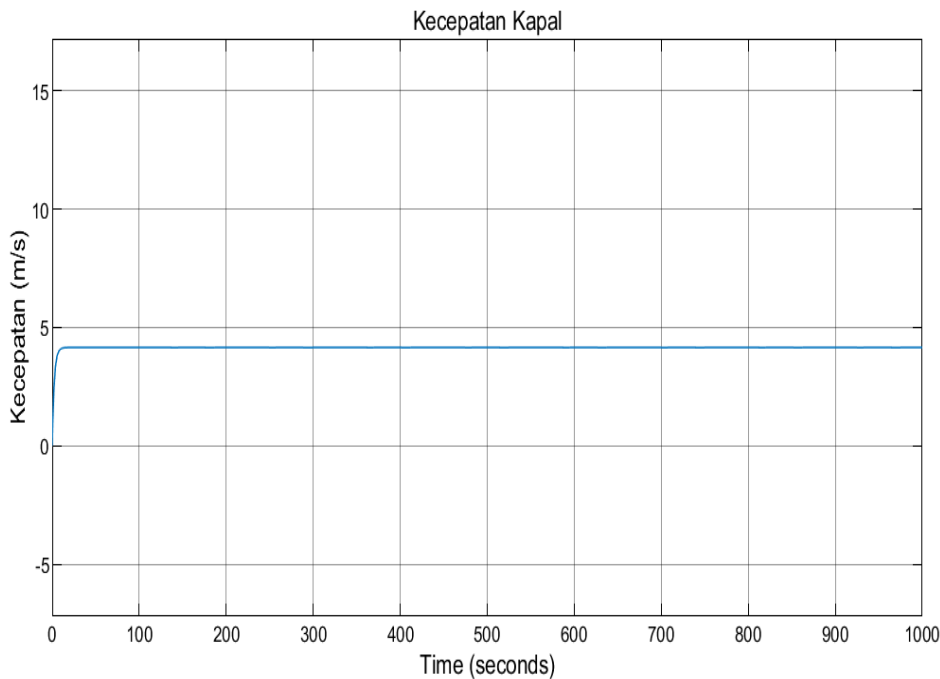
Fungsi Keanggotaan	<i>Lower Scale</i>	<i>Lower Lag</i>	<i>Rise Time</i>	<i>Settling Time</i>
trimf	0.5	0.5	5.0981	9.0537
trapmf	0.5	0.5	5.0981	9.0537
gbellmf	0.5	0.5	5.1037	9.0563
gaussmf	0.5	0.5	5.1079	9.0583

**Tabel 4.2** Skenario pemilihan *FoU* pada pengendali *propeller*

Fungsi Keanggotaan	<i>Lower Scale</i>	<i>Lower Lag</i>	<i>Rise Time</i>	<i>Settling Time</i>
trimf	0.2	0.2	5.1241	9.0647
trimf	0.5	0.5	5.1151	9.0613
trimf	0.8	0.8	5.1280	9.0660
trimf	0.2	0.8	5.1409	9.0693
trimf	0.2	0.5	5.1263	9.0655
trimf	0.5	0.2	5.1131	9.0605
trimf	0.5	0.8	5.1333	9.0676
trimf	0.8	0.2	5.1087	9.0586
trimf	0.8	0.5	5.1102	9.0593
trimf	0.5	0	5.1173	9.0622
trimf	0.8	0	5.1153	9.0614
trimf	0.2	0	5.1254	9.0652

Dari hasil skenario yang didapat pada Tabel 4.1, *membership function trimf* dan *trapmf* memiliki *Rise Time* dan *Settling Time* paling kecil dibandingkan *membership* lainnya. Kemudian pada penelitian ini dipilih *membership function trimf* pada pengendali kecepatan. Kemudian dilakukan skenario untuk menentukan *FoU* yang digunakan dengan menggunakan *input error 2* dan *distance 200*.

Dari uji coba skenario yang telah dilakukan pada Tabel 4.2, *Membership function* dengan *Lower Scale 0.8* dan *Lower Lag 0.2* memiliki *rise time* dan *settling time* yang paling kecil. Berikut merupakan respon sistem pengendali propeller dengan *input e error 2* dan jarak 200



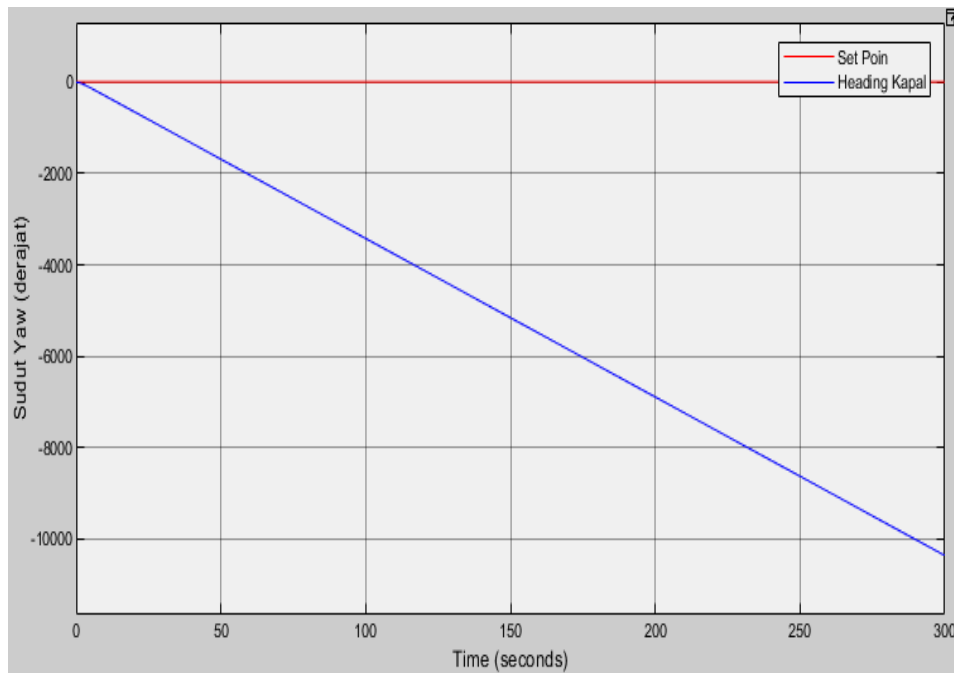
**Gambar 4.1** Respon Sistem pengendali Propeller

Berdasarkan gambar 4.1, dari uji coba yang dilakukan sistem pengendali propeller memiliki performansi *Rise Time* sebesar 5.1087 s, dan *settling time* sebesar 9.0586s.

### 4.3 Sistem Pengendali Rudder

Dalam melakukan analisis sistem pengendali rudder dilakukan uji open loop dengan menggunakan *Set Point* sebesar  $10^\circ$  dan  $20^\circ$ , sesuai dengan standar IMO (*International Maritime Organization*). Uji open loop bertujuan untuk mengetahui respon sistem Ketika tidak diberi kontroler. Berikut merupakan respon sistem dari uji open loop





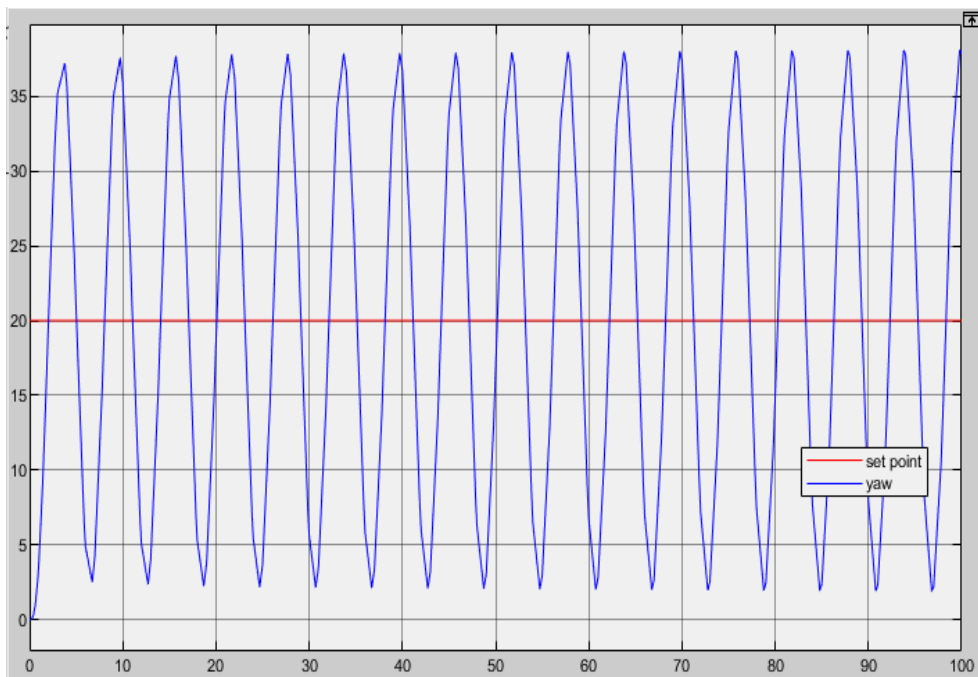
**Gambar 4.2** Respon Sistem Uji Open loop

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa gerak *yaw* kapal tidak bisa mencapai nilai *setpoint* yang sudah ditentukan dan terus mengalami penurunan untuk setiap kenaikan waktu. Ketidakkampuan sistem dalam mempertahankan nilainya agar tetap berada dalam kondisi *steady* pada *set point* yang telah ditentukan dapat disebabkan oleh tidak adanya pengendali pada sistem (Susanto & Wibowo, 2017).

