



TUGAS AKHIR - TF 181801

PERANCANGAN SISTEM KENDALI TRAYEKTORI DAN SANDAR KAPAL OTOMATIS BERBASIS SISTEM LOGIKA *FUZZY* DI PELABUHAN TANJUNG PERAK SURABAYA

DEAZ INDRA SETIAWAN
NRP. 0231164000018

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

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI TRAYEKTORI
DAN SANDAR KAPAL OTOMATIS BERBASIS SISTEM
LOGIKA *FUZZY* DI PELABUHAN TANJUNG PERAK
SURABAYA**

DEAZ INDRA SETIAWAN
NRP. 02311640000018

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

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

***DESIGN OF AUTOMATIC SHIP TRAJECTORY AND
LEAN BACK CONTROL SYSTEM BASED ON FUZZY
LOGIC SYSTEM IN THE PORT OF TANJUNG PERAK
SURABAYA***

Deaz Indra Setiawan
NRP. 02311640000018

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

*Department of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2020*

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Deaz Indra Setiawan
NRP : 02311640000018
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “**Perancangan Sistem Kendali Trayektori Dan Sandar Kapal Otomatis Berbasis Sistem Logika Fuzzy 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 sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 30 Juli 2020

Yang membuat pernyataan,



Deaz Indra Setiawan
NRP. 02311640000018

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

PERANCANGAN SISTEM KENDALI TRAYEKTORI DAN SANDAR KAPAL
OTOMATIS BERBASIS SISTEM LOGIKA *FUZZY* DI PELABUHAN
TANJUNG PERAK SURABAYA

Oleh:


Deaz Indra Setiawan
NRP. 0231164000018

Surabaya,

Menyetujui,
Pembimbing I


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

Menyetujui,
Pembimbing II


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

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Fisika FT-IRS ITS



Dr. Suyanto, S.T., M.T.
NIP. 19171113 199512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN SISTEM KENDALI TRAYEKTORI DAN SANDAR KAPAL OTOMATIS BERBASIS SISTEM LOGIKA *FUZZY* DI PELABUHAN TANJUNG PERAK SURABAYA

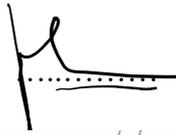
TUGAS AKHIR

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



DEAZ INDRA SETIAWAN
NRP. 0231164000018

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. Hendra Cordova, S.T., M.T. |  | (Ketua Penguji) |
| 4. Dr. Ir. Syamsul Arifin, M.T. |  | (Penguji I) |
| 5. Dr. Dhanny Arifianto, S.T, M.Eng |  | (Penguji II) |
| 6. Irwansyah, S.T.,M.T.,M.Phil.,Ph.D. |  | (Penguji III) |

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI TRAYEKTORI DAN
SANDAR KAPAL OTOMATIS BERBASIS SISTEM LOGIKA
FUZZY
DI PELABUHAN TANJUNG PERAK SURABAYA**

Nama : Deaz Indra Setiawan
NRP : 02311640000018
Departemen : Teknik Fisika FT-IRS ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Dr. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng

ABSTRAK

Tugas akhir yang dilakukan berkaitan dengan perancangan simulasi pengendalian trayektori dan sandar kapal otomatis dengan jenis kapal ferry KMP (Kapal Motor Penumpang) Legundi Surabaya. Sistem *autopilot* yang digunakan menggunakan kontrol logika *fuzzy* Sugeno-Takagi yang digunakan untuk mengontrol *rudder*, *bow thruster*, dan *stern thruster*. Simulasi menggunakan data spesifikasi kapal dengan pendekatan Nomoto orde II. Agar hasil simulasi mendekati keadaan sebenarnya, maka diberikan variasi gangguan arus laut 1; 1,5; dan 2 knot. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perancangan sistem pengendalian kapal otomatis berbasis logika *fuzzy* dapat memberikan hasil yang jauh lebih baik dan menghasilkan performansi sistem menjadi lebih baik dengan cara kapal dapat berlayar maupun bersandar sesuai dengan lintasan yang telah ditentukan dengan *error* lintasan maksimum sebesar 11,5 m dan minimum sebesar 0,085 m. Selain itu, jenis kontroler logika *fuzzy* yang digunakan jauh lebih baik dibanding konvensional PID, hal ini dikarenakan jenis kontroler tersebut memiliki semua nilai parameter yang lebih kecil/singkat.

Kata Kunci: Kontrol logika *fuzzy*, Trayektori, Sandar kapal otomatis.

Halaman ini sengaja dikosongkan

***DESIGN OF AUTOMATIC SHIP TRAJECTORY AND LEAN
BACK CONTROL SYSTEM BASED ON FUZZY LOGIC SYSTEM
IN THE PORT OF TANJUNG PERAK SURABAYA***

Name : Deaz Indra Setiawan
NRP : 0231164000018
Department : Engineering Physics FT-IRS ITS
Supervisors : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Dr. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng

ABSTRACT

The final project that is carried out relates to the design of the simulation of trajectory control and automatic ship berth with the type of KMP ferry (Ship Passenger Motor) Legundi Surabaya. The auto pilot system used Sugeno-Takagi fuzzy logic control which is used to control the rudder, bow thruster, and stern thruster. The simulation uses ship specification data with the Nomoto II order approach. So that the simulation results close to the actual state, then variations in sea current disturbance are given 1; 1,5; and 2 knots. The results show that the design of automatic ship control systems based on fuzzy logic can provide much better results and results in better system performance by the way the ship can sail or lean in accordance with a predetermined path with a maximum trajectory error of 11.5 m and a minimum amounting to 0.085 m. In addition, the type of fuzzy logic controller used is far better than conventional PID, this is because the type of controller has all the parameter values that are smaller / shorter.

Keywords: Fuzzy logic controller, trajectory, automatic berthing ship.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

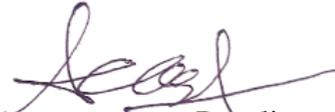
Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul **“Perancangan Sistem Kendali Trayektori Dan Sandar Kapal Otomatis Berbasis Sistem Logika *Fuzzy* Di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya”**.

Penulis menyadari bahwa dalam proses penelitian ini tidak terlepas dari bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku kepala departemen Teknik Fisika ITS yang bertanggung jawab atas terlaksananya kegiatan penelitian tugas akhir di lingkungan Teknik Fisika.
2. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. selaku Dosen pembimbing 1 yang telah banyak membantu, memberikan ilmu, saran, masukan serta bimbingannya dalam penyusunan laporan ini.
3. Dr. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng. selaku Dosen pembimbing 2 yang senantiasa membimbing dan memberikan masukan dalam penyusunan laporan ini.
4. Rekan satu tim penelitian yang sudah memberikan semangat dan membantu dalam melakukan penelitian.
5. Evania S. Ismuri yang telah memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis dengan tulus dan sabar.

Terimakasih khusus penulis kepada keluarga saya yang senantiasa memberikan motivasi, semangat, dan dorongan selama menjalani perkuliahan. Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini, untuk itu penulis sangat mengharapkan kritikan dan saran yang membangun demi kebaikan seksama. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan khususnya bagi penulis sendiri.

Surabaya, 30 Juli 2020



Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	1
1.3 Tujuan.....	1
1.4 Batasan Masalah.....	1
1.5 Sistematika Laporan	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	3
2.1 KMP Legundi Surabaya	3
2.2 Sistem Dinamika pada Kapal	3
2.3 Pemodelan Dinamika <i>Rudder</i>	6
2.4 Pemodelan Dinamika <i>Propeller</i>	6
2.5 Penentuan Trayektori Kapal	7
2.6 Pemodelan Gangguan Cuaca	7
2.7 Sistem Logika <i>Fuzzy</i>	9
2.8 Mode Kontrol PID.....	10
2.9 Standar Kapal Dalam Bersandar	11
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	13
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	13
3.2 Identifikasi Permasalahan.....	14

3.3	Studi Literatur	14
3.4	Penentuan Variabel Penelitian	15
3.5	Pengambilan Data Spesifikasi Kapal	15
3.6	Penentuan Data Trayektori dan Sandar Kapal	15
3.7	Pengambilan Data Kondisi Cuaca di Pelabuhan Tanjung Perak	17
3.8	Pemodelan Dinamika Kapal	18
3.9	Perancangan Sistem Kontrol Trayektori dan Sandar Kapal tanpa Gangguan	19
3.10	Pengujian Simulasi tanpa Gangguan	24
3.11	Pemodelan Gangguan Kondisi Cuaca.....	26
3.12	Pengujian Simulasi dengan Gangguan Cuaca.....	27
3.13	Analisis dan Pembahasan Performansi Sistem	27
3.14	Pengambilan Kesimpulan dan Saran	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		29
4.1	Analisis Pengujian Sistem Kontrol <i>Rudder</i> Berbasis KLF.....	29
4.2	Analisis Sistem Kontrol Kapal tanpa Gangguan Arus Laut	31
4.3	Analisis Sistem Kontrol Kapal dengan Gangguan Arus Laut 1 Knot	35
4.4	Analisis Sistem Kontrol Kapal dengan Gangguan Arus Laut 1,5 Knot .	39
4.5	Analisis Sistem Kontrol Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2 Knot	43
4.6	Analisis Perbandingan Kontrol Sistem Kapal Berbasis KLF dan Pengendali Konvensional PID	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		51
5.1	Kesimpulan	51
5.2	Saran	51
DAFTAR PUSTAKA.....		53
LAMPIRAN		55
BIODATA PENULIS.....		68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 KMP Legundi Surabaya	3
Gambar 2. 2 Enam derajat kebebasan gerakan pada kapal.....	5
Gambar 2. 3 Diagram <i>control loop rudder</i>	6
Gambar 2. 4 Konsep pemanduan kapal	7
Gambar 2. 5 Sistem koordinat	8
Gambar 2. 6 Struktur kontrol logika <i>fuzzy</i>	10
Gambar 2. 7 Diagram blok pengendali PID	11
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian	14
Gambar 3. 2 Jalur pelayaran dan sandar kapal KMP Legundi Surabaya	17
Gambar 3. 3 Posisi sandar kapal pada tepi Dermaga Jamrud Utara.....	17
Gambar 3. 4 Diagram blok perancangan pengendalian tanpa gangguan	19
Gambar 3. 5 Perancangan sistem KLF proses trayektori	20
Gambar 3. 6 <i>Membership function error yaw</i>	20
Gambar 3. 7 <i>Membership function yaw rate</i>	21
Gambar 3. 8 <i>Membership function command rudder</i>	21
Gambar 3. 9 Perancangan sistem KLF proses sandar	22
Gambar 3. 10 <i>Membership function distance</i>	22
Gambar 3. 11 <i>Membership function tegangan bow thruster</i>	23
Gambar 3. 12 <i>Membership function tegangan stern thruster</i>	23
Gambar 3. 13 <i>Surface viewer</i> (a) tegangan <i>stern thruster</i> (b) tegangan <i>bow thruster</i>	24
Gambar 3. 14 Uji <i>open loop rudder</i>	24
Gambar 3. 15 Uji <i>close loop rudder</i>	25
Gambar 3. 16 Simulasi program pengujian trayektori dan sandar kapal tanpa gangguan (<i>without disturbance</i>).....	26
Gambar 3. 17 Simulasi program pengujian trayektori dan sandar kapal dengan gangguan (<i>with disturbance</i>).....	27
Gambar 3. 18 Uji <i>close loop rudder</i> berbasis PID	28

Gambar 4.1 Hasil uji <i>openloop rudder</i> 20^0 (kapal tak berdimensi).....	29
Gambar 4.2 Hasil uji <i>openloop rudder</i> 30^0 (kapal tak berdimensi).....	30
Gambar 4.3 Hasil uji <i>closeloop rudder</i> 20^0 (kapal tak berdimensi).....	30
Gambar 4.4 Hasil uji <i>closeloop rudder</i> 30^0 (kapal tak berdimensi)	31
Gambar 4.5 Hasil simulasi trayektori kapal otomatis tanpa ada gangguan	32
Gambar 4.6 Hasil simulasi sandar kapal otomatis tanpa ada gangguan	33
Gambar 4.7 Hasil simulasi gabungan trayektori dan sandar kapal otomatis tanpa ada gangguan	34
Gambar 4.8 Hasil simulasi trayektori kapal otomatis dengan gangguan arus 1 knot	36
Gambar 4.9 Hasil simulasi sandar kapal otomatis dengan gangguan arus 1 knot	37
Gambar 4.10 Hasil simulasi gabungan trayektori dan sandar kapal otomatis dengan gangguan arus 1 knot	38
Gambar 4.11 Hasil simulasi trayektori kapal otomatis dengan gangguan arus 1,5 knot.....	40
Gambar 4.12 Hasil simulasi sandar kapal otomatis dengan gangguan arus 1,5 knot	41
Gambar 4.13 Hasil simulasi gabungan trayektori dan sandar kapal otomatis dengan gangguan arus 1,5 knot	42
Gambar 4.14 Hasil simulasi trayektori kapal otomatis dengan gangguan arus 2 knot.....	44
Gambar 4.15 Hasil simulasi sandar kapal otomatis dengan gangguan arus 2 knot	45
Gambar 4.16 Hasil simulasi gabungan trayektori dan sandar kapal otomatis dengan gangguan arus 2 knot	46
Gambar 4.17 Respon sistem KLF (a) masukan 20^0 , (b) masukan 30^0	48
Gambar 4.18 Respon sistem pengendali konvensional masukan 20^0	49
Gambar 4.19 Respon sistem pengendali konvensional masukan 30^0	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Notasi yang digunakan pada dinamika angkutan laut (kapal).....	5
Tabel 2. 2 Definisi Simbol	8
Tabel 3. 1 Letak koordinat proses kapal bersandar.....	15
Tabel 3. 2 <i>Rule base</i> pada pengendalian proses berlayar	21
Tabel 3. 3 <i>Rule base</i> pada pengendalian proses bersandar.....	23
Tabel 4. 1 <i>Root square error</i> pelayaran kapal tanpa ada gangguan.....	34
Tabel 4. 2 <i>Root square error</i> pelayaran kapal dengan gangguan arus 1 knot.....	38
Tabel 4. 3 <i>Root square error</i> pelayaran kapal dengan gangguan arus 1,5 knot....	42
Tabel 4. 4 <i>Root square error</i> pelayaran kapal dengan gangguan arus 2 knot.....	46
Tabel 4. 5 Parameter-parameter respon kedua jenis kontroler hasil simulasi (hasil kapal berdimensi)	50

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanjung Perak merupakan salah satu pelabuhan dengan jumlah kapal keluar masuk dengan intensitas yang sangat tinggi. Sehingga akan terjadi kepadatan bongkar muat kapal yang mengakibatkan banyaknya jumlah antrian kapal yang memasuki Dermaga. Selama proses kapal bersandar tersebut memerlukan kapal tunda (*tug boat*) untuk membantu mendorong kapal dalam bersandar. Sedangkan untuk menggunakan fasilitas kapal tunda memerlukan biaya operasi yang cukup tinggi.

