



TUGAS AKHIR - TF 141581

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI SANDAR
KAPAL OTOMATIS MENGGUNAKAN *FUZZY
GAIN SCHEDULING* - PID UNTUK MINIMALISASI
ERROR TRAYEKTORI DI PELABUHAN
TANJUNG PERAK SURABAYA**

NIKEN ARINA PRATIWI
NRP 02311440000069

Dosen Pembimbing:
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TF 141581

***DESIGN OF AUTOMATIC BERTHING CONTROL
SYSTEM USING FUZZY GAIN SCHEDULING-PID
FOR MINIMALIZATION OF TRAJECTORY
ERROR AT TANJUNG PERAK PORT SURABAYA***

NIKEN ARINA PRATIWI
NRP 02311440000069

Supervisors:

Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.

***ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018***

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Niken Arina Pratiwi
NRP : 02311440000069
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Perancangan Sistem Kendali Sandar Kapal Otomatis Menggunakan *Fuzzy Gain Scheduling*–PID Untuk Minimalisasi Error Trayektori di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 20 Juli 2018
Yang membuat pernyataan,



Niken Arina Pratiwi
NRP. 02311440000069

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

PERANCANGAN SISTEM KENDALI SANDAR KAPAL OTOMATIS MENGGUNAKAN *FUZZY GAIN* *SCHEDULING* – PID UNTUK MINIMALISASI ERROR TRAYEKTORI DI PELABUHAN TANJUNG PERAK SURABAYA

Oleh:

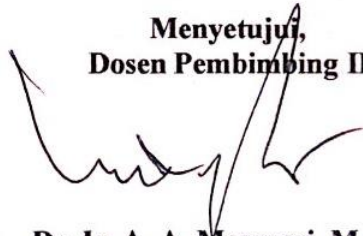
Niken Arina Pratiwi
NRP. 02311440000069
Surabaya, 20 Juli 2018

Menyetujui,
Dosen Pembimbing I



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

Menyetujui,
Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.
NIPN. 19580807 198403 1 001

Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS



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

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN II
PERANCANGAN SISTEM KENDALI SANDAR KAPAL
OTOMATIS MENGGUNAKAN *FUZZY GAIN*
***SCHEDULING* – PID UNTUK MINIMALISASI ERROR**
TRAYEKTORI DI PELABUHAN TANJUNG PERAK
SURABAYA

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

NIKEN ARINA PRATIWI
NRP. 02311440000069

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. (Pembimbing I)
2. Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng (Pembimbing II)
3. Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA. (Ketua Penguji)
4. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc. (Penguji I)

SURABAYA
JULI, 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI SANDAR KAPAL
OTOMATIS MENGGUNAKAN *FUZZY GAIN
SCHEDULING* – PID UNTUK MINIMALISASI ERROR
TRAYEKTORI DI PELABUHAN TANJUNG PERAK
SURABAYA**

Nama : Niken Arina Pratiwi
NRP : 02311440000069
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : 1. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
2. Dr. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng.

Abstrak

Proses sandar kapal di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya umumnya masih memerlukan kapal tunda (*tug boat*) untuk membantu mendorong atau menarik kapal mendekati dermaga. Pengadaan dan penggunaan fasilitas kapal tunda (*tug boat*) memerlukan biaya operasional yang cukup tinggi sehingga perlu adanya alternatif lain untuk melaksanakan proses sandar kapal, salah satunya yaitu dengan menerapkan sistem pengendalian otomatis pada proses sandar kapal. Tugas akhir ini berkaitan dengan perancangan simulasi sistem kendali sandar kapal otomatis dengan jenis kapal AHTS (*Anchor Handling Tug Supply*). Sistem *autopilot* yang diterapkan dalam simulasi ini menggunakan pengendali PID dengan mekanisme *fuzzy gain scheduling* dengan tujuan untuk meminimalkan nilai *error* trayektori sandar kapal. Logika fuzzy digunakan untuk melakukan penentuan parameter pengendali PID yang akan digunakan sesuai kondisi operasional di waktu tertentu. Pengendali FGS-PID dimanfaatkan untuk kendali kemudi (*rudder*), *bow thruster* dan *stern thruster* selama proses sandar. Pemodelan gangguan arus laut dengan kecepatan arus 2, 2,25 dan 2,5 knot dilakukan agar hasil dari simulasi mendekati kondisi yang sebenarnya. Perbandingan dengan metode FGS-PID dengan metode pengendalian PID menghasilkan bahwa metode FGS-PID dapat meminimalkan *error* trayektori yang terjadi ketika gangguan arus laut diaplikasikan dalam sistem. Nilai maksimum error lintasan sandar kapal dengan pengendali PID tanpa gangguan arus, dengan gangguan arus 2 knot, gangguan arus 2,25 knot serta gangguan arus 2,5 knot secara berturut-turut ialah 2,4 meter, 6,86 meter, 10,06 meter dan 15,32 meter. Nilai maksimum error

lintasan dengan pengendali FGS-PID tanpa gangguan arus, dengan gangguan arus 2 knot, gangguan arus 2,25 knot serta gangguan arus 2,5 knot secara berturut-turut adalah 0,8 meter, 2,36 meter, 2,51 meter dan 2,77 meter sehingga dapat disimpulkan bahwa penerapan mekanisme *fuzzy gain scheduling* pada pengendali PID dapat meminimalkan *error* trayektori sandar kapal di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya.

Kata Kunci: kapal AHTS, sandar kapal otomatis, pengendali PID, *fuzzy gain scheduling*-PID

**DESIGN OF AUTOMATIC BERTHING CONTROL SYSTEM
USING FUZZY GAIN SCHEDULING-PID FOR
MINIMALIZATION OF TRAJECTORY ERROR AT
TANJUNG PERAK PORT SURABAYA**

Name : Niken Arina Pratiwi
NRP : 02311440000069
Department : Engineering Physics FTI-ITS
Supervisors : 1. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
2. Dr. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng

Abstract

The process of berthing at the Tanjung Perak Port Surabaya still uses tug boats to help pushing or pulling the ship towards the berth. The procurement and usage of tug boats facilities require relatively high costs and thus another alternatives should be implemented to berth the ship, one of them is by applying an automatic berthing control system. This undergraduate thesis is related to the design of automatic berthing control system of Anchor Handling Tug Supply (AHTS) ship. The autopilot system uses a PID controller with fuzzy gain scheduling mechanism in order to minimize the value of berthing trajectory error. Fuzzy logic is used to perform the determination of PID controller parameters to be used according to the operational conditions at a certain time. The FGS-PID is used to control rudder, bow thruster, and stern thruster during the berthing process. The modelling of ocean current disturbance with the current velocity value of 2 knots, 2.25 knots and 2.5 knots is done in order to obtain a closer simulation result to actual condition. Comparison between FGS-PID controller and PID controller tuned using Ziegler-Nichols method resulted that FGS-PID controller is able to minimize the trajectory error when the ocean current diturbance is applied to the system. Maximum berthing trajectory error value with PID controller without current disturbance applied, with current disturbance of 2 knots, with current disturbance of 2.25 knots and with current disturbance of 2.5 knots are respectively 2.4 meters,

6.86 meters, 10.06 meters and 15.32 meters. The value of maximum trajectory error with FGS-PID controller without current disturbance, with current disturbance of 2 knots, with current disturbance of 2.25 knots and with current disturbance of 2.5 knots are respectively 0.8 meters, 2.36 meters, 2.51 meters and 2.77 meters thus can be concluded that the application of fuzzy gain scheduling mechanism on PID controller can successfully minimize the trajectory error during the process of auto-berthing at Tanjung Perak Port Surabaya.

Keywords: AHTS ship, automatic ship berthing, PID controller, fuzzy gain scheduling-PID controller

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena rahmat dan hikmat-Nya serta sholawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran dalam menyusun laporan Tugas Akhir yang berjudul:

“PERANCANGAN SISTEM KENDALI SANDAR KAPAL OTOMATIS MENGGUNAKAN *FUZZY GAIN* SCHEDULING–PID UNTUK MINIMALISASI ERROR TRAYEKTORI DI PELABUHAN TANJUNG PERAK SURABAYA”

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

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. selaku dosen wali dan dosen pembimbing penulis, serta Bapak Dr. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat kepada penulis.
3. Kedua orang tua penulis, Baskoro Kurnia Sakti dan Lilik Budiasih serta saudara penulis, Haryo Jalu Wicaksono dan Rekyan Bayu Waskitho atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan untuk penulis.
4. Shabrina, Halida, Febri, Padella, dan Najla, sahabat yang telah penulis kenal hampir setengah umur penulis dan senantiasa memberi dukungan, doa, serta keceriaan untuk penulis.
5. Uyun dan Adista, terima kasih atas persahabatan yang begitu berharga sehingga masa perkuliahan penulis terasa lebih berwarna. Terima kasih atas segala motivasi, dukungan, dan terima kasih telah hadir dalam hidup penulis.
6. Admin Laboratorium Simulasi dan Komputasi, khususnya Jinchuriki (Deni, Munir, Fathur, Yusril, Okke, Juniar, Ami,

Ames) terima kasih atas segala dukungan dan pelajaran yang diberikan kepada penulis.

7. Teman-teman bimbingan Tugas Akhir Ibu Aulia (Gama, Alfian, Mbak Novia, Agil, Thoriq, Mbak Sarah dan Mbak Chairani) yang telah menjadi teman diskusi yang baik selama satu semester terakhir dan segala dukungan yang kalian berikan.
8. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika FTI-ITS atas segala bantuan dan kerjasamanya.
9. Seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung penyelesaian penelitian ini dan tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa mungkin masih ada kekurangan dalam laporan ini, sehingga kritik dan saran penulis terima. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis dan pihak yang membacanya.

Surabaya, 20 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
<i>TITLE PAGE</i>	ii
LEMBAR PENGESAHAN II	v
Abstrak	vii
<i>Abstract</i>	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR NOTASI	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan	3
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1. Anchor Handling Tug Supply (AHTS)	5
2.2. Pemodelan Dinamika Kapal.....	6
2.2. Pemodelan Dinamika <i>Rudder</i>	13
2.3. Pemodelan Dinamika <i>Propeller</i> dan <i>Thruster</i>	14
2.4. Analisa Kestabilan Root-Locus	15
2.5. Pemodelan Gangguan Arus Laut	17
2.6. Pengendali Proporsional Integral Derivatif (PID).....	17
2.7. Logika Fuzzy	21
2.8. <i>Fuzzy Gain Scheduling</i>	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1. Identifikasi Masalah	33
3.2. Studi Literatur	33
3.3. Pengambilan Data Spesifikasi Kapal dan Data Cuaca	33
3.4. Pengambilan Data Trayektori Sandar Kapal	34
3.5. Pemodelan Dinamika Kapal.....	36
3.6. Pemodelan Aktuator.....	39
3.8. Perancangan Pengendali PID dengan Mekanisme <i>Fuzzy Gain Scheduling</i>	43

3.10.	Analisa Hasil Uji.....	58
3.11.	Pengujian Sistem Kendali Sandar Kapal Otomatis Tanpa Gangguan	63
3.12.	Pemodelan Gangguan Arus Laut	67
3.13.	Pengujian Sistem Kendali Sandar Kapal Otomatis dengan Gangguan Arus Laut.....	68
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	71
4.1.	Analisa Kestabilan Root Locus.....	71
4.2.	Analisa Uji Open Loop	72
4.3.	Analisa Uji Closed Loop Sistem.....	74
4.4.	Analisa Trayektori Sandar Kapal Tanpa Gangguan.....	80
4.5.	Analisa Trayektori Sandar Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2 Knot	85
4.6.	Analisa Trayektori Sandar Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2,25 Knot	89
4.7.	Analisa Trayektori Sandar Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2,5 Knot	93
4.8.	Perbandingan Trayektori Sandar Kapal Menggunakan Metode PID dengan Metode <i>Fuzzy Gain Scheduling</i> -PID	97
BAB V	PENUTUP	101
5.1.	Kesimpulan	101
5.2.	Saran	102
DAFTAR PUSTAKA.....		103
LAMPIRAN		107

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Kapal AHTS	5
Gambar 2.2	Gerak Kapal dengan 6 Derajat Kebebasan	7
Gambar 2.3	Diagram Blok Pengendalian <i>Rudder</i>	14
Gambar 2.4	Diagram Blok Sistem Pengendalian	16
Gambar 2.5	Diagram blok pengendali PID	18
Gambar 2.6	Osilasi Berkelanjutan dengan Periode P_{cr}	21
Gambar 2.7	Fungsi Keanggotaan Fuzzy dengan Representasi Segitiga	23
Gambar 2.8	Fungsi Keanggotaan Fuzzy dengan Representasi Trapezium	23
Gambar 2.9	Diagram Blok <i>Gain Scheduler</i> Konvensional Secara Umum	25
Gambar 2.10	Sistem Pengendalian PID dengan Mekanisme <i>Fuzzy Gain Scheduling</i>	26
Gambar 2.11	Contoh Respon Dinamik Sistem yang Diinginkan	27
Gambar 2.12	<i>Line of Sight Guidance</i>	29
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	32
Gambar 3.2	Jalur Sandar Kapal Menuju Dermaga Jamrud Utara	36
Gambar 3.3	Diagram Blok Sistem Kendali Sandar Kapal Otomatis	41
Gambar 3.4	Perancangan <i>Fuzzy Gain Scheduler</i> Kendali Gerak Yaw dengan Aktuator <i>Rudder</i>	45
Gambar 3.5	Fungsi Keanggotaan Variabel Masukan Yaw <i>Error</i>	45
Gambar 3.6	Fungsi Keanggotaan Variabel Masukan Yaw <i>Rate</i>	46
Gambar 3.7	Fungsi Keanggotaan Variabel Keluaran K_p'	47
Gambar 3.8	Fungsi Keanggotaan Variabel Keluaran K_d'	47
Gambar 3.9	Fungsi Keanggotaan Variabel Keluaran α	48
Gambar 3.10	<i>Surface View</i> Hubungan <i>Input</i> dengan K_p' Pengendali <i>Rudder</i>	49

Gambar 3.11	<i>Surface View Hubungan Input dengan K_d' Pengendali Rudder</i>	49
Gambar 3.12	<i>Surface View Hubungan Input dengan α Pengendali Rudder</i>	49
Gambar 3.13	<i>Perancangan Fuzzy Gain Scheduler Kendali Gerak Yaw dengan Aktuator Bow Thruster</i>	51
Gambar 3.14	<i>Perancangan Fuzzy Gain Scheduler Kendali Gerak Yaw dengan Aktuator Stern Thruster</i>	51
Gambar 3.15	<i>Surface View Keluaran K_p' (a) Aktuator Bow Thruster (b) Aktuator Stern Thruster</i>	53
Gambar 3.16	<i>Surface View Keluaran K_d' (a) Aktuator Bow Thruster (b) Aktuator Stern Thruster</i>	53
Gambar 3.17	<i>Surface View Keluaran α (a) Aktuator Bow Thruster (b) Aktuator Stern Thruster</i>	54
Gambar 3.18	<i>Perancangan Fuzzy Gain Scheduler untuk Kendali Gerak Sway</i>	55
Gambar 3.19	<i>Fungsi Keanggotaan Variabel Masukan Distance</i>	56
Gambar 3.20	<i>Surface View Kendali Sway Hubungan Distance dengan Keluaran (a) K_p' (b) K_d' (c) α</i>	57
Gambar 3.21	<i>Diagram Blok Simulink Uji Open Loop Rudder</i>	59
Gambar 3.22	<i>Diagram Blok Simulink Uji Open Loop Bow Thruster</i>	60
Gambar 3.23	<i>Diagram Blok Simulink Uji Open Loop Stern Thruster</i>	60
Gambar 3.24	<i>Blok Diagram Uji Closed Loop Sistem Kendali Rudder</i>	61
Gambar 3.25	<i>Blok Diagram Uji Closed Loop Kendali Yaw dengan Bow Thruster dan Stern Thruster</i>	61
Gambar 3.26	<i>Diagram Blok Uji Closed Loop Kendali Sway dengan Bow Thruster dan Stern Thruster</i>	62
Gambar 3.27	<i>Diagram Blok Uji Closed Loop Kendali Sway dan Yaw dengan Bow Thruster dan Stern Thruster</i>	63
Gambar 3.28	<i>Sistem Kendali Sandar Kapal Otomatis Tanpa Gangguan</i>	65
Gambar 3.29	<i>Sistem Kendali Sandar Kapal Otomatis dengan Gangguan Arus Laut</i>	69

Gambar 4.1	Plot <i>Root Locus</i> Uji Kestabilan Internal Sistem (a) Sway (b) Yaw.....	71
Gambar 4.2	Grafik Respon Sistem Pada Uji <i>Open Loop Rudder</i> pada Gerak (a) sway dan (b) yaw	72
Gambar 4.3	Grafik Respon Ristem pada Uji <i>Open Loop Bow Thruster</i> pada Gerak (a) Sway dan (b) Yaw.....	73
Gambar 4.4	Grafik Respon Sistem pada Uji <i>Open Loop Stern Thruster</i> pada Gerak (a) Sway dan (b) Yaw.....	74
Gambar 4.5	Uji <i>Turning Rudder</i> dengan Pengendali FGS-PID pada Sudut Heading (a) 20° dan (b) 30°	75
Gambar 4.6	Uji <i>Turning Thruster</i> dengan Pengendali FGS-PID pada Sudut Heading (a) 20° dan (b) 30°	77
Gambar 4.7	Uji <i>Closed Loop</i> Kendali Gerak Sway dengan Aktuator <i>Thruster</i>	78
Gambar 4.8	Respon Sudut Yaw terhadap Integrasi Sistem Pengendalian Yaw dan Sway	79
Gambar 4.9	Respon Gerak Sway terhadap Integrasi Sistem Pengendalian Yaw dan Sway	80
Gambar 4.10	Ilustrasi Trayektori Aktual Sandar Kapal Tanpa Gangguan Arus Laut	84
Gambar 4.11	Ilustrasi Trayektori Sandar Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2 Knot.....	88
Gambar 4.12	Ilustrasi Rayektori Sandar Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2,25 Knot.....	92
Gambar 4.13	Ilustrasi Rayektori Sandar Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2,5 Knot.....	96

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Notasi yang Digunakan pada Kendaraan Laut	6
Tabel 2.2	Variabel Normalisasi yang Digunakan Untuk <i>Prime-system I</i>	12
Tabel 2.3	Pengaruh parameter pengendalian PID terhadap respon dinamik sistem.....	19
Tabel 2.4	Aturan <i>Tuning</i> Ziegler-Nichols Berdasarkan Nilai Kcr dan Pcr.....	21
Tabel 3.1	Data Spesifikasi Kapal <i>Anchor Handling Tug Supply (AHTS)</i>	34
Tabel 3.2	Trayektori Sandar Kapal Menuju Terminal Jamrud Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya	35
Tabel 3.3	Koefisien Hidrodinamik Non-dimensional Kapal AHTS.....	37
Tabel 3.4	Mekanisme <i>Switching</i> Pengendalian	42
Tabel 3.5	Gain PID Minimum dan Maksimum Kendali Yaw dengan Aktuator <i>Rudder</i>	44
Tabel 3.6	<i>Rule Base</i> Parameter Kendali Yaw dengan Aktuator <i>Rudder</i>	48
Tabel 3.7	Gain PID Minimum dan Maksimum Kendali Yaw dengan Aktuator <i>Bow Thruster</i> dan <i>Stern Thruster</i> ...	50
Tabel 3.8	<i>Rule Base</i> Parameter Kendali Yaw dengan Aktuator <i>Bow Thruster</i>	52
Tabel 3.9	<i>Rule Base</i> Parameter Kendali Yaw dengan Aktuator <i>Stern Thruster</i>	52
Tabel 3.10	Gain PID Minimum dan Maksimum Kendali Sway dengan Aktuator <i>Bow Thruster</i> dan <i>Stern Thruster</i> ...	54
Tabel 3.11	<i>Rule Base</i> Parameter Kendali Sway dengan Aktuator <i>Bow Thruster</i> dan <i>Stern Thruster</i>	56
Tabel 3.12	Gain Pengendali PID dengan Metode <i>Tuning</i> Ziegler-Nichols Tipe-2	58

Tabel 4.1	Trayektori Sandar Kapal dan <i>Heading</i> Kapal pada Proses Sandar Tanpa Gangguan	81
Tabel 4.2	Trayektori Sandar Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2 Knot	85
Tabel 4.3	Trayektori Sandar Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2,25 Knot	89
Tabel 4.4	Trayektori Sandar Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2,5 Knot	93
Tabel 4.5	Perbandingan Error Trayektori dan Waktu Tempuh Pengendali PID dengan <i>Fuzzy Gain Scheduling</i> -PID	97

DAFTAR NOTASI

X	= gaya dan momen pada gerak sumbu-x
Y	= gaya dan momen pada gerak sumbu-y
Z	= gaya dan momen pada gerak sumbu-z
K	= gaya dan momen pada rotasi sumbu-x
M	= gaya dan momen pada rotasi sumbu-y
N	= gaya dan momen pada rotasi sumbu-z
u	= kecepatan linier pada sumbu-x
v	= kecepatan linier pada sumbu-y
w	= kecepatan linier pada sumbu-z
p	= kecepatan angular pada sumbu-x
q	= kecepatan angular pada sumbu-y
r	= kecepatan angular pada sumbu-z
x	= posisi pada sumbu-x
y	= posisi pada sumbu-y
z	= posisi pada sumbu-z
ϕ	= sudut euler pada sumbu-x
Θ	= sudut euler pada sumbu-y
Ψ	= sudut euler pada sumbu-z
M	= matriks inersia (termasuk massa tambahan)
$C(v)$	= matriks Coriolis (termasuk massa tambahan)
$D(v)$	= matriks redaman
$g(\eta)$	= vektor gaya dan momen gravitasi
τ	= vektor input kendali
m	= massa
X_G	= <i>center of gravity</i>
δ_R	= defleksi sudut <i>rudder</i>
C_B	= koefisien blok
T	= kedalaman kapal
L_{pp}	= <i>length between perpendicular</i> (panjang kapal)
B	= lebar kapal
A_δ	= luasan <i>rudder</i>
r	= jari-jari girasi
Δ	= <i>displacement</i>
U	= kecepatan <i>service</i> kapal

ρ	= massa jenis air laut
$Y'_{\dot{v}}$	= turunan gaya arah sway terhadap $\dot{v}$
$Y'_{\dot{r}}$	= turunan gaya arah sway terhadap $\dot{r}$
$N'_{\dot{v}}$	= turunan momen yaw terhadap $\dot{v}$
$N'_{\dot{r}}$	= turunan momen yaw terhadap $\dot{r}$
Y'_v	= turunan gaya arah sway terhadap v
Y'_r	= turunan gaya arah sway terhadap r
N'_v	= turunan momen yaw terhadap v
N'_r	= turunan momen yaw terhadap r
Y'_{δ}	= turunan gaya arah sway terhadap δ
N'_{δ}	= turunan momen yaw terhadap δ
I'_z	= momen inersia
T_B	= gaya dorong <i>bow thruster</i>
T_S	= gaya dorong <i>stern thruster</i>
X_B	= jarak <i>bow thruster</i> terhadap <i>center of gravity</i>
X_S	= jarak <i>stern thruster</i> terhadap <i>center of gravity</i>
Q_m	= torsi yang diproduksi oleh mesin (Nm)
Y	= posisi <i>fuel pump rack</i>
K_y	= <i>gain constant</i>
T_y	= <i>time constant</i>
n	= jumlah rotasi tiap detik (rps)
$\omega(t)$	= <i>zero mean Gaussian white noise</i>
V_c	= kecepatan arus laut
$u(t)$	= sinyal kontrol
$e(t)$	= sinyal <i>error</i>
K_p	= penguat proporsional
K_d	= penguat derivatif
K_i	= penguat integral
T_d	= konstanta waktu derivatif
T_i	= konstanta waktu integral
K_{cr}	= <i>critical gain</i>
P_{cr}	= <i>critical period</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pelabuhan adalah sebuah fasilitas yang berfungsi sebagai pintu masuk bagi penumpang kendaraan laut maupun barang-barang yang didistribusikan melalui moda transportasi laut. Pelabuhan juga berfungsi sebagai lokasi pemberhentian atau sandar kapal dari aktivitas berlayar untuk menjalankan beberapa aktivitas di pelabuhan. Aktivitas yang berlangsung di pelabuhan diantaranya bongkar muat barang, penurunan maupun pengangkutan penumpang serta aktivitas-aktivitas lain. (Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 2015) Pelabuhan Tanjung Perak merupakan salah satu pelabuhan tersibuk di Indonesia dengan jumlah arus peti kemas yang tinggi dan senantiasa mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Tingginya arus peti kemas di Pelabuhan Tanjung Perak salah satunya disebabkan oleh intensitas kapal yang besar di pelabuhan tersebut. Besarnya intensitas kapal tersebut menyebabkan segala aktivitas harus dilakukan dengan waktu yang efisien serta dengan biaya serendah mungkin, termasuk proses sandar kapal.

Proses sandar kapal harus dilakukan secepat mungkin agar tidak menyebabkan terjadinya antrian kapal yang hendak memasuki dermaga. Proses sandar kapal tersebut umumnya masih memerlukan kapal tunda (*tug boat*) untuk membantu mendorong atau menarik kapal mendekati dermaga. Pengadaan dan penggunaan fasilitas kapal tunda (*tug boat*) memerlukan biaya operasional yang cukup tinggi sehingga perlu adanya alternatif lain untuk melaksanakan proses sandar kapal, salah satunya yaitu dengan menerapkan sistem pengendalian otomatis pada proses sandar kapal.

Sistem pengendalian sandar kapal otomatis telah berhasil dirancang pada beberapa kapal hasil penelitian sebelumnya diantaranya dengan menggunakan metode pengendalian berbasis jaringan saraf tiruan (Zhang, Hearn, & Sen, 1997), metode *decoupling* (Le, 2001), PID (Bui, Kim, Choi, & Kawai, 2009), serta

Internal Model Control (Lee, Tzeng, & Shu, 2012). Perancangan sistem pengendalian sandar kapal otomatis dengan menggunakan pengendali berbasis logika fuzzy (Gunawan, Aisjah, & Masroeri, 2013) telah menghasilkan sistem yang mampu mengendalikan proses sandar kapal secara otomatis di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya. Penelitian tersebut menunjukkan hasil simulasi dengan nilai *error* lintasan yang kecil pada proses sandar kapal tanpa gangguan namun belum berhasil mempertahankan nilai *error* yang kecil tersebut ketika diberi gangguan berupa arus laut sebesar 2,5 knot.

Penelitian ini akan merancang sebuah sistem pengendalian otomatis berbasis PID dengan mekanisme *fuzzy gain scheduling* (FGS-PID) untuk minimalisasi nilai *error* posisi selama proses sandar kapal dengan acuan trayektori dan gangguan berupa arus laut yang sesuai dengan kondisi pada Terminal Jamrud Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya. Logika fuzzy diterapkan sebagai *gain scheduler* untuk menentukan nilai parameter pengendalian PID yaitu K_p , T_i , dan T_d yang sesuai untuk kondisi operasional *plant*. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan sistem pengendalian sandar kapal otomatis (*auto-berthing*) yang dapat memandu kapal untuk bersandar dengan baik sesuai trayektori yang ditentukan di bawah pengaruh gangguan alam berupa arus laut.

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan yang diangkat sebagai topik dalam pengerjaan Tugas Akhir ini antara lain:

1. Berapa nilai parameter pengendalian FGS-PID untuk menghasilkan *error* trayektori seminimum mungkin pada proses sandar kapal otomatis di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya?
2. Bagaimana perbandingan *error* trayektori pada proses sandar kapal otomatis menggunakan metode FGS-PID dan metode PID?

1.3. Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah diperlukan untuk memfokuskan penyelesaian masalah pada Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Metode pengendalian yang digunakan pada penelitian ini yaitu pengendalian berbasis PID dengan mekanisme *fuzzy gain scheduling* (FGS-PID).
2. Variabel yang dikendalikan pada proses sandar kapal yaitu 2 derajat kebebasan (*degree of freedom*) untuk gerakan *sway* dan *yaw* dengan asumsi bahwa secara eksperimen gerak *surge*, *pitch*, *roll*, dan *heave* tidak berpengaruh pada proses sandar kapal.
3. Studi kasus pada penelitian ini mengambil lokasi di Pelabuhan Tanjung Perak, Surabaya.
4. Jenis gangguan yang disimulasikan pada penelitian ini yaitu gangguan berupa arus laut.
5. Simulasi dilakukan menggunakan Simulink MATLAB R2014a.

1.4. Tujuan

Tujuan penelitian yang ingin dicapai dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Memperoleh nilai parameter pengendalian FGS-PID untuk menghasilkan *error* trayektori semimum mungkin pada proses sandar kapal otomatis di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya.
2. Membandingkan *error* trayektori pada proses sandar kapal otomatis menggunakan metode FGS-PID dan metode PID.

.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

DASAR TEORI

2.1. *Anchor Handling Tug Supply (AHTS)*

Kapal *Anchor Handling Tug Supply (AHTS)* merupakan sebuah kapal yang digunakan untuk membantu menarik dan memposisikan *oil rig* maupun kapal laut lain. Penurunan maupun penaikan jangkar pada instalasi unit pengeboran bahkan *semi-submersible rig* di laut lepas merupakan tugas kapal AHTS. Fitur utama lain dari kapal ini yaitu kemampuan kapal AHTS untuk bertindak sebagai kapal penyelamat (*rescue vessel*) bagi kapal lain pada keadaan darurat.