Dalam perancangan sistem pengendali dilakukan *tuning* parameter PID menggunakan metode *Ziegler-Nichols* untuk mendapatkan *range* parameter pengendali PID. *Range* parameter pengendali PID dapat ditentukan dengan persamaan (2.41) sampai (2.44). Untuk mendapat nilai  $K_{cr}$  dan  $T_{cr}$  digunakan *toolbox Tuning-PID* pada *software* MATLAB, kemudian diperoleh nilai  $K_{cr}$  sebesar -0.5957 dan  $T_{cr}$  sebesar 6.01 detik. Nilai  $K_{cr}$  didapat dengan menggunakan pengujian *open loop* dengan mengubah *gain* secara perlahan. Respon sistem dapat dilihat pada Gambar 4.3. Kemudian dilakukan perhitungan menggunakan persamaan (2.38) sampai (2.40) dengan nilai  $K_{cr}$  dan  $T_{cr}$  yang telah didapat sebelumnya. Sehingga didapatkan persamaan (4.1) dan (4.2)

$$K_p = (-0.357 + 0.1787)K'_p - 0.1787 \quad (4.1)$$

$$K_d = (-0.537 + 0.2864)K'_d - 0.2864 \quad (4.2)$$



**Gambar 4.3** Hasil Respon Sistem Stabil Kritis

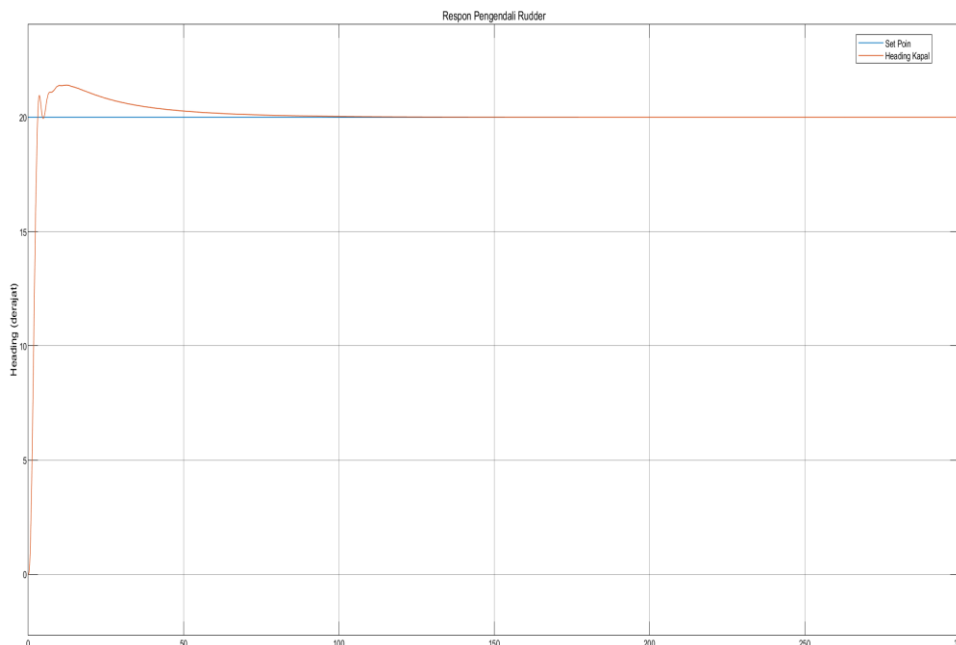
Terdapat 2 sistem *type 2 fuzzy logic*, yaitu sistem *type 2 fuzzy logic* sebagai pengatur parameter PID dan sistem *type 2 fuzzy logic* sebagai *scaling factor*. Sistem *type 2 fuzzy logic* sebagai pengatur parameter PID memiliki variabel masukan berupa *error* ( $e$ ) dan perubahan *error* ( $\Delta e$ ) heading kapal. Sedangkan keluarannya berupa  $K_P'$ ,  $K_D'$  dan  $\alpha$ . Sinyal kontrol ini akan diteruskan ke rudder kapal untuk menentukan kecepatan kapal. *Type reducer* yang digunakan yaitu *Enhanced Iterative Algorithm with Stop Condition (EIASC)* dikarenakan EIASC memiliki komputasi yang lebih cepat dibandingkan *type reducer* lainnya (Wu, 2011). Kemudian dilakukan skenario untuk memilih *membership function* pada pengendali *Type 2 Fuzzy* dengan *Footprint of uncertainty (FOU) Lower Scale 0.5* dan *Lower Lag 0.5*. *Membership* yang digunakan berjumlah 7 *membership function*. Selain itu, dilakukan perancangan sistem *type 2 fuzzy* untuk *scaling factor*. Sistem *type 2 fuzzy logic* sebagai *scaling factor* memiliki variabel masukan berupa *error* ( $e$ ) dan perubahan *error* ( $\Delta e$ ) heading kapal. Sedangkan keluarannya berupa faktor pengali A dan B. *Type reducer* yang digunakan yaitu *Enhanced Iterative Algorithm with Stop Condition (EIASC)*. Kemudian dilakukan skenario untuk memilih *membership function* pada pengendali *Type 2 Fuzzy* dengan *Footprint of uncertainty (FOU) Lower Scale 0.5* dan *Lower Lag 0.5*.

**Tabel 4.3** Skenario pemilihan parameter pengendali Rudder

No	Skenario <i>Type 2 Fuzzy logic</i>		<i>Setpoint</i>	<i>Over-shoot</i>	<i>Rise Time</i>	<i>Settling Time</i>
	<i>Scaling Factor</i>	<i>Kp' dan Kd'</i>				
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>•7 Fungsi Keanggotaan.</li> <li>•Tipe Mamdani</li> <li>•Range <i>output A</i> = 1-5</li> <li>•Range <i>output B</i> = 0-8</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•5 Fungsi Keanggotaan.</li> <li>•Tipe Mamdani</li> <li>•Range <i>output Kp'</i> = 0-1</li> <li>•Range <i>output Kd'</i> = 0-1</li> </ul>	10°	15.8742	5.4416	47.5866
			20°	9.144	1.7792	34.8994
			<b>Rata-Rata</b>	<b>12.5091</b>	<b>3.6104</b>	<b>41.243</b>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>•7 Fungsi Keanggotaan.</li> <li>•Tipe Mamdani</li> <li>•Range <i>output A</i> = 1-5</li> <li>•Range <i>output B</i> = 0-8</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•5 Fungsi Keanggotaan.</li> <li>•Tipe Sugeno</li> <li>•Range <i>output Kp'</i> = 0-1</li> <li>•Range <i>output Kd'</i> = 0-1</li> </ul>	10°	8.6331	3.6865	39.4707
			20°	6.8718	2.7199	37.6802
			<b>Rata-Rata</b>	<b>7.75245</b>	<b>3.2032</b>	<b>38.5755</b>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>•7 Fungsi Keanggotaan.</li> <li>•Tipe Sugeno</li> <li>•Range <i>output A</i> = 1-5</li> <li>•Range <i>output B</i> = 0-8</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•5 Fungsi Keanggotaan.</li> <li>•Tipe Mamdani</li> <li>•Range <i>output Kp'</i> = 0-1</li> <li>•Range <i>output Kd'</i> = 0-1</li> </ul>	10°	18.5113	4.4528	50.9007
			20°	59.9935	1.2799	38.2978
			<b>Rata-Rata</b>	<b>39.2524</b>	<b>2.86635</b>	<b>44.5993</b>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>•7 Fungsi Keanggotaan.</li> <li>•Tipe Mamdani</li> <li>•Range <i>output A</i> = 1-5</li> <li>•Range <i>output B</i> = 0-8</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•5 Fungsi Keanggotaan.</li> <li>•Tipe Sugeno</li> <li>•Range <i>output Kp'</i> = 0-1</li> <li>•Range <i>output Kd'</i> = 0-1</li> </ul>	10°	14.7951	5.0035	65.6778
			20°	50.1827	1.3563	34.7257
			<b>Rata-Rata</b>	<b>32.4889</b>	<b>3.1799</b>	<b>50.2018</b>

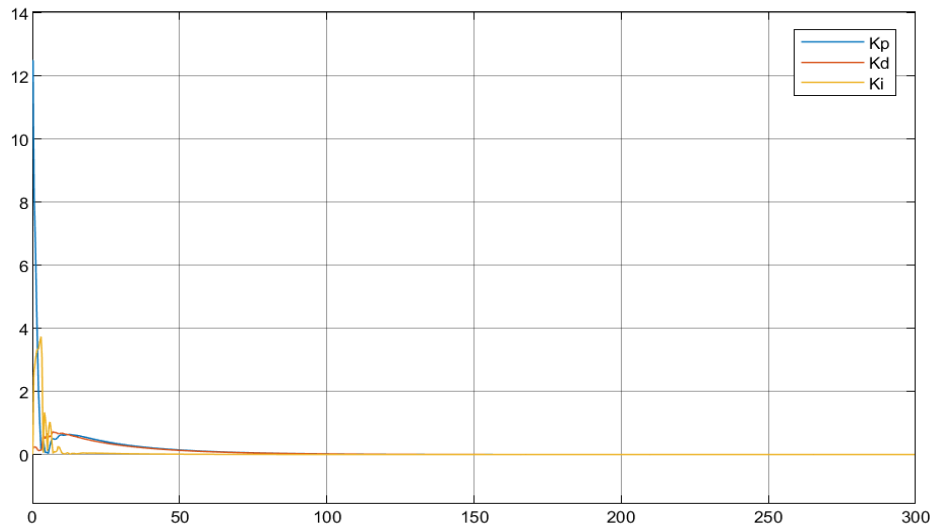
No	Skenario <i>Type 2 Fuzzy logic</i>		<i>Setpoint</i>	<i>Over-shoot</i>	<i>Rise Time</i>	<i>Settling Time</i>
	<i>Scaling Factor</i>	<i>Kp' dan Kd'</i>				
5	• Tanpa <i>Scaling Factor</i>	•5 Fungsi Keanggotaan. •Tipe Mamdani •Range <i>output</i> $Kp' = 0-1$ •Range <i>output</i> $Kd' = 0-1$	10°	9.7981	2.9052	39.2009
			20°	11.6771	3.9562	43.8171
			<b>Rata-Rata</b>	<b>10.7376</b>	<b>3.4307</b>	<b>41.509</b>
6	Tanpa <i>Scaling Factor</i>	•5 Fungsi Keanggotaan. •Tipe Sugeno •Range <i>output</i> $Kp' = 0-1$ Range <i>output</i> $Kd' = 0-1$	10°	7.0544	1.8748	41.1334
			20°	12.1801	5.7842	58.2068
			<b>Rata-Rata</b>	<b>9.61725</b>	<b>3.8295</b>	<b>49.6701</b>

Dari skenario yang telah dibuat pada Tabel 4.1 dengan menggunakan *setpoint* 10° dan 20° didapat skenario pengendali no 2 karena memiliki *overshoot*, *Rise Time*, *Settling Time* yang relatif kecil dibandingkan dengan skenario pengendali lainnya.