Kapal merupakan sebuah kendaraan pengangkut penumpang dan barang, seperti kendaraan bermotor maupun barang-barang pribadi milik penumpang, biasanya kapal tersebut berukuran cukup besar sehingga mampu membawa dengan kapasitas banyak. Salah satu jenis kapal yang banyak terdapat di pelabuhan Indonesia khususnya Tanjung Perak adalah kapal ferry yang biasanya melayani rute pelayaran yang dekat seperti penyebrangan selat atau danau, dan ada juga yang dapat menampung kendaraan, seperti kapal ferry Bahagia Ekspres, dan kapal ferry Legundi Surabaya. Kapal ferry biasanya dirancang dengan dua pintu, yaitu pintu depan dan belakang agar memudahkan bongkar muat kendaraan dan juga memudahkan kapal tersebut agar tidak perlu bermanuver. Misal dari suatu pelabuhan kapal ferry ini bersandar menggunakan pintu belakang untuk mengangkut kendaraan dan ketika sampai di pelabuhan tujuan, maka kapal ini akan menggunakan pintu depan untuk bersandar (Perhubungan, 2013).

Sebuah kapal dalam melakukan sandar merupakan hal penting dan utama dalam proses pemberhentian kapal tersebut, tak jarang hal-hal yang tidak diinginkan terjadi dalam proses sandar kapal, seperti kecelakaan kapal pengangkut peti kemas yang menabrak Dermaga Terminal Peti Kemas Semarang (TPKS) sehingga mengakibatkan *container crane* (CC) roboh berantakan. Sejumlah langkah pencegahan telah dilakukan namun tak berhasil mengendalikan laju kapal yang meluncur bebas saat akan bersandar pada dermaga (*Detik-Detik Kapal Tak*

Terkendali Tabrak Dermaga _ Okezone News, n.d.). Oleh karena itu, perkembangan IPTEK yang cukup pesat saat ini sangat dimungkinkan adanya sebuah sistem navigasi secara otomatis yang mengatur pergerakan kapal sehingga dapat bersandar secara otomatis tanpa adanya bantuan dari kapal tunda dan sekaligus dapat meminimalisir pergerakan kapal yang tak terkendali saat hendak bersandar pada Dermaga. Manuver pada kapal dipengaruhi oleh *propeller*, *rudder*, dan *thruster* dari ketiga aktuator tersebut dapat dilakukan kontrol, sehingga dapat memandu kapal untuk bersandar secara otomatis (Yao, 1997).

Terdapat beberapa penelitian sebelumnya yang terkait dengan penelitian sandar kapal secara otomatis baik dalam tahap simulasi maupun *prototype* kapal, seperti Studi Perancangan Sandar Kapal Secara Otomatis Menggunakan Logika *Fuzzy* di pelabuhan Tanjung Perak (Gunawan, Aisjah, & Masroeri, 2013), dan penelitian *Automatic Berthing Control Of Ship Using Adaptive Neural Network* (Nguyen & Jung, 2007). Kedua penelitian tersebut menggunakan metode yang berbeda, yaitu logika *fuzzy* sebagai elemen pengendalian dan *neural network* sebagai *training data* untuk parameter yang digunakan seperti sudut yang digunakan pada *rudder* dan kecepatan dari *propeller*. Penelitian tidak berhenti hanya pada tahap simulasi tetapi sudah berkembang menjadi sebuah *prototype* kapal yang dilengkapi dengan peralatan canggih seperti GPS sehingga kapal dapat bersandar secara otomatis sesuai dengan trayektori yang dilalui (Lee, Tzeng, & Chen, 2014). Penelitian sandar kapal otomatis ini merupakan pengembangan dari penelitian yang sudah ada sebelumnya, tetapi dengan menggunakan perbaikan metode yang berbeda yaitu sistem pengendalian *rudder*, dan *thruster* yang digunakan saat melakukan kontrol trayektori dan sandar kapal dalam satu *loop* pengendalian, dan menggunakan *rule base fuzzy* yang mengatur logika kerja dari kedua aktuator tersebut, serta membandingkan hasil performansinya dengan metode kontrol konvensional PID.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, dirumuskan beberapa permasalahan yang akan diteliti dengan rincian sebagai berikut:

- a) Bagaimana hasil perancangan sistem pengendalian *fuzzy* dalam menghasilkan performansi sistem terbaik?
- b) Bagaimana hasil analisis kemampuan sistem kontrol kapal otomatis dengan menggunakan sistem logika *fuzzy* maupun metode konvensional PID?

1.3 Tujuan

Berdasarkan pemaparan latar belakang dan permasalahan, maka tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a) Merancang sistem kontrol trayektori dan sandar kapal otomatis dengan menggunakan metode pengembangan sistem logika *fuzzy*.
- b) Melakukan simulasi rancangan sistem kontrol untuk beberapa kondisi gangguan yang diberikan agar hasil yang didapatkan sesuai/mendekati dengan keadaan sebenarnya.
- c) Mengevaluasi perbedaan performansi sistem hasil rancangan dengan menggunakan sistem logika *fuzzy* dan metode konvensional PID.

1.4 Batasan Masalah

Agar pembahasan tidak meluas dan menyimpang dari tujuan dan permasalahan, akan diberikan beberapa batasan masalah dari tugas akhir ini yaitu sebagai berikut:

- a) Objek yang diteliti adalah KMP (Kapal Motor Penumpang) Legundi Surabaya.
- b) Variabel yang dikontrol adalah *rudder*, *bow thruster*, dan *stern thruster* pada kapal.
- c) Diasumsikan pada *way point*, kapal sudah berada sejajar dengan tepi dermaga, dan 2 aktuator *thruster* yang digunakan memiliki spesifikasi daya yang sama besar yang dikontrol oleh 1 buah KLF sandar agar pergerakannya linier searah sumbu y .

- d) Diasumsikan model distribusi beban pada kapal terletak pada *center of mass* kapal dan dianggap berbentuk titik, sehingga pergerakannya simetris baik haluan maupun buritan kapal.
- e) Pemodelan kapal yang digunakan adalah metode Nomoto, sehingga bentuk kapal dianggap sebagai titik yang berpusat pada *center of mass* kapal agar memudahkan dalam pengerjaan simulasi kontrol trayektori dan sandar kapal otomatis.
- f) Dermaga yang digunakan dalam simulasi ini adalah salah satu pelabuhan di Tanjung Perak Surabaya yaitu Dermaga Jamrud Utara.
- g) Perancangan sistem kontrol ini dilakukan secara simulasi dengan menggunakan *software* Matlab R2019a.
- h) Himpunan fuzzy yang diusulkan adalah tipe 1 metode Sugeno-Takagi.
- i) Metode pengendalian konvensional PID digunakan sebagai pembanding.

1.5 Sistematika Laporan

Dalam laporan tugas akhir ini terdiri dari beberapa bab, sebagai berikut :

- a) BAB I Pendahuluan : Bab ini menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika laporan.
- b) BAB II Tinjauan Pustaka Dan Dasar Teori : Bab ini menjelaskan tentang penelitian-penelitian sebelumnya tentang topik yang kita ambil dan berisi juga teori-teori penunjang yang digunakan dalam penelitian ini.
- c) BAB III Metodologi Penelitian : Bab ini menjelaskan secara detail mengenai langkah-langkah yang dilakukan untuk mencapai tujuan dan untuk mendapatkan data keluaran yang dibutuhkan.
- d) BAB IV Hasil Dan Pembahasan : Pada bab ini merupakan tindak lanjut dari bab III, setelah melakukan penelitian dan mendapatkan data maka dilakukan analisis dan pembahasan.
- e) BAB V Kesimpulan dan Saran : Dalam bab ini berisi kesimpulan dan saran dalam penelitian ini.
- f) Lampiran : Berisi tentang data-data yang digunakan sebagai sumber materi, maupun algoritma pengolahan, dan perhitungan yang bertujuan untuk menjelaskan hasil penelitian yang didapat.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 KMP Legundi Surabaya

Kapal motor penumpang (KMP) Legundi Surabaya ini termasuk kedalam kapal ferry berjenis Ro-Ro yang biasanya dirancang dengan dua pintu, yaitu pintu depan dan belakang agar memudahkan bongkar muat kendaraan maupun barang-barang besar, sehingga untuk keluar masuknya kendaraan pada kapal ini menggunakan pintu *rampdoor* yang dapat dibuka saat bersandar di Pelabuhan. Kapal jenis ini seringkali berfungsi sebagai penghubung antar pulau di Indonesia, seperti Surabaya-Lombok, selain itu untuk meningkatkan efisiensi pergerakan kapal dalam bersandar dan menghemat biaya dalam bersandar maka pada kapal ini dilengkapi *bow thruster* dan *stern thruster* untuk membantu manuver kapal (Ariany, Hendra, & Febriary, 2018).



Gambar 2. 1 KMP Legundi Surabaya (Indonesia, n.d.)

2.2 Sistem Dinamika pada Kapal

Dalam suatu pemodelan terhadap transportasi laut dapat dibagi menjadi dua yaitu mempelajari pergerakan secara statis dan dinamis. Pemodelan statis yaitu terkonsentrasi pada kesetimbangan dari badan kapal baik saat bersandar maupun saat bergerak dengan kecepatan yang konstan. Sedangkan pemodelan dinamis yaitu terkonsentrasi pada saat kapal melaju dengan kecepatan yang berubah-ubah sehingga memiliki percepatan (Fossen, 1994).

Pada tahun 1957, Nomoto mengusulkan model fungsi alih sederhana untuk simulasi pengendalian arah pada gerak kapal. Berikut adalah model matematis dari Nomoto (Fossen, 1994):

$$\frac{\psi}{\delta r}(s) = \frac{Kr(1+T_3s)}{s(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad (2.1)$$

Parameter dari fungsi transfer diatas diperoleh dari:

$$T_1T_2 = \frac{\det(M)}{\det(N)} \quad (2.2)$$

$$T_1 + T_2 = \frac{n_{11}m_{22}+n_{22}m_{11}-n_{12}m_{21}-n_{21}m_{12}}{\det(N)} \quad (2.3)$$

$$Kr = \frac{n_{21}b_1-n_{11}b_2}{\det(N)} \quad (2.4)$$

$$KrT_3 = \frac{m_{21}b_1-m_{11}b_2}{\det(N)} \quad (2.5)$$

Dimana elemen m_{ij} , n_{ij} dan b_i ($i = 1,2$ dan $j = 1,2$) didapatkan dari matriks berikut:

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_Z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}; N = \begin{bmatrix} -Y_v & m \cdot u - Y_r \\ -N_v & mx_G \cdot u - N_r \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Dengan

$$\det(N) = Y_v(N_r - mx_G u) - N_v(Y_r - mu) \quad (2.7)$$

$$\det(M) = (m - Y_{\dot{v}})(I_Z - N_{\dot{r}}) - (mx_G - N_{\dot{v}})(mx_G - Y_{\dot{r}}) \quad (2.8)$$

$$b_1 = \frac{(I_Z - N_{\dot{r}})Y_{\delta} - (mx_G - Y_{\dot{r}})N_{\delta}}{\det(M)} \quad (2.9)$$

$$b_2 = \frac{(m - Y_{\dot{v}})N_{\delta} - (mx_G - N_{\dot{v}})Y_{\delta}}{\det(M)} \quad (2.10)$$

Untuk mendapatkan koefisien hidrodinamika pada kapal maka digunakan persamaan-persamaan berikut:

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

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

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

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

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

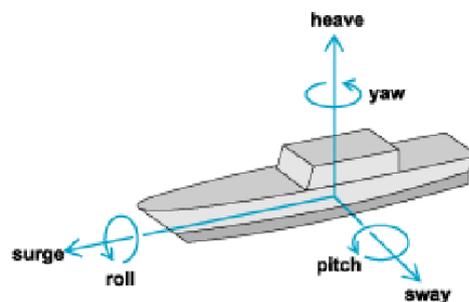
$$\frac{-Y_r'}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2,2\frac{B}{L} - 0,08\left(\frac{B}{T}\right) \quad (2.16)$$

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

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

Tabel 2. 1 Notasi yang digunakan pada dinamika angkutan laut (kapal) (Fossen, 1994)

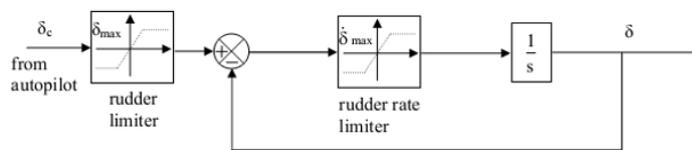
DOF	Gerak Kapal	<i>Forces and Moments</i>	<i>Linier and Angular Velocity</i>	<i>Potition and Euler Angles</i>
1	Dalam arah sumbu x (<i>surge</i>)	<i>X</i>	<i>u</i>	<i>x</i>
2	Dalam arah sumbu y (<i>sway</i>)	<i>Y</i>	<i>v</i>	<i>y</i>
3	Dalam arah sumbu z (<i>heave</i>)	<i>Z</i>	<i>w</i>	<i>z</i>
4	Rotasi terhadap sumbu x (<i>roll</i>)	<i>K</i>	<i>p</i>	ϕ
5	Rotasi terhadap sumbu y (<i>pitch</i>)	<i>M</i>	<i>q</i>	Θ
6	Rotasi terhadap sumbu z (<i>yaw</i>)	<i>N</i>	<i>r</i>	ψ



Gambar 2. 2 Enam derajat kebebasan gerakan pada kapal (Fossen, 1994)

2.3 Pemodelan Dinamika Rudder

Rudder merupakan suatu kemudi pada kapal yang memiliki fungsi untuk menentukan arah kapal sesuai dengan perintah kontroler (pengendali). Jenis kemudi yang sering digunakan pada kapal adalah tipe *Van Amorengen*. *Rudder* memiliki spesifikasi sudut dengan rentang antara -35° sampai 35° dengan laju kerja *rudder* yaitu $-7^\circ/s$ sampai $7^\circ/s$. Pada gambar 2.3 merupakan diagram blok untuk mensimulasikan dinamika dari *rudder* tipe *Van Amorengen*.