Gambar 2.1 Kapal AHTS (*Maritime Connector*, 2017)

Banyaknya kegunaan yang dimiliki oleh kapal AHTS menyebabkan tingginya kebutuhan akan kapal AHTS di berbagai area. Tingkat perkembangan dan persebaran area pengeboran minyak di laut lepas dari waktu ke waktu juga menjadi salah satu penyebab utama tingginya penggunaan dan kebutuhan akan kapal AHTS. (Singh, 2016)

Sebuah kapal AHTS biasanya dilengkapi dengan alat penggerak utama berupa *rudder* dan *propeller* serta alat penggerak tambahan (*auxiliary device*) berupa *bow thruster* dan *stern thruster*

untuk mempermudah maneuver kapal pada kondisi kecepatan rendah. Kelengkapan alat penggerak kapal AHTS dapat digunakan untuk melakukan sandar di dermaga tanpa bantuan dari *tugboat*.

2.2. Pemodelan Dinamika Kapal

Pemodelan dinamik kapal melibatkan dua bidang ilmu, yaitu ilmu statika dan ilmu dinamika. Statika merupakan ilmu mengenai benda dalam keadaan diam atau benda yang bergerak dengan kecepatan konstan, sedangkan dinamika yaitu ilmu mengenai benda bergerak dengan percepatan.

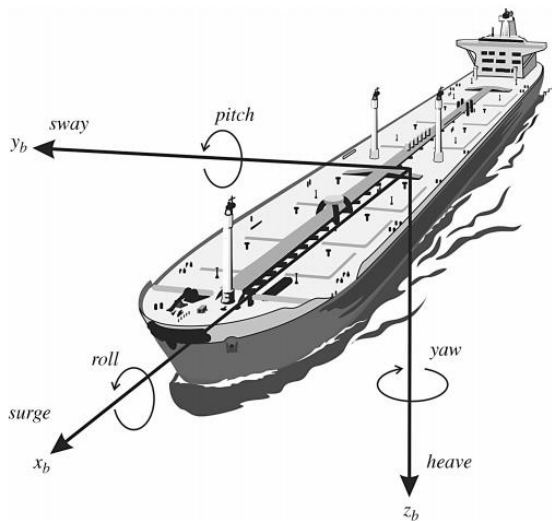
Dasar keilmuan dari ilmu dinamika yaitu hukum Newton yang ditemukan oleh Newton di tahun 1687. Ilmu dinamika biasanya dibagi atas dua bagian, yaitu kinematik yang hanya memerhatikan aspek geometris dari gerakan, dan kinetik yaitu analisa mengenai gaya-gaya yang menyebabkan terjadinya gerak.

Gerakan yang dialami oleh kapal memiliki 6 derajat kebebasan (*degree of freedom*) karena 6 koordinat yang berbeda dibutuhkan untuk menentukan posisi dan orientasi dari kapal. Tiga koordinat pertama digunakan untuk menyatakan posisi dan gerak translasi sepanjang sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z. Tiga koordinat lainnya digunakan untuk mendeskripsikan orientasi dan gerak rotasi kapal. Notasi yang digunakan untuk menyatakan gaya, momen, kecepatan linier dan angular, serta posisi dan sudut Euler pada keenam koordinat tersebut disebutkan pada Tabel 2.1 sedangkan ilustrasi dari gerak dan rotasi kapal ditunjukkan pada Gambar 2.2.

Tabel 2.1 Notasi yang Digunakan pada Kendaraan Laut (Fossen, 1994)

DOF	Gerak/Rotasi Kapal	Gaya dan momen	Kecepatan linier dan angular	Posisi dan sudut Euler
1	Gerak pada arah sumbu-x (<i>surge</i>)	X	u	x
2	Gerak pada arah sumbu-y (<i>sway</i>)	Y	v	y

DOF	Gerak/Rotasi Kapal	Gaya dan momen	Kecepatan linier dan angular	Posisi dan sudut Euler
3	Gerak pada arah sumbu-z (<i>heave</i>)	Z	w	z
4	Rotasi terhadap sumbu-x (<i>roll</i>)	K	p	ϕ
5	Rotasi terhadap sumbu-y (<i>pitch</i>)	M	q	Θ
6	Rotasi terhadap sumbu-z (<i>yaw</i>)	N	r	Ψ



Gambar 2.2 Gerak Kapal dengan 6 Derajat Kebebasan (Fossen, 2011)

Persamaan umum yang digunakan pada maneuver kapal dengan 6 derajat kebebasan yang diturunkan dari Hukum II Newton adalah sebagai berikut:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (2.1)$$

di mana:

- M = matriks inersia (termasuk massa tambahan)
 $C(v)$ = matriks Coriolis (termasuk massa tambahan)
 $D(v)$ = matriks redaman
 $g(\eta)$ = vektor gaya dan momen gravitasi
 τ = vektor input kendali

Persamaan gerak dan rotasi kapal pada sumbu-x, sumbu-y dan sumbu-z yang diturunkan dari persamaan (2.1) dinyatakan pada persamaan (2.2) hingga (2.7).

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] = X \quad (2.2)$$

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] = Y \quad (2.3)$$

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})] = Z \quad (2.4)$$

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K \quad (2.5)$$

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M \quad (2.6)$$

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - cr + wq)] = N \quad (2.7)$$

Pusat koordinat ditentukan berada di garis tengah kapal, yaitu $y_G = 0$. Persamaan gerak untuk kecepatan dan kemudi kapal didasarkan atas beberapa asumsi, yaitu:

- (i) Distribusi massa homogen dan bidang xz simetri ($I_{xy} = I_{yz} = 0$).
- (ii) Gerak *heave*, *roll*, dan *pitch* dapat diabaikan ($w = p = q = \dot{w} = \dot{p} = \dot{q} = 0$).

Asumsi-asumsi tersebut kemudian diterapkan pada persamaan (2.2) hingga (2.7) sehingga untuk model persamaan dinamika kapal dengan 2 derajat kebebasan yaitu *sway* dan *yaw* diperoleh bentuk seperti pada persamaan (2.8) dan (2.9).

$$\text{Sway} : m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) = Y \quad (2.8)$$

$$\text{Yaw} : I_z \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) = N \quad (2.9)$$

Pemodelan dinamika kapal dengan dua derajat kebebasan sering digunakan dalam merancang sistem kendali maneuver kapal, seperti pada model Davidson & Schiff (1946) serta Nomoto (1957). Kedua model tersebut menggunakan variabel gerak sway dan yaw serta input kendali berupa defleksi sudut rudder (δ).

Teori linear menyatakan bahwa gaya dan momen hidrodinamik pada pemodelan dinamika kapal Davidson dan Schiff dengan sumbu gerak sway dan yaw dapat dimodelkan sesuai persamaan (2.10) dan (2.11).

$$\textbf{Sway} : Y = Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_{\delta}\delta \quad (2.10)$$

$$\textbf{Yaw} : N = N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_v v + N_r r + N_{\delta}\delta \quad (2.11)$$

Persamaan dinamika kapal dapat disusun berdasarkan persamaan umum gerak kapal:

$$M\dot{v} + N(u_0)v = b\delta_R \quad (2.12)$$

dengan $v = [v, r]^T$ adalah vektor keadaan, δ_R adalah sudut *rudder* dan matriks $N(u_0)$ merupakan hasil penjumlahan dari matriks *damping* linier D dan matriks Coriolis $C(u_0)$. Persamaan (2.10) dan (2.11) dapat disubstitusikan ke dalam persamaan (2.8) dan (2.9) sehingga diperoleh persamaan berikut.

Sway:

$$m[\dot{v} + ur + x_G\dot{r}] = Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_{\delta}\delta \quad (2.13)$$

Yaw:

$$I_z\dot{r} + m[x_G(\dot{v} + ur)] = N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_v v + N_r r + N_{\delta}\delta \quad (2.14)$$

Variabel keadaan yaitu v dan r beserta turunannya pada persamaan (2.13) dan (2.14) dipindahkan ke sumbu kiri sehingga menyisakan input kendali di sisi kanan persamaan seperti pada persamaan (2.15) dan (2.16).

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} - Y_v v + (mu - Y_r)r = Y_{\delta}\delta \quad (2.15)$$

$$(mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} - N_v v + (mx_G u - N_r)r = N_{\delta}\delta \quad (2.16)$$

Model Davidson and Schiff (1946) dengan 2 derajat kebebasan sway dan yaw dapat diperoleh dengan mengubah persamaan (2.15) dan (2.16) ke dalam bentuk matriks *state space*

sesuai persamaan umum gerak kapal pada persamaan (2.12). Nilai matriks inersia (M), matriks redaman ($N(u_0)$) dan gaya/momen rudder didapatkan berdasarkan persamaan (2.17) dan (2.19).

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$N = \begin{bmatrix} -Y_v & mu - Y_{\dot{r}} \\ -N_v & mx_G u - N_r \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$b = \begin{bmatrix} Y_{\delta} \\ N_{\delta} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Matriks pada persamaan (2.17) hingga (2.19) merupakan matriks penyusun model dinamika kapal Davidson & Schiff. Pemodelan dinamika kapal Davidson & Schiff melibatkan satu *control input* berupa defleksi sudut rudder (δ_R) dengan satu aktuator berupa *rudder*. Aktuator tambahan berupa *stern thruster* dan *bow thruster* digunakan pada proses sandar kapal pada penelitian ini, sehingga gaya dorong *thruster* perlu ditambahkan ke dalam matriks b dan menghasilkan matriks baru pada persamaan (2.20). (Park & Kim, 2014)

$$b = \begin{bmatrix} Y_{\delta} & Tb & Ts \\ N_{\delta} & TbXb & TsXs \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Reformasi matriks b pada persamaan menyebabkan input kendali yang jumlahnya harus disesuaikan dengan jumlah kolom pada matriks b . *Control input* yang digunakan antara lain defleksi sudut rudder, tegangan *bow thruster* dan tegangan *stern thruster*.

Koefisien hidrodinamik yang digunakan pada matriks penyusun persamaan pemodelan dinamika kapal pada persamaan (2.17) hingga (2.19) merupakan turunan dari gaya dan momen hasil analisa regresi linier Clarke (1982) yang dinyatakan pada persamaan (2.19) hingga (2.30). (Edward V Lewis, 1988)

$$\frac{-Y_{I\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.16 \frac{C_B B}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{L}\right)^2 \quad (2.19)$$

$$\frac{-Y_{I\dot{r}}}{\pi(T/L)^2} = 0.67 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.0033 \left(\frac{B}{T}\right)^2 \quad (2.20)$$

$$\frac{-N_{I\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1.1 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.041 \left(\frac{B}{T}\right) \quad (2.21)$$

$$\frac{-N_{I\dot{r}}}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0.017 \frac{C_B B}{T} - 0.33 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.22)$$

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.40 \frac{C_B B}{T} \quad (2.23)$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2.2 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.080 \left(\frac{B}{T}\right) \quad (2.24)$$

$$\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2.4 \left(\frac{T}{L}\right) \quad (2.25)$$

$$\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{4} + 0.039 \left(\frac{B}{T}\right) - 0.56 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.26)$$

$$Y'_\delta = \frac{\pi A_\delta}{4LT} \quad (2.27)$$

$$N'_\delta = -\frac{1}{2} Y'_\delta \quad (2.28)$$

$$I'_r = m' \cdot r'^2 \quad (2.29)$$

$$I'_z = m' X'_G + I'_r \quad (2.30)$$

Koefisien hidrodinamika yang diperoleh melalui persamaan (2.19) hingga (2.30) merupakan koefisien hidrodinamik tak berdimensi. Penyusun matriks model dinamika kapal pada persamaan (2.17) hingga (2.19) merupakan parameter dan variabel dimensional, sehingga dibutuhkan mekanisme normalisasi untuk mengubah parameter tersebut menjadi nondimensional.

Nilai parameter spesifikasi kapal yaitu massa, *center of gravity*, dan kecepatan harus dikonversi menjadi bentuk nondimensional. Mekanisme mengubah parameter dimensional menjadi nondimensional disebut normalisasi. Normalisasi parameter salah satunya dapat dilakukan menggunakan metode normalisasi SNAME. Metode normalisasi ini memiliki 3 jenis yaitu *Prime-system I*, *Prime-system II*, dan *Bis-system*. *Prime-system 1* merupakan mekanisme yang menggunakan panjang dan kecepatan kapal. *Prime-system II* bersumber dari adanya *wing theory*, sedangkan *bis-system* digunakan untuk benda yang diam di laut seperti *offshore platform*.

Koefisien hidrodinamika pada penelitian ini dinormalisasi menggunakan mekanisme *Prime-system I* dengan mengikuti Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Variabel Normalisasi yang Digunakan Untuk *Prime-system I* (Fossen, 1994)

Satuan	<i>Prime-system I</i>
Panjang	L
Massa	$\frac{\rho}{2}L^3$
Momen inersia	$\frac{\rho}{2}L^5$
Waktu	$\frac{L}{U}$
Luasan referensi	L^2
Posisi	L
Sudut	1
Kecepatan linier	U
Kecepatan angular	$\frac{U}{L}$
Percepatan linier	$\frac{U^2}{L}$
Percepatan angular	$\frac{U^2}{L^2}$
Gaya	$\frac{\rho}{2}U^2L^2$
Momen	$\frac{\rho}{2}U^2L^3$

Parameter dan koefisien hidrodinamik kapal yang tidak berdimensi sehingga dibutuhkan model yang menyatakan hubungan antara parameter nondimensional dengan *state variabel* dimensional. Model yang menunjukkan representasi model Davidson dan Schiff (1946) dengan menggabungkan variabel keadaan aktual dengan parameter kapal dan koefisien hidrodinamik tak berdimensi ditunjukkan oleh persamaan (2.31).

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \frac{L}{U^2} m'_{11} & \frac{L^2}{U^2} m'_{12} \\ \frac{L}{U^2} m'_{21} & \frac{L^2}{U^2} m'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{U} n'_{11} & \frac{L}{U} n'_{12} \\ \frac{1}{U} n'_{21} & \frac{L}{U} n'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} = \\
& \begin{bmatrix} b'_{11} & b'_{12} & b'_{13} \\ b'_{21} & b'_{22} & b'_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_R \\ V_B \\ V_S \end{bmatrix} \quad (2.31)
\end{aligned}$$

di mana m'_{ij} , n'_{ij} dan b'_{ij} merupakan komponen dari matriks model Davidson dan Schiff tak berdimensi pada persamaan (2.17), (2.18) dan (2.20) secara berturut-turut.

Bentuk umum dari persamaan *state space* model dinamika kapal ditunjukkan oleh persamaan (2.32). (Fossen, 1994)

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.32)$$

Variabel keadaan yang digunakan yaitu kecepatan sway dan dan yaw rate $x = [v, r]^T$ sedangkan u merupakan sinyal kendali berupa sudut *rudder*, tegangan *bow thruster* dan tegangan *stern thruster*. Nilai matriks A dan B diperoleh dari perhitungan berdasarkan komponen matriks pada persamaan (2.31):

$$A = -M^{-1}N \quad (2.33)$$

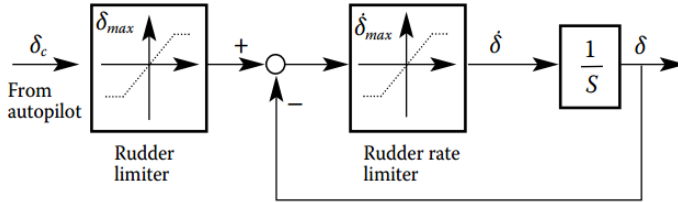
$$B = M^{-1}b \quad (2.34)$$

2.2. Pemodelan Dinamika Rudder

Rudder merupakan alat kemudi utama kapal pada umumnya. *Rudder* terletak di bagian belakang kapal dan berfungsi untuk menghasilkan gaya pada arah sumbu-y yang akan menyebabkan momen yaw dan dapat digunakan untuk mengendalikan sudut yaw kapal. Model matematis *rudder* yang sering digunakan pada simulasi dan rancangan *autopilot* adalah model Van Amerongen.

Model Van Amerongen terdiri dari dua *limiter*, *limiter* pertama berfungsi sebagai pembatas sudut *rudder* sedangkan *limiter* kedua berfungsi membatasi kecepatan sudut *rudder*. *International Convention for Safety Life at Sea (SOLAS)* menyatakan bahwa *rudder* harus dapat mengubah sudut dari 35° *port* ke 35° *starboard* selama 30 detik. Kecepatan sudut *rudder* maksimum sebesar 2,5°/s telah cukup untuk memenuhi kriteria tersebut. (Hammoud, 2012) Gambar 2.3 merupakan diagram blok

pengendalian *rudder* yang dimodelkan oleh Van Amerongen pada tahun 1982.



Gambar 2.3 Diagram Blok Pengendalian *Rudder* (Fossen, 1994)

Pemodelan dinamika *rudder* orde satu secara matematis dapat dinyatakan oleh persamaan (2.35).

$$\delta = \frac{K}{\sigma s + 1} \quad (2.35)$$

dengan nilai K yaitu *gain rudder* ($\Delta O/\Delta I$) dan σ adalah *time constant rudder*. (Fossen, 1994)

2.3. Pemodelan Dinamika *Propeller* dan *Thruster*

Propeller merupakan aktuator kapal berupa baling-baling yang terpasang di bagian belakang lambung kapal. *Propeller* mengubah gaya putar menjadi gaya dorong untuk kapal sehingga dapat berfungsi untuk mengatur kecepatan kapal. Semakin cepat putaran baling-baling *propeller*, maka semakin cepat kapal berjalan. *Propeller* utama kapal digunakan untuk menciptakan gaya pada arah sumbu-x (*surge*) (Fossen, 2011)

Side thruster merupakan aktuator yang terpasang di badan kapal, yaitu di bagian depan (*bow thruster*) dan/atau di bagian belakang kapal (*stern thruster*) untuk menciptakan gaya *sway* dan momen *yaw*. *Thruster* memiliki prinsip kerja yang sama dengan *propeller* yaitu mengubah gaya putar baling-baling *thruster* menjadi gaya dorong kapal. *Side thruster* digunakan ketika *rudder* tidak mampu menciptakan gaya dan momen yang diinginkan pada kecepatan rendah. (Park & Kim, 2014)

Dinamika *propeller* dan *thruster* telah dimodelkan secara matematis oleh Horigome, Hara, Hotta dan Ohtsu pada tahun 1990

dalam bentuk persamaan fungsi alih orde satu seperti pada persamaan (2.36).

$$\frac{Q_m}{Y}(s) = \frac{K_y}{1+T_y s} \quad (2.36)$$

Nilai T_y pada persamaan fungsi alih (2.36) dapat diperoleh melalui pendekatan sesuai persamaan (2.37).

$$T_y \approx 0.9 \frac{2\pi}{n} \quad (2.37)$$

dengan: Q_m = torsi yang diproduksi oleh mesin (Nm)

Y = posisi *fuel pump rack*

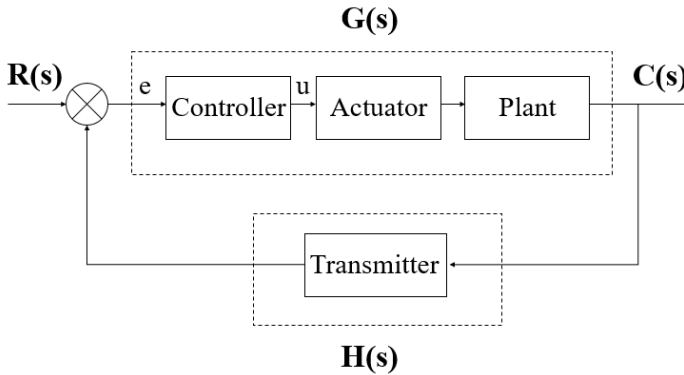
K_y = *gain constant*

T_y = *time constant*

n = jumlah rotasi tiap detik (rps)

2.4. Analisa Kestabilan Root-Locus

Karakteristik dasar dari respon transien sebuah sistem *closed-loop* berhubungan dengan *closed-loop poles*, yaitu akar dari persamaan karakteristik sistem tersebut. W.R. Evans mengembangkan sebuah metode sederhana yang disebut dengan metode *root-locus* untuk menentukan akar dari persamaan karakteristik. Metode ini bekerja dengan menentukan akar-akar persamaan karakteristik untuk semua nilai parameter sistem dan membentuk sebuah grafik. (Ogata, 2010) Akar-akar persamaan karakteristik untuk nilai parameter tertentu kemudian dapat ditentukan lokasinya pada grafik tersebut. Metode ini dapat digunakan untuk memprediksi perilaku dari sistem kendali terhadap variasi nilai *gain*. Grafik tersebut dapat dianalisa untuk menentukan kestabilan suatu sistem. Langkah-langkah untuk membangun *root-locus* untuk sistem pengendalian pada Gambar 2.4 adalah sebagai berikut. (Ogata, 2010)



Gambar 2.4 Diagram Blok Sistem Pengendalian (Ogata, 2010)

- Menentukan persamaan karakteristik sistem.

$$1 + G(s)H(s) = 0 \quad (2.38)$$

Persamaan karakteristik pada persamaan (2.38) dapat disusun ulang sehingga berbentuk seperti persamaan berikut ini.

$$1 + \frac{K(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_n)} = 0 \quad (2.39)$$
- Menentukan lokasi *pole* dan *zero* dari persamaan karakteristik pada bidang *s*. Cabang dari *root-locus* selalu dimulai dari *pole loop* terbuka dan berakhir pada *zero* seiring dengan peningkatan nilai *K* dari nol menuju tak hingga.
- Menentukan tempat kedudukan akar pada sumbu *real* dengan memilih titik uji pada sumbu *real*. Titik uji berada pada *root locus* jika jumlah total *pole* dan *zero* di sebelah kanan titik tersebut bernilai ganjil.
- Menentukan asimtot dari *root locus*. *Root loci* dari nilai *s* yang sangat besar harus asimtot terhadap garis lurus yang sudutnya:
$$\text{Sudut asimtot} = \frac{\pm 180^\circ(2k+1)}{n-m} \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.40)$$

di mana: *n* = jumlah *pole* dari *G(s)H(s)*
m = jumlah *zero* dari *G(s)H(s)*
- Mencari titik *breakaway* dan titik *break-in* dari persamaan karakteristik:

$$B(s) + KA(s) = 0 \quad (2.41)$$

Titik *breakaway* dan titik *break-in* dapat ditentukan dari akar persamaan berikut ini:

$$\frac{dK}{ds} = -\frac{B'(s)A(s) - B(s)A'(s)}{A^2(s)} = 0 \quad (2.42)$$

Tidak semua akar dari persamaan (2.42) merupakan titik *breakaway* dan titik *break-in*, melainkan hanya akar-akar yang terletak pada *root locus* saja.

- f. Menentukan sudut keberangkatan dan sudut kedatangan *root locus*.
- g. Mencari titik pada sumbu imajiner yang mungkin memotong *root loci*. Penentuan titik potong dapat dilakukan dengan menggunakan kriteria kestabilan Routh atau melakukan substitusi $s = j\omega$ pada persamaan karakteristik dan menyelesaikan persamaan untuk ω dan K.
- h. Melakukan beberapa pengujian titik dan menggambar *root loci*.
- i. Menentukan *pole loop* tertutup. Suatu sistem yang stabil memiliki *pole loop* tertutup yang seluruhnya terletak di sebelah kiri sumbu imajiner bidang s.

2.5. Pemodelan Gangguan Arus Laut

Arus laut rata-rata dapat dimodelkan menggunakan proses Gauss-Markov orde satu untuk keperluan simulasi seperti pada persamaan (2.43).

$$\dot{V}_c(t) + \mu_0 V_c(t) = \omega(t) \quad (2.43)$$

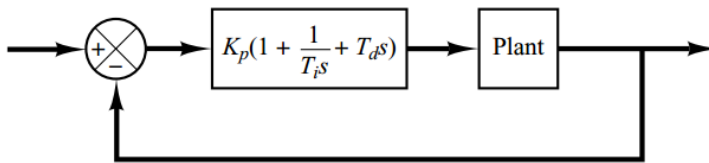
di mana $\omega(t)$ merupakan *zero mean Gaussian white noise* dan μ_0 merupakan konstanta yang nilainya lebih besar sama dengan nol ($\mu_0 \geq 0$). Proses tersebut harus membatasi nilai $V_c(t)$ di mana $V_{min} \leq V_c(t) \leq V_{max}$ untuk melakukan simulasi terhadap arus laut yang realistis. (Fossen, 1994)

2.6. Pengendali Proporsional Integral Derivatif (PID)

Kendali PID merupakan metode pengendalian yang telah digunakan secara luas pada berbagai bidang industri sejak tahun 1939. Lebih dari setengah pengendali yang digunakan di industri saat ini merupakan pengendali PID maupun pengendali PID yang telah dimodifikasi. Hal ini disebabkan oleh kesederhanaan struktur

pengendali PID serta kemudahan pengendali PID untuk diaplikasikan pada berbagai sistem. (Tehrani & Mpanda, 2012)

Pengendali PID sesuai namanya terdiri atas pengendalian proporsional, integral, dan derivatif. Sinyal pengendali PID merupakan hasil penjumlahan dari sinyal pengendali proporsional, pengendali integral, dan pengendali derivatif. Diagram blok pengendali PID ditampilkan oleh Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram blok pengendali PID (Ogata, 2010)

Sinyal kendali pada pengendalian PID sesuai diagram blok pengendalian pada Gambar 2.5 yaitu:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (2.44)$$

atau dalam bentuk lain:

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

di mana: $u(t)$ = sinyal kontrol
 $e(t)$ = sinyal *error*
 K_p = penguat proporsional
 K_d = penguat derivatif
 K_i = penguat integral
 T_d = konstanta waktu derivatif
 T_i = konstanta waktu integral

Persamaan (2.44) menunjukkan sinyal kontrol pengendali PID terdiri atas tiga parameter yaitu parameter proporsional (K_p), integral (T_i), dan derivatif (T_d). Komponen proporsional (P) berperan untuk mengalikan sinyal *error* dengan nilai *gain* secara proporsional. Nilai penguat proporsional yang tinggi akan mengakibatkan perubahan sinyal output yang besar pula, namun

nilai *gain* proporsional yang terlalu besar akan mengakibatkan sistem menjadi tidak stabil. Nilai penguat proporsional yang terlalu kecil maka sinyal keluaran akan menjadi terlalu kecil untuk memberi respon terhadap gangguan.

Komponen integral (I) pada pengendali PID digunakan untuk mengoreksi jika terjadi perbedaan nilai antara sinyal keluaran dengan sinyal *set point* pada kondisi *steady*. Pengendali integral melakukan akumulasi terhadap nilai *error* dari waktu ke waktu di masa lampau dan mengatasi kekurangan dari pengendali proporsional dengan mengeliminasi nilai *error steady-state*.

Pengendalian derivatif (D) menggunakan tingkat perubahan sinyal *error* sebagai elemen prediksi pada aksi pengendalian. Komponen derivatif tidak dapat digunakan sebagai pengendali yang berdiri sendiri tanpa komponen pengendalian lain akibat adanya kemungkinan peningkatan nilai *noise* dalam pengukuran. Pengendali derivatif akan memberikan pengaruh berupa peningkatan stabilitas sistem, pengurangan nilai *overshoot*, serta memperbaiki respon transien. Pengaruh komponen pengendalian K_p , K_i , dan K_d pada sistem *loop* tertutup dirangkum pada Tabel 2.3 berikut ini.