**Gambar 4.4** Respon Sistem pengendali Rudder

Berdasarkan gambar 4.4, sistem pengendali rudder dapat mencapai *set point* dengan nilai *overshoot* sebesar 7.75245%, *Rise Time* sebesar 3.2032 s, dan *settling time* sebesar 38.5755s.



**Gambar 4.5** Respon Parameter Kp Kd Ki

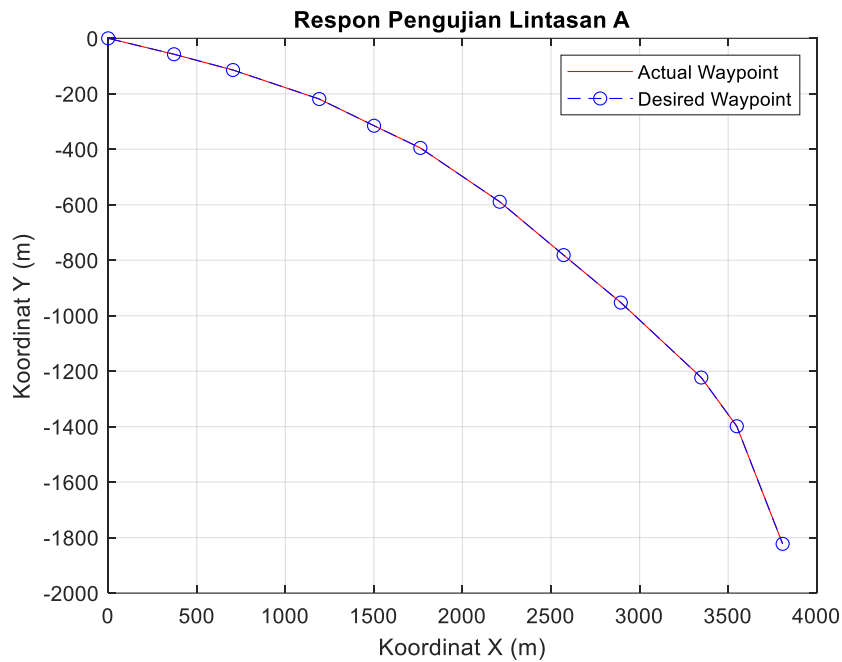
Pada Gambar 4.5 menunjukkan respon nilai parameter Kp, Kd, dan Ki. Nilai tersebut didapatkan menggunakan persamaan (2.38) sampai (2.40). Kemudian dapat diketahui juga bahwa parameter Kp, Kd, dan Ki memiliki nilai yang tinggi di awal pengujian dikarenakan memiliki *error* yang tinggi. Setelah itu, *error* mengecil sehingga nilai parameter Kp, Kd, dan Ki menjadi lebih kecil.

#### 4.4 Analisis Trajectory Kapal

Pengujian dan analisis *Trajectory Guidance* dengan lintasan yang sudah ditentukan sebelumnya. Pengujian ini menggunakan Simulink pada MATLAB dengan metode *Type-2 Fuzzy PID (T2FPID)*. Pengujian lintasan dikatakan berhasil apabila memenuhi standar *International Maritime Organization* dengan *circle of acceptance* maksimal 0,5 Lpp atau 36,57 m.

##### 4.4.1 Uji Lintasan A

Pengujian *Trajectory* yang pertama dilakukan pada lintasan A. Lintasan ini merupakan lintasan dengan kondisi air laut yang tenang atau tanpa gangguan. Data lintasan yang digunakan berada di lintasan antar pelabuhan Ketapang dan Gilimanuk. Dengan titik keberangkatan dari pelabuhan Ketapang dan berakhir di Pelabuhan Gilimanuk. Berikut merupakan respon hasil pengujian



**Gambar 4.6** *Trajectory Guidance* Lintasan A

**Tabel 4.4** Analisis *Trajectory Guidance* Lintasan A

Titik Lintasan	<i>Desired</i>		<i>Actual</i>		Error Lintasan (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
<b>Ketapang</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>1</b>	371.5400	-57.3900	371.5399	-57.3911	0.0011
<b>2</b>	704.6300	-114.2900	704.6299	-114.2909	0.0009
<b>3</b>	1191.5500	-218.8300	1191.5500	-218.8303	0.0003
<b>4</b>	1500.9500	-315.0900	1500.9498	-315.0913	0.0013
<b>5</b>	1762.3100	-395.1800	1762.3100	-395.1814	0.0014
<b>6</b>	2210.3400	-589.1700	2210.3400	-589.1706	0.0006
<b>7</b>	2571.0000	-781.4300	2570.9997	-781.4307	0.0007
<b>8</b>	2893.9200	-952.5800	2893.9200	-952.5805	0.0005
<b>9</b>	3348.1100	-1222.9000	3348.1099	-1222.9002	0.0002
<b>10</b>	3548.5000	-1398.5000	3548.4998	-1398.5048	0.0048
<b>Gilimanuk</b>	3807.4000	-1822.5000	3807.4002	-1822.5024	0.0024
<b>Rata-rata</b>					<b>0.0012</b>

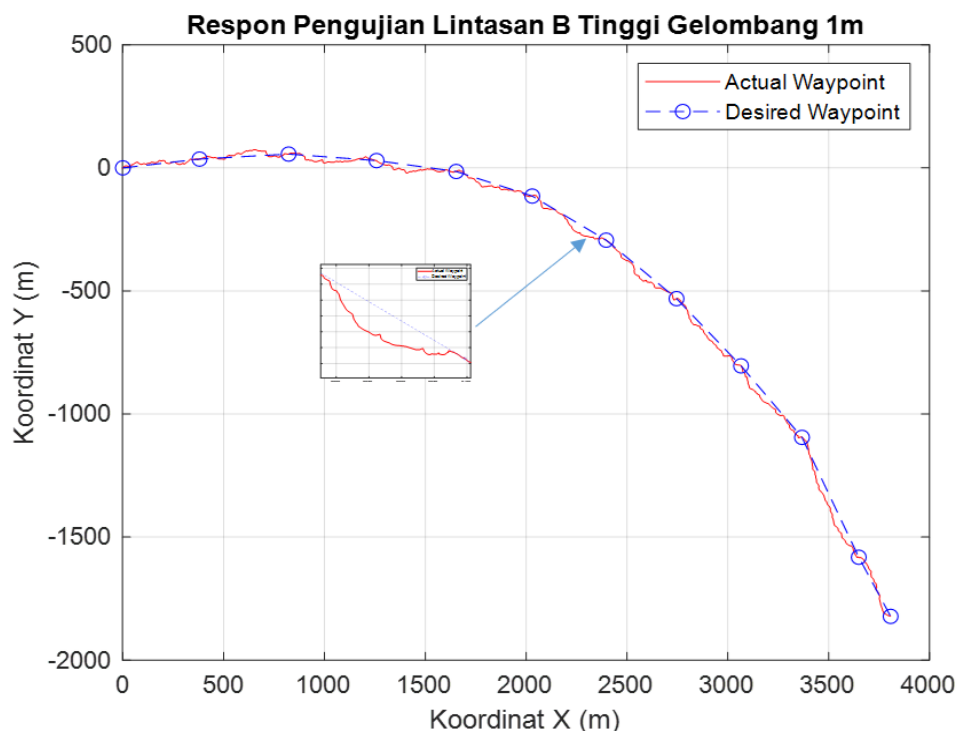
Berdasarkan Gambar 4.6, sistem pengendali yang sudah dirancang mampu untuk menjaga pergerakan kapal agar sesuai dengan *trajectory* pada lintasan A.

Pengujian lintasan ini kemudian dianalisis dengan mengamati *error* lintasan antara *desired waypoint* ( $X_d, Y_d$ ) dan *actual waypoint* ( $X_a, Y_a$ ). Nilai *error* diperoleh dengan mencari nilai perbedaan jarak antara nilai *actual waypoint* ( $X_a, Y_a$ ) dari kapal dengan nilai *desired waypoint* ( $X_d, Y_d$ ) *trajectory* yang dilewati oleh kapal. Dilakukan analisis *trajectory guidance* lintasan A pada Tabel 4.4.

Pada Tabel 4.4 dapat diketahui nilai *error* lintasan A di 12 titik tujuan. Rata-rata *error* pada lintasan A bernilai 0.0012 m dengan nilai *error* terbesar bernilai 0.0048 m. Sistem pengendali yang dirancang sudah memenuhi *circle of acceptance* pada standar *International Maritime Organization* dengan nilai *error* pada lintasan A kurang dari 36,57 m.