Gambar 2. 3 Diagram *control loop rudder* (Fossen, 1994)

Secara matematis, diagram blok pada gambar 2.3 dapat di dekati dengan persamaan (2.19):

$$\delta = \frac{K}{\sigma s + 1} \quad (2.19)$$

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

2.4 Pemodelan Dinamika Propeller

Propeller merupakan suatu alat penggerak kapal berbentuk baling-baling yang memiliki fungsi sebagai pengatur kecepatan kapal saat berlayar. Baling-baling yang terpasang pada kapal berperan untuk merubah gaya putar menjadi gaya dorong, sehingga semakin cepat putaran baling-baling maka akan semakin cepat kapal dalam berlayar (Fossen, 1994). *Propeller* pada kapal dapat dimodelkan secara matematis dengan pendekatan sebagai berikut (Oda, H., Ohtsu, K., Hotta, 1996):

$$\frac{Qm}{Y}(S) = \frac{Ky}{1+TyS} \quad (2.20)$$

dengan nilai Ty yang diperoleh dari persamaan:

$$Ty \approx 0,9 \frac{2\pi}{n} \quad (2.21)$$

Keterangan:

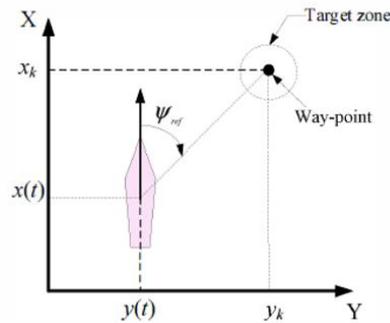
Ky : *Gain constant*

Ty : *Time constant*

n : *Rotation per second (propeller)*

2.5 Penentuan Trayektori Kapal

Dalam memandu kapal agar dapat berlayar sesuai dengan tujuan maka diperlukan sebuah jalur khusus yang dipersiapkan, sehingga kapal harus melakukan manuver untuk mengikuti jalur yang telah ditentukan.



Gambar 2. 4 Konsep pemanduan kapal (Lee et al., 2014)

Metode yang dipilih dalam pemanduan kapal dapat menggunakan *Line of Sight* (LOS). Sehingga *heading* pada kapal dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Psi_{ref}(t) = \tan^{-1} \left(\frac{y_k - y(t)}{x_k - x(t)} \right) \quad (2.22)$$

Dimana nilai (x_k, y_k) menunjukkan koordinat dari titik yang akan dituju oleh kapal (*target zone*) sedangkan koordinat $(x(t), y(t))$ adalah posisi kapal yang sebenarnya (*real point*) dan diperoleh dari hasil pengolahan GPS. Untuk mencapai target tujuan, kapal diharuskan berlayar melalui jalur yang telah ditentukan dan masuk ke dalam zona target di setiap *way-point* di sekitar radius referensi. Radius dari zona target (R_0) kira-kira sebesar dua kali panjang kapal tersebut. Setelah kapal memasuki lingkaran radius maka pendekatan yang digunakan untuk memandu kapal secara otomatis akan memilih untuk melanjutkan ke *way-point* setelahnya (x_{k+1}, y_{k+1}) (Lee et al., 2014).

$$(x_k - x(t))^2 + (y_k - y(t))^2 \leq R_0^2 \quad (2.23)$$

2.6 Pemodelan Gangguan Cuaca

Dalam proses simulasi pada dinamika kapal agar hasilnya mendekati keadaan yang sebenarnya, maka diperlukan adanya suatu gangguan dari luar (*disturbance*). Dalam memilih jenis gangguan dari luar maka harus memperhatikan pengaruh paling dominan yang ditimbulkan oleh gangguan tersebut. Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya memiliki pengaruh gangguan yang paling dominan terhadap

pengendalian trayektori dan sandar kapal yaitu berupa kecepatan arus laut. Pemodelan gangguan berupa kecepatan arus didekati dengan menggunakan model *Gauss-Markov process* orde satu (Fossen, 1994). Dengan persamaan model matematis sebagai berikut :

$$\dot{V}_c(t) + \mu_o V_c(t) = \omega(t) \quad (2.24)$$

Penyelesaian menggunakan deret Euler:

$$V_c(t) = \frac{V_c(0)}{0!} + \frac{t}{1!} \cdot \frac{\partial V_c}{\partial t} \quad (2.25)$$

Maka:

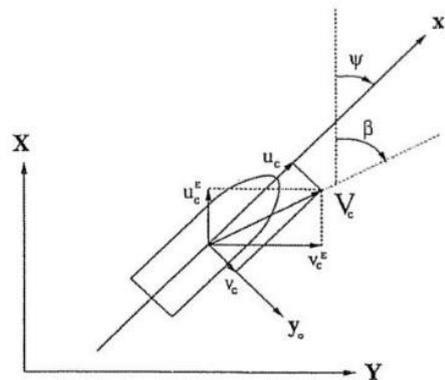
$$V_c(t) = V_c(0) + t (\omega(t) - \mu_o V_c(0)) \quad (2.26)$$

Keterangan:

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

μ_o : Constant value

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



Gambar 2. 5 Sistem koordinat (Fossen, 1994)

Tabel 2. 2 Definisi Simbol (Fossen, 1994)

Simbol	Definisi
ψ	Sudut arah kapal terhadap X (<i>yaw</i>)
U	Arah gerak kapal
β	Arah kecepatan terhadap X
α	Sudut arah kapal terhadap kecepatan kapal

Simbol	Definisi
δ	Sudut defleksi kemudi
V_c	Kecepatan arus

2.7 Sistem Logika *Fuzzy*

Banyak permasalahan dalam kehidupan sehari-hari yang tidak bisa diselesaikan dengan kata “ya” atau “tidak”. Tetapi diantara kedua kata tersebut terdapat beberapa nilai relatif yang dapat dinyatakan. Teori himpunan klasik (*crisp*) menjelaskan bahwa keberadaan suatu elemen hanya memiliki 2 kemungkinan keanggotaan (ya atau tidak). Oleh karena itu, Prof. L.A. Zadeh mencetuskan sebuah gagasan logika *fuzzy* dengan memodifikasi teori himpunan klasik dimana setiap anggotanya memiliki derajat keanggotaan yang bernilai kontinyu antara 0 sampai 1 dan disebut dengan himpunan *fuzzy* (*Fuzzy Set*) (Kusumadewi, 2002).

2.7.1 Himpunan *Fuzzy*

Himpunan *fuzzy* merupakan suatu keanggotaan dari suatu variabel *fuzzy*. Di dalam setiap variabel tersebut terdapat beberapa anggota yang memiliki nilai yang berbeda. Sebagai contoh setiap orang memiliki bentuk tubuh yang berbeda-beda, dari perbedaan tersebut dapat digolongkan menjadi 3 yaitu kurus, ideal, dan gemuk. Setiap variabel tersebut bisa memiliki *range* yang berbeda-beda sesuai dengan dasar kepakaran si perancang sistem logika *fuzzy*.

2.7.2 Struktur Dasar Logika *Fuzzy*

Dalam perancangan suatu logika *fuzzy* terdapat empat bagian yang berkaitan satu dengan yang lain, diantaranya:

- **Fuzzifikasi**

Fuzzifikasi merupakan pengubah *input* (*membership function*) yang bertujuan untuk memetakan variabel *crisp* (bentuk tegas) menjadi himpunan *fuzzy* (*variable linguistic*).

- **Menyusun *Rule Base***

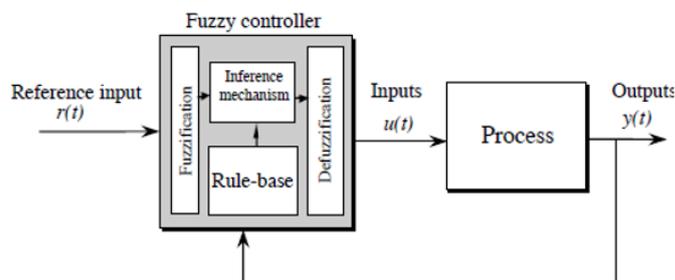
Berisi keputusan-keputusan (*if-then*) pada setiap hasil dari fuzzifikasi yang didapatkan dari kepakaran seseorang.

- **Fuzzy Inference**

Merupakan bagian penting dalam kerangka sistem logika *fuzzy* yang berfungsi sebagai operasi himpunan yang digunakan sehingga akan mendapatkan kesimpulan.

- **Defuzzifikasi**

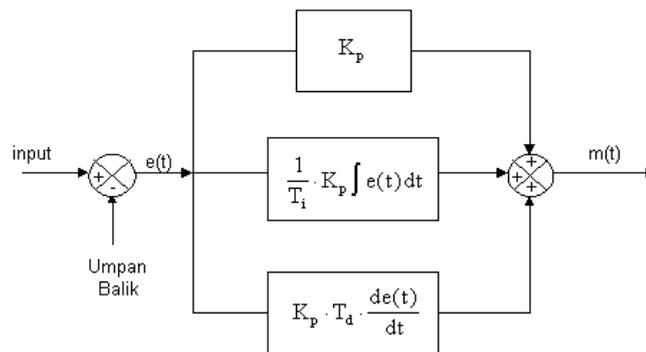
Defuzzifikasi merupakan tahap akhir dalam sistem kontrol logika *fuzzy* yaitu dengan mengubah kembali himpunan *fuzzy* menjadi himpunan *crisp*, sehingga akan didapat suatu penyelesaian.



Gambar 2. 6 Struktur kontrol logika *fuzzy* (Kusumadewi, 2002)

2.8 Mode Kontrol PID

Kontroler *PID* merupakan kombinasi dari 3 pengendali yaitu: Pengendali *Proportional*, pengendali *Integral*, dan pengendali *Derivative* yang disusun secara paralel sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.7. Ketiga jenis pengendali ini memberikan respon yang berbeda-beda pada proses orde satu, proses orde dua, maupun proses orde banyak. Untuk mempercepat kemampuan bereaksi maka diperlukan pengendali *derivative*, sehingga kekurangan yang ada pada pengendali *integral* dapat ditutupi. Jadi ketiga mode pengendali *Proportional*, *Integral*, dan *Derivative* masing-masing berguna untuk mempercepat reaksi sistem, menghilangkan *offset*, dan mendapatkan energi ekstra di saat-saat awal perubahan beban. Keluaran dari kontroler *PID* merupakan penjumlahan dari keluaran kontroler P, kontroler I, dan kontroler D.



Gambar 2. 7 Diagram blok pengendali PID (Ogata, 1996)

Pemodelan secara matematis dari kontrol *PID* dapat dinyatakan seperti persamaan berikut:

$$Gc(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (2.27)$$

Atau fungsi alihnya:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d}{s} \right) \quad (2.28)$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_p (1 + T_i s + T_i T_d s^2)}{T_i s} \quad (2.29)$$

Penggunaan mode kontrol baik *P*, *PI*, maupun *PID* disesuaikan dengan kebutuhan dan karakteristik dari proses yang dikendalikan (Ogata, 1996). Mode kontrol *P* digunakan apabila adanya *offset* masih dapat ditolerir oleh proses. Apabila tidak, maka mode kontrol *PI* dapat digunakan untuk memperbaiki performansi sistem dan sedangkan mode kontrol *PID* seringkali digunakan pada sistem pengendalian yang memiliki karakteristik pengendalian yang lambat seperti pengendalian temperatur. Untuk mendapatkan performansi yang optimal pada algoritma kontrol *PID* pada berbagai perubahan daerah operasi, *disturbance*, dan sesuai dengan kebutuhan proses maka perlu dilakukan penalaran terhadap nilai parameter kontrol *PID* (K_p , T_i , T_d).

2.9 Standar Kapal Dalam Bersandar

Untuk menyandarkan suatu kapal ke Dermaga maka diperlukan adanya sebuah mekanisme yang mengatur agar tidak terjadi kecelakaan, seperti tabrakan kapal dengan Dermaga, kapal kandas, tabrakan kapal dengan kapal lain, maupun kecelakaan lainnya. Untuk menangani permasalahan tersebut diperlukan kemahiran

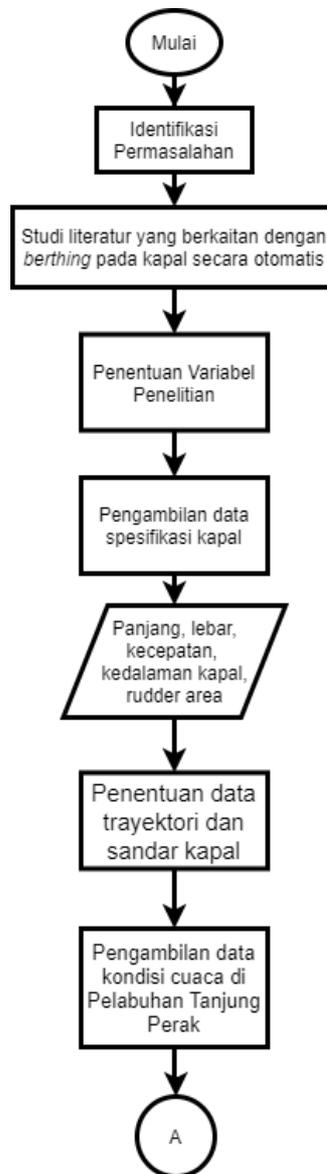
seorang nahkoda dalam mengendalikan kapal. Tujuan dari pemanduan kapal ini adalah untuk memberikan beberapa wawasan mengenai pemanduan kapal dalam bersandar. Nahkoda harus mengambil beberapa tindakan sebelum dan selama bersandar. Sebelum melakukan penyandaran kapal maka diperlukan perencanaan terhadap lintasan yang akan dilalui oleh kapal untuk memperhatikan bahaya yang mungkin terjadi. Apabila kapal membutuhkan bantuan kapal tunda (*tug boat*) maka perlu diperhatikan arah angin dan jumlah kapal tunda yang dibutuhkan. Apabila tidak menggunakan bantuan dari kapal tunda maka yang perlu diperhatikan pada saat bersandar adalah manuver kapal dengan menggunakan *thruster*, jarak antar kapal, dan kondisi pada saat melewati jalur yang sangat sempit (Murdoch, 2004).