Tabel 2.3 Pengaruh parameter pengendalian PID terhadap respon dinamik sistem (Tehrani & Mpanda, 2012)

Parameter	Rise time	Overshoot	Settling time	Steady-state error
K_p	Berkurang	Meningkat	Perubahan kecil	Berkurang
T_i	Berkurang	Meningkat	Meningkat	Berkurang
T_d	Sedikit berkurang	Sedikit berkurang	Sedikit berkurang	Tidak berpengaruh

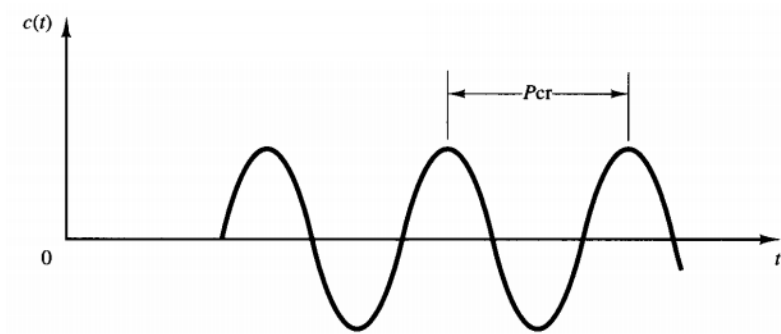
Parameter-parameter pengendalian K_p , T_i , dan T_d biasanya diatur pada batasan nilai tertentu. Kegiatan menentukan nilai parameter K_p , T_i , dan T_d disebut *tuning* parameter pengendalian. Pengaturan nilai parameter harus dilakukan dengan tepat dengan mempertimbangkan sifat dan karakteristik *plant* yang akan

dikendalikan untuk menghasilkan respon dan perilaku sistem pengendalian yang diinginkan. (Tehrani & Mpanda, 2012)

Tuning atau penentuan nilai parameter pengendali merupakan salah satu faktor terbesar yang mempengaruhi kinerja pengendalian PID. Parameter pengendali PID dapat di-*tuning* dengan menggunakan berbagai cara, antara lain *tuning* manual, metode Ziegler-Nichols, metode Cohen-Coons, *loop sharing* serta *pole placement* dan berbagai metode *tuning* lain. (Khan & Rapal, 2006)

Metode *tuning* yang dikembangkan oleh Ziegler dan Nichols merupakan metode penentuan parameter pengendalian PID yang paling luas digunakan di industri baik dalam bentuk murni maupun sudah termodifikasi. Metode ini sering digunakan sebagai dasar prosedur *tuning* yang diterapkan oleh manufaktur pengendali dan industri proses. Metode *tuning* Ziegler-Nichols didasarkan atas penentuan beberapa sifat dinamik proses yang kemudian digunakan untuk menyatakan nilai parameter pengendali. Luasnya pengaplikasian metode ini dikarenakan prosedur yang sederhana dan intuitif, memerlukan banyak pengetahuan mengenai proses yang dikendalikan serta dapat diaplikasikan dengan mudah. Beberapa batasan masih dimiliki oleh metode Ziegler-Nichols dalam proses *tuning* parameter pengendali PID, yaitu batas kestabilan yang sempit serta kemampuan untuk mengatasi adanya gangguan eksternal yang kurang memuaskan pada beberapa proses. (Astrom & Hagglund, 1995)

Proses *tuning* Ziegler-Nichols dilakukan dengan memberikan nilai $T_i = \infty$ dan $T_d = 0$. Penggunaan mode pengendalian proporsional digunakan untuk mengetahui nilai *critical gain* dan *critical period*. Nilai K_p ditingkatkan dari 0 menuju nilai kritis K_{cr} yaitu saat keluaran dari sistem menunjukkan osilasi dengan amplitudo yang konstan. P_{cr} merupakan periode sinyal keluaran sistem saat *gain* K_{cr} seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Osilasi Berkelanjutan dengan Periode P_{cr} (Ogata, 1997)

Ziegler-Nichols mengusulkan bahwa nilai parameter K_p , T_i dan T_d dapat ditentukan menurut nilai K_{cr} dan P_{cr} . Perhitungan parameter PID berdasarkan nilai *gain* dan periode kritis dilakukan berdasarkan perhitungan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Aturan *Tuning* Ziegler-Nichols Berdasarkan Nilai K_{cr} dan P_{cr} (Ogata, 1997)

Tipe pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2P_{cr}}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

2.7. Logika Fuzzy

Logika fuzzy didasarkan atas pemikiran bahwa tidak semua sistem di dunia ini bersifat tegas, deterministik, serta dapat dinyatakan dengan “ya” atau “tidak”. Seiring dengan meningkatnya kompleksitas sistem maka kemampuan untuk mendeskripsikan perilaku sistem secara presisi juga akan meningkat secara signifikan. Logika fuzzy yang pertama kali diusulkan oleh L.A. Zadeh pada tahun 1965 memungkinkan adanya nilai di antara “ya” (dinyatakan dengan nilai 1) dan “tidak” (dinyatakan dengan nilai 0) sehingga suatu kebenaran tidak hanya

dibatasi oleh pernyataan benar atau salah, namun terdapat derajat yang menyatakan kebenaran atau kesalahan tersebut. (Klir & Yuan, 1995)

2.7.1 Himpunan Fuzzy

Himpunan fuzzy merupakan pengelompokan objek berdasarkan variabel bahasa (linguistik) yang dinyatakan dalam bentuk fungsi keanggotaan fuzzy. Sebuah himpunan fuzzy pada suatu semesta pembicaraan X dinyatakan oleh fungsi yang memetakan setiap anggota X dengan derajat keanggotaan pada interval antara 0 sampai dengan 1. Fungsi tersebut dinamakan fungsi keanggotaan atau fungsi karakteristik.

Terdapat tiga operator standar yang digunakan dalam pengoperasian himpunan fuzzy, yaitu komplemen, gabungan (*union*), dan irisan (*intersection*). (Klir & Yuan, 1995)

a. Komplemen (NOT)

Operator komplemen menyatakan negasi dalam keanggotaan himpunan fuzzy, yang dinyatakan dengan persamaan (2.46).

$$\mu_A^c = 1 - \mu_A[x] \quad (2.46)$$

b. Gabungan (OR)

Operator gabungan menghasilkan nilai keanggotaan maksimum pada elemen himpunan-himpunan yang bersangkutan seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (2.47).

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A[x], \mu_B[y]) \quad (2.47)$$

c. Irisan (AND)

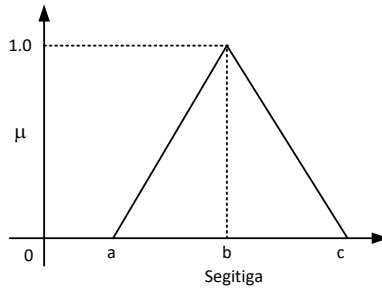
Operator irisan pada himpunan bilangan fuzzy menyatakan nilai derajat keanggotaan minimum pada elemen dari himpunan yang bersangkutan seperti pada persamaan (2.48).

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A[x], \mu_B[y]) \quad (2.48)$$

2.7.2 Jenis-jenis Fungsi Keanggotaan Fuzzy

Fungsi keanggotaan adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik input data ke dalam nilai keanggotaan (derajat keanggotaan) yang memiliki nilai antara 0 sampai dengan 1. Beberapa representasi fungsi keanggotaan fuzzy yang sering digunakan antara lain segitiga dan trapesium.

a. Representasi Segitiga

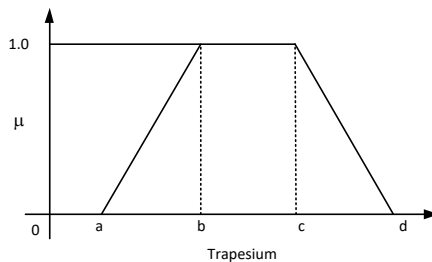


Gambar 2.7 Fungsi Keanggotaan Fuzzy dengan Representasi Segitiga (Klir & Yuan, 1995)

Fungsi keanggotaan fuzzy dengan representasi kurva berbentuk segitiga pada dasarnya merupakan gabungan dari dua kurva linier naik dan turun seperti pada Gambar 2.7. Representasi kurva segitiga dibatasi oleh tiga parameter yaitu a , b , dan c untuk menentukan nilai derajat keanggotaan fuzzy $\mu[x]$. Persamaan fungsi keanggotaan fuzzy untuk representasi berbentuk segitiga ditunjukkan oleh persamaan (2.49)

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (b - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (2.49)$$

b. Representasi Trapesium



Gambar 2.8 Fungsi Keanggotaan Fuzzy dengan Representasi Trapesium (Klir & Yuan, 1995)

Fungsi keanggotaan fuzzy dengan representasi berbentuk trapesium seperti pada Gambar 2.8 dibatasi oleh tiga parameter a , b , c , dan d untuk menentukan nilai derajat keanggotaan dengan persamaan (2.50).

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } x \geq d \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ (d - x)/(d - c); & c \leq x \leq d \end{cases} \quad (2.50)$$

Selain dua jenis representasi fungsi keanggotaan fuzzy pada persamaan (2.50), terdapat bentuk representasi lain diantaranya representasi bentuk bahu, representasi bentuk S (pertumbuhan dan penyusutan), serta representasi bentuk lonceng yang terbagi menjadi tiga kelas yaitu kurva himpunan phi, kurva beta, dan kurva gauss.

2.7.3 Struktur Dasar Logika Fuzzy

Pengendali logika fuzzy memiliki empat komponen utama, yaitu fuzzifikasi, *rule-base*, mekanisme inferensi, dan defuzzifikasi.

a. Fuzzifikasi

Proses fuzzifikasi berperan mengubah memodifikasi input agar dapat dinyatakan dan dibandingkan dengan aturan yang terdapat di dalam *rule-base* dengan cara mengubah masukan *crisp* menjadi nilai derajat keanggotaan pada himpunan fuzzy. Proses ini melibatkan perancangan input dari logika fuzzy dengan menggunakan *membership function*. Masukan bilangan *crisp* dikonversi menjadi nilai derajat keanggotaan fuzzy pada proses ini.

b. Rule-base

Rule-base berisi pengetahuan dalam bentuk sekelompok aturan yang menentukan bagaimana logika fuzzy bekerja untuk menghasilkan pengendalian yang sesuai. Perancangan *rule-base* pada sistem fuzzy dapat dinyatakan dengan kalimat *if-then* maupun dengan tampilan berupa tabel.

c. Mekanisme inferensi

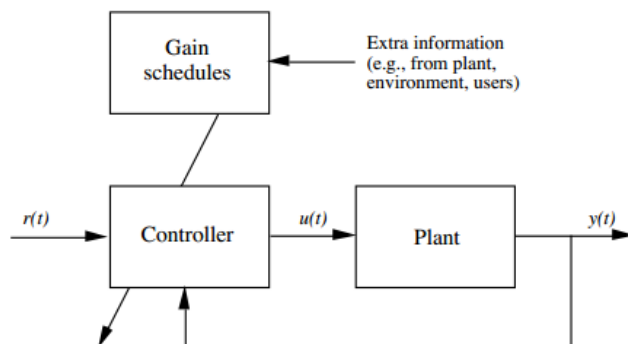
Mekanisme inferensi bertugas mengevaluasi aturan pengendalian yang relevan untuk waktu tertentu dan menentukan nilai yang akan menjadi input untuk sistem.

d. Defuzzifikasi

Proses defuzzifikasi merupakan proses konversi dari kesimpulan yang telah dihasilkan oleh mekanisme inferensi agar dapat menjadi input bagi *plant* (bilangan *crisp*). (Passino & Yurkovich, 1998)

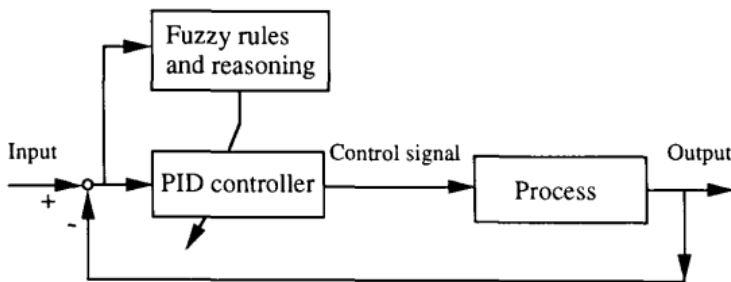
2.8. Fuzzy Gain Scheduling

Proses *gain scheduling* konvensional memerlukan banyak informasi mengenai *plant*, lingkungan atau pengguna untuk melakukan *tuning* terhadap *gain* pengendali. Skema *gain scheduling* secara umum ditunjukkan oleh Gambar 2.9. Mekanisme *gain scheduling* menyediakan *gain* tertentu untuk pengendali pada tiap kondisi operasi yang berbeda. *Gain scheduler* pada dasarnya merupakan komponen yang menerima kondisi operasi tertentu sebagai input dan menyediakan nilai-nilai *gain* sebagai output untuk diteruskan pada pengendali. Diagram blok dari mekanisme *gain scheduler* pada pengendali ditunjukkan oleh Gambar 2.9. (Passino & Yurkovich, 1998)



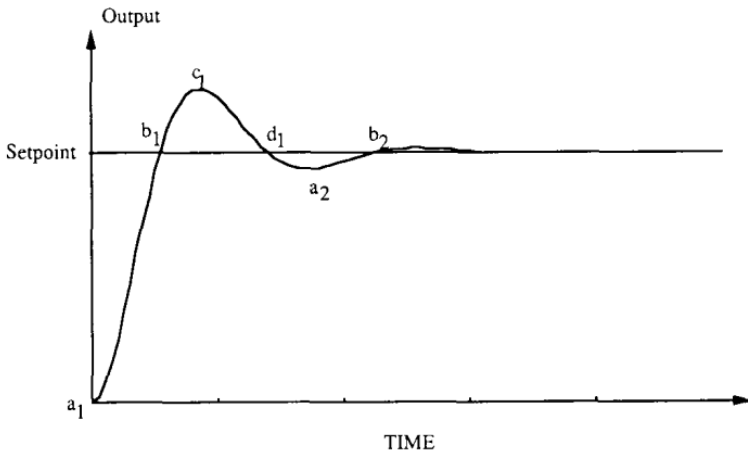
Gambar 2.9 Diagram Blok *Gain Scheduler* Konvensional Secara Umum (Passino & Yurkovich, 1998)

Salah satu metode yang dapat diaplikasikan untuk mengatur nilai *gain* secara otomatis berdasarkan kondisi lingkungan yaitu *fuzzy gain scheduling* berbasis PID. Metode ini menyatukan keuntungan dari sistem fuzzy dalam hal kemampuan beradaptasi pada berbagai sistem serta pengendali PID dalam hal kesederhanaan sistem kendali. Sistem fuzzy yang dilengkapi dengan *rule base* digunakan untuk menentukan nilai tiga parameter PID yaitu K_p , K_d , dan K_i . Mekanisme *fuzzy gain scheduling* dengan pengendali PID secara umum dapat digambarkan dalam bentuk blok diagram seperti pada Gambar 2.10. (Prayitno, Indrawati, Trusulaw, & Kavyarasan, 2017)



Gambar 2.10 Sistem Pengendalian PID dengan Mekanisme *Fuzzy Gain Scheduling* (Zhao, Tomizuka, & Isaka, 1993)

Tujuan dari pengendali PID dengan mekanisme *Fuzzy Gain Scheduling* adalah memilih nilai parameter pengendali PID yaitu K_p , K_i , dan K_d berdasarkan respon dinamik yang diinginkan. Contoh dari respon dinamik *plant* yang diinginkan ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Contoh Respon Dinamik Sistem yang Diinginkan (Zhao et al., 1993)

Gambar 2.11 menunjukkan bahwa pada kondisi awal di sekitar a_1 diperlukan sinyal kendali yang besar untuk mencapai waktu respon yang cepat, maka pengendali PID harus memiliki nilai *gain* proporsional yang besar, nilai *gain* integral yang besar, serta nilai *gain* derivatif kecil. Titik b_1 menunjukkan bahwa respon sistem telah mencapai *set point* maka dibutuhkan nilai sinyal kendali yang kecil untuk menghindari *overshoot*, sehingga pengendali PID harus memiliki *gain* proporsional bernilai kecil, *gain* derivatif bernilai besar serta *gain* integral dengan nilai kecil, dan seterusnya. Aturan-aturan dalam menentukan nilai parameter PID tersebut kemudian dinyatakan dalam bentuk *rule base* pada logika fuzzy.

Parameter pengendali PID ditentukan oleh logika fuzzy berdasarkan masukan berupa nilai *error* $e(k)$ dan *delta error* $\Delta e(k)$, sedangkan keluarannya yaitu nilai konstanta α serta K_p' dan K_d' yang masing-masing merupakan *gain* pengendali proporsional dan *gain* pengendali derivatif yang telah dinormalisasi sehingga memiliki antara nol dan satu.

Nilai parameter Kp' , Kd' dan α ditentukan berdasarkan sekumpulan aturan fuzzy dengan bentuk logika *if... then* seperti berikut ini.

If $e(k)$ is A_i and $\Delta e(k)$ is B_i then Kp' is C_i and Kd' is D_i and α is α_i
dengan nilai $i=1, 2, \dots, m$.

Nilai *gain* pengendali PID yang akan ditentukan oleh logika fuzzy yaitu Kp dan Kd diasumsikan berada pada rentang tertentu yaitu $[Kp_{\min}, Kp_{\max}]$ dan $[Kd_{\min}, Kd_{\max}]$. Rentang nilai Kp dan Kd tersebut ditentukan berdasarkan studi simulasi pada berbagai jenis proses sehingga diperoleh persamaan untuk mencari nilai $Kp_{\min}$, $Kp_{\max}$, $Kd_{\min}$ serta $Kd_{\max}$ sesuai persamaan (2.51) hingga (2.54).

$$Kp_{\min} = 0,32 K_u \quad (2.51)$$

$$Kp_{\max} = 0,6 K_u \quad (2.52)$$

$$Kd_{\min} = 0,08 K_u T_u \quad (2.53)$$

$$Kd_{\max} = 0,15 K_u T_u \quad (2.54)$$

di mana nilai K_u dan T_u secara berturut-turut merupakan nilai *gain* dan periode osilasi pada kondisi kestabilan kritis di bawah pengendali proporsional.

Keluaran dari sistem fuzzy berupa nilai Kp' , Kd' dan α kemudian diubah menjadi *gain* yang akan digunakan dalam pengendalian PID sesuai perhitungan pada persamaan (2.55) hingga (2.57). (Zhao et al., 1993)

$$Kp = (Kp_{\max} - Kp_{\min})Kp' + Kp_{\min} \quad (2.55)$$

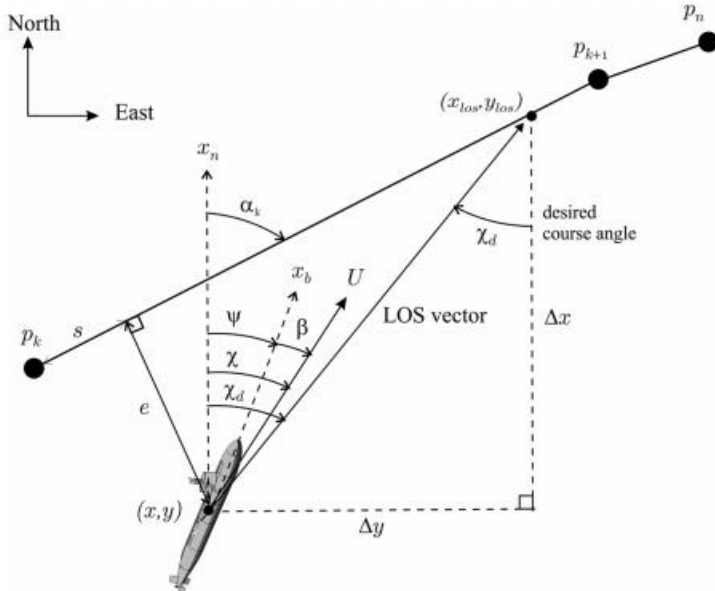
$$Kd = (Kd_{\max} - Kd_{\min})Kd' + Kd_{\min} \quad (2.56)$$

$$Ki = Kp^2 / (\alpha Kd) \quad (2.57)$$

2.9. Sistem Guidance

Sistem *guidance* adalah sebuah sistem yang berfungsi untuk melakukan perhitungan jarak, posisi, arah, serta kecepatan kapal secara kontinu yang akan diikuti oleh kapal. Keluaran dari sistem *guidance* akan menjadi *set point* dan digunakan sebagai masukan untuk sistem kendali. Sistem *guidance* memiliki beberapa

komponen penyusun utama antara lain sensor (*compass*, *gyrocompass*, *GPS*) serta data cuaca seperti kecepatan dan arah arus laut). Data yang diperoleh dari sensor berupa kecepatan, heading, maupun posisi aktual kapal diproses oleh sistem *guidance* untuk mendapat trayektori baru.



Gambar 2.12 Line of Sight Guidance (Fossen, 2011)

Sistem *guidance* Line of Sight (LOS) merupakan aksi penentuan sudut heading yang diinginkan untuk mencapai way point selanjutnya. Ilustrasi dari prinsip kerja *line of sight* dalam menentukan sudut heading kapal ditunjukkan oleh Gambar 2.12. Kumpulan way point $[x_d(k), y_d(k)]$ dan koordinat aktual kapal yang diperoleh dari GPS digunakan untuk menghitung nilai heading yang diinginkan dengan menggunakan persamaan (2.58).

$$\psi_d = \tan^{-1} \left(\frac{y_d(k) - y(t)}{x_d(k) - x(t)} \right) \quad (2.58)$$

Way point selanjutnya dapat ditentukan berdasarkan posisi kapal saat ini, yaitu apakah kapal berada di dalam lingkaran dengan

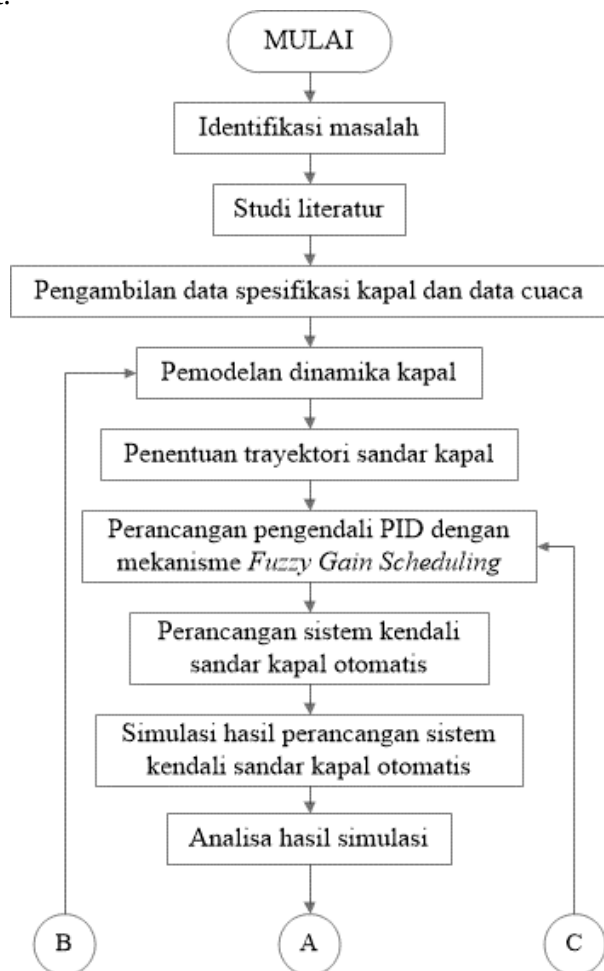
radius R di sekitar *way point* $[x_d(k), y_d(k)]$. Penentuan radius penerimaan (*circle of acceptance*) dapat dilakukan berdasarkan persamaan (2.59).

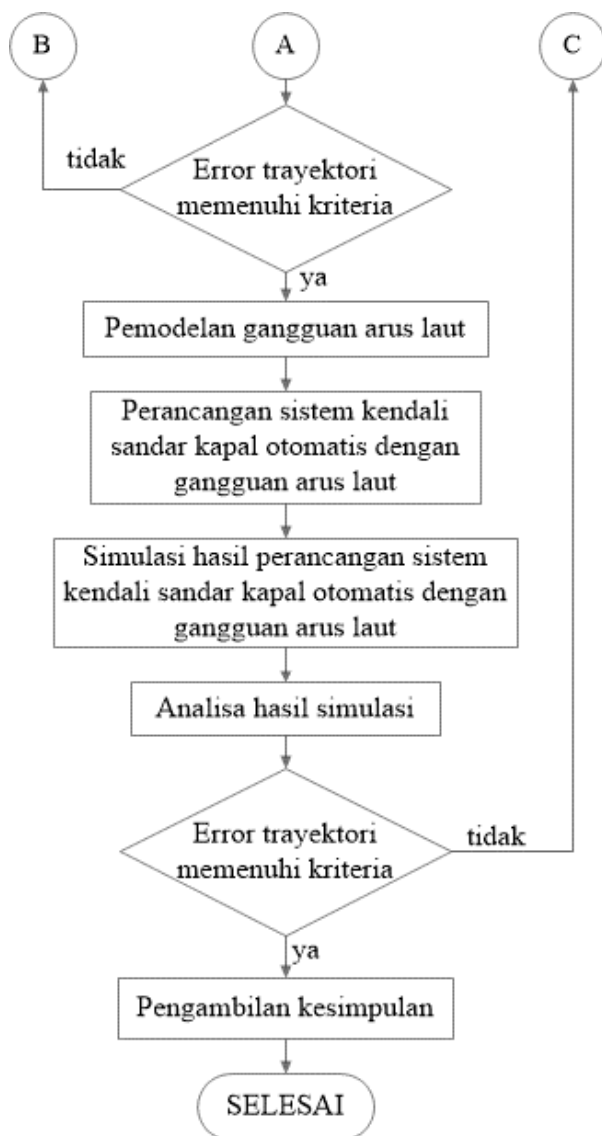
$$[x_d(k) - x(t)]^2 + [y_d(k) - y(t)]^2 \leq R^2 \quad (2.59)$$

Way point selanjutnya $[x_d(k+1), y_d(k+1)]$ dipilih apabila persamaan (2.59) terpenuhi. (Fossen, 1994)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang digambarkan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 3.1 sebagai berikut.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1. Identifikasi Masalah

Mengidentifikasi permasalahan yang mendasari dilakukannya penelitian ini, yaitu proses sandar kapal di Pelabuhan Tanjung Perak yang masih memerlukan bantuan kapal tunda (*tug boat*) untuk membantu kapal bergerak mendekati dermaga. Proses identifikasi masalah menghasilkan rumusan masalah serta tujuan yang ingin dicapai pada pelaksanaan penelitian ini.

3.2. Studi Literatur

Pelaksanaan Tugas Akhir ini memerlukan ide awal serta pemahaman konsep-konsep dasar untuk mewujudkan sistem yang diusulkan. Studi literatur-literatur yang berhubungan Tugas Akhir ini dilakukan untuk menunjang pengerjaan Tugas Akhir. Pemahaman materi yang harus dilakukan antara lain mengenai pemodelan dinamika kapal AHTS, pemodelan aktuator serta gangguan arus laut, serta literatur mengenai pengendalian PID dengan mekaisme *Fuzzy Gain Scheduling*. Teori-teori yang menunjang penelitian ini diperoleh dengan melakukan pendalaman materi dari *handbook* maupun hasil dari penelitian yang lampau. Penelitian ini dilakukan secara simulasi dengan menggunakan *software* penunjang MATLAB R2014a sehingga diperlukan pembelajaran mengenai *software* serta cara untuk menggunakan berbagai fungsi di dalam *software* yang diperlukan untuk menjalankan simulasi sistem yang diusulkan.

3.3. Pengambilan Data Spesifikasi Kapal dan Data Cuaca

Data spesifikasi kapal yang diperlukan sebagai acuan manuver kapal dengan menggunakan model Davidson & Schiff antara lain panjang, lebar, dan kedalaman kapal, *displacement*, kecepatan, koefisien blok, *center of gravity*, dan *rudder area*, dan jari-jari girasi. Data cuaca di Pelabuhan Tanjung Perak yang digunakan sebagai gangguan pada sistem pengendalian sandar kapal otomatis dipilih berdasarkan unsur terbesar penyebab perubahan posisi kapal saat melakukan sandar di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya, yaitu arus laut. Data spesifikasi kapal diperoleh dari PT. Biro Klasifikasi Indonesia sedangkan data

gangguan berupa arus laut didapatkan dari Stasiun Meteorologi Maritim Tanjung Perak Surabaya.

Spesifikasi dari kapal yang digunakan pada penelitian ini yaitu kapal *Anchor Handling Tug Supply (AHTS)* ditampilkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data Spesifikasi Kapal *Anchor Handling Tug Supply (AHTS)* (Biro Klasifikasi Indonesia, 2018)

Besaran	Nilai
L_{pp} (panjang)	55 m
B (lebar)	13 m
T (kedalaman)	5,75 m
Δ (<i>displacement</i>)	1.680 ton
U (kecepatan)	10 m/s
C_B (koefisien blok)	0,4086
X_G (<i>center of gravity</i>)	3,45 m
A_δ (<i>rudder area</i>)	2,212 m ²
r (jari-jari girasi)	8,25 m

Data spesifikasi kapal yang belum disebutkan pada Tabel 3.1 yaitu spesifikasi aktuator yang terpasang pada kapal. *Rudder* yang digunakan memiliki spesifikasi Vcc sebesar 380 Volt serta *time constant* sebesar 0,05 detik. Propeller pada kapal AHTS yang digunakan pada penelitian ini memiliki *gain constant* 1 dan dapat berputar dengan kecepatan 500 rpm. *Bow thruster* dan *stern thruster* kapal memiliki spesifikasi Vcc maksimum 12 Volt serta kecepatan putaran maksimum sebesar 2100 rpm.

Data cuaca yang diperoleh dari Stasiun Meteorologi Maritim Tanjung Perak berupa data nilai kecepatan dan arah arus laut tiap jam di Terminal Jamrud Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya mulai dari tanggal 1 Januari 2017 hingga 9 Desember 2017 dengan koordinat 112,687900 BT dan 7,167141 LS. Data cuaca yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai kecepatan arus laut tertinggi adalah sebesar 2,5 knot.