#### 4.4.2 Uji Lintasan B saat Tinggi Gelombang 1 m

Pengujian lintasan B saat tinggi gelombang 1 m, dimana lintasan B merupakan lintas yang digunakan kapal pada saat arus laut memiliki kecepatan 3 knot. Selain itu pada pengujian lintasan ini diberikan gangguan gelombang sebesar 1 m. Data lintasan yang digunakan berada di lintasan antar pelabuhan Ketapang dan Gilimanuk. Dengan titik keberangkatan dari pelabuhan Ketapang dan berakhir di Pelabuhan Gilimanuk.



**Gambar 4.7** *Trajectory Guidance* Lintasan B ( $H=1.0$  m)

Berdasarkan Gambar 4.7, sistem pengendali yang sudah dirancang mampu untuk menjaga pergerakan kapal agar sesuai dengan *trajectory* pada lintasan B saat tinggi gelombang 1 m. Pengujian lintasan ini kemudian dianalisis dengan mengamati *error* lintasan antara *desired waypoint* ( $X_d, Y_d$ ) dan *actual waypoint* ( $X_a, Y_a$ ). Nilai *error* diperoleh dengan mencari nilai perbedaan jarak antara nilai *actual waypoint* ( $X_a, Y_a$ ) dari kapal dengan nilai *desired waypoint* ( $X_d, Y_d$ ) trayektori yang dilewati oleh kapal. Dilakukan analisis *trajectory guidance* lintasan B pada Tabel 4.5

**Tabel 4.5** Analisis *Trajectory Guidance* Lintasan B (H=1 m)

Titik Lintasan	<i>Desired</i>		<i>Actual</i>		Error Lintasan (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
<b>Ketapang</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>1</b>	380.2800	35.7000	380.2797	35.7018	0.0018
<b>2</b>	822.0300	56.0800	822.0075	56.0153	0.0684
<b>3</b>	1258.1600	29.6000	1258.0916	29.7049	0.1253
<b>4</b>	1653.1600	-14.7000	1653.1508	-14.7102	0.0138
<b>5</b>	2030.2300	-114.6100	2030.1957	-115.2653	0.6562
<b>6</b>	2396.6300	-293.7100	2396.3336	-293.5502	0.3367
<b>7</b>	2745.7200	-531.4400	2745.6020	-531.4947	0.1300
<b>8</b>	3065.5900	-804.4700	3065.5667	-803.6884	0.7820
<b>9</b>	3367.9000	-1095.1800	3367.8564	-1094.6287	0.5530
<b>10</b>	3649.5100	-1582.2600	3649.4768	-1583.0241	0.7648
<b>Gilimanuk</b>	3807.4000	-1822.5000	3807.5094	-1822.2560	0.2674
<b>Rata-Rata</b>					<b>0.3083</b>

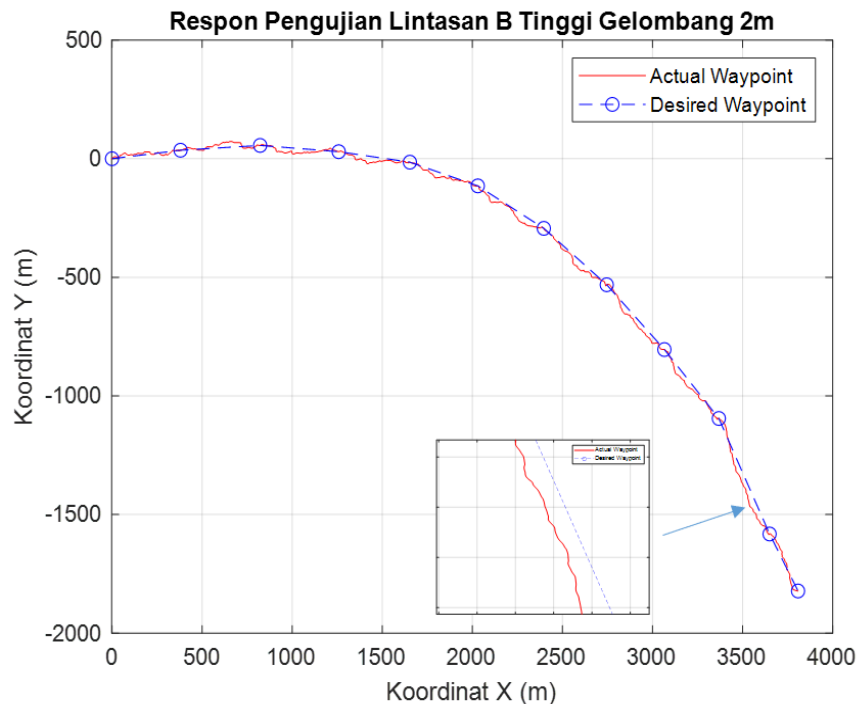
Pada Tabel 4.5 dapat diketahui nilai rata-rata *error* pada lintasan B saat tinggi gelombang 1 m di 12 titik tujuan yaitu 0.3083 m dengan nilai *error* terbesar bernilai 0.7820 m. Sistem pengendali yang dirancang sudah memenuhi *circle of acceptance* pada standar *International Maritime Organization* dengan nilai *error* pada lintasan B saat tinggi gelombang 1 m kurang dari 36,57 m.

#### 4.4.3 Uji Lintasan B saat Tinggi Gelombang 2m

Pengujian lintasan B saat tinggi gelombang 2 m, dimana lintasan B merupakan lintas yang digunakan kapal pada saat arus laut memiliki kecepatan 3



knot. Selain itu pada pengujian lintasan ini diberikan gangguan gelombang sebesar 2 m. Data lintasan yang digunakan berada di lintasan antar pelabuhan Ketapang dan Gilimanuk. Dengan titik keberangkatan dari pelabuhan Ketapang dan berakhir di Pelabuhan Gilimanuk.



**Gambar 4.8** *Trajectory Guidance* Lintasan B ( $H=2.0$  m)

Berdasarkan Gambar 4.8, sistem pengendali yang sudah dirancang mampu untuk menjaga pergerakan kapal agar sesuai dengan *trajectory* pada lintasan B dengan tinggi gelombang 2 m. Pengujian lintasan ini kemudian dianalisis dengan mengamati *error* lintasan antara *desired waypoint* ( $X_d, Y_d$ ) dan *actual waypoint* ( $X_a, Y_a$ ). Nilai *error* diperoleh dengan mencari nilai perbedaan jarak antara nilai *actual waypoint* ( $X_a, Y_a$ ) dari kapal dengan nilai *desired waypoint* ( $X_d, Y_d$ ) trayektori yang dilewati oleh kapal. Dilakukan analisis *trajectory guidance* lintasan B pada Tabel 4.6

Pada Tabel 4.6 dapat diketahui nilai rata-rata *error* pada lintasan B saat tinggi gelombang 2 m di 12 titik tujuan yaitu 0.1645 m dengan nilai *error* terbesar bernilai 0.7825 m. Sistem pengendali yang dirancang sudah memenuhi *circle of acceptance* pada standar *International Maritime Organization* dengan nilai *error* pada lintasan B dengan tinggi gelombang 2 m kurang dari 36.57 m.

**Tabel 4.6** Analisis *Trajectory Guidance* Lintasan B (H=2 m)

Titik Lintasan	<i>Desired</i>		<i>Actual</i>		Error Lintasan (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
<b>Ketapang</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>1</b>	380.2800	35.7000	380.2622	35.6972	0.0180
<b>2</b>	822.0300	56.0800	821.9189	55.8987	0.2127
<b>3</b>	1258.1600	29.6000	1258.1462	29.5948	0.0147
<b>4</b>	1653.1600	-14.7000	1652.9939	-14.6237	0.1827
<b>5</b>	2030.2300	-114.6100	2030.1929	-114.4765	0.1385
<b>6</b>	2396.6300	-293.7100	2396.6283	-293.6476	0.0624
<b>7</b>	2745.7200	-531.4400	2745.7000	-532.2222	0.7825
<b>8</b>	3065.5900	-804.4700	3065.5304	-804.3177	0.1635
<b>9</b>	3367.9000	-1095.1800	3367.8845	-1094.8790	0.3014
<b>10</b>	3649.5100	-1582.2600	3649.5023	-1582.2150	0.0457
<b>Gilimanuk</b>	3807.4000	-1822.5000	3807.4228	-1822.4541	0.0512
<b>Rata-Rata</b>					<b>0.1645</b>

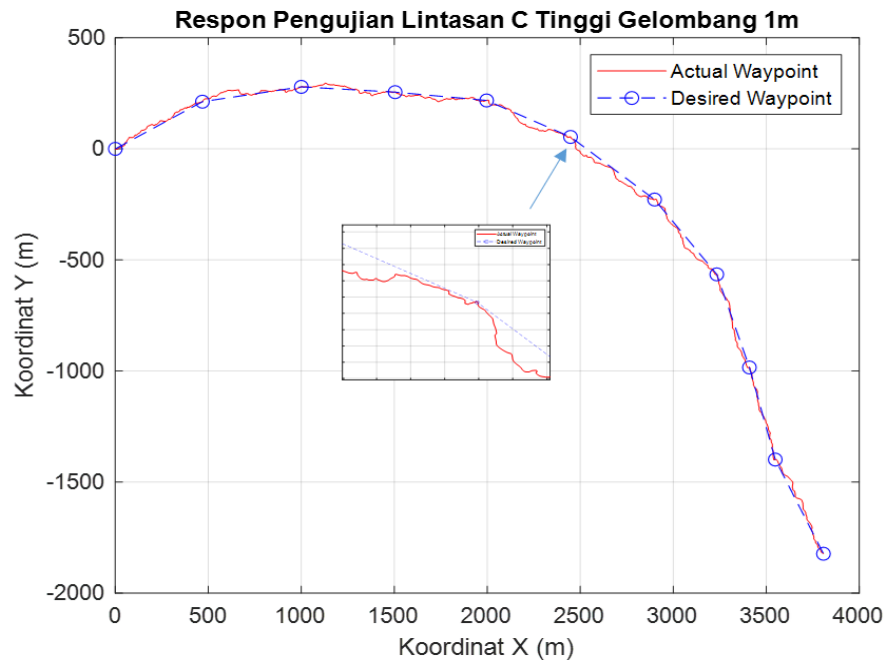
#### 4.4.4 Uji Lintasan C saat Tinggi Gelombang 1m

Pengujian lintasan C saat tinggi gelombang 1 m, dimana lintasan C merupakan lintasan yang digunakan kapal pada saat arus laut memiliki kecepatan 7 knot. Selain itu pada pengujian lintasa ini diberikan gangguan gelombang sebesar 1 m. Data lintasan yang digunakan berada di lintasan antar pelabuhan Ketapang dan Gilimanuk. Dengan titik keberangkatan dari pelabuhan Ketapang dan berakhir di Pelabuhan Gilimanuk.