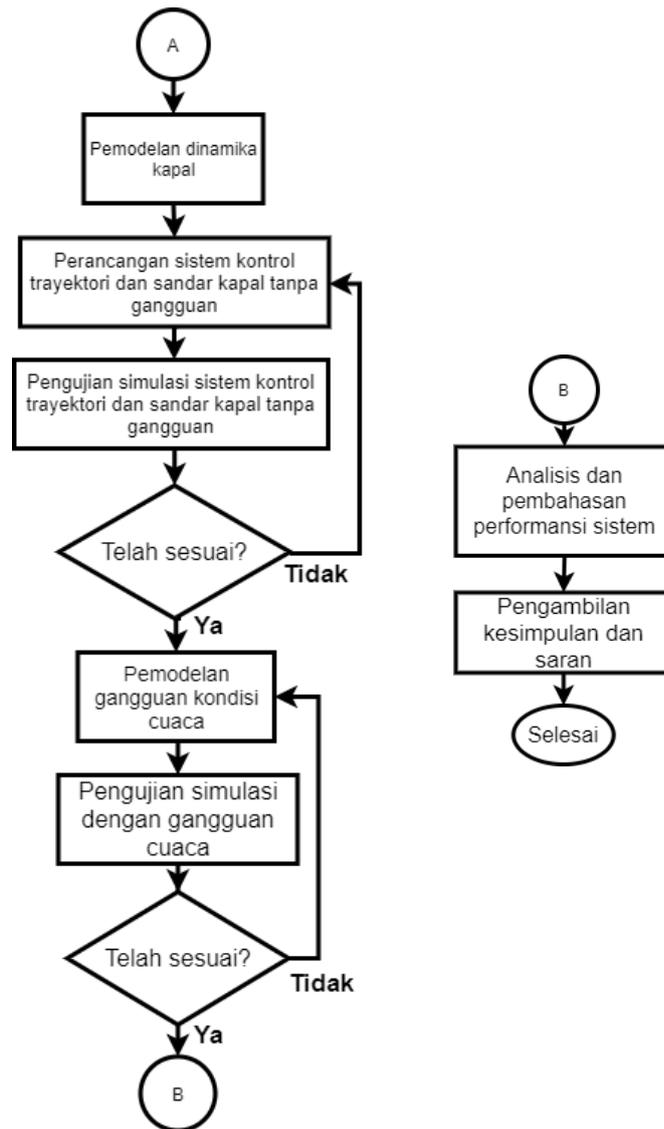
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian tugas akhir ini dibuat diagram alir tentang proses perancangan sistem kontrol sandar kapal otomatis seperti pada gambar 3.1 dengan beberapa tahapan pelaksanaan sebagai berikut:





Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

3.2 Identifikasi Permasalahan

Tahap ini berisi rumusan-rumusan permasalahan menarik yang dihadapi oleh penulis, dan berusaha untuk dibedah menjadi lebih rinci maupun lebih jelas sehingga akan dapat diselesaikan permasalahan tersebut.

3.3 Studi Literatur

Pada tahap ini terdiri dari pencarian dan pemahaman literatur seperti artikel maupun jurnal-jurnal ilmiah tentang otomasi sandar kapal dan beberapa referensi dari penelitian sebelumnya. Selain itu juga dilakukan pendalaman materi terhadap manuver kapal, trayektori yang akan dilintasi oleh kapal, dan sistem kontrol otomatis dengan menggunakan logika *fuzzy*. Karena penelitian ini dilakukan

secara simulasi dengan menggunakan Matlab R2019a maka diperlukan studi pembelajaran tentang program yang akan dijalankan.

3.4 Penentuan Variabel Penelitian

Tahap ini berisi variabel-variabel penelitian yang akan diteliti lebih lanjut, seperti parameter pengendalian *fuzzy* terbaik, dan nilai performansi sistem sehingga nantinya akan berkaitan dengan data-data yang dibutuhkan dalam penelitian, seperti aktuator berupa *rudder*, dan *thruster*.

3.5 Pengambilan Data Spesifikasi Kapal

Data yang diperlukan sebagai acuan manuver pada kapal motor penumpang (KMP) Legundi Surabaya dengan menggunakan model Nomoto orde II adalah sebagai berikut (Fossen, 1994):

L_{pp} (Panjang, m)	= 99,2
B (Lebar, m)	= 19,6
T (Kedalaman, m)	= 4,1
Δ (<i>Displacement</i> , ton)	= 3120,07
U (Kecepatan, m/s)	= 7,7
C_B (<i>Coefficient Block</i>)	= 0,567
X_G (<i>Center of Gravity</i>)	= 8,417
A_δ (<i>Rudder Area</i> , m ²)	= 7,19
r (Jari-jari, m)	= 22,32
m'	= 0,000005212

3.6 Penentuan Data Trayektori dan Sandar Kapal

Lintasan yang digunakan sebagai jalur bersandarnya kapal ditentukan oleh posisi kapal terakhir yang masuk ke dalam area sandar kapal. Dengan koordinat titik-titik seperti pada tabel 3.1:

Tabel 3. 1 Letak koordinat proses kapal bersandar

Letak Titik	Koordinat GPS (DMS)	Koordinat UTM (Penyederhanaan)
Posisi Awal Kapal	07 ⁰ 10' 57.6''LS dan 112 ⁰ 45' 04.5''BT	(0, 0) m
2	07 ⁰ 10' 59.7''LS dan 112 ⁰ 44' 55.4''BT	(279, -64) m

Letak Titik	Koordinat GPS (DMS)	Koordinat UTM (Penyederhanaan)
3	07 ⁰ 11' 01.8''LS dan 112 ⁰ 44' 46.2''BT	(562, -127) m
4	07 ⁰ 11' 04.5''LS dan 112 ⁰ 44' 37.4''BT	(832, -209) m
5	07 ⁰ 11' 07.6''LS dan 112 ⁰ 44' 29.9''BT	(1063, -303) m
6	07 ⁰ 11' 12.1''LS dan 112 ⁰ 44' 22.4''BT	(1293, -441) m
7	07 ⁰ 11' 18.2''LS dan 112 ⁰ 44' 15.8''BT	(1497, -627) m
8	07 ⁰ 11' 25.6''LS dan 112 ⁰ 44' 11.2''BT	(1639, -854) m
9	07 ⁰ 11' 28.4''LS dan 112 ⁰ 44' 09.1''BT	(1703, -940) m
10	07 ⁰ 11' 31.7''LS dan 112 ⁰ 44' 05.5''BT	(1814, -1041) m
11	07 ⁰ 11' 35.0''LS dan 112 ⁰ 44' 02.0''BT	(1922, -1142) m
12	07 ⁰ 11' 39.1''LS dan 112 ⁰ 43' 58.2''BT	(2039, -1267) m
13	07 ⁰ 11' 42.6''LS dan 112 ⁰ 43' 53.5''BT	(2184, -1374) m
14	07 ⁰ 11' 44.3''LS dan 112 ⁰ 43' 49.6''BT	(2304, -1426) m
15	07 ⁰ 11' 46.4''LS dan 112 ⁰ 43' 44.7''BT	(2454, -1490) m
16	07 ⁰ 11' 47.9''LS dan 112 ⁰ 43' 39.6''BT	(2611, -1536) m
17	07 ⁰ 11' 48.6''LS dan 112 ⁰ 43' 36.4''BT	(2709, -1557) m
<i>Way Point</i>	07 ⁰ 11' 49.0''LS dan 112 ⁰ 43' 32.8''BT	(2820, -1569) m
Posisi Sandar Kapal	07 ⁰ 11' 50.6''LS dan 112 ⁰ 43' 32.9''BT	(2820, -1618) m

Pada tahapan kapal bersandar, mesin kapal harus berhenti pada 3 kali lebar kapal (*Way Point*) sebesar 49 m sebelum mencapai dermaga. Kemudian *Bow Thruster* dan *Stern Thruster* akan bekerja perlahan-lahan dalam menyandarkan badan kapal ke bibir dermaga sesuai dengan trayektori dan posisi arah kapal. Gambar 3.2 merupakan alur pelayaran kapal sekaligus bersandar dari posisi awal hingga tepi dermaga Jamrud Utara.



Gambar 3. 2 Jalur pelayaran dan sandar kapal KMP Legundi Surabaya



Gambar 3. 3 Posisi sandar kapal pada tepi Dermaga Jamrud Utara

3.7 Pengambilan Data Kondisi Cuaca di Pelabuhan Tanjung Perak

Pada tahap ini dilakukan pengambilan data-data cuaca di sekitar pelabuhan Tanjung Perak seperti kecepatan gelombang, arus laut, dan kecepatan angin melalui Stasiun BMKG setempat. Kemudian dari data tersebut dipilih yang paling dominan mempengaruhi dalam proses sandar kapal di Dermaga Jamrud Utara yaitu berupa kecepatan arus laut.

3.8 Pemodelan Dinamika Kapal

Pada tahap ini pemodelan dilakukan berdasarkan data spesifikasi kapal dan diolah dengan menggunakan pendekatan matematis Nomoto orde II (Fossen, 1994). Nilai-nilai parameter yang telah diketahui kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan (2.11-2.18) untuk mendapatkan koefisien hidrodinamika kapal sehingga diperoleh nilai sebagai berikut:

$$\begin{array}{ll}
 -Y'_v = 0,00663 & -Y'_r = 0,00031 \\
 -N'_v = 0,000114 & -N'_r = 0,00034 \\
 -Y'_v = 0,01119 & -Y'_r = -0,0024 \\
 -N'_v = 0,003215 & -N'_r = 0,00175 \\
 Y'_\delta = 14,24526 & N'_\delta = -7,12263
 \end{array}$$

Berdasarkan nilai di atas kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan (2.6) dan diperoleh hasil sebagai berikut:

$$\begin{array}{l}
 M' = \begin{bmatrix} 0,00663 & 0,00035 \\ 0,00015 & 0,00329 \end{bmatrix}; M = \begin{bmatrix} 0,01109 & 0,05873 \\ 0,00026 & 0,54672 \end{bmatrix} \\
 N' = \begin{bmatrix} 0,01118 & -0,00235 \\ 0,00321 & 0,00208 \end{bmatrix}; N = \begin{bmatrix} 0,00145 & -0,0304 \\ 0,00041 & 0,02687 \end{bmatrix} \\
 b = \begin{bmatrix} 8,17346 \\ -8,17827 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Sehingga

$$T1T2 = 166,947$$

$$K_R = 295,634$$

$$T1 + T2 = 20,797$$

$$K_RT3 = 1795,605$$

Maka fungsi transfer kapal motor penumpang Legundi Surabaya berdasarkan persamaan (2.1) adalah seperti berikut:

$$\frac{\psi}{\delta_r}(s) = \frac{1795,605s+295,634}{116,947s^3+20,797s^2+s} \quad (3.1)$$

Dalam pemodelan *rudder*, keluaran dari KLF berupa *command rudder* (δ_c) diubah menjadi *actuator rudder* (δ_a). *Rudder* yang digunakan memiliki spesifikasi Vcc sebesar 380 volt dan *time constant* sebesar 0,05 sehingga didapatkan persamaan fungsi transfer sesuai persamaan (2.19) yaitu:

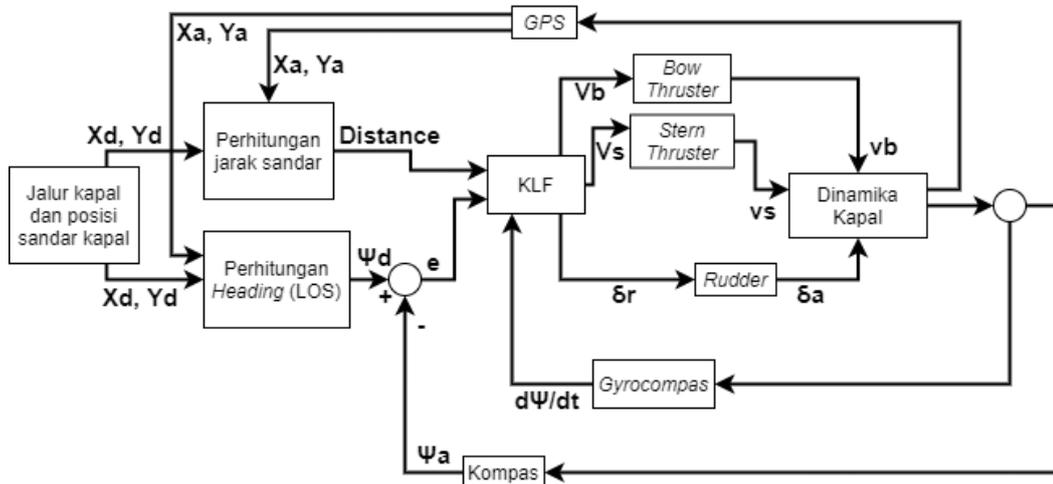
$$\delta = \frac{0,6/380}{0,05s+1} \quad (3.2)$$

Pemodelan *propeller* sebagai penggerak utama kapal dilakukan menggunakan pendekatan dari (Oda, H., Ohtsu, K., Hotta, 1996). Pemodelan dari spesifikasi kapal nilai K_y (*Gain constant*) adalah 1, dan n *propeller* 500 rpm. Dari hasil perhitungan T_y pada persamaan (2.21) didapat nilai 0,339 sehingga didapatkan fungsi transfer sesuai persamaan (2.20) yaitu:

$$\frac{Qm}{Y}(S) = \frac{1}{1+0,339s} \quad (3.3)$$

3.9 Perancangan Sistem Kontrol Trayektori dan Sandar Kapal tanpa Gangguan

Perancangan kontrol trayektori sekaligus sandar pada kapal Legundi Surabaya ini berbasis KLF dengan diagram blok seperti gambar 3.4.



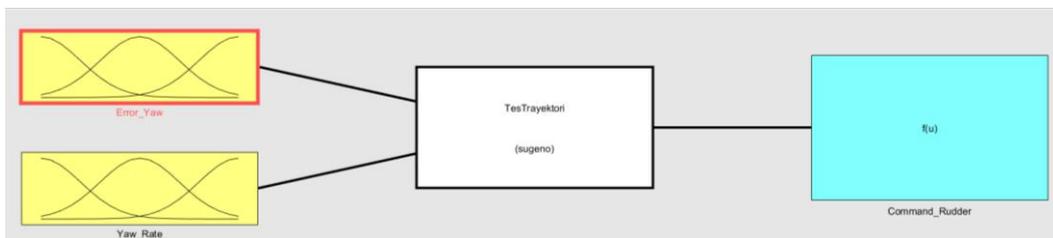
Gambar 3. 4 Diagram blok perancangan pengendalian tanpa gangguan

Diagram blok pada gambar 3.4 menjelaskan proses pengendalian yang harus dilalui kapal dalam berlayar sekaligus bersandar pada Dermaga Jamrud Utara melalui jalur yang telah ditentukan. *Set point* dari jalur kapal dan posisi sandar kapal menjadi masukan untuk mengatur sudut *heading* dari pergerakan kapal (saat berlayar) dan juga untuk mengatur *output* tegangan *bow thruster* dan *stern thruster* (saat bersandar). Pada penelitian ini memiliki tiga buah aktuator, yaitu *rudder* saat berlayar, maupun *bow thruster* dan *stern thruster* saat bersandar. Posisi dan arah kapal ditunjukkan oleh GPS dan kompas sebagai komponen sensor.