3.4. Pengambilan Data Trayektori Sandar Kapal

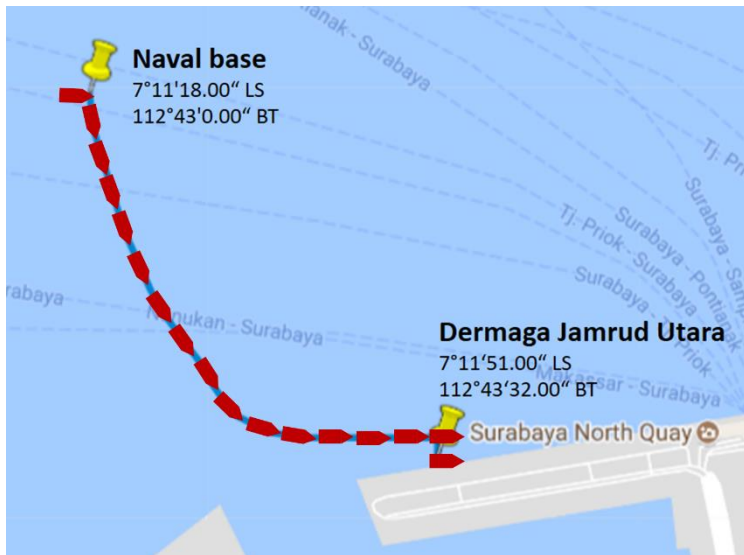
Data jalur kapal yang hendak bersandar pada Terminal Jamrud Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya diperoleh dari PT. Pelindo III

Cabang Tanjung Perak Surabaya dan dinyatakan dalam bentuk titik-titik koordinat *latitude* dan *longitude* dengan satuan derajat lintang dan bujur. Konversi dari satuan derajat ke satuan meter dapat dilakukan dengan cara mengalikan koordinat dengan konstanta $111,32 \times 10^3$ meter. Titik awal trayektori kemudian digeser pada titik (0, 1020) meter untuk menyederhanakan proses analisa hasil simulasi. Trayektori yang harus diikuti oleh kapal ditunjukkan oleh Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Trayektori Sandar Kapal Menuju Terminal Jamrud Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya (PT. Pelindo III Cabang Tanjung Perak Surabaya)

Latitude (°LS)	Longitude (°BT)	X (meter)	Y (meter)
-7,18833	112,7167	0	1020
-7,18915	112,7168	11	930
-7,19170	112,7175	95	646
-7,19321	112,7182	171	478
-7,19379	112,7185	200	413
-7,19495	112,7194	305	284
-7,19634	112,7204	411	129
-7,19680	112,7213	516	78
-7,19692	112,7222	621	65
-7,19698	112,7232	726	65
-7,19692	112,7256	990	65
-7,19750	112,7256	990	0

Trayektori sandar yang harus dilewati oleh kapal yang akan bersandar di Terminal Jamrud diilustrasikan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Jalur Sandar Kapal Menuju Dermaga Jamrud Utara

Kapal yang hendak bersandar harus menghentikan mesin kapal yaitu *rudder* dan *propeller* sejauh 3 kali lebar kapal dari dermaga. Proses sandar kapal selanjutnya dilakukan dengan mendekati dermaga secara perlahan-lahan menggunakan *stern thruster* dan *bow thruster* secara bersamaan.

3.5. Pemodelan Dinamika Kapal

Pemodelan dinamika kapal dilakukan berdasarkan data spesifikasi kapal yang telah diperoleh dan diolah dengan menggunakan pendekatan matematis *Davidson and Schiff* setelah terlebih dahulu menghitung koefisien hidrodinamika berdasarkan nilai parameter-parameter nondimensional kapal.

Pemodelan dinamika kapal tak berdimensi sesuai pemodelan *Davidson and Schiff* membutuhkan beberapa nilai spesifikasi nondimensional kapal. Parameter nondimensional kapal tersebut diperoleh dari proses normalisasi nilai spesifikasi kapal pada Tabel 3.1 menggunakan mekanisme *Prime-system I*. Nilai parameter non-dimensional yang dibutuhkan untuk melakukan pemodelan

berdasarkan model *Davidson and Schiff* adalah massa, *center of gravity* serta kecepatan.

$$m' = 0,000019764 \quad (3.1)$$

$$X_G' = 0,062727 \quad (3.2)$$

$$u_0' = 1 \quad (3.3)$$

Data spesifikasi kapal pada Tabel 3.1 digunakan untuk menghitung nilai koefisien hidrodinamika kapal berdasarkan persamaan (2.19) hingga persamaan (2.30). Persamaan hidrodinamika kapal yang diperoleh dari persamaan tersebut ditunjukkan oleh Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Koefisien Hidrodinamik Non-dimensional Kapal AHTS

Koefisien Hidrodinamik	Nilai
$Y'_{\dot{v}}$	-0,029613576
$Y'_{\dot{r}}$	-0,004856047
$N'_{\dot{v}}$	-0,005741788
$N'_{\dot{r}}$	-0,000722005
Y'_v	-0,047001015
Y'_r	0,005520950
N'_v	-0,025770766
N'_r	-0,007063290
Y'_{δ}	0,005493440
N'_{δ}	-0,002746721
I'_r	0,001345210
I'_z	0,001345280

Koefisien hidrodinamika dan data spesifikasi kapal non-dimensional pada Tabel 3.3 kemudian dapat digunakan untuk memperoleh matriks dinamika kapal tak berdimensi.

$$M' = \begin{bmatrix} 0,0296 & 0,0049 \\ 0,0057 & 0,0021 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$N' = \begin{bmatrix} 0,0470 & -0,0055 \\ 0,0258 & 0,0071 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$b' = \begin{bmatrix} 0,0055 & 0,0104 & 0,0104 \\ -0,0027 & -0,0038 & 0,0038 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Matriks non-dimensional pada persamaan (3.4) hingga persamaan (3.6) kemudian diubah sesuai persamaan (2.31) untuk memperoleh model dinamika kapal yang menyatakan hubungan antara parameter non-dimensional dengan variabel keadaan aktual.

$$M = \begin{bmatrix} 0,0163 & 0,1470 \\ 0,0032 & 0,0625 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$N = \begin{bmatrix} 0,0047 & -0,0303 \\ 0,0026 & 0,0389 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$b = \begin{bmatrix} 0,0055 & 0,0104 & 0,0104 \\ -0,0027 & -0,0038 & 0,0038 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Matriks (3.7) hingga (3.9) digunakan untuk melakukan perhitungan matriks penyusun persamaan *state space* dinamika kapal sehingga diperoleh matriks A dan B seperti pada persamaan (3.10) dan (3.11).

$$A = \begin{bmatrix} 0,1529 & 13,6994 \\ -0,0489 & -1,3137 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1,3457 & 2,1743 & 0,1704 \\ -0,1119 & -0,1704 & 0,0519 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Sistem kendali lintasan kapal memerlukan keluaran berupa perubahan sudut *heading* kapal sehingga untuk menambahkan satu variabel *state* berupa perubahan sudut *heading* diperlukan penambahan baris dan kolom pada matriks A dan B pada persamaan (3.10) dan (3.11) menjadi matriks (3.12) dan (3.13) berikut ini.

$$A = \begin{bmatrix} 0,1529 & 13,6994 & 0 \\ -0,0489 & -1,3137 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1,3457 & 2,1743 & 0,1704 \\ -0,1119 & -0,1704 & 0,0519 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Persamaan *state space* kapal AHTS sesuai bentuk umum *state space* dinamika kapal pada persamaan (2.32) dinyatakan sesuai dengan persamaan (3.14) dan (3.15).

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1529 & 13,6994 & 0 \\ -0,0489 & -1,3137 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1,3457 & 2,1743 & 0,1704 \\ -0,1119 & -0,1704 & 0,0519 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_R \\ V_B \\ V_S \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + 0 \quad (3.15)$$

3.6. Pemodelan Aktuator

Rudder yang digunakan sebagai aktuator pada penelitian ini dapat dimodelkan sesuai persamaan (2.35) sehingga diperoleh fungsi transfer orde satu seperti yang tertera pada persamaan (3.11).

$$\delta = \frac{0,001578947}{0,05s+1} \quad (3.11)$$

Pemodelan propeller dilakukan sesuai pendekatan Horigome, Hara, Hotta dan Hotsu (1990) sesuai pada persamaan (2.36). Perhitungan nilai *time constant* dilakukan sesuai persamaan (2.37) berdasarkan spesifikasi rpm propeller dan diperoleh nilai sebesar 0,617. Fungsi transfer orde satu yang didapatkan dari hasil pemodelan dinamika propeller dituliskan pada persamaan (3.12) berikut.

$$\frac{Q_m}{Y}(s) = \frac{1}{1+0,617s} \quad (3.12)$$

Pemodelan *thruster* baik *bow* maupun *stern* dilakukan sama dengan pemodelan *propeller* yaitu dengan pendekatan Horigome, Hara, Hotta dan Hotsu (1990) sesuai spesifikasi *thruster* dengan tegangan 12 Volt dan kecepatan sudut 2100 rpm. Perhitungan sesuai persamaan (2.37) menghasilkan *time constant* sebesar 0,1616 sedangkan *gain* aktuator yang digunakan yaitu sebesar

0,0833. Fungsi transfer pemodelan *thruster* orde satu diberikan pada persamaan (3.13).

$$V(s) = \frac{0,0833}{1+0,1616s} \quad (3.13)$$

3.7. Perancangan Sistem Kendali Sandar Kapal Otomatis

Model *plant* dan gangguan yang telah diperoleh kemudian disusun sedemikian rupa bersama pengendali PID dengan mekanisme *fuzzy gain scheduling* sehingga menghasilkan sistem pengendalian sandar kapal otomatis yang diinginkan. Aktuator berupa *rudder* dan *propeller* digunakan untuk menggerakkan dinamika kapal sebelum proses *berthing* hingga kapal mencapai *way point*, sedangkan selama proses sandar, kerja *rudder* dan *propeller* digantikan oleh *stern thruster* dan *bow thruster*.

Sistem kendali sandar kapal otomatis yang dirancang pada penelitian ini ditunjukkan oleh diagram blok pada Gambar 3.3. Trayektori yang harus dilalui kapal untuk melakukan sandar sesuai pada Tabel 3.3 berperan sebagai *way point* atau koordinat-koordinat yang ingin dicapai oleh kapal pada sistem pengendalian sandar kapal otomatis. Perhitungan *desired heading* kemudian dilakukan menggunakan mekanisme *Line of Sight* (LOS) untuk menghasilkan sudut *heading* yang diinginkan agar kapal dapat menuju ke *way point* selanjutnya. Perhitungan sudut *heading* dilakukan berdasarkan nilai koordinat aktual kapal dan koordinat yang ingin dituju oleh kapal.

Sistem pengendalian sandar kapal otomatis pada penelitian ini tersusun atas 2 jenis mekanisme pengendalian yaitu sistem pengendali trayektori sebelum *berthing* dan sistem pengendali pada proses *berthing*. Mekanisme pengendalian sebelum proses *berthing* terdiri atas satu pengendali FGS-PID dengan aktuator berupa *rudder*. Mekanisme pengendalian pada proses *berthing* terdiri dari tiga pengendali FGS-PID dengan aktuator berupa *bow thruster* dan *stern thruster*. Adanya dua mekanisme pengendalian sehingga diperlukan proses *switching* pengendalian antara mekanisme pertama dan kedua yang diperlihatkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Mekanisme *Switching* Pengendalian

X (meter)	Y (meter)	Aktuator
0	1020	<i>Rudder</i>
11	930	<i>Rudder</i>
95	646	<i>Rudder</i>
171	478	<i>Rudder</i>
200	413	<i>Rudder</i>
305	284	<i>Rudder</i>
411	129	<i>Rudder</i>
516	78	<i>Rudder</i>
621	65	<i>Rudder</i>
726	65	<i>Rudder</i>

X (meter)	Y (meter)	Aktuator
990	65	<i>Rudder</i>
990	0	<i>Bow thruster</i> dan <i>stern thruster</i>

Tabel 3.4 menunjukkan bahwa *switching* dilakukan berdasarkan trayektori kapal. *Switching* dilakukan dari aktuator *rudder* ke *bow thruster* dan *stern thruster* ketika trayektori aktual kapal telah mencapai *way point* pada koordinat (900,65) meter.

Pengendali FGS-PID pertama berfungsi untuk mengendalikan gerak *yaw* kapal dengan mengatur defleksi sudut *rudder*. Sistem pengendalian *rudder* tersebut bekerja hingga kapal mencapai *way point* pada koordinat (990, 65) yaitu pada jarak tiga kali lebar kapal dari dermaga untuk kemudian digantikan oleh mekanisme pengendalian kedua setelah kapal mencapai *way point*.

Mekanisme pengendalian kedua terdiri atas tiga pengendali FGS-PID yang bekerja bersama-sama untuk melakukan proses *berthing* dengan menggunakan dua buah thruster yaitu di bagian depan (*bow thruster*) dan belakang badan kapal (*stern thruster*). Ketiga pengendali tersebut masing-masing berfungsi untuk mengendalikan gerak *sway* kapal, gerak *yaw* kapal dengan aktuator *bow thruster*, serta gerak *yaw* kapal dengan aktuator *stern thruster*. Perintah kendali dari FGS-PID pada proses sandar kapal yaitu berupa tegangan masukan thruster. Tegangan masukan *bow thruster* diperoleh dari penjumlahan sinyal kendali gerak *yaw* untuk *bow thruster* dan pengendali gerak *sway*, sedangkan tegangan masukan *stern thruster* diperoleh dari penjumlahan sinyal kendali gerak *yaw* untuk *stern thruster* dan pengendali gerak *sway*.

3.8. Perancangan Pengendali PID dengan Mekanisme *Fuzzy Gain Scheduling*

Pengendali PID yang digunakan pada sistem pengendalian memiliki tiga parameter pengendalian yaitu penguat proporsional (K_p), konstanta waktu integral (T_i), dan konsanta waktu derivatif (T_d). Proses *tuning* yaitu penentuan gain parameter pengendalian

dilakukan menggunakan logika fuzzy untuk menentukan nilai K_p , T_i , dan T_d yang sesuai dengan kondisi operasi *plant*.

Sistem kendali yang diusulkan pada penelitian ini terdiri dari empat buah *fuzzy gain scheduler* yang masing-masing berfungsi untuk menentukan nilai gain pengendali PID yaitu K_p' , K_d' , dan α untuk mengendalikan *rudder*, gerak *sway*, gerak *yaw bow thruster* dan gerak *yaw stern thruster*.

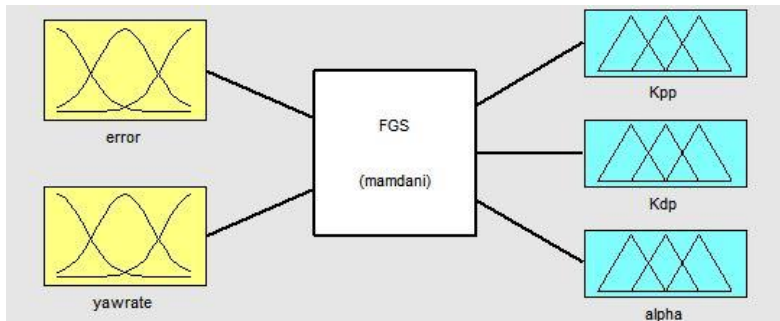
3.8.1. *Fuzzy Gain Scheduler* untuk Kendali Gerak Yaw dengan Aktuator *Rudder*

Perhitungan nilai gain proporsional dan derivatif minimum dan maksimum sesuai pada persamaan (2.51) hingga (2.54) menghasilkan $K_{p_{min}}$, $K_{p_{max}}$, $K_{d_{min}}$, dan $K_{d_{max}}$ untuk pengendali *fuzzy gain scheduler* kendali gerak yaw dengan aktuator *rudder* ditunjukkan oleh Tabel 3.5.

Tabel 3.5 *Gain* PID Minimum dan Maksimum Kendali Yaw dengan Aktuator *Rudder*

<i>Gain</i> PID	Minimum	Maksimum
K_p	$-2,7399 \times 10^4$	$-5,1373 \times 10^4$
K_d	$-1,9864 \times 10^4$	$-3,7246 \times 10^4$

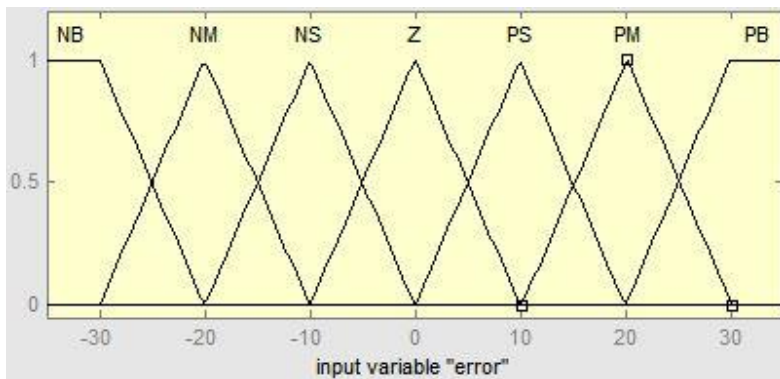
Logika fuzzy digunakan untuk melakukan penjadwalan *gain* pengendali PID sesuai rentang *gain* pada Tabel 3.5. *Fuzzy gain scheduler* pada pengendalian gerak yaw kapal menggunakan aktuator berupa *rudder* memiliki 2 masukan yaitu nilai kesalahan sudut yaw (*yaw error*) dan kecepatan sudut yaw (*yaw rate*). Sedangkan keluaran dari logika fuzzy adalah berupa nilai K_p' , K_d' , dan α untuk PID pengendali *rudder*. Perancangan *fuzzy gain scheduler* untuk kendali *rudder* ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Perancangan *Fuzzy Gain Scheduler* Kendali Gerak Yaw dengan Aktuator Rudder

- **Fuzzifikasi**

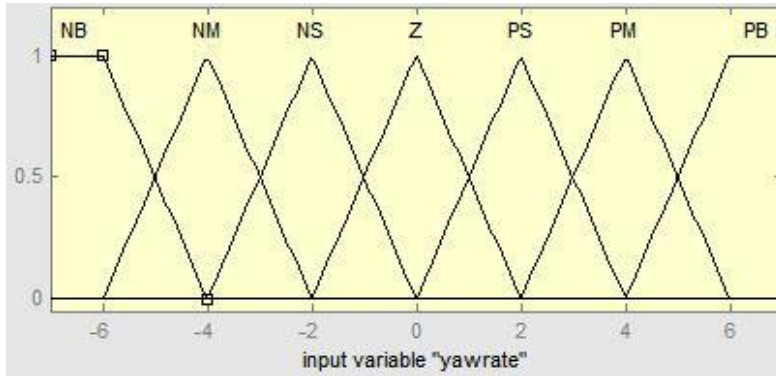
Variabel masukan pertama dari *fuzzy gain scheduler* yaitu *yaw angle error* memiliki 7 fungsi keanggotaan yaitu NB (*negative big*), NM (*negative medium*), NS (*negative small*), Z (*zero*), PS (*positive small*), PM (*positive medium*), dan PB (*positive big*) dengan rentang antara -35° hingga 35° . Dua diantaranya berbentuk trapesium dan lima lainnya berbentuk segitiga seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Fungsi Keanggotaan Variabel Masukan Yaw Error

Variabel masukan kedua yaitu kecepatan perubahan *yaw angle* (*yaw rate*) memiliki tingkatan fungsi keanggotaan yang sama dengan variabel *yaw error* yaitu *Negative Big* (NB), *Negative*

Medium (NM), *Negative Small* (NS), *Zero* (Z), *Positive Small* (PS), *Positive Medium* (PM), dan *Positive Big* (PB). Rentang dari variabel *yaw rate* disesuaikan dengan kemampuan kapal untuk melakukan perubahan nilai *heading* tiap detiknya yaitu $-7^\circ/\text{s}$ hingga $7^\circ/\text{s}$. Fungsi keanggotaan variabel masukan *yaw rate* ditunjukkan oleh Gambar 3.6.



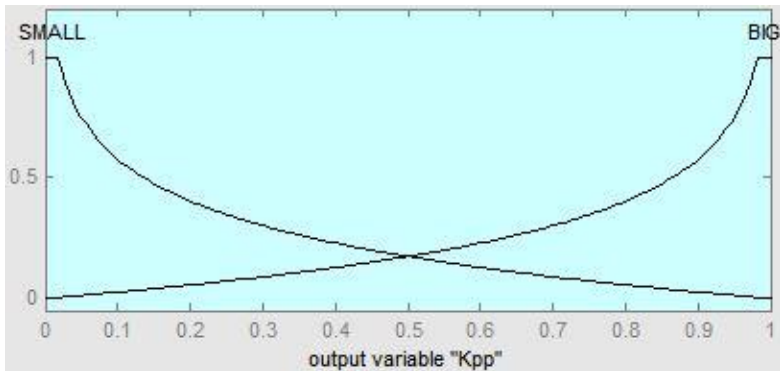
Gambar 3.6 Fungsi Keanggotaan Variabel Masukan *Yaw Rate*

Fungsi keanggotaan dari variabel masukan K_p' memiliki dua tingkatan yaitu *SMALL* dan *BIG* serta dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$\mu_{SMALL}(x) = -\frac{1}{4} \ln x \quad (3.13)$$

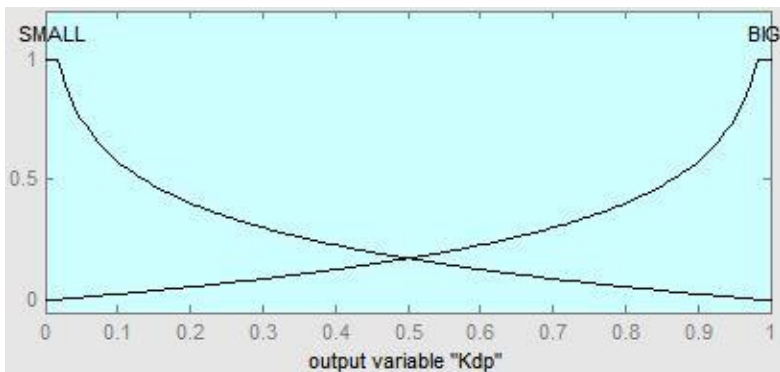
$$\mu_{BIG}(x) = -\frac{1}{4} \ln(1 - x) \quad (3.14)$$

Fungsi keanggotaan variabel keluaran K_p' memiliki rentang antara 0 hingga 1 seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.7.



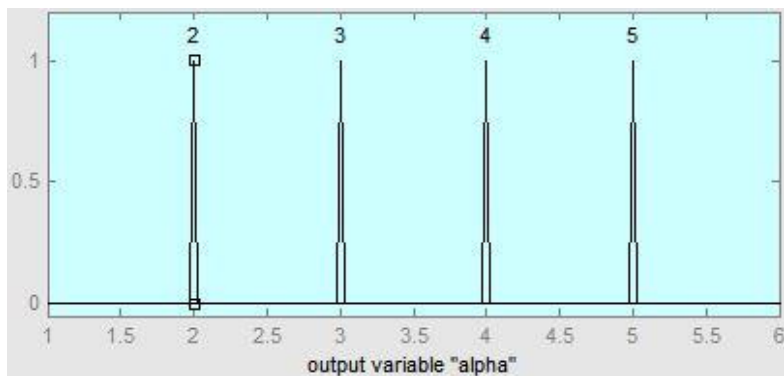
Gambar 3.7 Fungsi Keanggotaan Variabel Keluaran K_p'

Variabel keluaran *fuzzy gain scheduling* kedua yaitu K_d' memiliki fungsi keanggotaan dan rentang yang sama seperti variabel K_p' dengan persamaan (3.13) dan (3.14) dan ditunjukkan oleh Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Fungsi Keanggotaan Variabel Keluaran K_d'

Variabel keluaran terakhir untuk *fuzzy gain scheduling* PID pengendali *rudder* yaitu konstanta α hanya dapat memiliki nilai 2, 3, 4, atau 5 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Fungsi Keanggotaan Variabel Keluaran α

- **Rule Base**

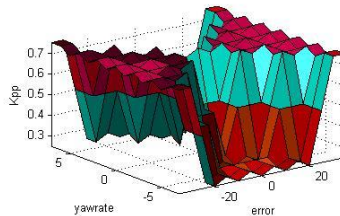
Susunan *rule base* merepresentasikan hubungan antara input masukan dengan keluaran pada suatu sistem logika Fuzzy. Tabel 3.6 menunjukkan hubungan antara masukan logika fuzzy yaitu *yaw error* dan *yaw rate* terhadap keluaran logika fuzzy yaitu Kp' , Kd' dan α . Logika fuzzy yang digunakan sebagai *gain scheduler* gerak *yaw* dengan aktuator berupa *rudder* memiliki 49 *rule base* berdasarkan jumlah masukan dan jumlah fungsi keanggotaan masukan.

Tabel 3.6 *Rule Base* Parameter Kendali Yaw dengan Aktuator Rudder

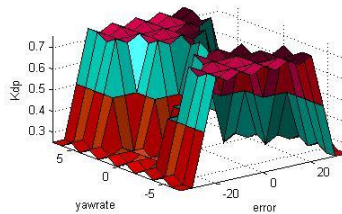
Kp' , Kd' , α		Yaw rate						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
Yaw error	NB	B,S,2	B,S,2	B,S,2	B,S,2	B,S,2	B,S,2	B,S,2
	NM	S,B,3	B,B,3	B,S,2	B,S,2	B,S,2	B,B,3	S,B,3
	NS	S,B,4	S,B,3	B,B,3	B,S,2	B,B,3	S,B,3	S,B,4
	Z	S,B,5	S,B,4	S,B,3	B,B,3	S,B,3	S,B,4	S,B,5
	PS	S,B,4	S,B,3	B,B,3	B,S,2	B,B,3	S,B,3	S,B,4
	PM	S,B,3	B,B,3	B,S,2	B,S,2	B,S,2	B,B,3	S,B,3
	PB	B,S,2	B,S,2	B,S,2	B,S,2	B,S,2	B,S,2	B,S,2

Hubungan antara input dan output logika fuzzy untuk kendali rudder juga dapat dinyatakan dalam suatu permukaan tiga dimensi

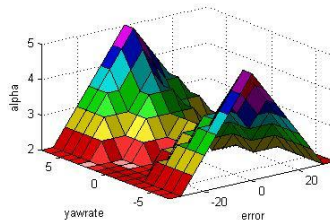
yang biasa disebut *surface*. Permukaan ini menyatakan gabungan dari dua buah nilai masukan yang akan menghasilkan nilai keluaran tertentu. *Surface* membantu agar *rule base* dapat dilihat lebih mudah secara visual. Gambar 3.10 hingga Gambar 3.12 menunjukkan *surface* logika fuzzy untuk keluaran berupa K_p' , K_d' , dan α secara berturut-turut.



Gambar 3.10 *Surface View* Hubungan Input dengan K_p' Pengendali Rudder



Gambar 3.11 *Surface View* Hubungan Input dengan K_d' Pengendali Rudder



Gambar 3.12 *Surface View* Hubungan Input dengan α Pengendali Rudder

- **Defuzzifikasi**

Proses defuzzifikasi digunakan untuk melakukan konversi dari keluaran logika fuzzy mamdani berupa nilai keanggotaan fungsi keanggotaan menjadi nilai *crisp*. Masukan dari proses defuzzifikasi merupakan keluaran logika fuzzy yaitu derajat keanggotaan K_p' , K_d' dan α . Nilai derajat keanggotaan diubah menjadi nilai *crisp* K_p' , K_d' dan α dengan menggunakan metode *centroid*.

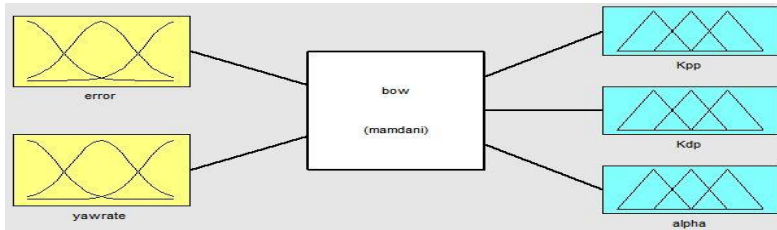
3.8.2. Fuzzy Gain Scheduler untuk Kendali Gerak Yaw dengan Aktuator Thruster

Perhitungan nilai gain proporsional dan derivatif minimum dan maksimum sesuai pada persamaan (2.51) hingga (2.54) menghasilkan $K_{p_{min}}$, $K_{p_{max}}$, $K_{d_{min}}$, dan $K_{d_{max}}$ untuk pengendali *fuzzy gain scheduler* kendali gerak yaw dengan aktuator *bow thruster* dan *stern thruster* ditunjukkan oleh Tabel 3.7.

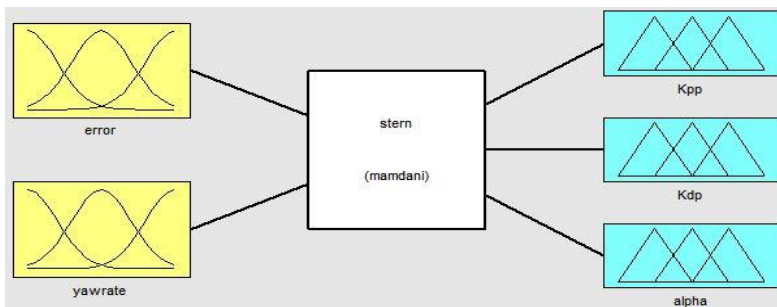
Tabel 3.7 Gain PID Minimum dan Maksimum Kendali Yaw dengan Aktuator Bow Thruster dan Stern Thruster

Aktuator	Gain PID	Minimum	Maksimum
Bow thruster	Kp	-109,6279	-205,5524
	Kd	-88,7986	-166,4974
Stern thruster	Kp	-26,6309	-49,9330
	Kd	-137,1494	-257,1551

Fuzzy gain scheduler dirancang untuk melakukan penjadwalan gain pengendali PID sesuai rentang yang ditunjukkan oleh Tabel 3.7. Logika fuzzy digunakan untuk menentukan nilai gain yang selanjutnya digunakan untuk mengatur tegangan *bow thruster* dan *stern thruster* pada proses sandar kapal. Pengendali ini dibutuhkan untuk menjaga *heading* kapal agar tetap berada pada nilai 0° saat proses sandar dilakukan. Masukan dari logika fuzzy berupa nilai *yaw error* serta *yaw rate*. Gambar 3.13 dan Gambar 3.14 menunjukkan perancangan logika *fuzzy gain scheduler*.