Berdasarkan Gambar 4.9, sistem pengendali yang sudah dirancang mampu untuk menjaga pergerakan kapal agar sesuai dengan *trajectory* pada lintasan C saat tinggi gelombang 1 m. Pengujian lintasan ini kemudian dianalisis dengan mengamati *error* lintasan antara *desired waypoint* ( $X_d, Y_d$ ) dan *actual waypoint* ( $X_a, Y_a$ ). Nilai *error* diperoleh dengan mencari nilai perbedaan jarak antara nilai *actual waypoint* ( $X_a, Y_a$ ) dari kapal dengan nilai *desired waypoint* ( $X_d, Y_d$ ) trayektori yang dilewati oleh kapal. Dilakukan analisis *trajectory guidance* lintasan C pada Tabel 4.7

Pada Tabel 4.7 dapat diketahui nilai rata-rata *error* pada lintasan C saat tinggi gelombang 1 m di 11 titik tujuan yaitu 0.2375 m dengan nilai *error* terbesar

bernilai 0.7470 m. Sistem pengendali yang dirancang sudah memenuhi *circle of acceptance* pada standar *International Maritime Organization* dengan nilai *error* pada lintasan C saat tinggi gelombang 1 m kurang dari 36.57 m.



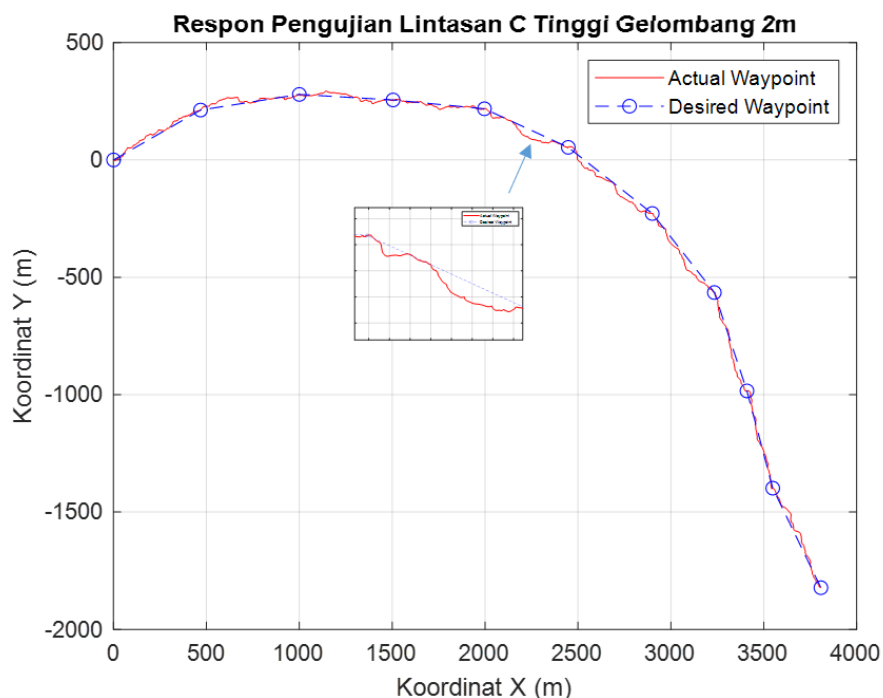
**Gambar 4.9** Trajectory Guidance Lintasan C (H=1 m)

**Tabel 4.7** Analisis Trajectory Guidance Lintasan C (H=1 m)

Titik Lintasan	<i>Desired</i>		<i>Actual</i>		Error Lintasan (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
<b>Ketapang</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>1</b>	468.4000	212.4000	468.3989	212.3998	0.0011
<b>2</b>	999.9700	279.0300	999.7633	278.9477	0.2225
<b>3</b>	1504.5800	255.4000	1504.5256	256.1450	0.7470
<b>4</b>	1996.3300	217.8500	1996.3236	217.8231	0.0276
<b>5</b>	2447.6200	53.5500	2447.5530	54.1364	0.5902
<b>6</b>	2899.7100	-228.2100	2899.7042	-228.2152	0.0078
<b>7</b>	3233.8500	-564.9500	3233.6866	-564.8439	0.1948
<b>8</b>	3409.3400	-984.0200	3408.9944	-983.7321	0.4498
<b>9</b>	3548.4500	-1398.5500	3548.4419	-1398.5558	0.0100
<b>Gilimanuk</b>	3807.4000	-1822.5000	3807.4452	-1822.1412	0.3617
<b>Rata-Rata</b>					<b>0.2375</b>

#### 4.4.5 Uji Lintasan C saat Gelombang 2m

Pengujian lintasan C saat tinggi gelombang 2 m, dimana lintasan C merupakan lintasan yang digunakan kapal pada saat arus laut memiliki kecepatan 7 knot. Selain itu pada pengujian lintasan ini diberikan gangguan gelombang sebesar 2 m. Data lintasan yang digunakan berada di lintasan antar pelabuhan Ketapang dan Gilimanuk. Dengan titik keberangkatan dari pelabuhan Ketapang dan berakhir di Pelabuhan Gilimanuk.



**Gambar 4.10** *Trajectory Guidance* Lintasan C ( $H=2$  m)

Berdasarkan Gambar 4.10, sistem pengendali yang sudah dirancang mampu untuk menjaga pergerakan kapal agar sesuai dengan *trajectory* pada lintasan C saat tinggi gelombang 1 m. Pengujian lintasan ini kemudian dianalisis dengan mengamati *error* lintasan antara *desired waypoint* ( $X_d, Y_d$ ) dan *actual waypoint* ( $X_a, Y_a$ ). Nilai *error* diperoleh dengan mencari nilai perbedaan jarak antara nilai *actual waypoint* ( $X_a, Y_a$ ) dari kapal dengan nilai *desired waypoint* ( $X_d, Y_d$ ) trayektori yang dilewati oleh kapal. Dilakukan analisis *trajectory guidance* lintasan B pada Tabel 4.8

Pada Tabel 4.8 dapat diketahui nilai rata-rata *error* pada lintasan C saat tinggi gelombang 1 m di 11 titik tujuan yaitu 0.0666 m dengan nilai *error* terbesar

bernilai 0.2821 m. Sistem pengendali yang dirancang sudah memenuhi *circle of acceptance* pada standar *International Maritime Organization* dengan nilai *error* pada lintasan C saat tinggi gelombang 1 m kurang dari 36.57 m.

**Tabel 4.8** Analisis *Trajectory Guidance* Lintasan C (H=2 m)

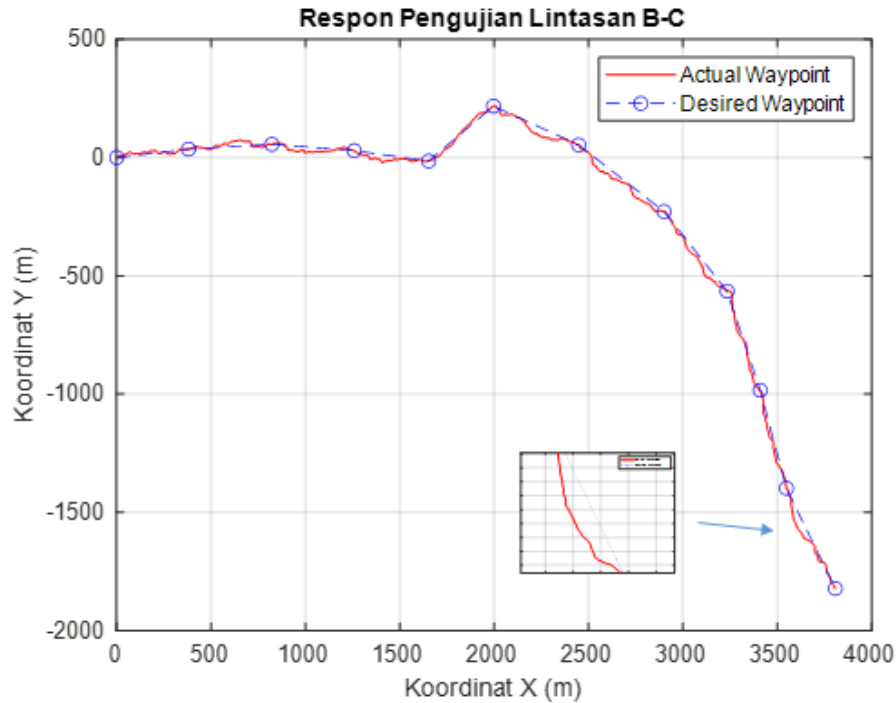
Titik Lintasan	<i>Desired</i>		<i>Actual</i>		Error Lintasan (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
<b>Ketapang</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>1</b>	468.4000	212.4000	468.1323	212.3110	0.2821
<b>2</b>	999.9700	279.0300	999.9597	279.0533	0.0254
<b>3</b>	1504.5800	255.4000	1504.5700	255.5442	0.1445
<b>4</b>	1996.3300	217.8500	1996.3239	217.8504	0.0061
<b>5</b>	2447.6200	53.5500	2447.6096	53.5391	0.0150
<b>6</b>	2899.7100	-228.2100	2899.6402	-228.2214	0.0708
<b>7</b>	3233.8500	-564.9500	3233.8152	-564.9810	0.0466
<b>8</b>	3409.3400	-984.0200	3409.3227	-984.1395	0.1207
<b>9</b>	3548.4500	-1398.5500	3548.4349	-1398.5635	0.0202
<b>Gilimanuk</b>	3807.4000	-1822.5000	3807.4009	-1822.5000	0.0009
<b>Rata-Rata</b>					<b>0.0666</b>