3.9.1 Perancangan Sistem Kontrol Logika Fuzzy untuk Proses Trayektori

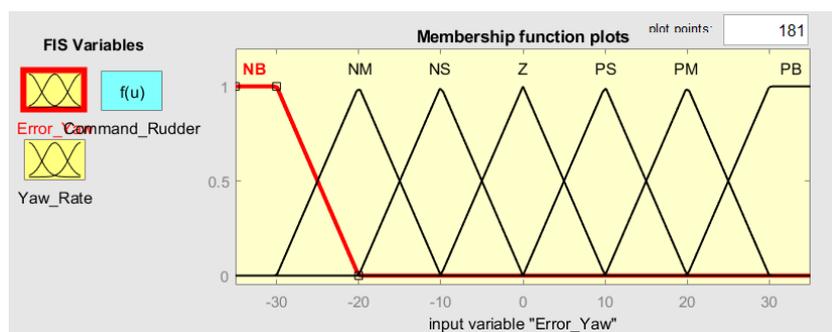
- **Fuzzifikasi**

Pada tahap ini digunakan kontroler yang bekerja dengan MISO (*Multi Input dan Single Output*) yaitu dengan *input error yaw* dan *yaw rate* sebagai pengatur dalam berlayar, dan menghasilkan *output* berupa *command rudder* (δa) yang berpengaruh terhadap arah gerak kapal dalam mengikuti trayektori yang telah ditentukan. Pendekatan dalam pemilihan fungsi keanggotaan dengan menggunakan metode Sugeno menghasilkan keluaran berupa nilai pasti (*single tone*) dari kontrol logika fuzzy tersebut. Perancangan kontrol logika fuzzy ditunjukkan pada gambar 3.5.



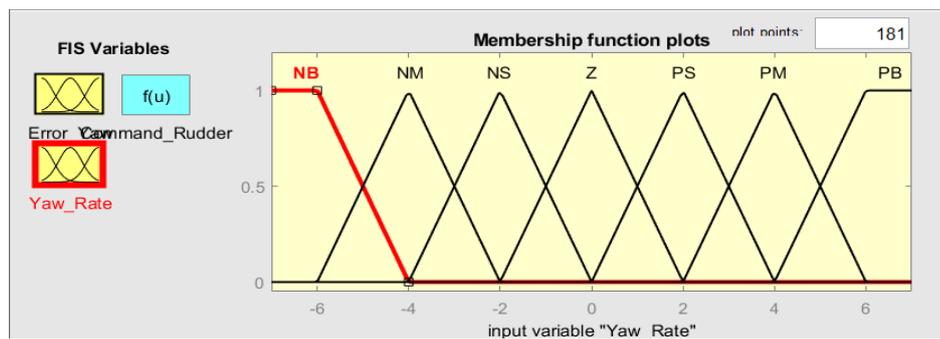
Gambar 3. 5 Perancangan sistem KLF proses trayektori

Nilai masukan dari *error yaw* pada gambar 3.6 menunjukkan 7 tingkatan yaitu *Negative Big* (NB), *Negative Medium* (NM), *Negative Small* (NS), *Zero* (Z), *Positive Small* (PS), *Positive Medium* (PM), dan *Positive Big* (PB) dengan rentang nilai antara -35^0 sampai 35^0 . Pemilihan fungsi keanggotaan ini berbentuk segitiga dan trapesium karena akan menghasilkan nilai terbaik untuk sistem berupa aktuator.



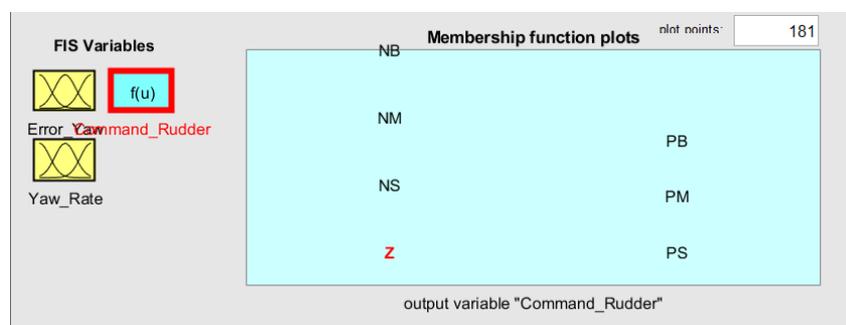
Gambar 3. 6 Membership function error yaw

Nilai masukan pada *yaw rate* dibagi menjadi 7 bagian juga yaitu *Negative Big* (NB), *Negative Medium* (NM), *Negative Small* (NS), *Zero* (Z), *Positive Small* (PS), *Positive Medium* (PM), dan *Positive Big* (PB) dengan rentang nilai antara $-7^0/s$ sampai $7^0/s$. Untuk fungsi keanggotannya ditunjukkan pada gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Membership function yaw rate

Berikut adalah hasil keluaran yang diharapkan dari *command rudder* yang dapat mewakili arah gerak kapal dengan rentang -35^0 sampai 35^0 .



Gambar 3. 8 Membership function command rudder

• Rule Base

Dalam sistem KLF membutuhkan suatu nilai dari kepakaran yang ditentukan oleh perancang. *Rule base* disusun harus dapat merepresentasikan hasil yang mendekati kebenaran jika diterapkan pada sistem yang sebenarnya. Tabel 3.2 merupakan *rule base* yang digunakan dalam mengendalikan *rudder*.

Tabel 3. 2 Rule base pada pengendalian proses berlayar

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

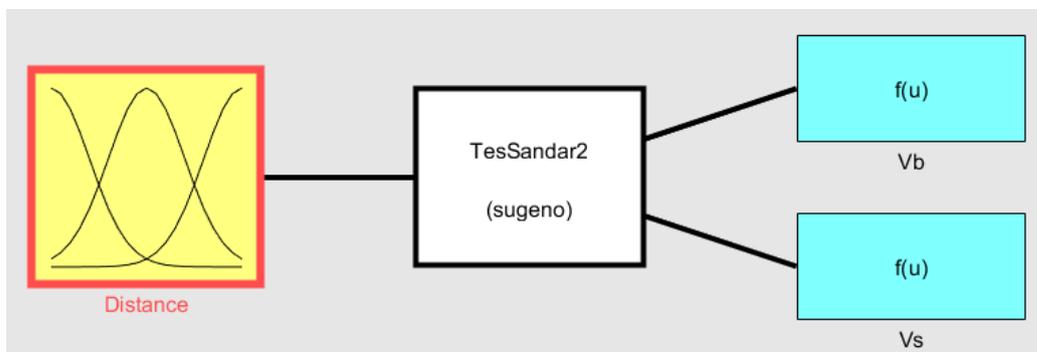
• Defuzzifikasi

Input dari proses defuzzifikasi merupakan himpunan *fuzzy* yang diperoleh dari *rule base* yang telah disusun sebelumnya. *Output* dari *rule base* masih dalam domain bentuk himpunan *fuzzy*, oleh karena itu harus diubah kembali menjadi bentuk himpunan *crisp*. Untuk metode Sugeno yang digunakan adalah defuzzifikasi berjenis *average*.

3.9.2 Perancangan Sistem Kontrol Logika Fuzzy untuk Proses Sandar

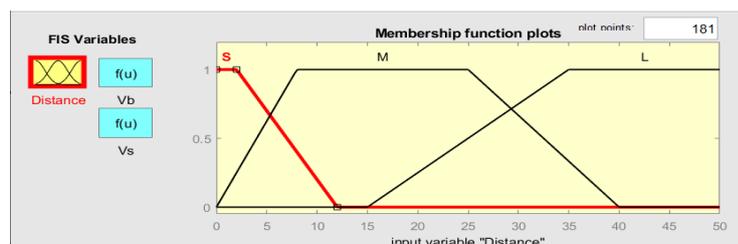
• Fuzzifikasi

Pada tahap ini digunakan kontroler yang bekerja dengan SIMO (*Single Input* dan *Multi Output*) yaitu dengan *input distance* sebagai pengatur dalam bersandar, dan menghasilkan 2 *output* berupa tegangan *bow thruster* (V_b) dan *stern truster* (V_s) yang berpengaruh terhadap gerak kapal dalam proses bersandar. Pendekatan dalam pemilihan fungsi keanggotaan dengan menggunakan metode Sugeno menghasilkan keluaran berupa nilai pasti (*single tone*) dari kontrol logika *fuzzy* tersebut. Perancangan kontrol logika *fuzzy* ditunjukkan pada gambar 3.9



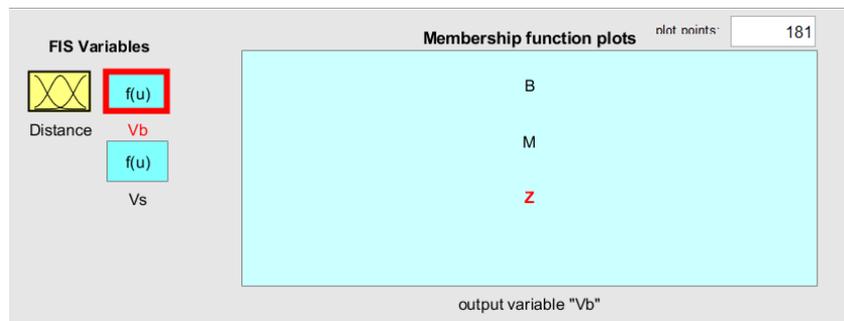
Gambar 3. 9 Perancangan sistem KLF proses sandar

Nilai masukan pada gambar 3.10 menunjukkan rentang jarak kapal yang dibagi menjadi 3 bagian yaitu *Short* (S), *Medium* (M), dan *Long* (L) dengan rentang nilai antara 0 sampai 50 meter dari bibir dermaga.

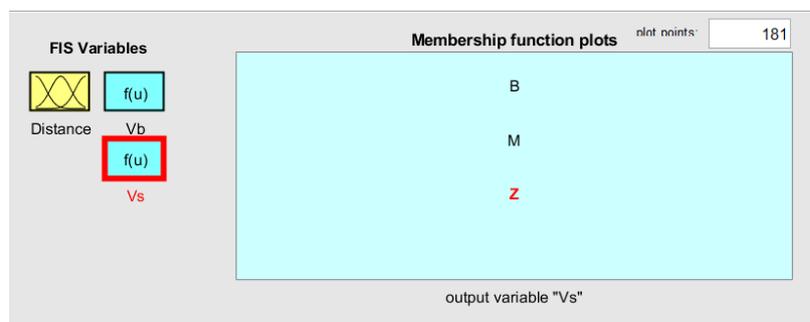


Gambar 3. 10 Membership function distance

Gambar 3.11 dan gambar 3.12 menunjukkan nilai keluaran dari KLF sandar berupa tegangan yang memiliki 3 tingkatan yaitu *Zero (Z)*, *Medium (M)*, dan *Big (B)*. Dengan rentang nilai antara 0 Volt sampai 6 Volt sesuai dengan spesifikasi motor yang digunakan sebagai penggerak *bow thruster* dan *stern thruster*.



Gambar 3. 11 Membership function tegangan bow thruster



Gambar 3. 12 Membership function tegangan stern thruster

• Rule Base

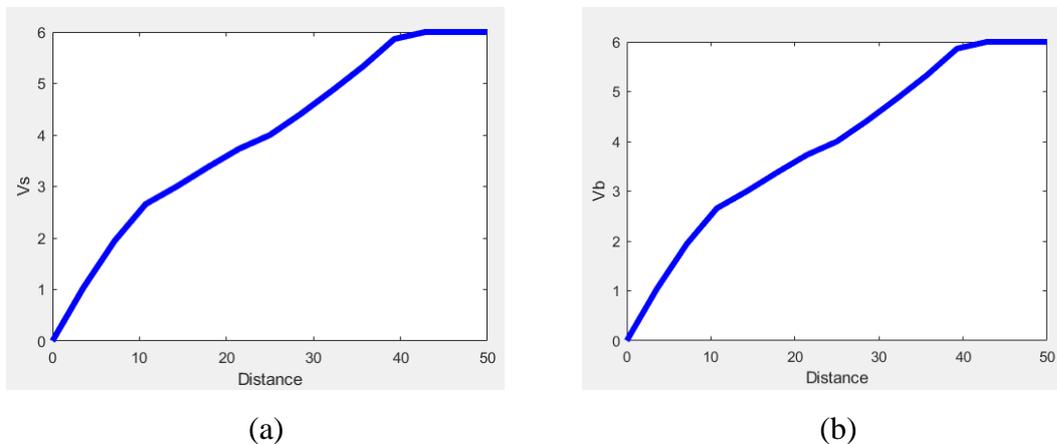
Rule base diterapkan berdasarkan masukan berupa jarak kapal dengan bibir dermaga dan keluaran berupa tegangan *bow thruster* maupun *stern thruster* yang mempengaruhi kecepatan pergerakan sandar kapal. Tabel 3.3 merupakan *rule base* yang digunakan dalam mengendalikan *bow thruster* dan *stern thruster*.

Tabel 3. 3 Rule base pada pengendalian proses bersandar

<i>Distance</i>	<i>Output</i>	
	Vb	Vs
L	B	B
M	M	M
S	Z	Z

Berdasarkan *rule base* yang telah diterapkan maka akan diperoleh hasil *surface area* dengan sumbu x adalah jarak kapal dengan bibir dermaga, sedangkan sumbu y

adalah tegangan keluaran dari *bow thruster* dan *stern thruster*. Hasil *surface area* dapat dilihat seperti pada gambar 3.13.



Gambar 3. 13 *Surface viewer* (a) tegangan *stern thruster* (b) tegangan *bow thruster*

• Defuzzifikasi

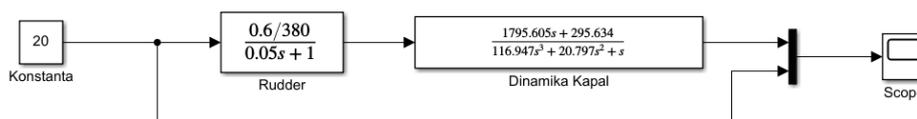
Input dari proses defuzzifikasi merupakan himpunan *fuzzy* yang diperoleh dari *rule base* yang telah disusun sebelumnya. *Output* dari *rule base* masih dalam domain bentuk himpunan *fuzzy*, oleh karena itu harus diubah kembali menjadi bentuk himpunan *crisp*. Untuk metode Sugeno yang digunakan adalah defuzzifikasi berjenis *average*.