Gambar 3.13 Perancangan *Fuzzy Gain Scheduler* Kendali Gerak Yaw dengan Aktuator *Bow Thruster*



Gambar 3.14 Perancangan *Fuzzy Gain Scheduler* Kendali Gerak Yaw dengan Aktuator *Stern Thruster*

- **Fuzzifikasi**

Fungsi keanggotaan dan rentang masukan dan keluaran pada logika *fuzzy gain scheduler* untuk pengendali gerak yaw baik untuk pengendali *bow thruster* dan *stern thruster* memiliki bentuk dan nilai yang sama dengan rancangan logika fuzzy untuk kendali *rudder*. Fungsi keanggotaan masukan dan keluaran logika *fuzzy gain scheduler* untuk kendali gerak yaw dengan aktuator *bow thruster* maupun *stern thruster* ditunjukkan oleh Gambar 3.5 hingga Gambar 3.9.

- **Rule base**

Rule base pengendalian gerak yaw dengan aktuator *thruster* menyatakan hubungan antara masukan logika fuzzy berupa yaw *error* dan yaw *rate* pada proses *berthing* terhadap keluaran berupa gain parameter PID untuk mengendalikan tegangan *thruster*. Logika fuzzy untuk mengendalikan gerak yaw dengan aktuator

bow thruster dan *stern thruster* masing-masing memiliki 49 *rule base* berdasarkan jumlah input dan jumlah fungsi keanggotaan input. Tabel 3.8 menunjukkan *rule base* untuk *gain scheduling* pengendalian tegangan *bow thruster* sedangkan Tabel 3.9 menampilkan *rule base* untuk *gain scheduling* pengendalian *stern thruster*.

Tabel 3.8 *Rule Base Parameter Kendali Yaw dengan Aktuator Bow Thruster*

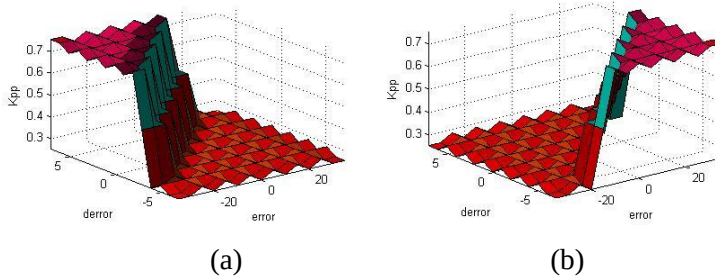
Kp', Kd, α		Yaw error						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
Yaw rate	NB	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,B,5
	NM	S,B,4	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,B,5
	NS	B,S,3	S,B,4	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,B,5
	Z	B,S,2	B,S,3	S,B,4	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,B,5
	PS	B,S,2	B,S,2	B,S,3	S,B,4	S,B,5	S,B,5	S,B,5
	PM	B,S,2	B,S,2	B,S,2	B,S,3	S,B,4	S,B,5	S,B,5
	PB	B,S,2	B,S,2	B,S,2	B,S,2	B,S,3	S,B,4	S,B,5

Tabel 3.9 *Rule Base Parameter Kendali Yaw dengan Aktuator Stern Thruster*

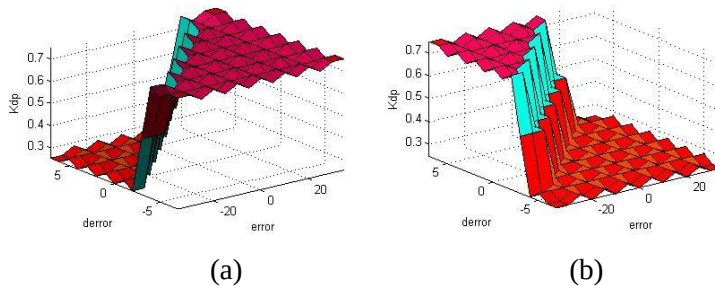
Kp', Kd, α		Yaw error						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
Yaw rate	NB	S,S,5	S,S,4	B,S,3	B,S,2	B,S,2	B,S,2	B,S,2
	NM	S,S,5	S,S,5	S,S,4	B,S,3	B,S,2	B,S,2	B,S,2
	NS	S,B,5	S,S,5	S,S,5	S,S,4	B,S,3	B,S,2	B,S,2
	Z	S,B,5	S,B,5	S,S,5	S,S,5	S,S,4	B,S,3	B,S,2
	PS	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,S,5	S,S,5	S,S,4	B,S,3
	PM	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,S,5	S,S,5	S,S,4
	PB	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,B,5	S,S,5	S,S,5

Rule base yang telah dirancang sesuai dengan Tabel 3.8 dan Tabel 3.9 dapat dinyatakan dalam bentuk *surface view* yang menyatakan hubungan antara Kp', Kd', α , terhadap nilai masukan logika fuzzy yaitu *yaw error* dan *yaw rate*. *Surface* tiga dimensi

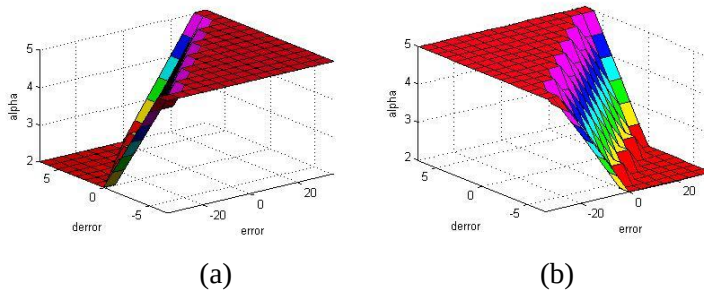
yang masing masing menunjukkan hubungan input dengan K_p' , K_d' , dan α secara berturut-turut ditunjukkan oleh Gambar 3.15, Gambar 3.16 dan Gambar 3.17.



Gambar 3.15 Surface View Keluaran K_p' (a) Aktuator Bow Thruster (b) Aktuator Stern Thruster



Gambar 3.16 Surface View Keluaran K_d' (a) Aktuator Bow Thruster (b) Aktuator Stern Thruster



Gambar 3.17 Surface View Keluaran α (a) Aktuator *Bow Thruster*
(b) Aktuator *Stern Thruster*

- **Defuzzifikasi**

Proses defuzzifikasi digunakan untuk melakukan konversi dari keluaran logika fuzzy mamdani berupa nilai keanggotaan fungsi keanggotaan menjadi nilai *crisp*. Masukan dari proses defuzzifikasi merupakan keluaran logika fuzzy yaitu derajat keanggotaan K_p' , K_d' dan α . Nilai derajat keanggotaan diubah menjadi nilai *crisp* K_p' , K_d' dan α dengan menggunakan metode *centroid*.

3.8.3. Fuzzy Gain Scheduling-PID untuk Kendali Gerak Sway dengan Aktuator Thruster

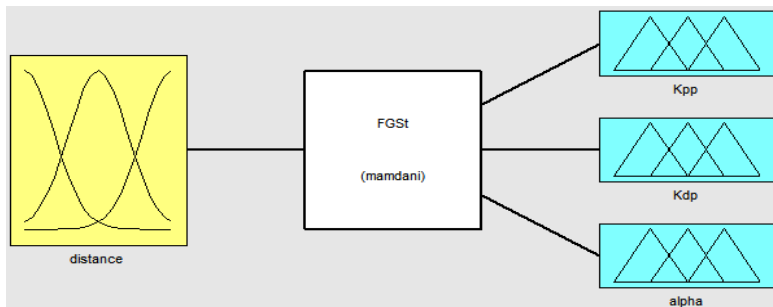
Perhitungan nilai gain proporsional dan derivatif minimum dan maksimum sesuai pada persamaan (2.51) hingga (2.54) menghasilkan $K_{p_{min}}$, $K_{p_{max}}$, $K_{d_{min}}$, dan $K_{d_{max}}$ untuk pengendali *fuzzy gain scheduler* kendali gerak *yaw* dengan aktuator *rudder* ditunjukkan oleh Tabel 3.10.

Tabel 3.10 Gain PID Minimum dan Maksimum Kendali Sway dengan Aktuator *Bow Thruster* dan *Stern Thruster*

Gain PID	Minimum	Maksimum
K_p	6,2109	11,6454
K_d	5,1706	9,6948

Fuzzy gain scheduler digunakan untuk menentukan nilai parameter pengendali PID untuk proses kendali *thruster*, baik *stern*

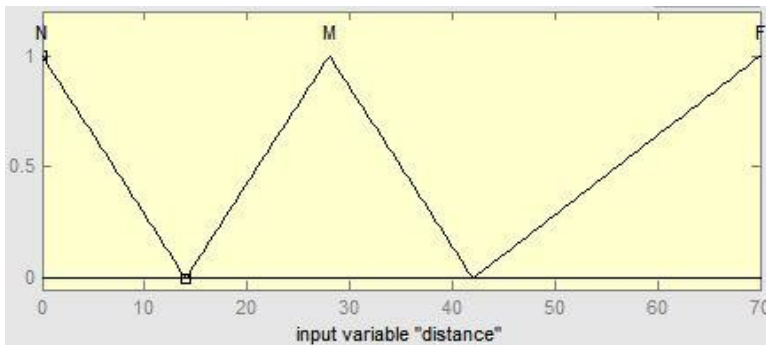
thruster maupun *bow thruster* untuk mengatur gerak sway kapal pada proses sandar. Penjadwalan nilai K_p dan K_d pada pengendalian sway dilakukan oleh logika *fuzzy* berdasarkan rentang nilai maksimum dan minimum pada Tabel 3.10. Masukan dari logika *fuzzy* berupa nilai kesalahan posisi kapal yang diperoleh dari membandingkan koordinat x dan y *desired* kapal dengan koordinat x dan y aktual. Keluaran dari logika *fuzzy* yaitu nilai parameter PID untuk pengendalian tegangan *stern thruster* dan *bow thruster*. Perancangan logika *fuzzy gain scheduler* untuk pengendalian *thruster* pada proses sandar kapal ditunjukkan oleh Gambar 3.18.



Gambar 3.18 Perancangan *Fuzzy Gain Scheduler* untuk Kendali Gerak Sway

- **Fuzzifikasi**

Fungsi keanggotaan dan rentang masukan dan keluaran pada logika *fuzzy gain scheduler* untuk pengendali gerak sway baik untuk pengendali *bow thruster* dan *stern thruster* ditunjukkan oleh Gambar 3.19. Variabel masukan pengendali berupa *distance* yaitu jarak kapal dari dermaga dan memiliki tiga buah fungsi keanggotaan yaitu *Near* (N), *Medium* (M) dan *Far* (F) yang menunjukkan jarak dekat, menengah, dan jauh dari dermaga. Fungsi keanggotaan *far* ditentukan berdasarkan posisi di saat mesin kapal, *rudder* dan *propeller* berhenti bekerja, yaitu di jarak sekitar tiga kali lebar kapal dari dermaga.



Gambar 3.19 Fungsi Keanggotaan Variabel Masukan *Distance*

Keluaran dari logika fuzzy sebagai *gain scheduler* kendali sway yaitu K_p' , K_d' dan α memiliki fungsi keanggotaan yang sama dengan logika *fuzzy gain scheduler* pada sistem kendali *rudder* yang ditunjukkan oleh Gambar 3.7 hingga Gambar 3.9.

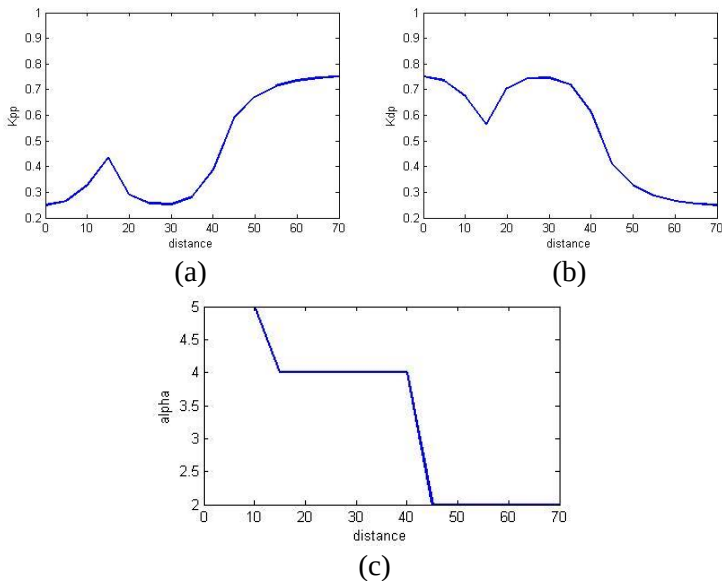
- **Rule base**

Rule base yang menyatakan hubungan antara *distance* dengan K_p' , K_d' , dan α pada pengendalian gerak sway terdiri atas tiga poin aturan sesuai dengan satu buah input yaitu *distance* dan tiga buah *membership function* untuk variabel input *distance*. Basis aturan pada pengendali sway ditunjukkan oleh Tabel 3.11.

Tabel 3.11 *Rule Base* Parameter Kendali Sway dengan Aktuator Bow Thruster dan Stern Thruster

<i>Distance</i>	<i>Output</i>		
	K_p'	K_d'	α
N	SMALL	BIG	5
M	SMALL	BIG	4
F	BIG	SMALL	2

Rule base pada Tabel 3.8 dapat dinyatakan dalam bentuk *surface* yaitu grafik 2 dimensi yang menunjukkan hubungan *distance* dengan masing-masing keluaran. Gambar 3.20 merupakan grafik yang menunjukkan hubungan antara nilai variabel masukan berupa jarak kapal dengan dermaga (*distance*) dengan nilai keluaran yaitu K_p' , K_d' dan α .



Gambar 3.20 Surface View Kendali Sway Hubungan Distance dengan Keluaran (a) Kp' (b) Kd' (c) α

- **Defuzzifikasi**

Proses defuzzifikasi digunakan untuk melakukan konversi dari keluaran logika fuzzy mamdani berupa nilai keanggotaan fungsi keanggotaan menjadi nilai *crisp*. Masukan dari proses defuzzifikasi merupakan keluaran logika fuzzy yaitu derajat keanggotaan Kp' , Kd' dan α . Nilai derajat keanggotaan diubah menjadi nilai *crisp* Kp' , Kd' dan α dengan menggunakan metode *centroid*.

3.9. Perancangan Pengendali Proporsional Integral Derivatif (PID)

Pengendali PID didesain menggunakan metode *tuning* PID Ziegler-Nichols tipe-2 dengan tujuan untuk membandingkan sistem pengendalian trayektori sandar kapal otomatis menggunakan pengendali yang diusulkan yaitu FGS-PID dengan pengendali PID. *Gain* yang diperoleh dari metode *tuning* Ziegler-Nichols tipe-2 untuk pengendalian yaw dengan aktuator *rudder*,

pengendalian yaw dengan aktuator *bow thruster*, pengendalian yaw dengan aktuator *stern thruster*, dan pengendalian sway dengan aktuator *bow thruster* dan *stern thruster* ditunjukkan oleh Tabel 3.12.

Tabel 3.12 Gain Pengendali PID dengan Metode *Tuning Ziegler-Nichols Tipe-2*

Pengendalian	Aktuator	Kp	Ki	Kd
Yaw	<i>Rudder</i>	-17124,4	-20756,9	-9418,44
	<i>Bow thruster</i>	-68,5175	-46,6105	-67,1471
	<i>Stern thruster</i>	-16,6443	-1,61596	-114,291
Sway	<i>Bow thruster</i> dan <i>stern thruster</i>	3,881808	2,331416	4,308807

3.10. Analisa Hasil Uji

Analisa dari hasil pengujian sistem pengendalian dilakukan guna mengetahui apakah hasil pemodelan dan perancangan sistem pengendalian telah sesuai dengan kriteria yang diinginkan. Pengujian dilakukan secara simulasi menggunakan *software* MATLAB R2014a.

3.9.1. Uji *Root Locus*

Uji *root locus* dilakukan terhadap persamaan fungsi transfer kapal AHTS untuk mengetahui kestabilan internal kapal sebelum sistem pengendalian diterapkan. Fungsi transfer didapatkan dengan menggunakan fungsi *ss2tf* terhadap persamaan *state space* kapal AHTS yang telah diperoleh pada proses pemodelan. Persamaan *state space* pemodelan kapal AHTS memiliki 2 keluaran yaitu kecepatan *sway* dan *yaw angle*, maka uji stabilitas *root locus* dilakukan terhadap kedua keluaran tersebut dengan menggunakan fungsi *rlocus* pada *software* MATLAB 2014a.

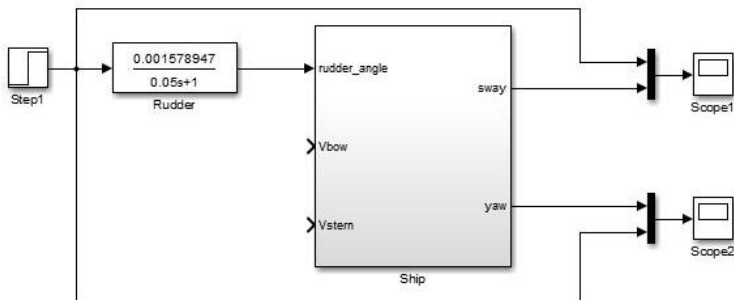
- a. Uji *root locus* fungsi transfer dinamika kapal AHTS untuk *output* kecepatan *sway*

`rlocus(tf([3.69 10.26 12.37 7.89 2.66 0.37],[1 3.48 5.45 4.83 2.56 0.77 0.10 0]))`

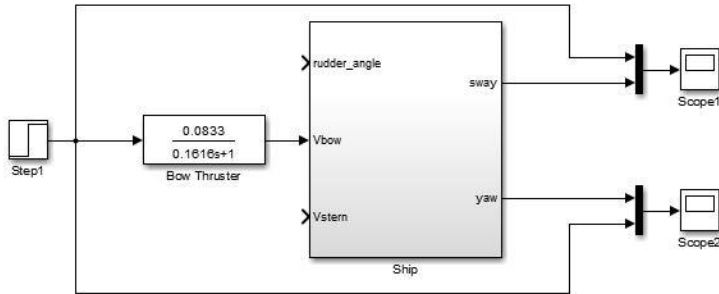
- b. Uji *root locus* untuk fungsi transfer dinamika kapal AHTS untuk *output* sudut *yaw*
- `rlocus(tf([-0.23 -0.68 -0.86 -0.58 -0.20],[1 3.48 5.45 4.84 2.56 0.77 0.10 0 0]))`

3.9.2. Uji *Open Loop* Sistem

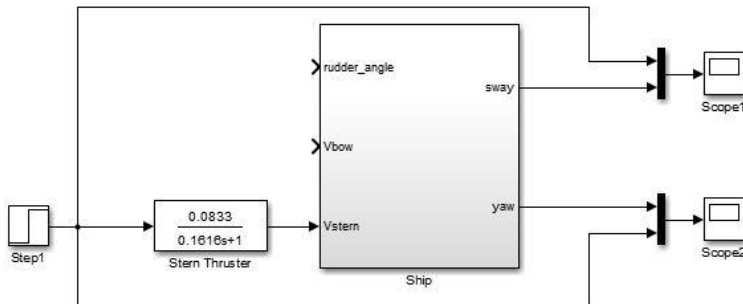
Pengujian *open loop* dilakukan terhadap model dinamika kapal AHTS dan aktuator yaitu *rudder* dan *thruster* guna mengetahui respon dari sistem sebelum pengendali diterapkan pada sistem. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan masukan berupa sinyal *step* kepada sistem dan menganalisa respon dari sistem terhadap sinyal tersebut. Pengujian *open loop* dilakukan terhadap ketiga aktuator yaitu *rudder*, *bow thruster*, dan *stern thruster* untuk melihat respon masing-masing aktuator pada gerak *sway* dan *yaw* tanpa adanya pengaruh pengendali terhadap kapal. Gambar 3.21, Gambar 3.22, dan Gambar 3.23 masing-masing menunjukkan diagram blok uji *open loop* sistem terhadap kerja *rudder*, *bow thruster* dan *stern thruster* secara berturut-turut pada gerak *sway* dan *yaw*.



Gambar 3.21 Diagram Blok Simulink Uji *Open Loop* Rudder



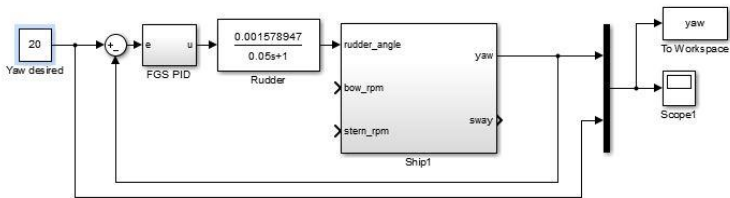
Gambar 3.22 Diagram Blok Simulink Uji Open Loop Bow Thruster



Gambar 3.23 Diagram Blok Simulink Uji Open Loop Stern Thruster

3.9.3. Uji Close Loop Rudder untuk Kendali Yaw

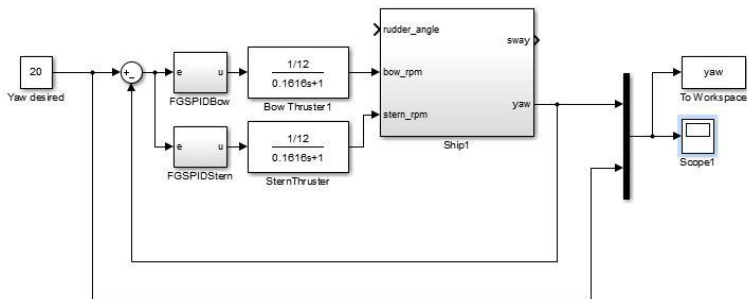
Pengujian sistem *closed loop rudder* ditujukan untuk mengetahui respon dinamik dari sistem setelah pengendali *yaw* diterapkan untuk mengendalikan defleksi sudut *rudder*. Sistem pengendalian dikatakan dapat berkerja dengan baik jika respon *closed loop* menunjukkan karakteristik yang baik. Pengujian *closed loop* dilakukan dengan memberikan nilai input konstanta dengan nilai 20° dan 30° untuk melihat apakah sistem telah memenuhi standar dari IMO (*International Maritime Organization*). Gambar 3.24 menunjukkan diagram blok pengujian *closed loop* sistem kendali gerak *yaw* kapal dengan aktuator *rudder*.



Gambar 3.24 Blok Diagram Uji *Closed Loop* Sistem Kendali *Rudder*

3.9.4. Uji *Closed Loop* Bow Thruster dan Stern Thruster untuk Kendali Yaw

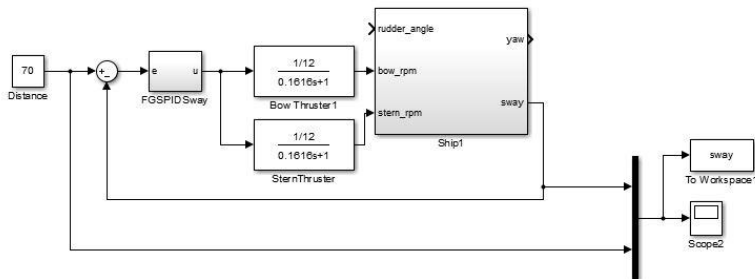
Pengujian *closed loop* terhadap sistem kendali gerak *yaw* dengan aktuator *bow thruster* dan *stern thruster* dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui apakah pengendali *Fuzzy Gain Scheduling-PID* yang didesain mampu mempertahankan sudut *yaw* kapal pada saat proses berthing agar tetap pada sudut yang diinginkan. Nilai masukan pada uji *closed loop* kendali ini juga digunakan sebesar 20° dan 30° sesuai standar IMO. Gambar 3.25 menunjukkan blok diagram uji *closed loop* sistem pengendalian *yaw* dengan aktuator berupa *bow thruster* dan *stern thruster*.



Gambar 3.25 Blok Diagram Uji *Closed Loop* Kendali Yaw dengan *Bow Thruster* dan *Stern Thruster*

3.9.5. Uji *Closed Loop* Bow Thruster dan Stern Thruster untuk Kendali Sway

Pengujian *closed loop* gerak sway dilakukan untuk menganalisa respon sistem dengan pengendali FGS-PID yang telah dirancang untuk mengendalikan gerak sway kapal pada saat melakukan *berthing*. Keluaran dari FGS-PID berupa tegangan masukan *bow thruster* dan *stern thruster* untuk membantu kapal mendekati dermaga secara perlahan-lahan. Nilai masukan yang digunakan sebagai *set point* pada uji *closed loop* ini sebesar 70 meter yaitu tiga kali lebar kapal yang merupakan jarak di mana kapal harus mematikan *rudder* dan *propeller* untuk digantikan oleh *stern thruster* dan *bow thruster*. Gambar 3.26 memperlihatkan blok diagram uji *closed loop* untuk gerak sway kapal dengan aktuator *bow thruster* dan *stern thruster*.

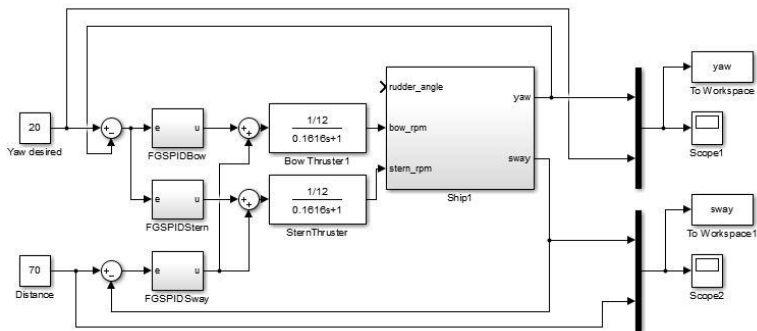


Gambar 3.26 Diagram Blok Uji *Closed Loop* Kendali Sway dengan Bow Thruster dan Stern Thruster

3.9.6. Uji *Closed Loop* Bow Thruster dan Stern Thruster untuk Kendali Proses Sandar

Pengujian *closed loop* pengendalian sandar dilakukan untuk mengetahui respon dari gabungan sistem pengendalian gerak sway dan yaw dengan aktuator *bow thruster* dan *stern thruster* saat kapal melakukan sandar. Tegangan yang diperoleh dari keluaran pengendali yaw untuk *bow thruster* dan pengendali yaw untuk *stern thruster* masing-masing dijumlahkan dengan tegangan keluaran pengendali sway untuk memperoleh tegangan total *bow thruster* dan *stern thruster*. Pengujian ini dilakukan karena pada sistem

sandar kapal otomatis kedua mekanisme pengendalian harus bekerja secara bersamaan sehingga perlu adanya uji *closed loop* dilakukan guna mengetahui apakah pengendali yang telah dirancang mampu membantu sistem untuk mencapai *set point* dengan baik dan memiliki karakteristik dinamik sistem yang baik. Nilai *set point* yang ditentukan untuk pengujian ini yaitu 30° untuk kendali *yaw* dan 70 meter untuk kendali *sway*. Blok diagram *Simulink* dari pengujian *closed loop* pengendalian proses sandar ditunjukkan oleh Gambar 3.27.



Gambar 3.27 Diagram Blok Uji *Closed Loop* Kendali Sway dan Yaw dengan Bow Thruster dan Stern Thruster

3.11. Pengujian Sistem Kendali Sandar Kapal Otomatis Tanpa Gangguan

Sistem kendali sandar kapal otomatis dirancang setelah mengetahui bahwa seluruh rangkaian proses uji *closed loop* menunjukkan kestabilan dan respon yang baik. Perancangan sistem kendali sandar kapal otomatis dilakukan dengan menambahkan beberapa komponen tambahan berupa *sensor* yaitu GPS, kompas, dan *gyrocompass* dalam sistem pengendalian yang telah dirancang. GPS digunakan untuk menentukan posisi aktual kapal, yang kemudian dibutuhkan untuk melakukan perhitungan koordinat dan *heading* yang diinginkan agar kapal dapat mengikuti trayektori sandar dengan baik. Kompas dan *gyrocompass* diperlukan untuk menentukan arah dan kecepatan perubahan arah kapal. Adanya

peralihan dari dua mekanisme pengendalian yaitu dari pengendalian *yaw* dengan aktuator *rudder* dan *propeller* menjadi pengendalian *sway* dan *yaw* dengan aktuator *bow thruster* dan *stern thruster* menyebabkan perlunya suatu mekanisme *switching* untuk melakukan pengalihan dari satu mekanisme pengendalian ke mekanisme lain. Mekanisme *switching* dilakukan berdasarkan penentuan ketercapaian koordinat aktual kapal pada *way point* yang telah ditentukan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

Gambar 3.28 menunjukkan rancangan sistem kendali sandar kapal otomatis tanpa gangguan. Empat buah *switch* diperlukan dalam melakukan integrasi subsistem pengendalian *tracking* trayektori dan subsistem pengendalian sandar. *Switch* berfungsi untuk mengalihkan dari subsistem pengendalian *tracking* trayektori ke subsistem pengendalian sandar ketika kapal telah mencapai *way point* yang diinginkan, yaitu ketika kapal telah berada pada posisi sejajar dengan dermaga, yang pada penelitian ini berada pada koordinat (990;65). *Switch* secara teknis bertugas menyalakan dan mematikan aktuator ketika kapal melakukan sandar, oleh karena itu jumlah *switch* pada rancangan sistem disesuaikan dengan jumlah aktuator yang digunakan, yaitu empat buah.

Mekanisme *tracking* trayektori memerlukan dua buah aktuator yaitu *propeller* dan *rudder*. *Switch* akan memerintahkan kedua aktuator tersebut untuk menyala sedangkan dua aktuator lainnya yaitu *bow thruster* dan *stern thruster* dimatikan. Proses pengendalian sandar menggunakan aktuator berupa *bow thruster* dan *stern thruster* sehingga pada proses ini *switch* akan menyalakan kedua aktuator tersebut dan mematikan *propeller* serta *rudder* kapal.