#### 4.4.6 Uji Lintasan B berubah ke Lintasan C

Dilakukan pengujian lintasan saat skenario terjadi perubahan kecepatan arus dari 3 knot ke 7 knot. Lintasan yang dilalui yaitu Lintasan B saat kecepatan arus 3 knot kemudian berubah menjadi lintasan C saat kecepatan arus menjadi 7 Knot. Percobaan ini dilakukan saat tinggi gelombang 1 m. Data lintasan yang digunakan berada di lintasan antar pelabuhan Ketapang dan Gilimanuk. Dengan titik keberangkatan dari pelabuhan Ketapang dan berakhir di Pelabuhan Gilimanuk.

Berdasarkan Gambar 4.11, sistem pengendali yang sudah dirancang mampu untuk menjaga pergerakan kapal agar sesuai dengan *trajectory* pada lintasan B-C saat tinggi gelombang 1 m. Pengujian lintasan ini kemudian dianalisis dengan mengamati *error* lintasan antara *desired waypoint* ( $X_d, Y_d$ ) dan *actual waypoint* ( $X_a, Y_a$ ). Nilai *error* diperoleh dengan mencari nilai perbedaan jarak antara nilai *actual waypoint* ( $X_a, Y_a$ ) dari kapal dengan nilai *desired waypoint* ( $X_d, Y_d$ )

trayektori yang dilewati oleh kapal. Dilakukan analisis *trajectory guidance* lintasan B pada Tabel 4.9



**Gambar 4.11** *Trajectory Guidance* Lintasan B-C (H=1 m)

**Tabel 4.9** Analisis *Trajectory Guidance* Lintasan B-C (H=1 m)

Titik Lintasan	<i>Desired</i>		<i>Actual</i>		Error Lintasan (m)
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
<b>Ketapang</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>1</b>	380.2800	35.7000	380.2797	35.7018	0.0018
<b>2</b>	822.0300	56.0800	822.0075	56.0153	0.0684
<b>3</b>	1258.2000	29.6000	1258.0916	29.7049	0.1509
<b>4</b>	1653.2000	-14.7000	1653.1508	-14.7102	0.0503
<b>5</b>	1996.3300	217.8500	1996.3284	217.8512	0.0020
<b>6</b>	2447.6000	53.5500	2447.5692	53.5467	0.0310
<b>7</b>	2899.7000	-228.2100	2899.6580	-228.2597	0.0651
<b>8</b>	3233.9000	-564.9500	3233.8027	-564.9928	0.1063
<b>9</b>	3409.3000	-984.0200	3409.2873	-983.9969	0.0264
<b>10</b>	3548.5000	-1398.6000	3548.4316	-1398.5603	0.0790
<b>Gilimanuk</b>	3807.4000	-1822.6000	3807.4135	-1822.4937	0.1072
<b>Rata-Rata</b>					<b>0.0574</b>

Pada Tabel 4.9 dapat diketahui nilai rata-rata *error* pada lintasan C dengan tinggi gelombang 1 m di 11 titik tujuan yaitu 0.0574 m dengan nilai *error* terbesar bernilai 0.1509 m. Sistem pengendali yang dirancang sudah memenuhi *circle of acceptance* pada standar *International Maritime Organization* dengan nilai *error* pada lintasan B - C saat tinggi gelombang 1 m kurang dari 36.57 m.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Kesimpulan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

- a. Parameter pengendali terbaik pada penelitian ini adalah dengan menyusun sistem *fuzzy scaling factor* dan sistem *fuzzy Self-Tuning PID* yang sesuai dengan sistem. Parameter terbaik dari sistem *fuzzy scaling factor* adalah tipe mamdani yang tersusun dari 7 Fungsi Keanggotaan dan fuzzy PID adalah tipe Sugeno dengan 5 Fungsi Keanggotaan.
- b. Sistem pengendali yang sudah disusun sudah mampu untuk mengendalikan sudut haluan kapal sesuai dengan standar IMO. Pada setpoint  $10^{\circ}$  memiliki overshoot kurang dari  $10^{\circ}$  dan pada setpoint  $20^{\circ}$  memiliki overshoot kurang dari  $25^{\circ}$ .
- c. *Trajectory guidance* pada semua lintasan Ketapang - Gilimanuk dengan gangguan yang sudah ditetapkan memiliki nilai *error* pada masing-masing lintasan yang masih berada dalam rentang nilai jari-jari *circle of acceptance*  $<36.575$  ( $<0.5 L_{pp}$ ).

#### **5.2 Saran**

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut

- a. Menambahkan variasi gangguan angin laut.
- b. Menambahkan metode optimisasi pada sistem pengendalian, seperti metode *Ant Colony Optimization (ACO)* atau *Genetic Algorithm (GA)*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- Aisjah, A S. (2021). *Design auto trajectory of passenger ship in variation of sea condition in line Ketapang - Gilimanuk of Bali strait, Indonesia. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 972 012061
- Aisjah, A. S. (2010) ‘An Analysis Nomoto Gain and Norbin Parameter on Ship Turning Maneuver’, *IPTEK The Journal for Technology and Science*, 21(2). doi: 10.12962/j20882033.v21i2.31.
- Badan Pusat Statistik. (2020). *Statistika Transportasi Laut tahun 2020*
- Bansal, H. (2009) ‘Tuning of PID Controllers using Simulink’, *International Journal of Mathematical Modeling, Simulation and Applications*
- Budianto. (2017). *Penentuan Ukuran Utama dan Rencana Garis Fast Ferry 150 Pax Untuk Penyeberangan Rute Gresik – Bawean. Jurnbal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*
- Carlton, J. (2012). *Marine Propellers and Propulsion*, 2nd ed.; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK,.
- Christopher, A. (1996) *SIMULINK modeling of a marine autopilot for TSSE ship designs*. Naval Postgraduate School.
- Czabanski, Robert. Jezewski, Michal. Leski, Jacek. (2017). *Introduction to Fuzzy Systems. Theory and Applications of Ordered Fuzzy Numbers*. pp.23-43.
- Dwisaputra, I. (2016). *PENGARUH JUMLAH INPUT DAN MEMBERSHIP FUNCTION FUZZY LOGIC CONTROL PADA ROBOT KESEIMBANGAN BERODA DUA. JURNAL MANUTECH*. DOI: 10.33504/manutech.v8i02.16
- Fang, Ming-Chung. Lee, Zi-Yi, (2016)" ‘Application of neurofuzzy algorithm to portable dynamic positioning control system for ships’, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*.
- Fossen, T. (1994) *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. Available at: <https://www.wiley.com/en-id/Guidance+and+Control+of+Ocean+Vehicles-p-9780471941132>.
- Fossen, T. I. (1994) *Guidance and Control of Ocean Vehicle*. John Willey &

Sons, Inc.

- International Maritime Organization. (2002). RESOLUTION MSC.137(76) (adopted on 4 December 2002) STANDARDS FOR SHIP MANOEUVRABILITY. *Imo*, 137(December).
- Kaur, Arshdeep. Et al. (2012). Comparison of Mamdani-Type and Sugeno-Type Fuzzy Inference Systems for Air Conditioning System
- Lee, S. Der, Tzeng, C. Y. and Chen, B. J. (2014) 'Design and experiment of a fuzzy PID track-keeping ship autopilot', *Oceans 2014 - Taipei*. doi: 10.1109/OCEANS-TAIPEI.2014.6964524.
- Liang and J. M. Mendel, "Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 8, pp. 535–550, Oct. 2000.
- Liu , Yong, Bu, Renxiang, Xiaori Gao. (2018)" 'Ship trajectory tracking control system design based on sliding mode control algorithm, *POLISH MARITIME RESEARCH*.
- Mao, E. et all. (2020). *Pressure Control Algorithm Based on Adaptive Fuzzy PID with Compensation Correction for the Tractor Electronic Hydraulic Hitch. Applied Sciences 10, no. 9: 3179. <https://doi.org/10.3390/app10093179>*
- Komite Nasional Keselamatan Transportasi. (2009). Kajian Analisis Trend Kecelakaan Transportasi Laut Tahun 2003 – 2008.
- Karnik, J. M. Mendel, and Q. Liang. (1999). "Type-2 fuzzy logic systems," *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, vol. 7, pp. 643–658.
- Kumbasar, T. Hagraş, (2015). Interval Type-2 Fuzzy PID Controllers, in the book entitled Springer Handbook of Computational Intelligence, Eds. J. Kacprzyk and W. Pedrycz, Springer Verlag.
- Lazawroska, A. (2020)" 'A Discrete Artificial Potential Field for Ship Trajectory Planning', *The Journal of Navigation*
- Lewis, E V. (1988). *Principle of Naval Architecture Second Revision* (Vol. III). Society of Naval Architects and Marine Engineers 601 Pavonia Avenue Jersey City, NJ. ISBN NO. 0-939773-02-3
- Santoso, M. Y., Su, S. F. and Aisjah, A. S. (2013) 'Nonlinear rudder roll stabilization using fuzzy gain scheduling - PID controller for naval vessel', *iFUZZY 2013 - 2013 International Conference on Fuzzy Theory and Its*