3.10 Pengujian Simulasi tanpa Gangguan

Agar dapat mengetahui sistem yang dirancang sudah sesuai atau belum dengan tujuan, maka dilakukan beberapa jenis pengujian dengan menggunakan *tools* Matlab. Terdapat beberapa jenis pengujian yang telah dilakukan diantaranya:

3.10.1 Pengujian *Open Loop Rudder*

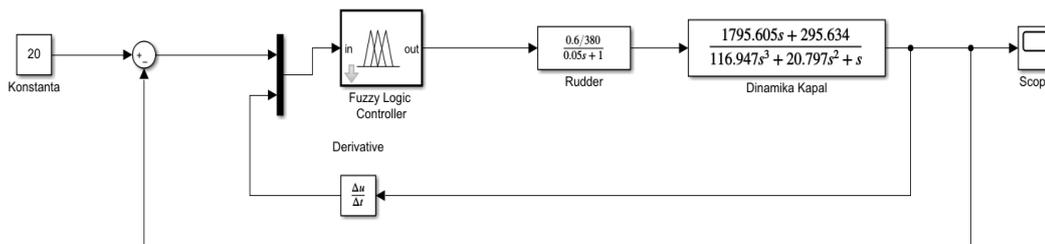
Pada tahap ini diberikan input berupa konstanta sebesar 20^0 dan 30^0 yang merupakan ketentuan dari pengujian manuver kapal IMO (*International Maritime Organization*). Gambar 3.14 merupakan pengujian *open loop* dengan fungsi transfer *rudder* dan dinamika kapal sebagai bagian komponen pengujian.



Gambar 3. 14 Uji *open loop rudder*

3.10.2 Pengujian *Close Loop Rudder*

Pengujian tahap ini diberikan input berupa konstanta sebesar 20^0 dan 30^0 seperti pada gambar 3.15, kemudian masuk ke dalam kontroler yang berbasis *fuzzy* Sugeno-Takagi. Hasil keluaran dari kontroler tersebut menjadi masukan *command rudder* untuk fungsi transfer *rudder* dan memberikan besar sudut yang mengatur kemudi kapal.

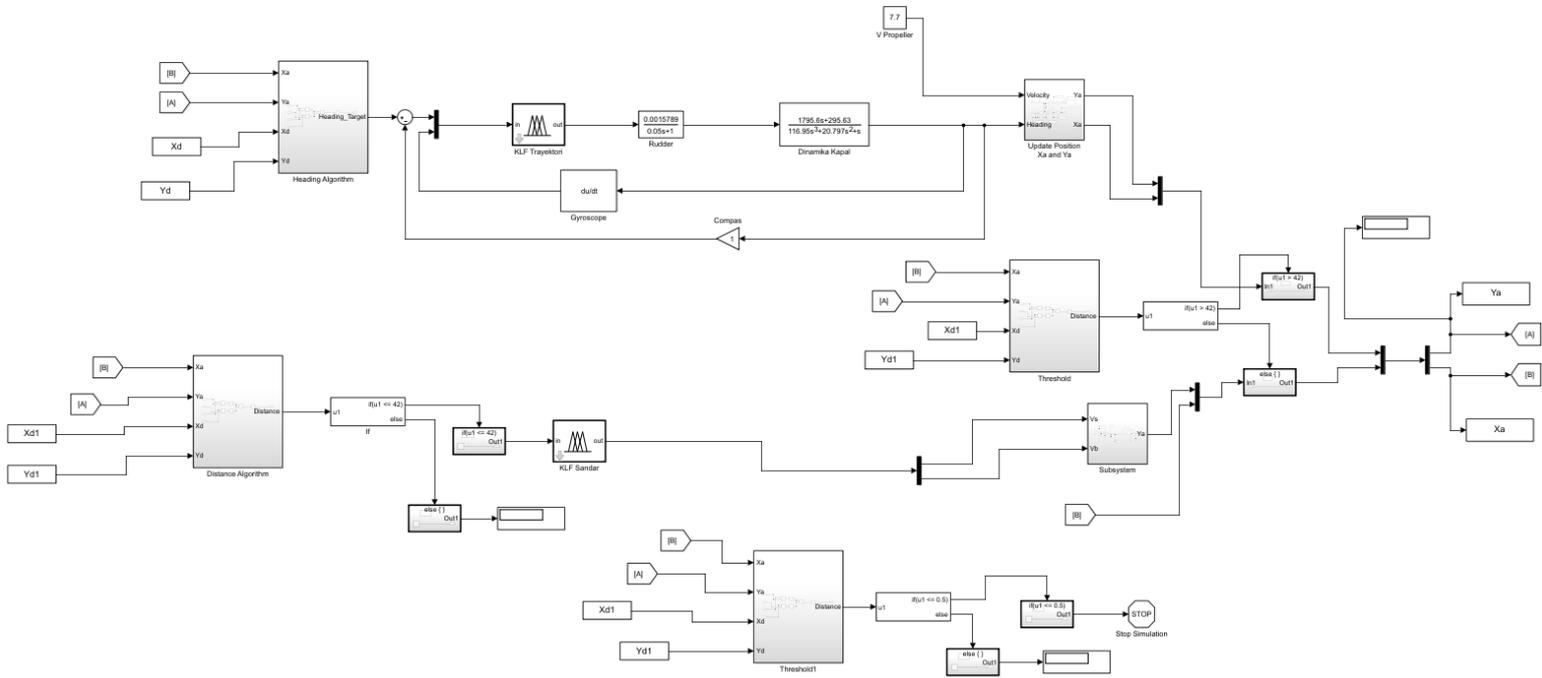


Gambar 3. 15 Uji *close loop rudder*

3.10.3 Pengujian Trayektori dan Sandar Kapal

Pada tahap pengujian trayektori kapal diperlukan beberapa sensor yaitu kompas, *gyrocompas*, dan GPS. Dari sensor tersebut akan didapatkan koordinat posisi kapal dengan arah kapal (*yaw*) dan kecepatan kapal. Pada saat kapal berlayar melintasi trayektori maka GPS akan mendeteksi posisi kapal dan akan mengarahkan kapal pada tujuan sandar kapal. Dari pengujian ini belum digunakan gangguan berupa arus laut sehingga diharapkan kapal dapat berjalan sesuai dengan *set point* yang telah ditentukan.

Untuk tahap pengujian sandar kapal tidak lagi menggunakan aktuator berupa *rudder* dan *propeller*, melainkan *bow thruster* dan *stern thruster*. Kontrol tegangan yang di *supply* untuk memutar baling-baling *thruster* berpengaruh terhadap arah gerak *sway*. Dari posisi jarak berhentinya kapal (uji trayektori) kapal akan bergerak menepi ke bibir dermaga sesuai dengan *set point* yang ditetapkan. Sensor jarak digunakan untuk mengetahui selisih antara posisi kapal dengan posisi dermaga. Simulasi program pengujian trayektori dan sandar kapal dapat dilihat seperti pada gambar 3.16.



Gambar 3. 16 Simulasi program pengujian trayektori dan sandar kapal tanpa gangguan (*without disturbance*)

3.11 Pemodelan Gangguan Kondisi Cuaca

Pemodelan gangguan kondisi cuaca pada Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya dipilih berupa kecepatan arus, hal ini dikarenakan yang paling dominan mempengaruhi proses berlayar dan bersandar kapal disana adalah kecepatan arus. Pemodelan ini menggunakan *Gauss-Markov process* seperti pada persamaan (2.26). Dengan kecepatan maksimum arus bervariasi dari 1; 1,5; dan 2 knot sehingga akan diperoleh hasil sebagai berikut:

Untuk kecepatan arus sebesar 1 knot:

$$V_c(t) = 0,514 + t(\omega(t) - 0,0514) \tag{3.4}$$

Untuk kecepatan arus sebesar 1,5 knot:

$$V_c(t) = 0,772 + t(\omega(t) - 0,0772) \tag{3.5}$$

Untuk kecepatan arus sebesar 2 knot:

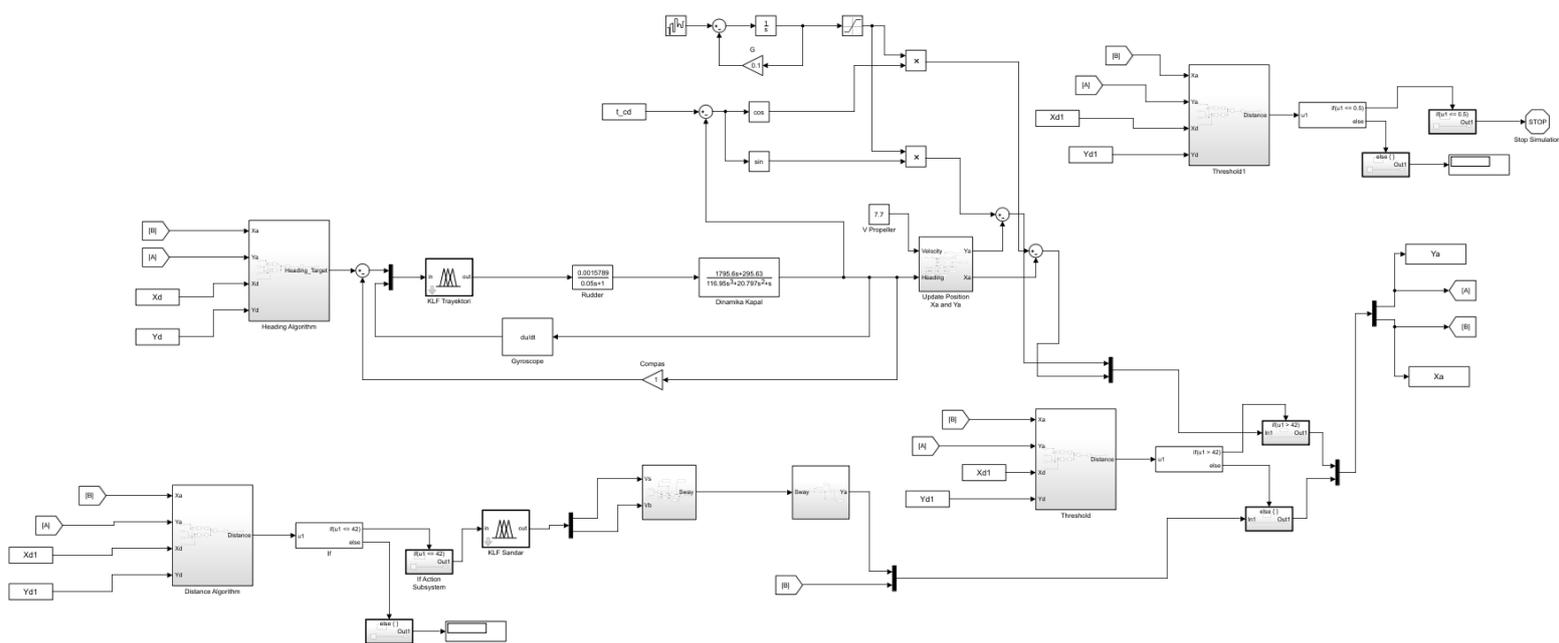
$$V_c(t) = 1,029 + t(\omega(t) - 0,1029) \tag{3.6}$$

Gangguan kecepatan arus ini dibuat dengan jenis gangguan yang tidak dapat diprediksi sebelumnya dengan masukan berupa fungsi *white noise* yang nilainya

berubah-ubah terhadap fungsi waktu sehingga diharapkan dengan hasil ini dapat mendekati keadaan yang sebenarnya.

3.12 Pengujian Simulasi dengan Gangguan Cuaca

Pada tahap ini dilakukan pengujian simulasi namun ditambahkan dengan gangguan (*disturbance*) berupa kecepatan dan arah arus. Hal ini dikarenakan agar hasil simulasinya nanti akan semakin mendekati keadaan yang sebenarnya di kondisi nyata. Dari sistem yang telah dirancang sebelumnya ditambahkan gangguan yang diletakkan setelah *plant* (dinamika kapal). Diharapkan kontroler akan tetap dapat bekerja dengan baik meskipun terdapat gangguan dari luar sistem. Pada pengendalian trayektori diharapkan menghasilkan *error* yang kecil antara *track desired* dengan *track actual*, sedangkan pada pengendalian sandar kapal diharapkan manuver kapal dapat dikendalikan dengan baik sehingga dapat bersandar dengan sempurna. Simulasi percobaan dengan gangguan cuaca ditunjukkan seperti pada gambar 3.17.



Gambar 3. 17 Simulasi program pengujian trayektori dan sandar kapal dengan gangguan (*with disturbance*)

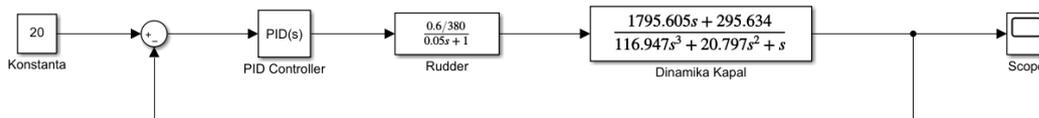
3.13 Analisis dan Pembahasan Performansi Sistem

Pada tahap ini dilakukan analisis dan pembahasan dari hasil pengujian yang telah dilakukan, baik menggunakan sistem logika *fuzzy* maupun pengendali konvensional PID. Berdasarkan hasil yang diperoleh dapat dievaluasi apakah

program yang dirancang (sistem logika *fuzzy*) sudah sesuai dengan *set point* yang diharapkan atau belum, dan juga apakah memiliki keunggulan dibanding pengendali konvensional PID atau tidak.

Pada proses simulasi pengendalian sistem logika *fuzzy*, hasil yang didapatkan masih berupa nilai yang bersifat belum berdimensi, hal ini agar mempermudah dalam proses pengendalian gerak kapal secara otomatis, sehingga apabila telah didapatkan nilai hasil simulasi (belum berdimensi) maka setelah itu dilakukan proses pendimensian hasil dengan cara nilai yang sebelumnya didapatkan dikalikan dengan panjang kapal (L) dalam satuan meter, lalu dibagi dengan *service speed* kapal Legundi Surabaya (u) dalam satuan m/s.

Pengendali konvensional PID dilakukan pengujian pada tahap ini dengan diberikan *input* berupa konstanta sebesar 20^0 dan 30^0 seperti pada gambar 3.18, kemudian masuk ke dalam kontroler PID. Hasil keluaran dari kontroler tersebut menjadi masukan untuk fungsi transfer *rudder* dan selanjutnya akan mempengaruhi hasil respon sistem yang berasal dari dinamika kapal. Dalam menentukan besaran parameter pengendali (K_p , T_i , dan T_d) dilakukan metode secara *auto tuning* dalam *software* Simulink-Matlab dengan pemilihan metode berdasarkan fungsi transfer yang disusun dalam diagram blok.