3.12. Pemodelan Gangguan Arus Laut

Pemodelan gangguan berupa arus laut dilakukan berdasarkan proses Gauss-Markov orde satu sesuai pada persamaan (2.43). Nilai awal kecepatan arus laut yang digunakan yaitu kecepatan maksimum arus di Pelabuhan Tanjung Perak selama tahun 2017 sebesar 2 knot, 2,25 knot, dan 2,5 knot. Model gangguan arus laut untuk masing-masing kecepatan arus diberikan pada persamaan (3.14) hingga (3.16).

Arus laut sebesar 2 knot:

$$Vc(t) = 1,0289 + (-0,1. \omega(t). e^{-0,1t}) \quad (3.14)$$

Arus laut sebesar 2,25 knot:

$$Vc(t) = 1,1575 + (-0,1. \omega(t). e^{-0,1t}) \quad (3.15)$$

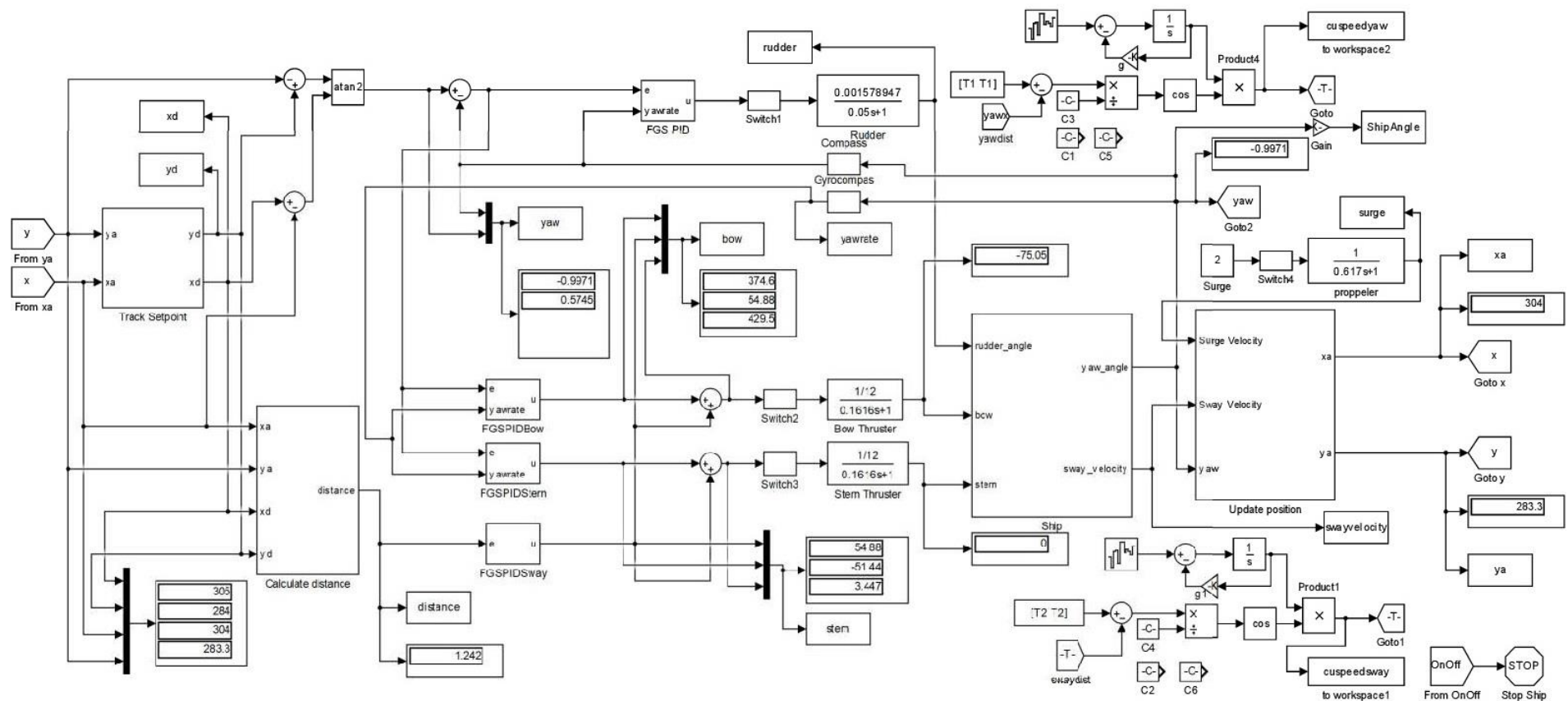
Arus laut sebesar 2,5 knot:

$$Vc(t) = 1,2861 + (-0,1. \omega(t). e^{-0,1t}) \quad (3.16)$$

Gangguan arus laut yang digunakan untuk keperluan simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan menambahkan *gaussian white noise* sebagai masukan agar dapat memberikan nilai yang selalu berubah terhadap fungsi waktu dengan harapan agar pemodelan gangguan dapat mendekati kondisi arus laut di lapangan.

3.13. Pengujian Sistem Kendali Sandar Kapal Otomatis dengan Gangguan Arus Laut

Perancangan sistem kendali dengan melakukan simulasi harus dibuat semirip mungkin dengan kondisi asli di lapangan agar diketahui gambaran dari respon sistem jika pengendalian yang dirancang diterapkan secara langsung pada kondisi nyata. Gangguan baik berupa arus laut, gelombang laut, maupun angin merupakan hal yang tidak dapat dihindari dalam perancangan sistem *autopilot* kendaraan laut. Gangguan berupa arus dimodelkan serta diterapkan dalam perancangan sistem pengendalian sandar kapal otomatis dengan harapan bahwa sistem pengendalian masih dapat bekerja dengan baik meskipun gangguan diberikan. Sistem pengendalian diharapkan masih dapat memberikan respon berupa gerak *sway* dan *yaw* yang baik sehingga kapal tetap dapat berjalan pada trayektori yang diinginkan dengan *heading* yang diinginkan pula. Keberhasilan dari perancangan sistem dapat dilihat dari koordinat aktual dan koordinat *desired* kapal yang selisihnya merupakan nilai *error*. Semakin kecil *error* yang ditunjukkan maka kapal dapat mengikuti trayektori dengan lebih baik. Gambar 3.29 menunjukkan perancangan sistem kendali sandar kapal otomatis dengan gangguan berupa arus laut.



Gambar 3.29 Sistem Kendali Sandar Kapal Otomatis dengan Gangguan Arus Laut

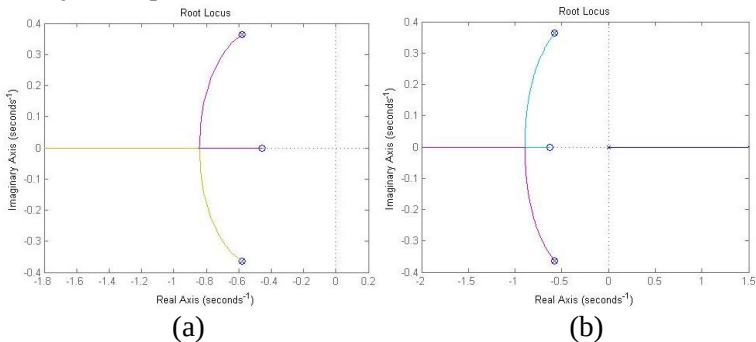
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa Kestabilan Root Locus

Uji kestabilan *root locus* dilakukan untuk mengetahui stabilitas sistem berdasarkan letak *pole* dan *zero* pada bidang real dan imajiner. Nilai *pole* dan *zero* merupakan konstanta pada pembilang dan penyebut fungsi transfer sistem sehingga dengan mengetahui fungsi transfer dari suatu sistem, maka kestabilan sistem tersebut akan dapat dianalisa. Uji kestabilan *root locus* pada penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kestabilan internal kapal AHTS.

Uji stabilitas internal sistem merupakan uji yang dilakukan untuk mengetahui kestabilan dari kapal AHTS tanpa adanya pengaruh dari aktuator. Pengujian dilakukan terhadap fungsi transfer kapal tanpa dikalikan dengan fungsi transfer aktuator. Hasil dari uji kestabilan internal sistem pada arah *sway* dan *yaw* ditunjukkan pada Gambar 4.1.



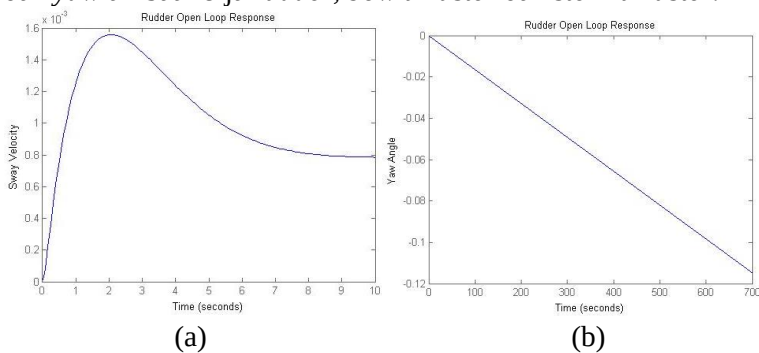
Gambar 4.1 Plot *Root Locus* Uji Kestabilan Internal Sistem (a) Sway (b) Yaw

Gambar 4.1 (a) menunjukkan grafik *root locus* dari fungsi transfer gerak *sway* kapal AHTS. Letak dari semua *pole* pada grafik tersebut berada di sebelah kiri sumbu imajiner sehingga dapat dikatakan bahwa gerak *sway* kapal AHTS stabil secara internal. Plot *root locus* kestabilan rotasi *yaw* kapal AHTS diperlihatkan oleh Gambar 4.1 (b). Gambar 4.1 (b) menunjukkan

bahwa persamaan fungsi transfer rotasi yaw kapal AHTS memiliki 3 pole. Dua dari *pole* tersebut berada di sebelah kiri sumbu imajiner, sedangkan satu *pole* terletak tepat di sumbu imajiner. *Pole* yang terletak tepat pada sumbu imajiner dapat diartikan bahwa rotasi yaw kapal AHTS merupakan sistem *critically stable* atau memiliki stabilitas kritis.

4.2. Analisa Uji Open Loop

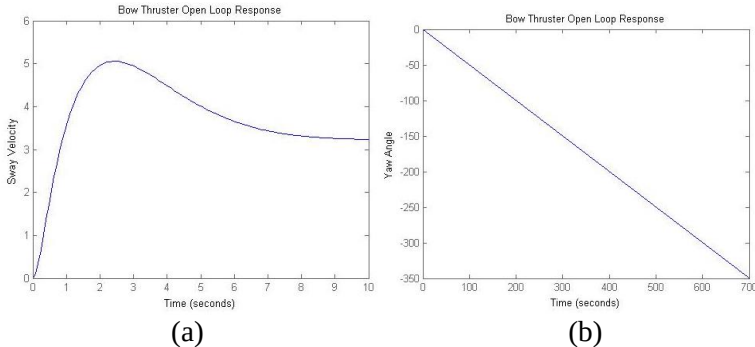
Pengujian *open loop* dilakukan guna mencari tahu respon sistem di bawah pengaruh kerja aktuator tanpa ada pengendali yang diterapkan. Pengujian dilakukan dengan memberikan masukan berupa sinyal step terhadap aktuator dan kapal AHTS. Pengujian dilakukan secara bertahap untuk mengetahui respon gerak *sway* dan *yaw* akibat kerja *rudder*, *bow thruster* dan *stern thruster*.



Gambar 4.2 Grafik Respon Sistem Pada Uji *Open Loop Rudder* pada Gerak (a) *sway* dan (b) *yaw*

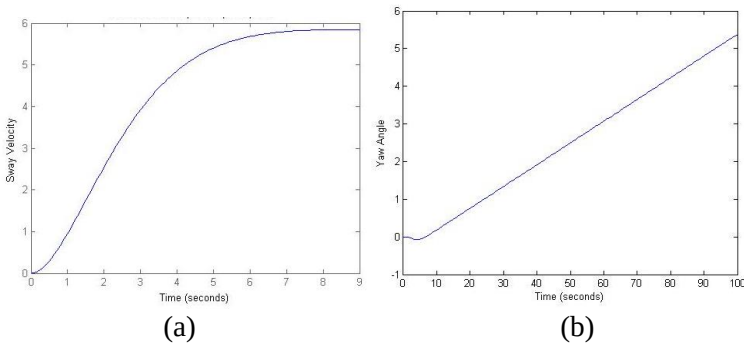
Gambar 4.2 menunjukkan respon sistem pada gerak *sway* dan *yaw* terhadap sinyal *step* yang diberikan kepada *rudder* tanpa adanya pengendali. Gambar 4.2 (a) memperlihatkan bahwa tanpa adanya pengendali, jika masukan berupa sinyal *step* diberikan kepada *rudder* maka kecepatan gerak *sway* kapal akan mengalami peningkatan namun pada akhirnya berada pada nilai yang konstan. Gambar 4.2 (b) menunjukkan bahwa sudut *yaw* kapal terus mengalami penurunan saat sinyal masukan diberikan kepada *rudder*. Gambar 4.2 secara keseluruhan menyatakan bahwa kerja *rudder* tanpa adanya aktuator akan menyebabkan kapal bergerak

menyamping dengan kecepatan konstan dan berputar-putar tidak terkendali.



Gambar 4.3 Grafik Respon Ristem pada Uji *Open Loop Bow Thruster* pada Gerak (a) Sway dan (b) Yaw

Respon sistem terhadap sinyal *step* yang diberikan terhadap *bow thruster* tanpa adanya pengaruh dari *controller* ditunjukkan oleh Gambar 4.3. Gambar 4.3 (a) menunjukkan respon kecepatan gerak *sway* terhadap kerja *bow thruster* sedangkan Gambar 4.3 (b) menunjukkan respon sudut *yaw*. Kedua grafik tersebut menunjukkan bahwa input pada *bow thruster* mengakibatkan kapal berputar dengan sudut *yaw* yang semakin membesar ke arah negatif dan bergeser ke arah *sway* dengan kecepatan yang awalnya meningkat hingga $5,05 \text{ m/s}$ kemudian lama kelamaan menunjukkan angka yang konstan pada nilai $3,24 \text{ m/s}$ dalam waktu 9,84 detik.

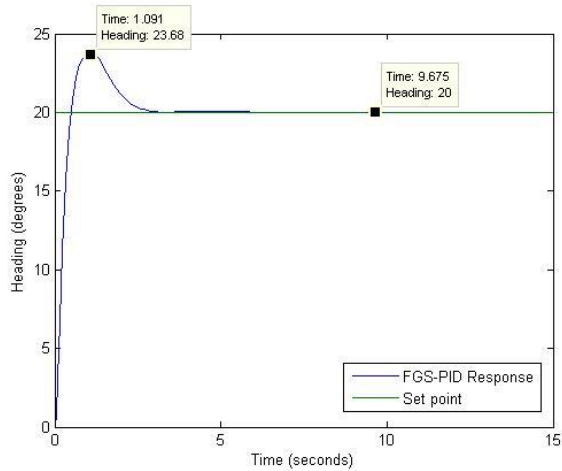


Gambar 4.4 Grafik Respon Sistem pada Uji *Open Loop Stern Thruster* pada Gerak (a) Sway dan (b) Yaw

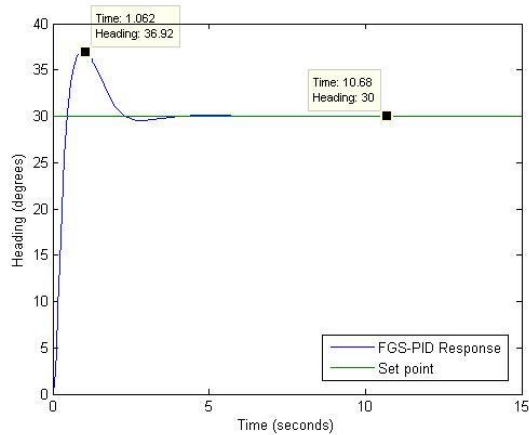
Gambar 4.4 (a) dan (b) merupakan grafik yang menunjukkan respon kecepatan sway dan sudut *heading* kapal jika aktuator *stern thruster* diberi masukan berupa sinyal *step*. Gambar tersebut menunjukkan bahwa ketika *stern thruster* bekerja tanpa ada pengaruh dari aktuator lain dan *controller*, maka kapal akan bergerak dengan kecepatan sway $5,84 \text{ m/s}$ setelah 8,57 detik dan akan berputar dengan sudut yaw yang terus berkurang dari waktu ke waktu.

4.3. Analisa Uji Closed Loop Sistem

Pengujian *close loop* sistem dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui respon sistem setelah diberi pengendali PID dengan mekanisme *fuzzy gain scheduling* yang telah dirancang. Uji *closed loop* dapat digunakan untuk menilai performa dari pengendali FGS-PID berdasarkan respon yang ditunjukkan oleh sistem. Uji *closed loop* pada penelitian ini dilakukan sesuai dengan standar *maneuverability* IMO yaitu uji *closed loop* rotasi yaw kapal dilakukan dengan sudut *heading* masukan sebesar 20° dan 30° atau yang disebut dengan uji *turning*. Gambar 4.5 menunjukkan respon dari uji *turning* dengan menggunakan *rudder* pada sudut *heading* sebesar 20° dan 30° .



(a)



(b)

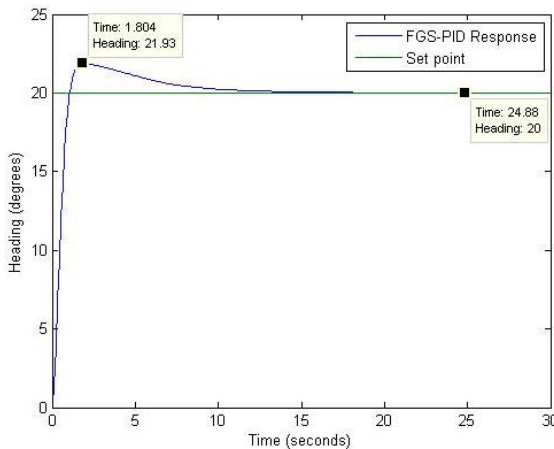
Gambar 4.5 Uji *Turning Rudder* dengan Pengendali FGS-PID pada Sudut *Heading* (a) 20° dan (b) 30°

Gambar 4.5 (a) memperlihatkan respon dinamik sistem saat diberikan *set point heading* sebesar 20°. Respon yang ditunjukkan oleh sistem memiliki *maximum overshoot* dengan nilai 23,68° yang memenuhi standar *maneuverability* IMO karena tidak melebihi

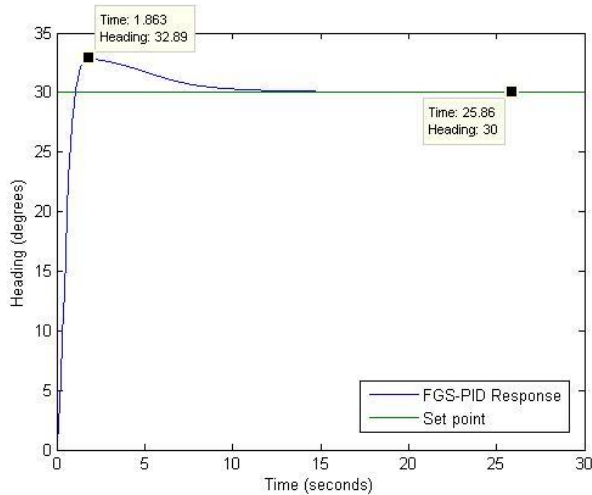
25°. Sistem mencapai kondisi stabil pada sudut *heading* yang diinginkan yaitu 20° dalam waktu 9,675 detik. Respon uji *turning* dengan sudut *heading* 30° pada Gambar 4.5 (b) juga menunjukkan bahwa sistem memenuhi standar IMO yaitu *overshoot* yang tidak lebih dari 40°. Respon sistem pada Gambar 4.5 (b) menunjukkan nilai *maximum overshoot* sebesar 36,92° dan dapat mencapai kondisi *steady* pada waktu 10,68 detik.

Rudder pada sistem kendali sandar kapal otomatis yang dirancang di penelitian ini hanya bekerja hingga kapal mencapai *way point* pada koordinat (990;65). Proses sandar kapal di mana kapal mendekati dermaga dengan mengendalikan gerak *sway* dan *yaw* tanpa adanya gerak *surge* kapal memanfaatkan pengendalian aktuator *bow thruster* dan *stern thruster* secara bersamaan untuk membantu kapal mendekat ke dermaga secara perlahan-lahan dengan mempertahankan *heading* kapal pada nilai 0°.

Uji *closed loop* yang kedua merupakan pengujian terhadap kemampuan pengendali FGS-PID untuk mengatur tegangan *bow thruster* dan *stern thruster* agar kedua aktuator dapat menggerakkan kapal hingga mencapai sudut *heading* yang diinginkan. Gambar 4.6 (a) dan (b) menunjukkan respon *heading* dari kapal terhadap *set point* 20° dan 30° yang diberikan.



(a)

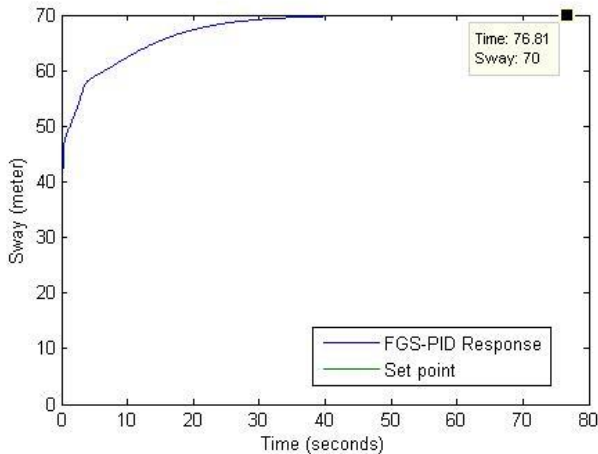


(b)

Gambar 4.6 Uji *Turning Thruster* dengan Pengendali FGS-PID pada Sudut *Heading* (a) 20° dan (b) 30°

Gambar 4.6 menunjukkan respon *heading* kapal saat diberi *set point* heading sebesar 20° dan 30° dengan aktuator *stern thruster* dan *bow thruster*. Respon dinamik pada Gambar 4.6 (a) menunjukkan *maximum overshoot* sebesar $21,93^\circ$ dan *settling time* sebesar 24,88 detik. Respon dinamik pada saat kapal diberikan *set point* sebesar 30° pada Gambar 4.6 (b) menghasilkan *overshoot* sebesar $32,89^\circ$ serta membutuhkan waktu selama 25,86 detik untuk mencapai *set point* yang diinginkan.

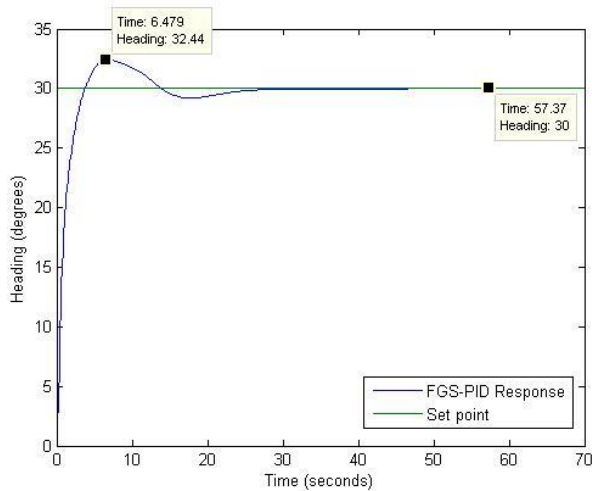
Variabel yang dikendalikan pada proses sandar kapal selain *heading* yaitu jarak kapal dari dermaga dengan bantuan *bow thruster* dan *stern thruster*. Kapal AHTS memiliki *thruster* berjenis *fixed-pitch tunnel thruster* sehingga gerak yang terjadi jika kapal digerakkan hanya dengan *bow thruster* dan *stern thruster* adalah gerak *sway* dan rotasi *yaw* tanpa adanya gerak *surge*. Hasil pengujian terhadap kinerja pengendali FGS-PID dalam mengendalikan tegangan *bow thruster* dan *stern thruster* agar dapat menghasilkan gerak *sway* yang diinginkan ditunjukkan oleh Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Uji *Closed Loop* Kendali Gerak Sway dengan Aktuator Thruster

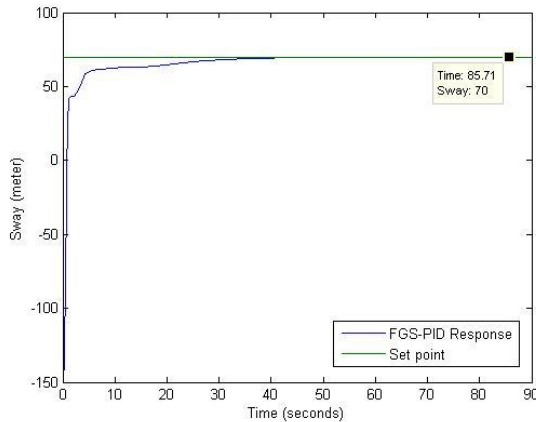
Gambar 4.7 menunjukkan respon gerak sway kapal terhadap *set point* jarak sebesar 70 meter yang diberikan. Pengendali FGS-PID digunakan untuk memberi perintah berupa tegangan yang sama untuk *bow thruster* dan *stern thruster* untuk menggerakkan kapal sepanjang 70 meter. Respon yang diperlihatkan oleh Gambar 4.7 menunjukkan bahwa kapal membutuhkan waktu selama 76,81 detik untuk melakukan gerak sway sejauh 70 meter dengan bantuan *bow thruster* dan *stern thruster*.

Proses sandar kapal mengharuskan pengendali sudut *yaw* dan pengendali gerak sway untuk dapat bekerja bersama-sama agar kapal dapat melakukan *berthing* dengan sudut yang diinginkan dan berhenti di posisi yang diinginkan. Uji *closed loop* terhadap integrasi pengendali gerak sway dan *yaw* perlu dilakukan untuk mengetahui kemampuan pengendali FGS-PID yang telah dirancang dalam membantu kapal melakukan sandar dengan baik. Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 merupakan respon sudut *yaw* dan jarak sway kapal terhadap *set point heading* sebesar 30° dan *set point* jarak sway sejauh 70 meter.



Gambar 4.8 Respon Sudut Yaw terhadap Integrasi Sistem Pengendalian Yaw dan Sway

Gambar 4.8 menunjukkan respon sudut yaw kapal AHTS pada sistem integrasi pengendalian yaw dan sway dengan *set point* sudut heading sebesar 30° . Respon pada Gambar 4.8 menunjukkan *overshoot* sebesar $32,44^\circ$ dan *settling time* selama 57,37 detik. Sistem integrasi pengendalian dapat dikatakan memenuhi standar *maneuverability* IMO karena *overshoot* yang ditunjukkan tidak lebih dari 40° .



Gambar 4.9 Respon Gerak Sway terhadap Integrasi Sistem Pengendalian Yaw dan Sway

Respon sistem pada Gambar 4.9 merupakan gerak sway kapal dengan *set point* jarak sway sepanjang 70 meter pada sistem integrasi pengendalian sway dan yaw. Gambar 4.9 menunjukkan bahwa kapal dapat mencapai *set point* jarak yang diinginkan selama 85,71 detik dan tidak menunjukkan adanya *overshoot*.

4.4. Analisa Trayektori Sandar Kapal Tanpa Gangguan

Proses sandar kapal otomatis terbagi menjadi dua tahapan, yaitu tahap *tracking* trayektori dan tahap sandar. Tahap *tracking* trayektori merupakan proses pengendalian yang bertujuan agar kapal dapat mengikuti trayektori yang diinginkan dengan baik dari koordinat awal (0;1020) menuju *way point* pada koordinat (990;65). Kapal digerakkan menggunakan *propeller* dan *rudder* pada tahapan ini. *Propeller* digunakan untuk menghasilkan gaya *surge* pada kapal sedangkan *rudder* bertugas menentukan arah atau *heading* kapal. Kecepatan *surge* kapal dimodelkan sebagai konstanta sebesar 2 m/s karena pada saat melakukan sandar, kapal harus bergerak dengan kecepatan yang rendah. Pengendalian dilakukan dengan mengatur defleksi sudut *rudder* agar *heading* kapal dapat sesuai dengan sudut yang diinginkan menurut

mekanisme *guidance* dengan perhitungan *Line of Sight* sehingga kapal tetap berada pada trayektori yang telah ditentukan.

Tabel 4.1 Trayektori Sandar dan *Heading* Kapal dengan Pengendali FGS-PID Tanpa Gangguan

Waktu (detik)	Heading (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	0	1020	0,00	1020,00	0,000
46,65	-85,07	11	930	11,01	930,00	0,015
194,74	-74,54	95	646	95,01	646,00	0,005
286,93	-66,79	171	478	171,00	478,00	0,004
322,54	-75,21	200	413	200,03	413,01	0,031
405,76	-65,73	305	284	305,09	284,04	0,098
499,66	-71,64	411	129	410,98	129,01	0,026
558,11	-1,54	516	78	515,91	77,75	0,270
610,98	13,09	621	65	620,76	65,08	0,251
663,52	-36,35	726	65	725,83	65,05	0,180
795,73	0,00	990	65	990,05	65,00	0,050
877,77	0,00	990	0	989,85	0,01	0,152
Rata-rata error						0,098

Tabel 4.1 menunjukkan trayektori dan *heading* kapal selama proses sandar dengan pengendali FGS-PID berlangsung tanpa ada pengaruh dari gangguan arus laut. Nilai Xd dan Yd menyatakan koordinat titik X dan Y yang diinginkan (*desired*) sedangkan Xa dan Ya menyatakan koordinat X dan Y aktual kapal. Nilai *error* merupakan jarak antara titik (Xd;Yd) dan titik (Xa;Ya) yang dihitung dengan menggunakan persamaan jarak antara dua titik sesuai pada persamaan (4.1).

$$e = \sqrt{(y_d - y_a)^2 + (x_d - x_a)^2} \quad (4.1)$$

Nilai *error* lintasan pada waktu 46,65 detik berdasarkan persamaan (4.1) adalah:

$$\begin{aligned} e &= \sqrt{(930 - 930)^2 + (11 - 11,01)^2} \\ &= 0,01 \end{aligned}$$

Nilai *error* lintasan untuk waktu dan koordinat lain yang dicantumkan pada tabel data trayektori sandar kapal dihitung menggunakan persamaan yang sama yaitu persamaan (4.1).