- Applications, (December), pp. 94–99. doi: 10.1109/iFuzzy.2013.6825416.
- Susanto, E. & Wibowo, S. A., 2017. *Buku Ajar Perancangan Metode Kendali*. Bandung: Universitas Telkom.
- Tanaka, Yutaka. (2018). *Active vibration compensator on moving vessel by hydraulic parallel mechanism. International Journal of Hydromechatronics*. DOI:10.1504/IJHM.2018.094887
- Mendel, J. M. et al, (2014). *Introduction To Type-2 Fuzzy Logic Control Theory And Applications*. Wiley-IEEE Press. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
- Mendel and H. Wu, (2006) “Type-2 fuzzistics for symmetric interval type-2 fuzzy sets: Part I, forward problems,” *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 14, pp. 781–792.
- Minorsky., N. (1922) ‘DIRECTIONAL STABILITY OF AUTOMATICALLY STEERED BODIES’, *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 34(2), pp. 280–309. doi: 10.1111/j.1559-3584.1922.tb04958.x.
- Motwani, A. (2013). *An interval Kalman filter-based fuzzy multi-sensor fusion approach for fault-tolerant heading estimation of an autonomous surface vehicle. Journal of Engineering for the Maritime Environment*.
- Nguyen, D. et al. (2020). *A New Fuzzy PID Control System Based on Fuzzy PID Controller and Fuzzy Control Process. International Journal of Fuzzy Systems* 22. DOI:10.1007/s40815-020-00904-y
- Tomera, M. (2017) ‘Fuzzy self-tuning PID controller for a ship autopilot’, in *Marine Navigation - Proceedings of the International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, TRANSSNAV 2017. CRC Press/Balkema, pp. 93–103. doi: 10.1201/9781315099132-15.
- Sirwan A. et al. (2013). *A Comparison of Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference Systems based on Block Cipher Evaluation*
- Qiang, Z. et al. (2019) ‘Adaptive neural network auto-berthing control of marine ships’. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.02.031.
- Wang, Liuping. (2020). *Basics of PID Control. PID Control System Design and Automatic Tuning using MATLAB/Simulink Wiley-IEEE Press*
- Welch, Greg. 2001. *An Introduction to the Kalman Filter*. SIGGRAPH 2001, Los

Angeles

- Wu,D and Nie,M. (2011). “Comparison and practical implementation of type-reduction algorithms for type-2 *fuzzy* sets and systems,” 2011 IEEE Int. Conf. *Fuzzy Syst.* (FUZZ-IEEE 2011), no. 6, pp. 2131–2138,.
- Zadeh, L, (2009), *Fuzzy Logic. Computer Science. Published in Encyclopedia of Complexity.*
- Zhao, Z. Y., Tomizuka, M. and Isaka, S. (1993) ‘Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers’, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23(5), pp. 1392–1398. doi: 10.1109/21.260670.

## LAMPIRAN

### A. Pemodelan Dinamika Kapal

$$L_{pp} \text{ (Panjang)} = 73.15 \text{ meter}$$

$$B \text{ (Lebar)} = 15.2 \text{ meter}$$

$$T \text{ (Kedalaman)} = 3.6 \text{ meter}$$

$$U \text{ (Kecepatan)} = 4.63 \text{ m/s}$$

$$m \text{ (massa kapal)} = 2940 \text{ Ton}$$

$$C_b \text{ (Koefisien Balok)} = 0.734$$

$$A_{\delta} \text{ (Rudder area)} = 4.6 \text{ m}^2$$

$$R \text{ (jari-jari)} = 16.458 \text{ meter}$$

$$X_g \text{ (Center of Gravity)} = 3.045 \text{ meter}$$

Perhitungan *center of gravity* dan massa nondimensional

$$Xg' = \frac{Xg}{L_{pp}} \qquad m' = \frac{m}{(\frac{1}{2}\rho L^3)}$$

$$Xg' = \frac{3.045}{73.15} \qquad m' = \frac{2940}{(\frac{1}{2} \cdot 1025 \cdot 73.15^3)}$$

$$Xg' = 0.04163 \qquad m' = 0.0000147$$

Dilakukan perhitungan koefisien hidrodinamika kapal nondimensional menggunakan persamaan berikut.

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0,16 \frac{C_B B}{T} - 5,1(B/L)^2$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = 0,67 \frac{B}{L} - 0,0033(B/T)^2$$

$$\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} = 1,1 \frac{B}{L} - 0,041\left(\frac{B}{T}\right)$$

$$\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0,017 \frac{C_B B}{T} - 0,33\left(\frac{B}{L}\right)$$

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0,4 \frac{C_B B}{T}$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2,2\frac{B}{L} - 0,08\left(\frac{B}{T}\right)$$

$$\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2,4\frac{T}{L}$$

$$\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{4} + 0,039\frac{B}{T} - 0,56\left(\frac{B}{L}\right)$$

$$Y'\delta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{A\delta}{LT}$$

$$N'\delta = -0,5 Y'\delta$$

$$I'r = m'.r^2, \text{ dengan } r = 0,225L$$

$$I'z = m'.Xg^2 + I'r$$

Dengan

$$\frac{C_B B}{T} = \frac{0.734 \cdot 15.2}{3.6} \quad \frac{B}{L} = \frac{15.2}{73.15} \quad \frac{B}{T} = \frac{15.2}{3.6} \quad \frac{T}{L} = \frac{3.6}{73.15}$$

$$\frac{C_B B}{T} = 3.09911 \quad \frac{B}{L} = 0.20779 \quad \frac{B}{T} = 4.22222 \quad \frac{T}{L} = 0.04921$$

$$\left(\frac{B}{L}\right)^2 = 0.04317$$

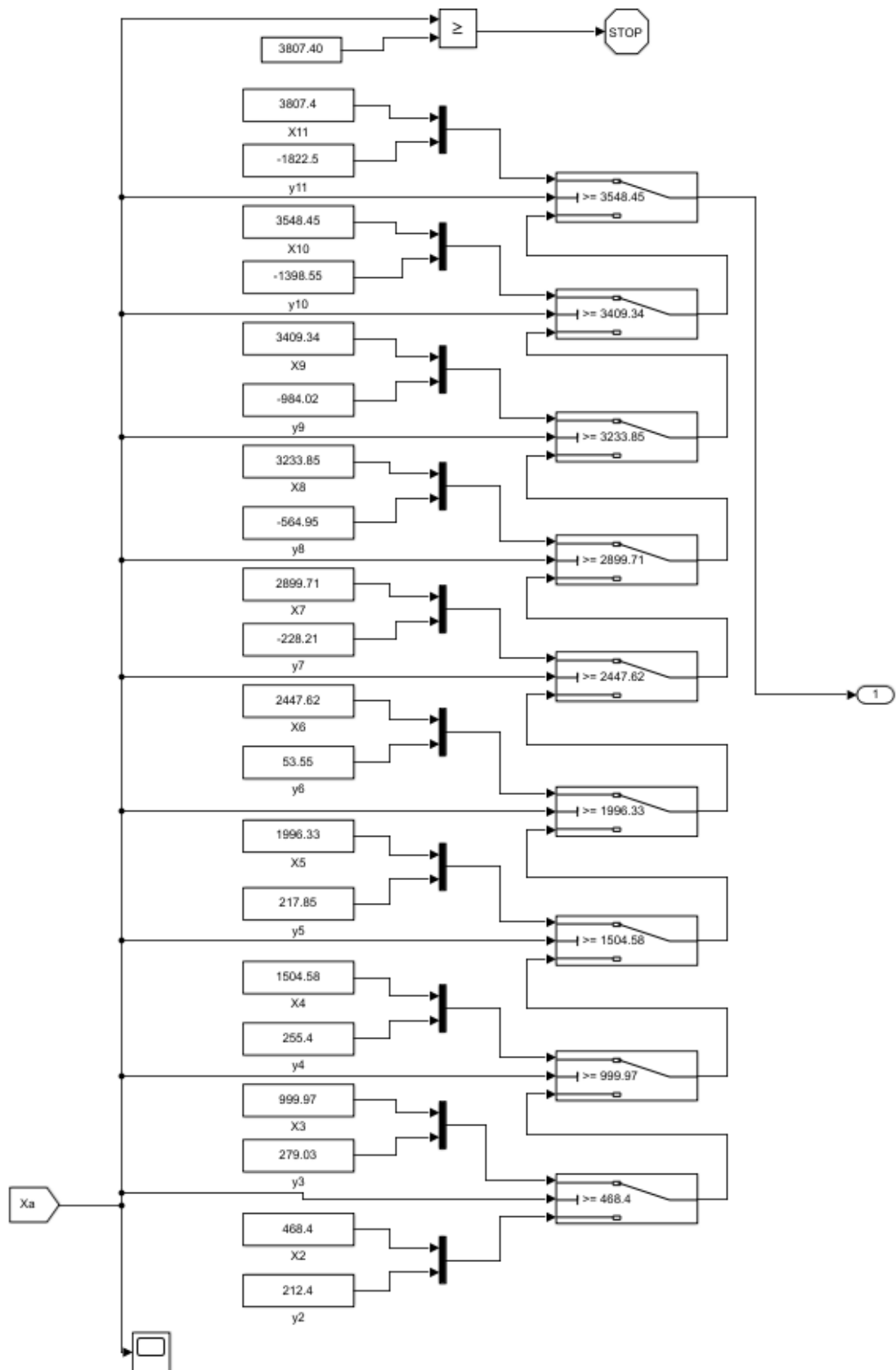
$$\left(\frac{T}{L}\right)^2 = 0.00242$$

Maka diperoleh koefisien hidrodinamika sebagai berikut.