Gambar 3. 18 Uji *close loop rudder* berbasis PID

3.14 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Tahap ini berisi jawaban dari permasalahan-permasalahan yang telah dirumuskan untuk dicari solusinya, selain itu terdapat pula saran-saran dari penulis tentang hasil penelitian yang didapatkan agar dikemudian hari penelitian yang sejenis dapat menjadi lebih baik hasilnya.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

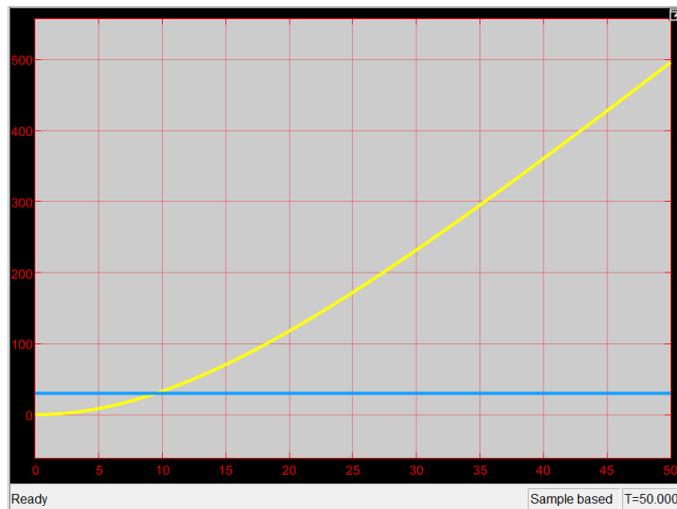
Penelitian ini menjelaskan tentang simulasi pengendalian Kapal Motor Penumpang (KMP) Legundi Surabaya dengan menggunakan metode kontrol logika *fuzzy* Sugeno-Takagi untuk membantu kapal dalam melakukan proses berlayar sekaligus bersandar secara otomatis dari pelabuhan Lembar menuju pelabuhan Tanjung Perak Surabaya. Untuk itu dalam tahapan pertama dilakukan pengujian *open loop* dan *close loop* terhadap *rudder* kapal untuk dapat mengetahui hasil kinerja rancangan KLF yang dibuat, kemudian tahap selanjutnya dilakukan uji pengendalian trayektori kapal otomatis baik tanpa gangguan maupun dengan gangguan, selanjutnya tahap yang ketiga adalah uji pengendalian sandar kapal secara otomatis, serta tahap terakhir adalah membandingkan hasil kinerja KLF yang dirancang dengan pengendali konvensional PID terhadap uji *close loop rudder*.

4.1 Analisis Pengujian Sistem Kontrol *Rudder* Berbasis KLF

Pengujian ini dapat dilakukan setelah mendapatkan fungsi transfer dari *rudder* kapal (3.2) dan dinamika kapal (3.1). Pada kedua fungsi transfer ini dilakukan pengujian *open loop* tanpa adanya kontroler yang bekerja sehingga pada gambar 4.1 dan gambar 4.2 dapat dilihat grafik terus naik dan tidak terkendali. Pada pengujian ini diberikan masukan *heading rudder* sebesar 20^0 dan 30^0 sesuai dengan standar *International Maritime Organization* (IMO).

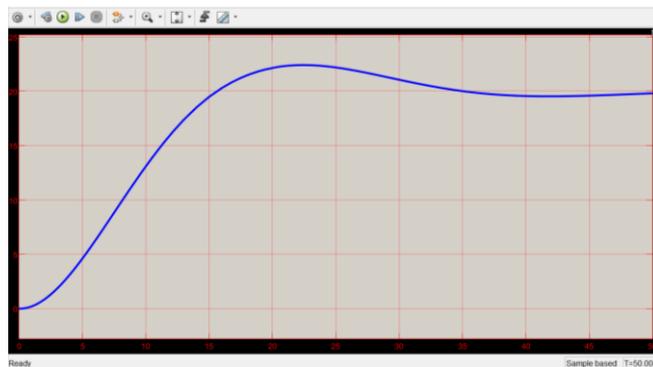


Gambar 4.1 Hasil uji *openloop* rudder 20^0 (kapal tak berdimensi)

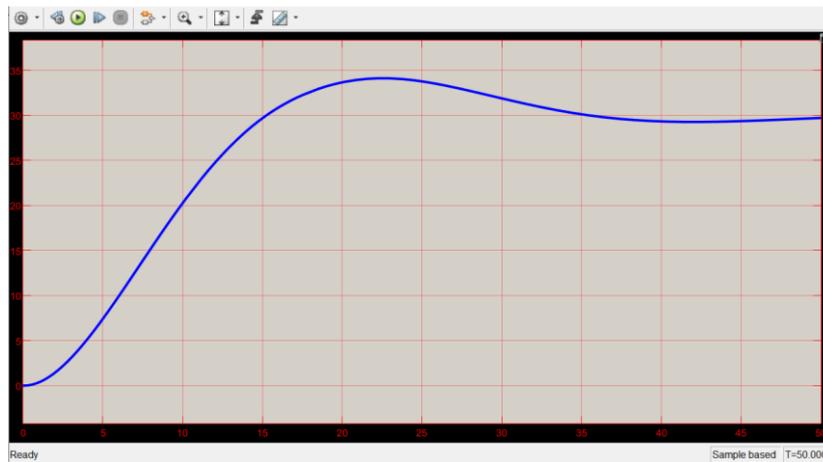


Gambar 4. 2 Hasil uji *openloop* rudder 30^0 (kapal tak berdimensi)

Tahap selanjutnya adalah melihat respon dari kontroler yang telah dirancang menggunakan KLF dengan masukan berupa *error yaw* dan *yaw rate*, maka dilakukanlah pengujian *close loop* dengan *set point heading* kapal sebesar 20^0 dan 30^0 . Pemilihan KLF Sugeno-Takagi didasarkan pada fungsi dan kegunaan dari kontroler ini yang memiliki karakteristik dengan respon lebih cepat dibandingkan dengan metode KLF Mamdani karena hasil keluarannya bersifat 1 nilai pasti (*single tone*). Dari hasil pengujian *close loop* yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa respon sistem tidak mengalami *overshoot* (teredam) dan mencapai *set point* sesuai *heading* kapal yang diberikan pada waktu 10,7 menit (hasil kapal berdimensi) yang artinya rancangan sistem KLF yang dibuat sudah sesuai dan dapat diterapkan pada uji pengendalian trayektori kapal secara otomatis. Hasil pengujian *close loop* dapat dilihat seperti pada gambar 4.3 dan gambar 4.4.



Gambar 4. 3 Hasil uji *closeloop* rudder 20^0 (kapal tak berdimensi)

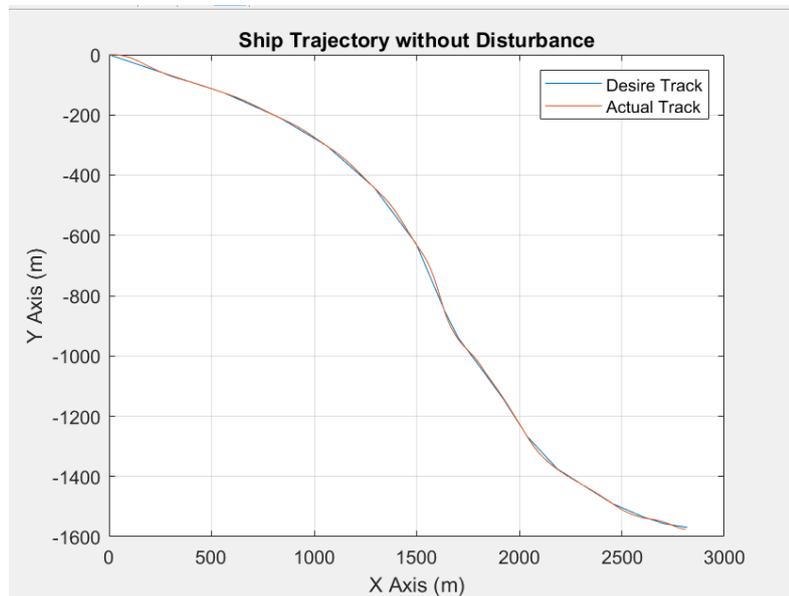


Gambar 4. 4 Hasil uji *closeloop* rudder 30^0 (kapal tak berdimensi)

4.2 Analisis Sistem Kontrol Kapal tanpa Gangguan Arus Laut

Proses pengendalian kapal dibagi menjadi 2 proses yaitu kontrol untuk trayektori kapal (berlayar) dan kontrol untuk sandar kapal (menepi di bibir dermaga). Pada proses yang pertama ini untuk mengetahui sistem kendali *rudder* (aktuator) terhadap trayektori yang sudah dirancang dilakukan uji performansi tanpa adanya gangguan terlebih dahulu. Berdasarkan trayektori yang telah ditentukan, kapal dapat berjalan mendekati lintasan yang dikehendaki (*desire track*) dengan koordinat awal (0, 0) m hingga sampai pada koordinat akhir kapal pada proses pertama (*way point*) yaitu (2820, -1569) m. Untuk dapat mengatur manuver aktuator kapal berupa *rudder* (arah gerak *yaw*) maka diberikan sinyal kontrol sesuai dari *rule base* KLF trayektori yang telah dirancang. Waktu yang ditempuh kapal dari koordinat awal hingga mencapai *way point* adalah 93,62 menit (hasil kapal berdimensi). Selama kapal berlayar melintasi trayektori terdapat selisih dengan trayektori yang diharapkan (*desire track*) dengan *root square error* maksimum sebesar 7,684 m dan minimum sebesar 0,085 m. Selisih simpangan yang terjadi antara *actual track* dengan *desire track* terjadi diakibatkan karena kecepatan kapal (putaran *propeller*) yang diasumsikan konstan (arah gerak *surge*) saat berbelok melewati lintasan, sehingga pada koordinat tertentu kapal tersebut bermanuver melebihi dari *setpoint* yang telah dirancang (*desire track*). Pada gambar 4.5 dapat

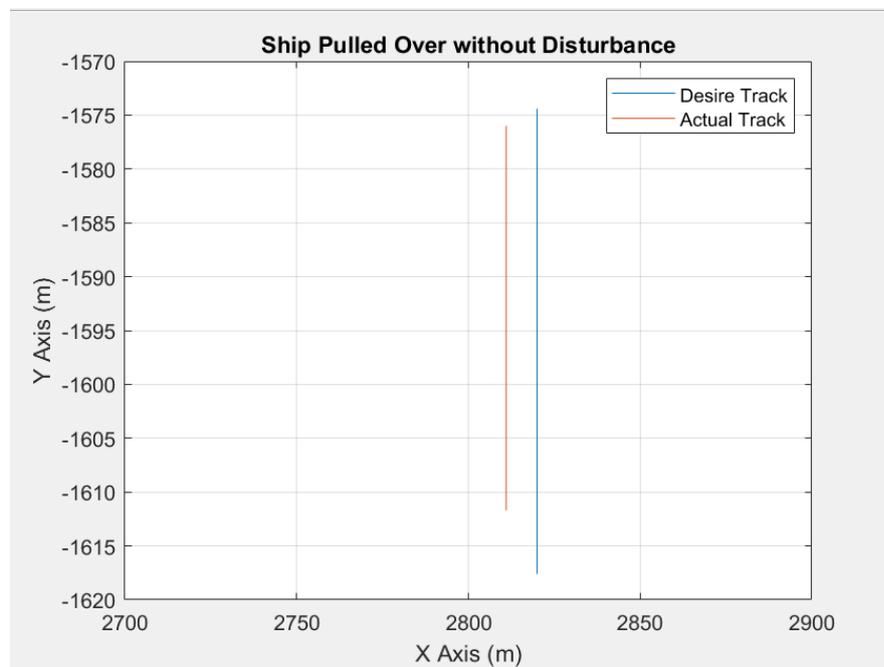
dilihat hasil dari simulasi trayektori kapal secara otomatis mulai dari koordinat awal kapal hingga *way point*.



Gambar 4. 5 Hasil simulasi trayektori kapal otomatis tanpa ada gangguan

Pada proses kedua yaitu bersandarnya kapal secara otomatis dimulai dari *way point* (2820, -1569) m hingga menuju tepi dermaga (2820, -1618) m. Proses ini terdapat perbedaan dengan kontrol trayektori kapal seperti sebelumnya, yaitu karena pada proses ini menggunakan 2 buah aktuator yang berbeda yakni *bow thruster* dan juga *stern thruster* untuk arah gerak kapal secara *sway*. Dalam sistem kontrol ini masukan berupa jarak antara posisi kapal terhadap tepi dermaga (*distance*) dan keluaran berupa nilai tegangan *bow thruster* (V_b) dan *stern thruster* (V_s) yang akan berpengaruh terhadap kecepatan gerak sandar sehingga dapat mencapai tepi dermaga maka diharuskan pergerakan manuver kapal dikendalikan agar berjalan sesuai *setpoint* dan sesuai standar yang ada. Waktu yang ditempuh kapal dari *way point* hingga mencapai tepi dermaga adalah 2 menit (hasil kapal berdimensi), hal ini dikarenakan pada proses ini kapal hanya bergerak sejauh 49 meter dalam arah gerak *sway*. Selama kapal bersandar terdapat selisih dengan lintasan yang diharapkan (*desire track*) dengan *root square error* pada posisi akhir kapal dengan tepi dermaga yaitu sebesar 9,81 m. simpangan yang terjadi antara *actual track* dengan *desire track* terjadi diakibatkan karena kecepatan *sway* kapal (putaran *thruster*) yang sebenarnya terjadi secara berubah-ubah, namun dalam penentuan waktu proses sandar diasumsikan kecepatan *sway* tersebut konstan

sebesar 5,4 m/s, sehingga antara waktu simulasi dengan keadaan yang sebenarnya terdapat perbedaan. Pada gambar 4.6 dapat dilihat hasil dari simulasi sandar kapal secara otomatis mulai dari *way point* hingga tepi dermaga.