Proses sandar kapal diawali pada koordinat (0;1020) kemudian diarahkan menuju tiap-tiap *way point* yang harus dilewati yaitu (Xd;Yd) dengan menggunakan *rudder* dan *propeller* hingga kapal mencapai koordinat (990;65) kemudian digantikan oleh *stern thruster* dan *bow thruster* untuk menggerakkan kapal menuju koordinat (990;0). Waktu total yang dibutuhkan pada proses sandar kapal dari posisi awal kapal hingga kapal mencapai dermaga tanpa adanya gangguan arus laut adalah selama 877,77 detik. Tabel 4.1 memperlihatkan bahwa terjadi penyimpangan (*error*) trayektori aktual dari trayektori yang diinginkan (*desired*) dengan rata-rata sebesar 0,098 meter. Simpangan terjauh yang terjadi selama proses sandar ini yaitu sebesar 0,270 meter.

Sudut kapal dipertahankan pada nilai 0° ketika melakukan proses sandar dengan bantuan *bow thruster* dan *stern thruster*. Sudut kapal berhasil dipertahankan sesuai *set point* yaitu 0° selama proses sandar hingga kapal berhenti di dermaga Jamrud Utara dengan koordinat aktual (989,85;0,01) sehingga sistem pengendalian dikatakan dapat memandu kapal melakukan proses *berthing* dengan baik.

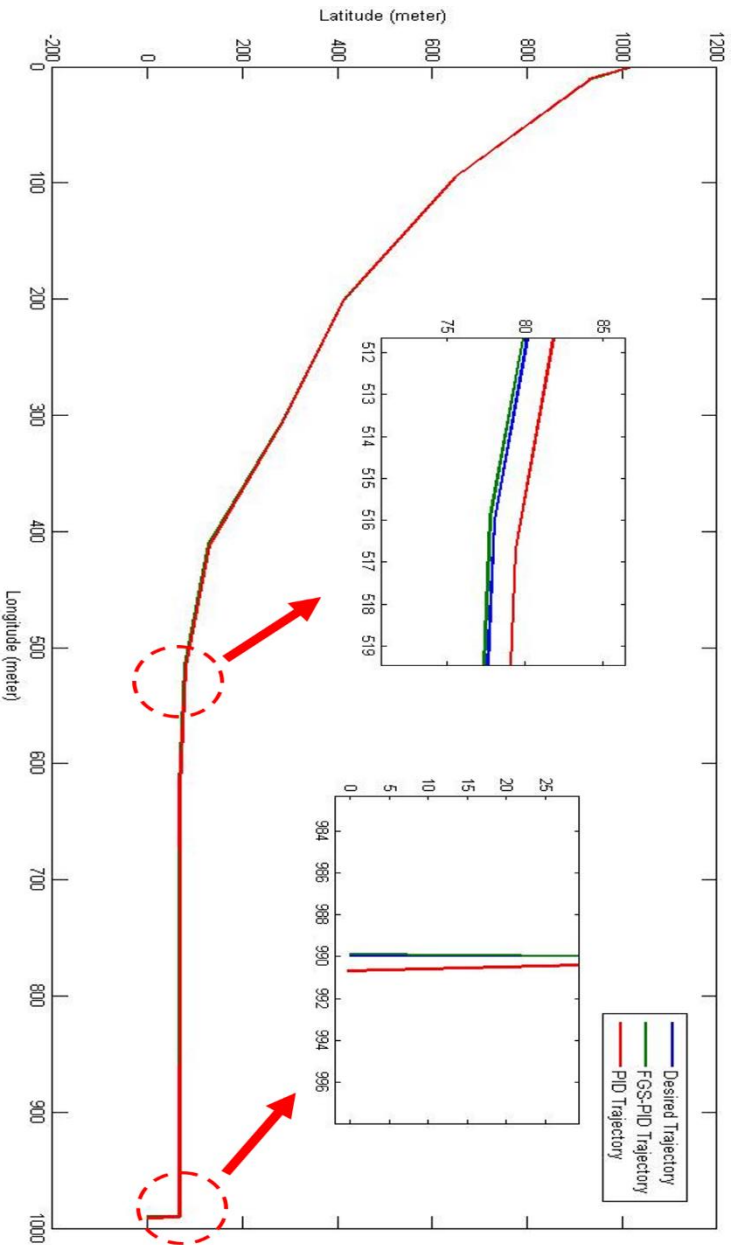
Pengendali PID tanpa mekanisme *auto-tuning* diterapkan pada sistem yang sama untuk mengetahui perbandingan kemampuan pengendali PID dan PID yang telah dilengkapi dengan mekanisme *fuzzy gain scheduling* dalam membantu kapal melakukan *auto-berthing*. Mekanisme *tuning* yang digunakan untuk menentukan *gain* pengendali adalah Zigler-Nichols tipe kedua. Trayektori sandar kapal dan *heading* kapal dengan pengendalian PID tanpa pengaruh gangguan arus laut ditunjukkan oleh Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Trayektori Sandar dan *Heading* Kapal dengan Pengendali PID Tanpa Gangguan

Waktu (detik)	Heading (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	0	1020	0,00	1020,00	0,000
46,88	-80,35	11	930	10,83	929,94	0,178
194,97	-69,46	95	646	95,25	646,05	0,250
287,25	-64,17	171	478	170,67	477,84	0,366
322,83	-84,39	200	413	199,88	412,93	0,137
406,15	-30,93	305	284	305,66	284,48	0,814
500,14	-70,76	411	129	411,88	129,55	1,040
558,71	-14,69	516	78	516,69	79,38	1,546
611,64	-7,70	621	65	621,30	66,98	2,000
664,49	-5,08	726	65	726,09	67,40	2,402
796,50	0,00	990	65	990,01	66,05	1,050
832,71	0,00	990	0	990,67	-0,35	0,756
Rata-rata error						0,958

Trayektori sandar kapal tanpa adanya gangguan berupa arus laut dengan pengendali PID menghasilkan nilai rata-rata *error* lintasan sebesar 0,958 meter dengan *error* lintasan maksimum sebesar 2,402 meter. Data tersebut menunjukkan bahwa ketika gangguan arus laut tidak diterapkan pada sistem, mekanisme *fuzzy gain scheduling* mampu meminimalkan *error* lintasan sandar kapal dengan pengendali PID berdasarkan nilai rata-rata *error* dan nilai *error* maksimum yang mengalami penurunan.

Ilustrasi pergerakan kapal pada proses sandar tanpa adanya pengaruh gangguan dengan pengendali FGS-PID dan pengendali PID dengan metode *tuning* Ziegler-Nichols tipe-2 ditunjukkan oleh Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Ilustrasi Trayektori Aktual Sandar Kapal Tanpa Gangguan Arus Laut

4.5. Analisa Trayektori Sandar Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2 Knot

Gangguan arus laut dimodelkan dan diterapkan pada sistem pengendalian sandar kapal otomatis dengan harapan bahwa hasil simulasi akan mendekati kondisi asli di lapangan. Gangguan arus laut sebesar 2 knot diberikan terhadap gerak *yaw* dan *sway* kapal dan menghasilkan respon sistem berupa trayektori serta *heading* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Trayektori Sandar dan *Heading* Kapal dengan Pengendali FGS-PID Gangguan Arus 2 Knot

Waktu (detik)	Heading (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	11	930	0,00	1020,00	0,000
46,65	-78,07	11	930	11,03	930,01	0,031
194,76	-104,10	95	646	95,15	646,04	0,160
287,06	-40,76	171	478	170,67	477,81	0,376
322,85	-25,89	200	413	199,98	413,12	0,117
405,92	-71,14	305	284	305,64	284,45	0,781
499,87	-84,30	411	129	410,78	129,10	0,242
558,46	15,88	516	78	515,66	78,38	0,506
611,51	-39,58	621	65	621,06	65,38	0,384
663,89	-39,21	726	65	725,54	64,86	0,481
796,38	1,69	990	65	990,03	65,48	0,477
867,33	0,42	990	0	990,50	0,02	0,503
Rata-rata error						0,338

Adanya gangguan berupa arus laut dengan kecepatan 2 knot memberikan pengaruh terhadap kemampuan sistem pengendalian untuk mengarahkan kapal agar dapat mengikuti trayektori yang diinginkan. Hal ini dapat dilihat dari rata-rata *error* trayektori yang meningkat menjadi 0,338 meter dibandingkan rata-rata *error* trayektori tanpa gangguan. *Error* posisi di akhir proses sandar kapal mengalami sedikit peningkatan menjadi sebesar 0,503 meter

akibat adanya gangguan arus sebesar 2 knot. Sudut *heading* kapal ketika proses *berthing* berlangsung yang harus dijaga agar tetap berada pada sudut 0° berhasil dilakukan oleh pengendali FGS-PID di bawah pengaruh arus 2 knot meskipun ada sedikit penyimpangan yaitu sebesar $0,42^\circ$. Waktu total yang dibutuhkan oleh kapal untuk bersandar di bawah pengaruh gangguan arus laut sebesar 2 knot adalah selama 867,33 detik.

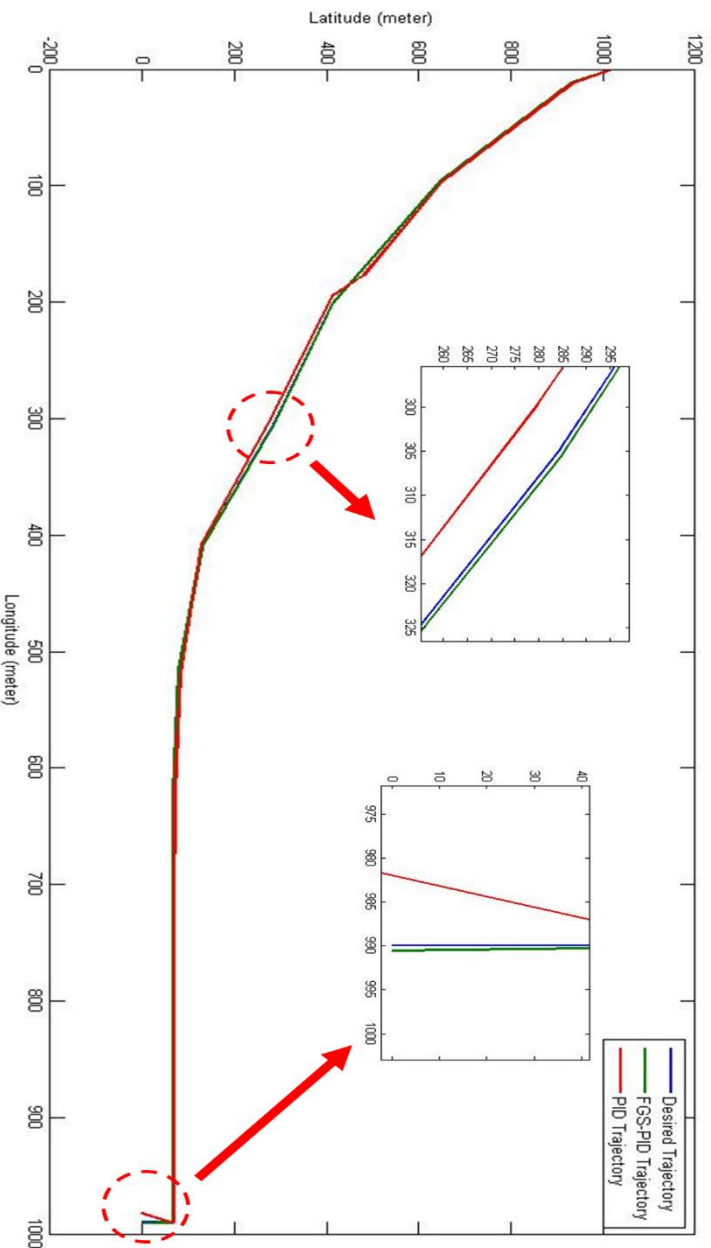
Tabel 4.4 Trayektori Sandar dan *Heading* Kapal dengan Pengendali PID Gangguan Arus 2 Knot

Waktu (detik)	Heading ($^\circ$)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	0	1020	0,00	1020,00	0,000
47,34	-77,86	11	930	12,62	930,16	1,625
196,44	-84,17	95	646	97,50	646,71	2,595
290,24	-54,75	171	478	176,73	480,55	6,270
325,55	-81,15	200	413	194,84	410,90	5,575
410,38	-54,20	305	284	299,63	279,73	6,857
505,33	-43,85	411	129	407,56	126,46	4,275
563,52	-25,38	516	78	518,55	82,91	5,530
616,52	-20,60	621	65	621,83	69,93	5,003
669,52	-24,76	726	65	726,14	67,93	2,929
804,46	-9,02	990	65	990,18	68,43	3,437
837,00	-16,44	990	0	981,67	-1,97	8,561
Rata-rata error						4,787

Tabel 4.4 menunjukkan trayektori sandar kapal dengan pengendali PID di bawah pengaruh gangguan arus laut sebesar 2 knot. Tabel tersebut menunjukkan bahwa tanpa adanya mekanisme *fuzzy gain scheduling* yang diterapkan pada pengendali PID, trayektori sandar kapal mengalami peningkatan nilai rata-rata *error* lintasan menjadi 4,787 meter. Penyimpangan posisi akhir kapal saat telah mencapai Terminal Jamrud juga mengalami peningkatan, yang awalnya sebesar 0,503 dengan pengendali FGS-

PID menjadi 8,561 meter tanpa diterapkannya mekanisme *gain scheduling* berbasis logika fuzzy.

Perbandingan hasil simulasi berupa trayektori sandar aktual kapal AHTS menggunakan pengendali FGS-PID dan menggunakan pengendali PID dengan metode *tuning* Ziegler-Nichols dgangguan arus laut 2 knot pada bidang sumbu-xy diperlihatkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Ilustrasi Trayektori Sandar Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2 Knot

4.6. Analisa Trayektori Sandar Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2,25 Knot

Simulasi dilakukan dengan menggunakan trayektori sandar yang sama, namun nilai kecepatan angin sebagai gangguan ditingkatkan menjadi 2,25 knot. Trayektori aktual serta *heading* kapal sebagai respon terhadap sistem pengendalian dengan pengendali FGS-PID yang diberi gangguan sebesar 2,25 knot dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Trayektori Sandar Kapal dengan pengendali FGS-PID Gangguan Arus Laut 2,25 Knot

Waktu (detik)	Heading (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	11	930	0,00	1020,00	0,000
46,63	-73,10	11	930	11,05	930,06	0,077
194,76	-93,32	95	646	95,13	646,03	0,139
287,01	-46,05	171	478	170,93	478,01	0,073
322,59	-89,91	200	413	199,97	413,06	0,067
405,87	-75,19	305	284	305,27	284,20	0,334
499,80	-91,89	411	129	410,94	129,10	0,117
558,38	25,53	516	78	515,94	78,07	0,092
611,38	-16,76	621	65	621,18	66,54	1,546
663,81	-39,17	726	65	725,58	64,93	0,422
796,08	0,54	990	65	989,96	65,06	0,075
878,38	0,79	990	0	990,84	0,06	0,838
Rata-rata error						0,344

Data pada Tabel 4.5 menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan arus laut yang digunakan sebagai *disturbance* pada sistem pengendalian menjadi sebesar 2,25 knot tidak menyebabkan peningkatan nilai rata-rata *error* lintasan sandar kapal yang signifikan. Rata-rata *error* trayektori mengalami peningkatan menjadi 0,344 meter dari nilai sebelumnya yaitu 0,338 meter pada proses sandar dengan kecepatan gangguan arus laut sebesar 2 knot.

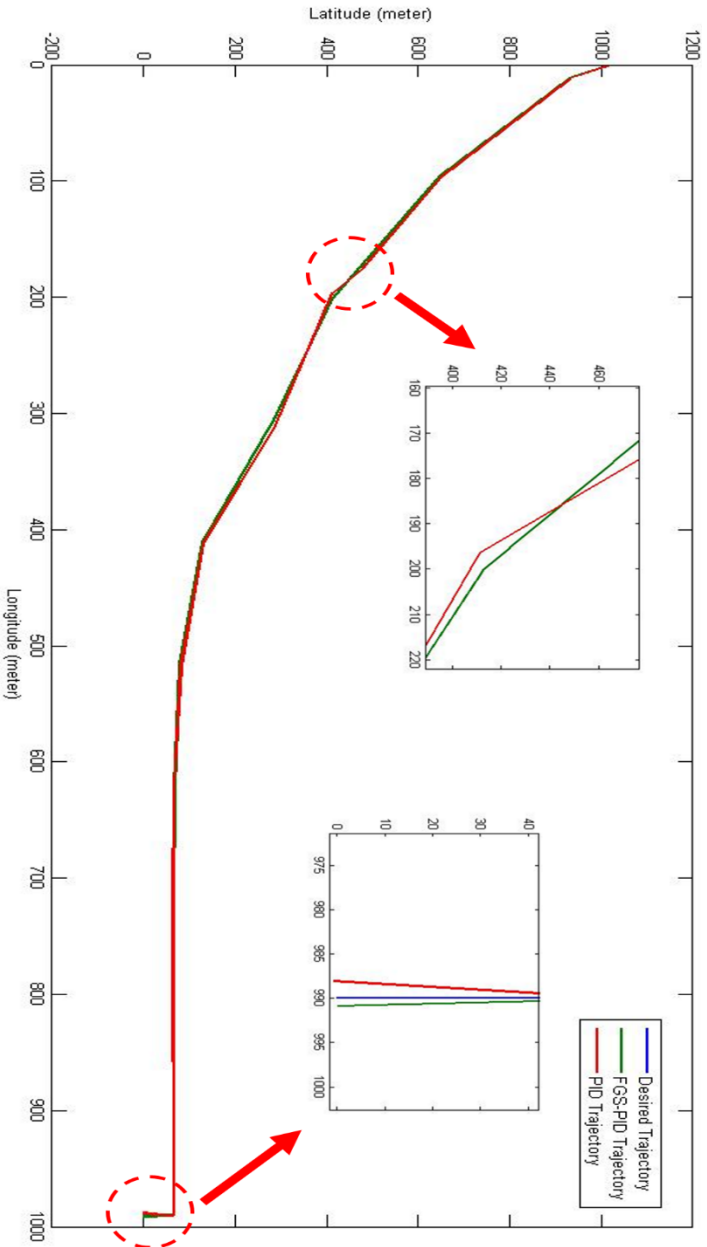
Error trayektori terbesar yang terjadi adalah sebesar 1,546 meter yang juga mengalami peningkatan dibandingkan nilai *error* lintasan maksimum pada proses sandar dengan gangguan arus 2 knot. Keseluruhan proses sandar kapal dari koordinat awal pada titik (0;1020) hingga kapal sampai pada dermaga memakan total waktu sebanyak 878,38 detik. *Heading* kapal pada akhir proses sandar masih dapat dipertahankan pada nilai yang mendekati nilai *set point* 0° yaitu sebesar $0,79^{\circ}$. Peningkatan nilai *error heading* dibandingkan data sebelumnya disebabkan oleh peningkatan nilai kecepatan arus laut yang diterapkan pada sistem.

Tabel 4.6 Trayektori Sandar dan *Heading* Kapal dengan Pengendali PID Gangguan Arus 2,25 Knot

Waktu (detik)	Heading ($^{\circ}$)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	0	1020	0,00	1020,00	0,815
47,48	-151,32	11	930	11,81	930,03	2,565
197,36	-86,00	95	646	97,47	646,68	4,089
290,40	-59,55	171	478	174,72	479,69	3,985
326,58	-69,73	200	413	196,32	411,47	6,631
410,28	-48,14	305	284	310,15	288,18	1,149
505,36	-63,17	411	129	411,99	129,58	3,960
564,20	-27,21	516	78	517,85	81,50	0,807
618,20	-12,24	621	65	621,51	65,63	1,028
671,28	-10,77	726	65	726,03	63,97	0,448
805,36	12,00	990	65	990,15	65,42	2,150
837,92	-19,67	990	0	987,98	-0,73	0,815
Rata-rata error						2,512

Pengendali PID yang diterapkan pada sistem sandar kapal dengan mekanisme *tuning* Ziegler-Nichols tipe-2 di bawah gangguan arus laut sebesar 2,25 knot ditunjukkan oleh Tabel 4.6. Nilai rata-rata *error* pada proses sandar kapal yang ditunjukkan pada Tabel 4.6 mengalami peningkatan dibandingkan dengan proses sandar dengan pengendali PID yang dilengkapi mekanisme

fuzzy gain scheduling dengan nilai gangguan arus laut yang sama. Nilai *error* lintasan maksimum juga mengalami peningkatan menjadi sebesar 6,631 meter. Perbandingan lintasan sandar kapal di bawah pengaruh gangguan arus laut sebesar 2,25 knot menggunakan pengendali FGS-PID dan pengendali PID ditunjukkan oleh Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Ilustrasi Rayektori Sandar Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2,25 Knot

4.7. Analisa Trayektori Sandar Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2,5 Knot

Gangguan arus laut sebesar 2,5 knot diharapkan masih dapat diatasi oleh sistem kendali sandar kapal otomatis berbasis pengendali PID dengan mekanisme *fuzzy gain scheduling*. Trayektori aktual dan *heading* kapal di bawah pengaruh gangguan arus laut sebesar 2,5 knot dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Trayektori Sandar Kapal dengan Pengendali FGS-PID Gangguan Arus Laut 2,5 Knot

Waktu (detik)	Heading (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	11	930	0,00	1020,00	0,000
46,64	-74,54	11	930	11,06	930,04	0,068
194,75	-98,94	95	646	95,06	646,01	0,066
286,98	-80,98	171	478	170,88	478,03	0,120
322,63	-35,96	200	413	200,01	413,02	0,021
405,78	-53,43	305	284	304,85	284,04	0,156
499,78	-35,59	411	129	410,98	128,98	0,031
558,19	13,73	516	78	515,90	78,07	0,120
611,21	-29,97	621	65	621,14	65,89	0,897
663,75	4,49	726	65	726,00	63,02	1,978
795,85	-1,61	990	65	989,67	65,19	0,384
863,83	-1,41	990	0	991,10	0,05	1,106
Rata-rata error						0,450

Gangguan arus laut sebesar 2,5 knot memberi pengaruh yang tidak terlalu besar bagi pergerakan kapal AHTS saat melakukan proses *berthing* dilihat dari nilai rata-rata dan nilai *error* trayektori tertinggi dibandingkan dengan trayektori aktual kapal ketika bersandar di bawah pengaruh gangguan arus sebesar 2,25 knot. Rata-rata *error* trayektori mengalami peningkatan yang tidak signifikan menjadi sebesar 0,450 meter sedangkan nilai *error* tertinggi yang terjadi adalah 1,978 meter. Proses *berthing* dengan

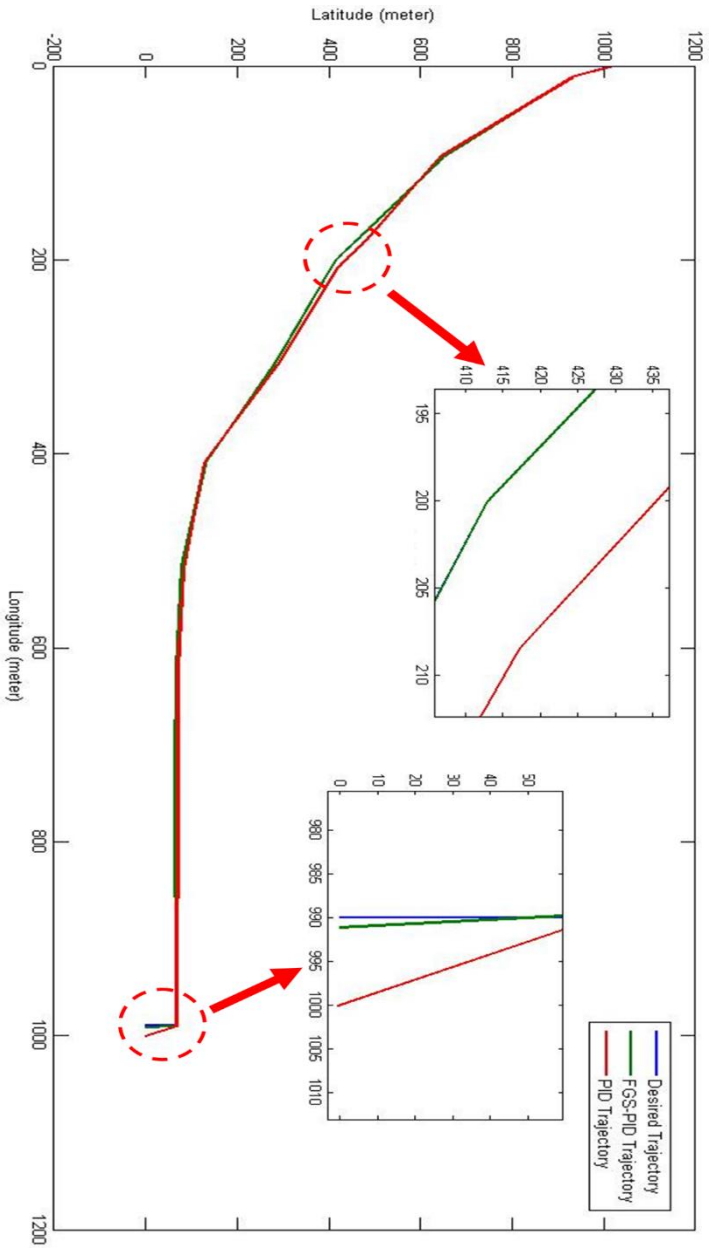
gangguan arus sebesar 2,5 knot memakan waktu total selama 863,83 meter. *Heading* kapal di akhir proses *berthing* yaitu saat kapal sudah mencapai dermaga adalah sebesar $-1,41^{\circ}$. Pengendali FGS-PID dapat dikatakan berhasil dalam mengendalikan proses sandar kapal di bawah gangguan arus laut sebesar 2,5 knot dilihat berdasarkan nilai rata-rata *error* lintasan dan *error heading* di akhir lintasan yang bernilai kecil. Proses pengendalian sandar kapal di bawah pengaruh arus laut 2,5 knot dengan pengendali PID tanpa mekanisme *fuzzy gain scheduling* menghasilkan trayektori sandar yang ditunjukkan oleh Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Trayektori Sandar Kapal dengan Pengendali PID Gangguan Arus Laut 2,5 Knot

Waktu (detik)	Heading ($^{\circ}$)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	0	1020	0,00	1020,00	0,000
47,44	-38,77	11	930	11,57	930,05	0,576
196,81	-84,95	95	646	92,17	645,13	2,964
290,24	-42,78	171	478	178,68	481,62	8,489
326,24	-70,16	200	413	208,43	417,22	9,429
410,20	-64,09	305	284	308,30	286,60	4,204
505,25	-53,46	411	129	408,59	127,21	2,999
563,61	-21,38	516	78	518,70	83,43	6,068
616,56	-19,03	621	65	621,56	70,14	5,166
670,45	6,28	726	65	726,23	70,18	5,186
804,49	-11,06	990	65	990,38	66,71	1,751
838,74	-0,56	990	0	1000,06	-0,54	10,07
Rata-rata error						5,173

Nilai rata-rata *error* lintasan sandar kapal di bawah gangguan arus laut 2,5 knot mengalami peningkatan menjadi 5,173 meter tanpa adanya mekanisme *fuzzy gain scheduling* yang diterapkan pada pengendali PID. Koordinat akhir kapal juga mengalami penyimpangan yang cukup besar menjadi sebesar 10,07 meter dibandingkan dengan koordinat akhir sandar kapal yang

dikendalikan dengan pengendali FGS-PID yaitu sebesar 1,106 meter dari dermaga. Perbandingan lintasan sandar kapal di bawah pengaruh arus laut 2,5 knot dengan menggunakan pengendali FGS-PID dan pengendali PID dengan metode *tuning* Ziegler-Nichols ditunjukkan oleh Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Ilustrasi Rayektori Sandar Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2,5 Knot

4.8. Perbandingan Trayektori Sandar Kapal Menggunakan Metode PID dengan Metode *Fuzzy Gain Scheduling*-PID

Pengendali PID didesain untuk membantu proses sandar kapal AHTS dengan trayektori yang sama. Metode *tuning* yang digunakan yaitu metode Ziegler-Nichols tipe-2 sesuai dengan perhitungan parameter PID pada tabel *tuning* Ziegler-Nichols pada Tabel 2.4. Sistem yang sama digunakan untuk melakukan simulasi menggunakan *controller* PID. Hasil yang diperoleh dari simulasi menggunakan *controller* PID dan FGS-PID dibandingkan berdasarkan rata-rata *error*, *error* maksimum, dan waktu tempuh total pada Tabel 4.5.