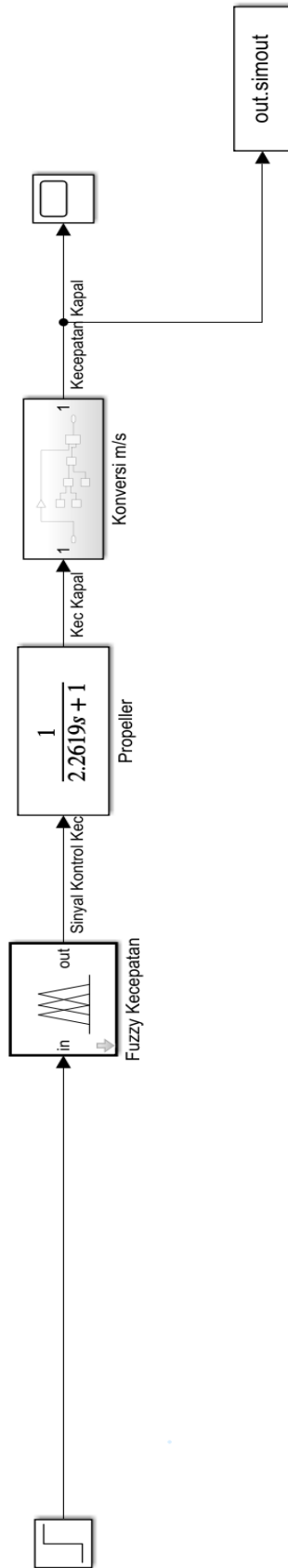
$Y'_v$	-0.01704
$Y'_r$	0.00289
$N'_v$	-0.00470
$N'_r$	-0.00227
$Y'_\dot{v}$	-0.00971
$Y'_\dot{r}$	-0.00061
$N'_\dot{v}$	-0.00042
$N'_\dot{r}$	-0.00051
$Y'_\delta$	0.01371
$N'_\delta$	-0.00686
$I'_z$	0.00397
$I'_r$	0.00411



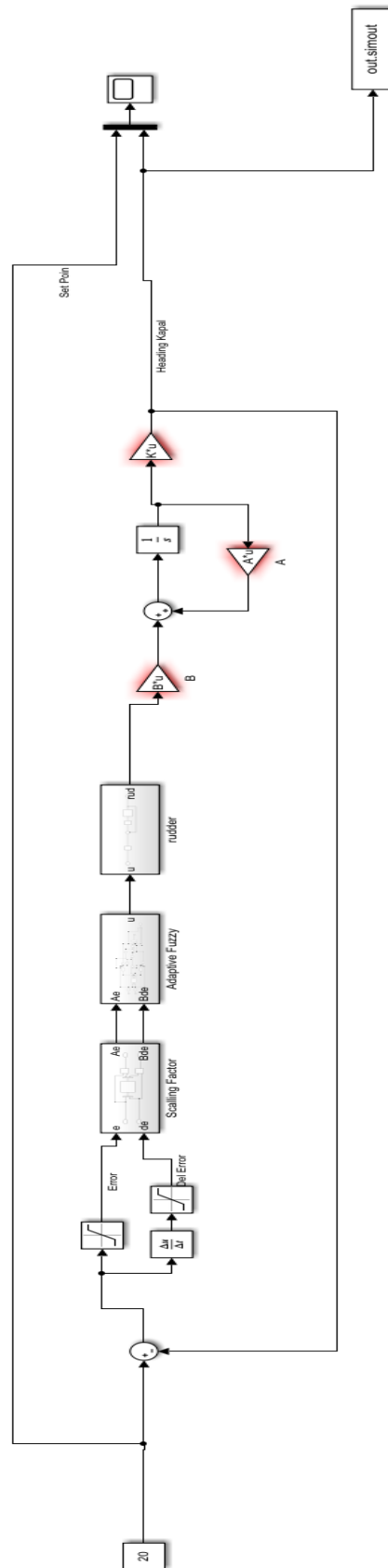
## B. Rangkaian Algoritma pemilihan Setpoint



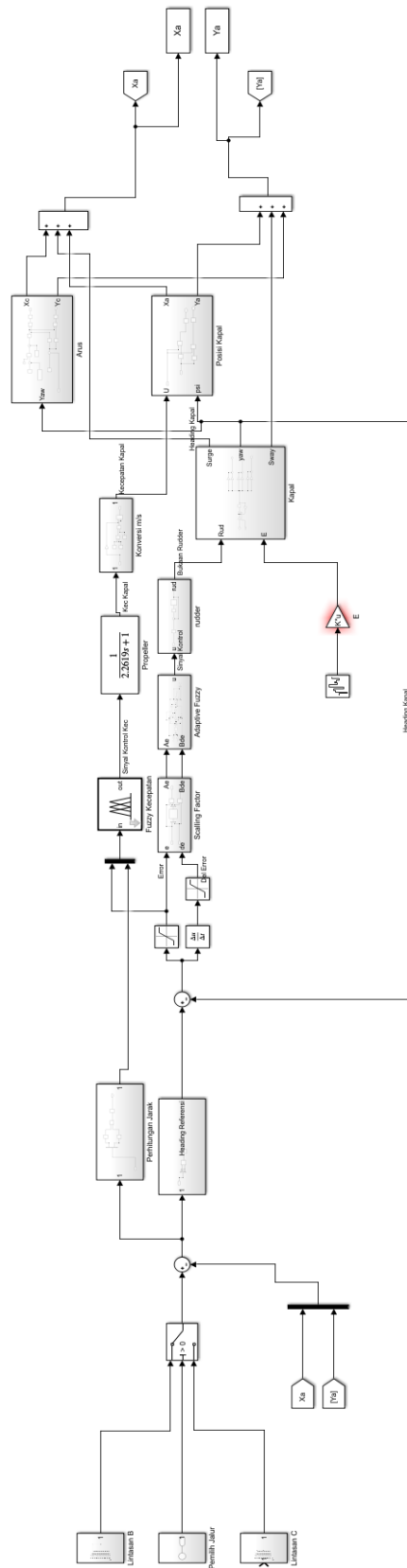
### C. Rangkaian Uji Pengendali *Propeller*



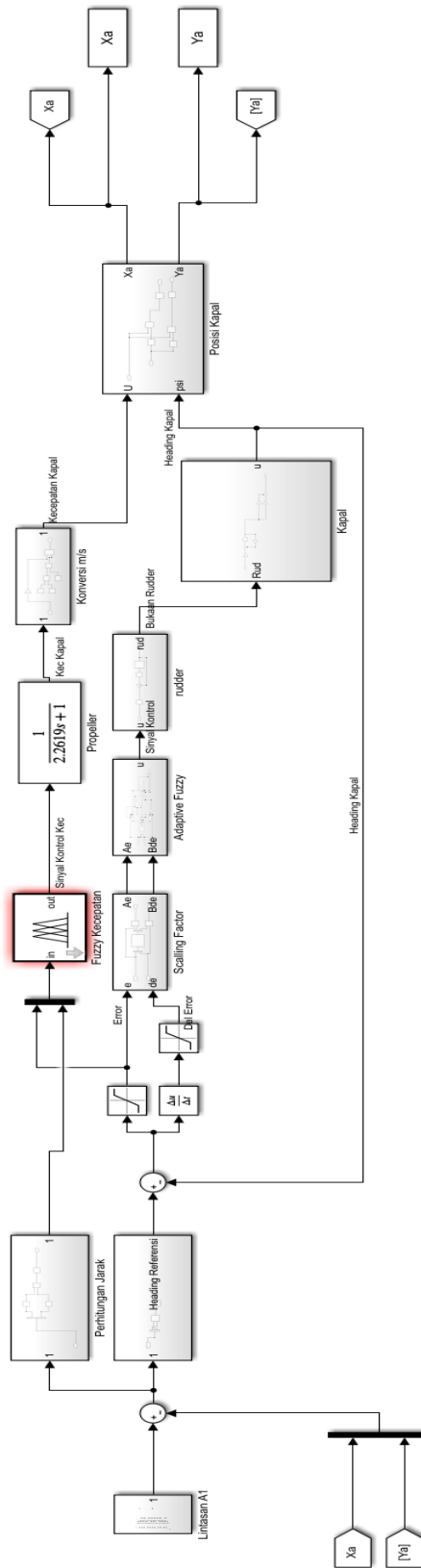
### D. Rangkaian Uji Pengendali Rudder



### E. Sistem Trajectory Guidance pada Lintasan B dan C



F. Sistem *Trajectory Guidance pada Lintasan A*



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIODATA PENULIS



Nama Lengkap penulis yaitu Dian Permana berasal dari Tasikmalaya. Menempuh pendidikan sarjana di Departemen Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Aktif dalam berbagai kegiatan akademik maupun non akademik. Selama berkuliah aktif di ITS Team Sapuaringin, Badan Legislatif Mahasiswa FTIRS, Laboratorium Pengukuran Keandalan Resiko dan Keselamatan. Selain mengikuti kegiatan magang di Petrokimia Gresik, Saka Pangkah Indonesia Limited, dan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Bagi pembaca yang memili kritik dan saran terhadap laporan dengan judul “PERANCANGAN SISTEM TRAJECTORY GUIDANCE PADA KAPAL BERBASIS TYPE-2 FUZZY PID BERDASARKAN PERUBAHAN DINAMIKA KAPAL AKIBAT GANGGUAN KONDISI LINGKUNGAN” dapat menghubungi penulis melalui email berikut: [dianpermana0076@gmail.com](mailto:dianpermana0076@gmail.com)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*