Tabel 4.9 Perbandingan *Error* Trayektori dan Waktu Tempuh Pengendali PID dengan *Fuzzy Gain Scheduling*-PID

Gangguan	Pengendali	Rata-rata error (meter)	Error maksimum (meter)	Waktu tempuh total (detik)
Tanpa gangguan	PID	0,958	2,402	832,71
	FGS-PID	0,098	0,270	877,77
Gangguan arus 2 knot	PID	4,787	8,561	837,00
	FGS-PID	0,338	0,781	867,33
Gangguan arus 2,25 knot	PID	2,512	6,631	837,92
	FGS-PID	0,344	1,546	878,38
Gangguan arus 2,5 knot	PID	5,173	10,070	838,74
	FGS-PID	0,450	1,978	863,83

Pengendali PID dapat mengendalikan proses sandar kapal dengan baik ketika gangguan arus tidak diberikan kepada sistem. Rata-rata *error* lintasan yang ditunjukkan pada proses sandar kapal dengan pengendali PID tanpa gangguan arus laut yaitu sebesar

0,958 meter dengan *error* lintasan maksimum sebesar 2,402 meter. Nilai tersebut tidak jauh berbeda dengan *error* lintasan sandar kapal menggunakan pengendali FGS-PID yaitu dengan nilai rata-rata *error* lintasan sebesar 0,098 meter dan nilai maksimum *error* lintasan sebesar 0,270 meter.

Pemberian gangguan berupa arus laut sebesar 2 knot menyebabkan peningkatan *error* yang cukup signifikan bagi trayektori sandar kapal dengan pengendali PID yaitu menjadikan nilai rata-rata *error* meningkat menjadi 4,787 meter dan nilai maksimum *error* lintasan sebesar 8,561 meter. Trayektori sandar kapal dengan pengendali FGS-PID di bawah pengaruh arus laut 2 knot tidak mengalami peningkatan nilai *error* yang signifikan dibandingkan dengan trayektori sandar kapal ketika tidak terdapat gangguan arus laut. Nilai rata-rata *error* lintasan mengalami peningkatan menjadi 0,338 meter sedangkan nilai maksimum *error* meningkat sebesar 0,781 meter.

Peningkatan nilai kecepatan gangguan arus laut yang diberikan menjadi sebesar 2,25 knot menyebabkan trayektori sandar kapal dengan pengendali PID menunjukkan nilai *error* yang cukup besar hingga 6,631 meter namun nilai rata-rata *error* trayektori mengalami penurunan menjadi sebesar 2,512 meter. Penurunan nilai rata-rata *error* ini diakibatkan oleh penggunaan sinyal *gaussian* sebagai sumber gangguan arus laut pada simulasi yang menyebabkan kecepatan arus laut dikeluarkan secara acak dengan arah yang acak pula, yaitu dapat searah dengan gerak kapal maupun berlawanan dengan gerak kapal. Penggunaan pengendali FGS-PID pada proses sandar kapal dengan gangguan arus laut 2,25 knot masih dapat mempertahankan nilai *error* trayektori rata-rata yang kecil yaitu sebesar 0,344 meter serta nilai maksimum *error* trayektori sebesar 1,546 meter.

Pengendali FGS-PID berhasil memandu sandar kapal di bawah gangguan arus laut sebesar 2,5 knot dengan baik meskipun masih menghasilkan rata-rata *error* sebesar 0,450 meter. Nilai *error* lintasan tertinggi yang dihasilkan adalah 1,978 meter. Pengendali PID tanpa adanya mekanisme *fuzzy gain scheduling* yang diterapkan pada proses sandar kapal dengan nilai gangguan

arus yang sama yaitu 2,5 knot menghasilkan rata-rata *error* lintasan yang lebih besar yaitu 5,173 meter dan nilai *error* lintasan hingga 10,070 meter. Mekanisme *fuzzy gain scheduling* yang diterapkan pada pengendali PID dapat meminimalkan *error* lintasan yang terjadi berdasarkan nilai rata-rata *error* lintasan dan nilai *error* maksimum yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh nilai *gain* pengendali PID yang dapat menyesuaikan terhadap kondisi eksternal dari lingkungan sistem akibat adanya mekanisme *gain scheduling* dengan logika fuzzy, berbeda dengan nilai *gain* pengendali PID dengan mekanisme *tuning* Ziegler-Nichols yang bernilai konstan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Sistem pengendalian sandar kapal otomatis dengan menggunakan pengendali berbasis *Fuzzy Gain Scheduling-PID* telah berhasil dirancang dalam penelitian ini. Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil perancangan sistem kendali sandar kapal otomatis ini adalah sebagai berikut.

- a. Perancangan sistem kendali sandar kapal otomatis berbasis FGS-PID di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya menggunakan nilai minimum K_p untuk pengendalian *rudder*, *bow thruster*, *stern thruster* dan *yaw* secara berturut-turut ialah $-2,74 \cdot 10^4$, $-109,6279$, $6,2109$, dan $-26,6309$ sedangkan nilai maksimum K_p yaitu $-5,1373 \cdot 10^4$, $-205,5524$, $-49,9330$ dan $11,6454$. Nilai minimum K_d untuk urutan yang sama yaitu $-1,1302 \cdot 10^4$, $-80,5765$, $-137,1494$ dan $5,1706$ sedangkan nilai maksimumnya adalah $-2,1191 \cdot 10^4$, $-151,0810$, $-257,1551$ dan $9,6948$ secara berturut-turut.
- b. Pengendali FGS-PID yang dirancang pada penelitian ini dapat meminimalkan *error* lintasan sandar kapal pada pengendali PID saat gangguan arus laut diberikan kepada sistem. Nilai maksimum *error* lintasan sandar kapal dengan pengendali PID tanpa gangguan arus, dengan gangguan arus 2 knot, gangguan arus 2,25 knot serta gangguan arus 2,5 knot secara berturut-turut ialah 2,4 meter, 8,56 meter, 6,63 meter dan 10,07 meter. Nilai maksimum *error* lintasan dengan pengendali FGS-PID tanpa gangguan arus, dengan gangguan arus 2 knot, gangguan arus 2,25 knot serta gangguan arus 2,5 knot secara berturut-turut adalah 0,27 meter, 0,78 meter, 1,55 meter dan 1,98 meter.

5.2. Saran

Saran yang dapat penulis berikan agar penelitian ini dapat dikembangkan menjadi lebih baik ke depannya adalah sebagai berikut.

- a. Gangguan alam yang digunakan dalam proses simulasi dapat ditambahkan gangguan alam lain seperti angin dan gelombang laut agar simulasi lebih mendekati kondisi sebenarnya.
- b. Menggunakan jenis pengembangan lain dari pengendali PID sebagai *controller* untuk mendapatkan hasil yang lebih baik, seperti *adaptive* PID atau gabungan pengendali PID dengan metode pengendalian lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Astrom, K., & Hagglund, T. (1995). *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning* (2nd Editio). Piedmont: Instrument Society of America.
- Bui, V. P., Kim, Y. B., Choi, Y. W., & Kawai, H. (2009). A study on automatic ship berthing system design. *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC 2009*, 181–184. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2009.4919268>
- Edward V Lewis. (1988). *Principle of Naval Architecture Second Revision* (Vol. III).
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamic and Marine and Motion Control*. Trondheim: John Wiley & Sons Ltd.
- Gunawan, R., Aisjah, A. S., & Masroeri, A. A. (2013). *Perancangan Sistem Kontrol Sandar Kapal Otomatis Berbasis Logika Fuzzy di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya. Sandar Kapal Menggunakan Logika Fuzzy*. Surabaya.
- Hammoud, S. (2012). Ship motion control using multi-controller structure. *Journal of Maritime Research*, 9(1), 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.07.028>
- Khan, A. A., & Rapal, N. (2006). Fuzzy PID Controller: Design, Tuning and Comparison with Conventional PID Controller. *2006 IEEE International Conference on Engineering of Intelligent Systems*, (1), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICEIS.2006.1703213>
- Klir, G. J., & Yuan, B. (1995). *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Application*. Mexico: Prentice-Hall, Inc.

- Le, M. (2001). An automatic control system for ship harbour manoeuvres using decoupling control. *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*, 2, 2108–2113. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2001.932918>
- Lee, S. Der, Tzeng, C. Y., & Shu, K. Y. (2012). Design and experiment of a small boat auto-berthing control system. *2012 12th International Conference on ITS Telecommunications, ITST 2012*, (2), 397–401. <https://doi.org/10.1109/ITST.2012.6425206>
- Maritime Connector. (2017). INDOLIZIZ SATU - 9536533 - ANCHOR HANDLING VESSEL. Diambil 20 Juni 2018, dari <http://maritime-connector.com/image/indoliziz-satu-9536533/175378/>
- Menteri Perhubungan Republik Indonesia. (2015). Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 51 Tahun 2015.
- Ogata, K. (1997). *Modern Control Engineering* (3 ed.). New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5 ed.). New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Park, J. Y., & Kim, N. (2014). Design of an adaptive backstepping controller for auto-berthing a cruise ship under wind loads. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(2), 347–360. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0184>
- Passino, K. M., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control*. Ohio: Addison Wesley Longman, Inc.
- Prayitno, A., Indrawati, V., Trusulaw, I. I., & Kavyarasan, K. (2017). Rudder-roll stabilization using fgs-pid controller for sigma-e warship Rudder-roll stabilization using fgs-pid controller for sigma-e warship.

- Singh, B. (2016). Features, Applications, and Limitations of Anchor Handling Tug Supply Vessels (AHTS). Diambil 20 Juni 2018, dari <https://www.marineinsight.com/types-of-ships/features-applications-and-limitations-of-anchor-handling-tug-supply-vessels-ahts/>
- Tehrani, K. A., & Mpanda, A. (2012). *Introduction to PID Controllers - Theory, Tuning and Application to Frontier Areas*. (R. C. Panda, Ed.). InTech. <https://doi.org/10.5772/2422>
- Zhang, Y., Hearn, G. E., & Sen, P. (1997). A Multivariable Neural Controller for Automatic Ship Berthing. *IEEE Control Systems*, 17(4), 31–45. <https://doi.org/10.1109/37.608535>
- Zhao, Z., Tomizuka, M., & Isaka, S. (1993). Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers, 23(5).

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN A

PEMODELAN DINAMIKA KAPAL

Kapal *Anchor Handling Tug Supply* (AHTS) dimodelkan berdasarkan spesifikasi kapal yang diperoleh dari PT. Biro Klasifikasi Indonesia. Spesifikasi kapal AHTS:

L_{pp} (panjang)	=	55	m
B (lebar)	=	13	m
T (kedalaman)	=	5,75	m
Δ (<i>displacement</i>)	=	1.680.000	kg
U (kecepatan)	=	10	m/s
C_B (koefisien blok)	=	0,4086	
X_G (<i>center of gravity</i>)	=	3,45	m
A_δ (<i>rudder area</i>)	=	2,212	m ²
r (jari-jari girasi)	=	8,25	m

Beberapa spesifikasi kapal harus diubah menjadi bentuk nondimensional untuk pemodelan kapal antara lain massa, *center of gravity*, jari-jari girasi dan kecepatan. Konversi parameter kapal dilakukan dengan metode *Prime-System I*:

$$m' = \frac{m}{0,5\rho L_{pp}^3} = 1,98.10^{-5}$$

$$X'_G = \frac{X_G}{L_{pp}} = 0,0627$$

$$r' = \frac{r}{L_{pp}} = 0,15$$

Spesifikasi kapal digunakan untuk menghitung nilai koefisien hidrodinamika yang diturunkan oleh Clarke:

$$\frac{-Y'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.16 \frac{C_{BB}}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{L}\right)^2$$

$$\frac{-Y'_{\dot{r}}}{\pi(T/L)^2} = 0.67 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.0033 \left(\frac{B}{T}\right)^2$$

$$\frac{-N'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1.1 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.041 \left(\frac{B}{T}\right)$$

$$\frac{-N'_{\dot{r}}}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0.017 \frac{C_{BB}}{T} - 0.33 \left(\frac{B}{L}\right)$$

$$\begin{aligned}
\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} &= 1 + 0.40 \frac{C_B B}{T} \\
\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} &= -\frac{1}{2} + 2.2 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.080 \left(\frac{B}{T}\right) \\
\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} &= \frac{1}{2} + 2.4 \left(\frac{T}{L}\right) \\
\frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} &= \frac{1}{4} + 0.039 \left(\frac{B}{T}\right) - 0.56 \left(\frac{B}{L}\right) \\
Y'_\delta &= \frac{\pi A \delta}{4LT} \\
N'_\delta &= -\frac{1}{2} Y'_\delta \\
I'_r &= m' \cdot r'^2 \\
I'_z &= m' X'_G + I'_r
\end{aligned}$$

Nilai koefisien hidrodinamika yang diperoleh berdasarkan persamaan-persamaan turunan Clarke tersebut:

$$\begin{aligned}
Y'_{\dot{v}} &= -0.029613576 \\
Y'_{\dot{r}} &= -0.004856047 \\
N'_{\dot{v}} &= -0.005741788 \\
N'_{\dot{r}} &= -0.000722005 \\
Y'_v &= -0.047001015 \\
Y'_r &= 0.00552095 \\
N'_v &= -0.025770766 \\
N'_r &= -0.00706329 \\
Y'_\delta &= 0.00549344 \\
N'_\delta &= -0.002746721 \\
I'_r &= 0.00134521 \\
I'_z &= 0.00134528
\end{aligned}$$

Matriks dinamika kapal nondimensional dan dimensional diperoleh dengan cara mensubstitusikan nilai-nilai koefisien hidrodinamika dan spesifikasi nondimensional kapal dalam model persamaan dinamika kapal Davidson & Schiff.

$$M' = \begin{bmatrix} 0.0296 & 0.0049 \\ 0.0057 & 0.0021 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
N' &= \begin{bmatrix} 0.0470 & -0.0055 \\ 0.0258 & 0.0071 \end{bmatrix} \\
b' &= \begin{bmatrix} 0.0055 & 0.0104 & 0.0104 \\ -0.0027 & -0.0038 & 0.0038 \end{bmatrix} \\
M &= \begin{bmatrix} 0.0163 & 0.1470 \\ 0.0032 & 0.0625 \end{bmatrix} \\
N &= \begin{bmatrix} 0.0047 & -0.0303 \\ 0.0026 & 0.0389 \end{bmatrix} \\
b &= \begin{bmatrix} 0.0055 & 0.0104 & 0.0104 \\ -0.0027 & -0.0038 & 0.0038 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Matriks untuk pemodelan *state-space* kapal AHTS diperoleh dengan cara:

$$\begin{aligned}
A &= -M^{-1}N \\
A &= \begin{bmatrix} 0.1529 & 13.6994 \\ -0.0489 & -1.3137 \end{bmatrix} \\
B &= M^{-1}b \\
B &= \begin{bmatrix} 1.3457 & 2.1743 & 0.1704 \\ -0.1119 & -0.1704 & 0.0519 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Penambahan satu variabel keadaan yaitu sudut yaw menyebabkan perubahan pada matriks A dan B.

$$\begin{aligned}
A &= \begin{bmatrix} 0.1529 & 13.6994 & 0 \\ -0.0489 & -1.3137 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\
B &= \begin{bmatrix} 1.3457 & 2.1743 & 0.1704 \\ -0.1119 & -0.1704 & 0.0519 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

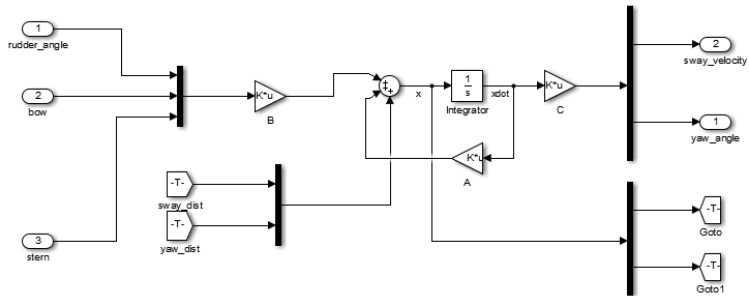
Persamaan lengkap *state-space* kapal AHTS:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1529 & 13.6994 & 0 \\ -0.0489 & -1.3137 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.3457 & 2.1743 & 0.1704 \\ -0.1119 & -0.1704 & 0.0519 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_R \\ V_B \\ V_S \end{bmatrix}$$

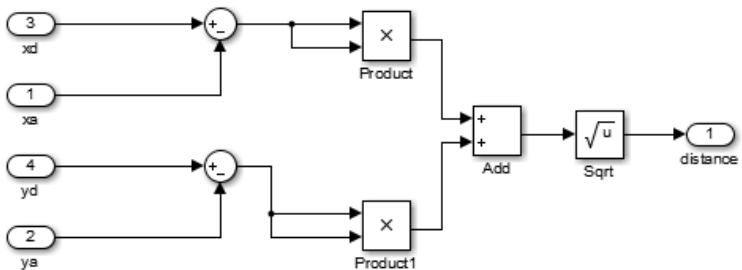
Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN B SUBSISTEM SIMULINK

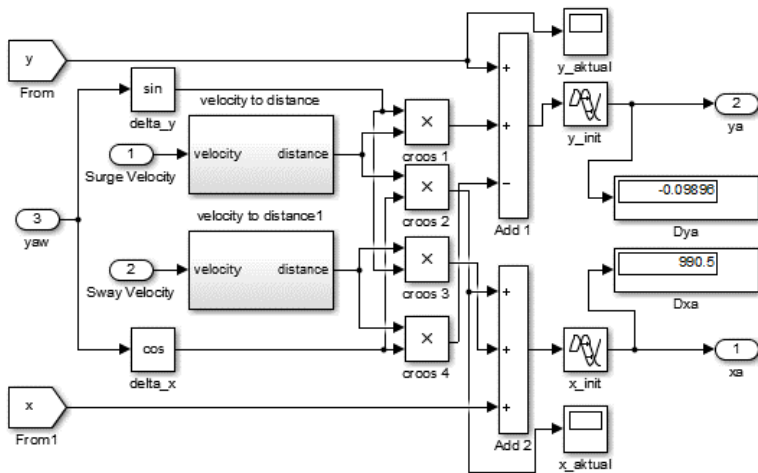
A. Model Dinamik Kapal (*state-space*)



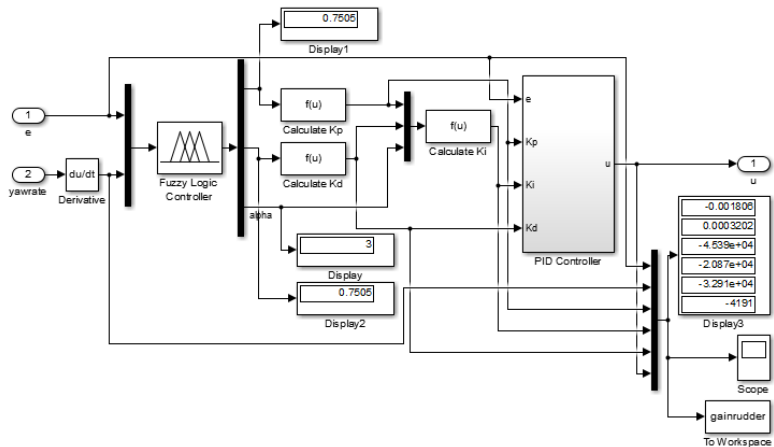
B. Perhitungan Jarak



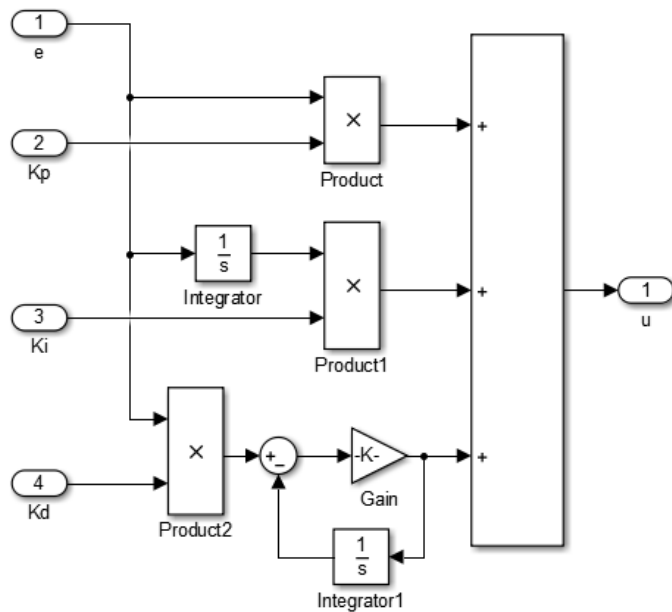
C. Perhitungan Trayektori Aktual



D. Fuzzy Gain Scheduler



E. Pengendali PID



Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN C
TRAYEKTORI DAN *HEADING* SANDAR KAPAL
DENGAN PENGENDALI FGS-PID

**A. Trayektori Sandar Kapal dengan Pengendali FGS-PID
Tanpa Gangguan Arus Laut**

Waktu (detik)	Heading (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	0	1020	0,00	1020,00	0,000
46,65	-85,07	11	930	11,01	930,00	0,015
194,74	-74,54	95	646	95,01	646,00	0,005
286,93	-66,79	171	478	171,00	478,00	0,004
322,54	-75,21	200	413	200,03	413,01	0,031
405,76	-65,73	305	284	305,09	284,04	0,098
499,66	-71,64	411	129	410,98	129,01	0,026
558,11	-1,54	516	78	515,91	77,75	0,270
610,98	13,09	621	65	620,76	65,08	0,251
663,52	-36,35	726	65	725,83	65,05	0,180
795,73	0,00	990	65	990,05	65,00	0,050
877,77	0,00	990	0	989,85	0,01	0,152
Error rata-rata						0,098
Error maksimum						0,270

**B. Trayektori Sandar Kapal dengan Pengendali FGS-PID
dengan Gangguan Arus 2 Knot**

Waktu (detik)	Heading (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	11	930	0,00	1020,00	0,000
46,65	-78,07	11	930	11,03	930,01	0,031
194,76	-104,10	95	646	95,15	646,04	0,160
287,06	-40,76	171	478	170,67	477,81	0,376
322,85	-25,89	200	413	199,98	413,12	0,117

Waktu (detik)	Heading (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
405,92	-71,14	305	284	305,64	284,45	0,781
499,87	-84,30	411	129	410,78	129,10	0,242
558,46	15,88	516	78	515,66	78,38	0,506
611,51	-39,58	621	65	621,06	65,38	0,384
663,89	-39,21	726	65	725,54	64,86	0,481
796,38	1,69	990	65	990,03	65,48	0,477
867,33	0,42	990	0	990,50	0,02	0,503
Error rata-rata						0,338
Error maksimum						0,781

C. Trayektori Sandar Kapal dengan Pengendali FGS-PID dengan Gangguan Arus 2,25 Knot

Waktu (detik)	Heading (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	11	930	0,00	1020,00	0,000
46,63	-73,10	11	930	11,05	930,06	0,077
194,76	-93,32	95	646	95,13	646,03	0,139
287,01	-46,05	171	478	170,93	478,01	0,073
322,59	-89,91	200	413	199,97	413,06	0,067
405,87	-75,19	305	284	305,27	284,20	0,334
499,80	-91,89	411	129	410,94	129,10	0,117
558,38	25,53	516	78	515,94	78,07	0,092
611,38	-16,76	621	65	621,18	66,54	1,546
663,81	-39,17	726	65	725,58	64,93	0,422
796,08	0,54	990	65	989,96	65,06	0,075
878,38	0,79	990	0	990,84	0,06	0,838
Error rata-rata						0,344
Error maksimum						1,546

**D. Trayektori Sandar Kapal dengan Pengendali FGS-PID
Dengan Gangguan Arus 2,5 Knot**

Waktu (detik)	Heading (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	11	930	0,00	1020,00	0,000
46,64	-74,54	11	930	11,06	930,04	0,068
194,75	-98,94	95	646	95,06	646,01	0,066
286,98	-80,98	171	478	170,88	478,03	0,120
322,63	-35,96	200	413	200,01	413,02	0,021
405,78	-53,43	305	284	304,85	284,04	0,156
499,78	-35,59	411	129	410,98	128,98	0,031
558,19	13,73	516	78	515,90	78,07	0,120
611,21	-29,97	621	65	621,14	65,89	0,897
663,75	4,49	726	65	726,00	63,02	1,978
795,85	-1,61	990	65	989,67	65,19	0,384
863,83	-1,41	990	0	991,10	0,05	1,106
Error rata-rata						0,450
Error maksimum						1,978

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN D
TRAYEKTORI DAN *HEADING* SANDAR KAPAL
DENGAN PENGENDALI PID

A. Trayektori Sandar Kapal dengan Pengendali PID Tanpa Gangguan Arus Laut

Waktu (detik)	Heading (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	0	1020	0,00	1020,00	0,000
46,88	-80,35	11	930	10,83	929,94	0,178
194,97	-69,46	95	646	95,25	646,05	0,250
287,25	-64,17	171	478	170,67	477,84	0,366
322,83	-84,39	200	413	199,88	412,93	0,137
406,15	-30,93	305	284	305,66	284,48	0,814
500,14	-70,76	411	129	411,88	129,55	1,040
558,71	-14,69	516	78	516,69	79,38	1,546
611,64	-7,70	621	65	621,30	66,98	2,000
664,49	-5,08	726	65	726,09	67,40	2,402
796,50	0,00	990	65	990,01	66,05	1,050
832,71	0,00	990	0	990,67	-0,35	0,756
Error rata-rata						0,958
Error maksimum						2,402

B. Trayektori Sandar Kapal dengan Pengendali PID dengan Gangguan Arus 2 Knot

Waktu (detik)	Heading (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	0	1020	0,00	1020,00	0,000
47,34	-77,86	11	930	12,62	930,16	1,625
196,44	-84,17	95	646	97,50	646,71	2,595
290,24	-54,75	171	478	176,73	480,55	6,270
325,55	-81,15	200	413	194,84	410,90	5,575

Waktu (detik)	Heading (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
410,38	-54,20	305	284	299,63	279,73	6,857
505,33	-43,85	411	129	407,56	126,46	4,275
563,52	-25,38	516	78	518,55	82,91	5,530
616,52	-20,60	621	65	621,83	69,93	5,003
669,52	-24,76	726	65	726,14	67,93	2,929
804,46	-9,02	990	65	990,18	68,43	3,437
837,00	-16,44	990	0	981,67	-1,97	8,561
Error rata-rata						4,787
Error maksimum						8,561

C. Trayektori Sandar Kapal dengan Pengendali PID dengan Gangguan Arus 2,25 Knot

Waktu (detik)	Heading (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	0	1020	0,00	1020,00	0,815
47,48	-151,32	11	930	11,81	930,03	2,565
197,36	-86,00	95	646	97,47	646,68	4,089
290,40	-59,55	171	478	174,72	479,69	3,985
326,58	-69,73	200	413	196,32	411,47	6,631
410,28	-48,14	305	284	310,15	288,18	1,149
505,36	-63,17	411	129	411,99	129,58	3,960
564,20	-27,21	516	78	517,85	81,50	0,807
618,20	-12,24	621	65	621,51	65,63	1,028
671,28	-10,77	726	65	726,03	63,97	0,448
805,36	12,00	990	65	990,15	65,42	2,150
837,92	-19,67	990	0	987,98	-0,73	0,815
Error rata-rata						2,512
Error maksimum						6,631

D. Trayektori Sandar Kapal dengan Pengendali PID dengan Gangguan Arus 2,5 Knot

Waktu (detik)	Heading (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0,00	0,00	0	1020	0,00	1020,00	0,000
47,44	-38,77	11	930	11,57	930,05	0,576
196,81	-84,95	95	646	92,17	645,13	2,964
290,24	-42,78	171	478	178,68	481,62	8,489
326,24	-70,16	200	413	208,43	417,22	9,429
410,20	-64,09	305	284	308,30	286,60	4,204
505,25	-53,46	411	129	408,59	127,21	2,999
563,61	-21,38	516	78	518,70	83,43	6,068
616,56	-19,03	621	65	621,56	70,14	5,166
670,45	6,28	726	65	726,23	70,18	5,186
804,49	-11,06	990	65	990,38	66,71	1,751
838,74	-0,56	990	0	1000,06	-0,54	10,07
Error rata-rata						5,173
Error maksimum						10,07

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Nama penulis Niken Arina Pratiwi, dilahirkan di Lamongan, 13 November 1997. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dan tinggal di Jalan Kapten Tendean RT 019 RW 003 Sengon, Jombang. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDI Roushon Fikr Jombang pada tahun 2010, pendidikan di SMPN 1 Jombang pada tahun 2012, pendidikan di SMAN 3 Jombang pada tahun 2014 dan pendidikan S1 Teknik Fisika ITS di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2018. Penulis aktif dalam beberapa organisasi selama masa perkuliahan, yaitu Badan Eksekutif Mahasiswa FTI-ITS sebagai staff departemen PSDM dan Laboratorium Simulasi dan Komputasi sebagai asisten. Bidang minat yang diambil oleh penulis untuk menyelesaikan penelitian ini sebagai Tugas Akhir yaitu bidang minat Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol.

Penulis menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Perancangan Sistem Kendali Sandar Kapal Otomatis Menggunakan Fuzzy Gain Scheduling–PID Untuk Minimalisasi Error Trayektori di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya” pada bulan Juni 2018. Pembaca yang memiliki kritik, saran, atau ingin berdiskusi lebih lanjut dapat menghubungi penulis melalui e-mail: nikenarinapратиwi@gmail.com.