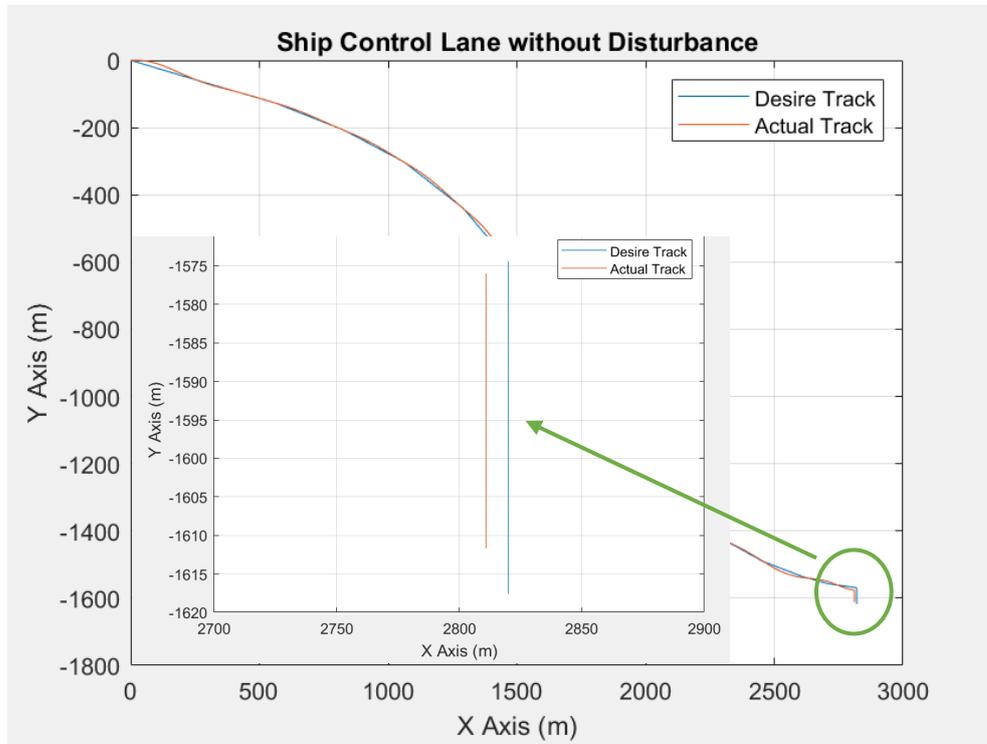


Gambar 4. 6 Hasil simulasi sandar kapal otomatis tanpa ada gangguan

Pada saat kapal mendekat ke pelabuhan maka dari KLF sandar akan memberikan keluaran tegangan *thruster* yang semakin menurun, hal ini sesuai dengan *rule base* yang telah dirancang. Hal ini mengakibatkan kecepatan *sway* menurun dari tegangan maksimal sebesar 6 V hingga menjadi 0 V saat mendekati tepi dermaga. Aksi kontroler pada aktuator *stern* dan *bow thruster* terjadi perbedaan antara yang sebenarnya dengan hasil simulasi yaitu terdapat *error* berjarak 9,81 meter dari *center of mass* kapal terhadap tepi dermaga, dengan demikian tali pengikat kapal dapat dilemparkan ke dermaga oleh awak kapal dan diharapkan kapal dapat berjalan secara perlahan meskipun tidak ada aktuator karena gerakan hidrodinamika dari kapal tersebut.

Hasil simulasi manuver gabungan antara trayektori dan sandar kapal secara otomatis tanpa adanya gangguan dapat dilihat seperti pada gambar 4.7, dan juga

pada tabel 4.1 merupakan nilai analisis *root square error* yang terjadi selama proses kapal berlayar sekaligus bersandar.



Gambar 4. 7 Hasil simulasi gabungan trayektori dan sandar kapal otomatis tanpa ada gangguan

Tabel 4. 1 *Root square error* pelayaran kapal tanpa ada gangguan

Titik	X_d (m)	Y_d (m)	X_a (m)	Y_a (m)	<i>Error Lintasan</i> (m)
2	279	-64	281,66	-65,99	3,322
3	562	-127	561,97	-127,08	0,085
4	832	-209	833,69	-209,95	1,939
5	1063	-303	1061,92	-303,05	1,081
6	1293	-441	1292,61	-441,63	0,741
7	1497	-627	1496,01	-627,68	1,201
8	1639	-854	1637,31	-854,3	1,716
9	1703	-940	1703,38	-945,1	5,114
10	1814	-1041	1819,01	-1038,1	5,789

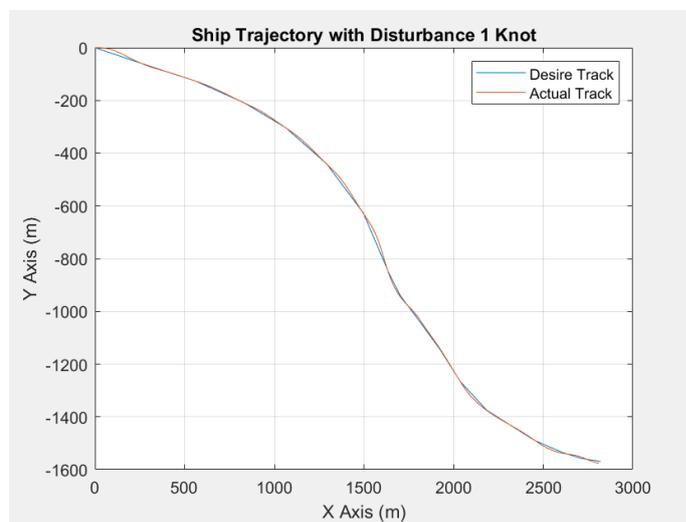
Titik	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan (m)
11	1922	-1142	1923,35	-1140,8	1,806
12	2039	-1267	2039,42	-1267,9	0,993
13	2184	-1374	2181,27	-1373,7	2,746
14	2304	-1426	2302,42	-1425,3	1,728
15	2454	-1490	2453,4	-1489,4	0,848
16	2611	-1536	2607,63	-1537,5	3,689
17	2709	-1557	2704,2	-1551	7,684
Way point	2820	-1569	2818,14	-1576,3	7,533
Sandar kapal	2820	-1617,6	2818,14	-1613,08	4,888

Berdasarkan tabel diatas, dapat dilihat bahwa pada titik 17 antara *desire track* dan *actual track* menunjukkan *error* lintasan terjauh dibanding titik-titik yang lain yaitu sebesar 7,684 meter, sedangkan pada titik ketiga menunjukkan *error* lintasan terkecil sebesar 0,085 meter. Besarnya *error* lintasan menunjukkan nilai yang bervariasi diantara titik-titiknya, hal ini dikarenakan terdapat perbedaan yang bervariasi pada koordinat y (y aktual) dibanding nilai koordinat x (x aktual) sehingga mengakibatkan nilai *error* lintasan yang dihasilkan berbeda-beda/acak pada tiap titik.

4.3 Analisis Sistem Kontrol Kapal dengan Gangguan Arus Laut 1 Knot

Agar simulasi kapal yang dilakukan mendekati dengan kondisi dan keadaan yang sebenarnya di Pelabuhan Tanjung Perak maka dilakukan pemodelan gangguan berupa kecepatan arus laut sebesar 1 knot dengan metode *Gauss-Markov process* dan arah arus sebesar -20^0 . Pemberian gangguan ini dimulai dari titik koordinat awal kapal hingga sampai di tepi dermaga, sehingga aktuator berupa *rudder* dan *thruster* langsung bekerja menyesuaikan kondisi lingkungan sekitar untuk dapat mencapai *setpoint* berupa jalur yang telah ditentukan. Dalam pemodelan ini diasumsikan kecepatan kapal konstan walaupun terdapat gangguan arus laut, meskipun dalam keadaan sebenarnya kecepatan kapal dipengaruhi oleh besarnya arus laut dan arah dari arus laut tersebut. Berdasarkan trayektori yang telah

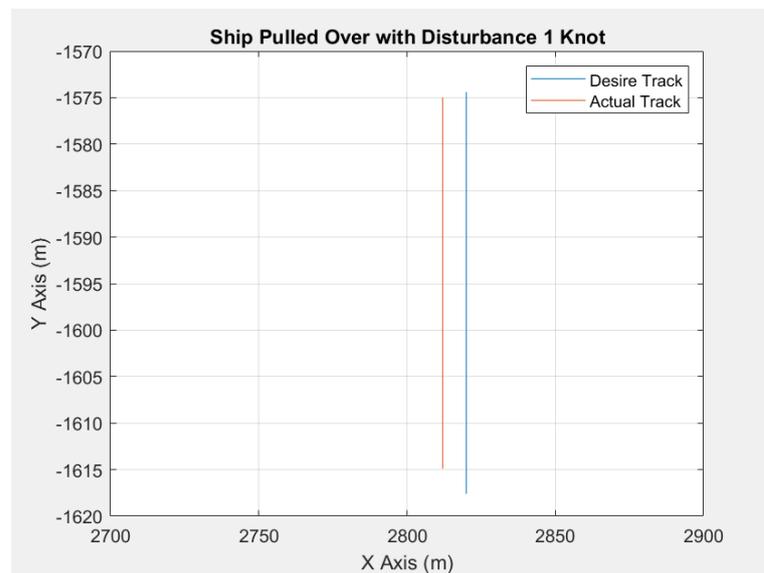
ditentukan, kapal dapat berjalan mendekati lintasan yang dikehendaki (*desire track*) dengan koordinat awal (0, 0) m hingga sampai pada koordinat akhir kapal pada proses pertama (*way point*) yaitu (2820, -1569) m meskipun terdapat *error* yang lebih besar dibanding proses sebelumnya (tanpa gangguan), hal ini disebabkan karena dengan perlakuan waktu berlayar kapal yang sama selama 93,6 menit (hasil kapal berdimensi), maka dengan adanya tambahan gangguan tersebut menghasilkan posisi kapal yang sedikit berbeda dari posisi yang telah ditentukan sebelumnya. Selama kapal berlayar melintasi trayektori terdapat selisih dengan trayektori yang diharapkan (*desire track*) dengan *root square error* maksimum sebesar 10,126 m dan minimum sebesar 0,47 m. Selisih simpangan yang terjadi antara *actual track* dengan *desire track* terjadi diakibatkan karena kecepatan kapal (putaran *propeller*) yang diasumsikan konstan (arah gerak *surge*) saat berbelok melewati lintasan dan juga diberikan waktu pelayaran kapal yang sama namun terdapat penambahan berupa gangguan arus laut 1 knot. Pada gambar 4.8 dapat dilihat hasil dari simulasi trayektori kapal secara otomatis mulai dari koordinat awal kapal hingga *way point*.



Gambar 4. 8 Hasil simulasi trayektori kapal otomatis dengan gangguan arus 1 knot

Pada proses kedua yaitu bersandarnya kapal secara otomatis dimulai dari *way point* (2820, -1569) m hingga menuju tepi dermaga (2820, -1618) m sama seperti proses sebelumnya namun tetap ditambahkan berupa gangguan arus laut sebesar 1 knot agar mendekati keadaan yang sebenarnya di Pelabuhan. Waktu yang ditempuh kapal dari *way point* hingga mencapai tepi dermaga adalah sama yaitu 2 menit (hasil

kapal berdimensi), namun terdapat *error* yang terjadi karena pengaruh dari adanya gangguan yang diberikan. Selama kapal bersandar terdapat selisih dengan lintasan yang diharapkan (*desire track*) dengan *root square error* pada posisi akhir kapal dengan tepi dermaga yaitu sebesar 9,51 m. simpangan yang terjadi antara *actual track* dengan *desire track* terjadi diakibatkan karena kecepatan *sway* kapal (putaran *thruster*) yang sebenarnya terjadi secara berubah-ubah, namun dalam penentuan waktu proses sandar diasumsikan kecepatan *sway* tersebut konstan sebesar 5,4 m/s ditambah dengan adanya pengaruh gangguan arus laut 1 knot, sehingga antara waktu simulasi dengan keadaan yang sebenarnya terdapat perbedaan. Pada gambar 4.9 dapat dilihat hasil dari simulasi sandar kapal secara otomatis mulai dari *way point* hingga tepi dermaga.

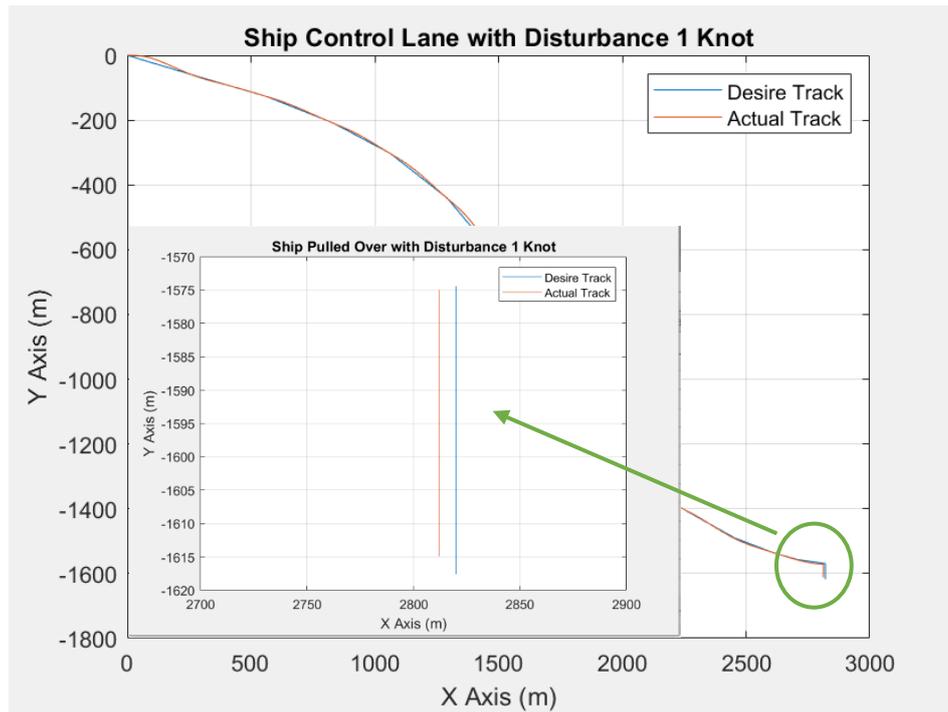


Gambar 4. 9 Hasil simulasi sandar kapal otomatis dengan gangguan arus 1 knot

Pada saat kapal mendekati ke pelabuhan maka dari KLF sandar akan memberikan keluaran tegangan *thruster* yang semakin menurun, hal ini sesuai dengan *rule base* yang telah dirancang. Hal ini mengakibatkan kecepatan *sway* menurun dari tegangan maksimal sebesar 6 V hingga menjadi 0 V saat mendekati tepi dermaga. Aksi kontroler pada aktuator *stern* dan *bow thruster* terjadi perbedaan antara yang sebenarnya dengan hasil simulasi yaitu terdapat *error* berjarak 9,51 meter dari *center of mass* kapal terhadap tepi dermaga, dengan demikian tali pengikat kapal dapat dilemparkan ke dermaga oleh awak kapal dan diharapkan

kapal dapat berjalan secara perlahan meskipun tidak ada aktuator karena gerakan hidrodinamika dari kapal tersebut.

Hasil simulasi manuver gabungan antara trayektori dan sandar kapal secara otomatis tanpa adanya gangguan dapat dilihat seperti pada gambar 4.10, dan juga pada tabel 4.2 merupakan nilai analisis *root square error* yang terjadi selama proses kapal berlayar sekaligus bersandar.



Gambar 4. 10 Hasil simulasi gabungan trayektori dan sandar kapal otomatis dengan gangguan arus 1 knot

Tabel 4. 2 *Root square error* pelayaran kapal dengan gangguan arus 1 knot

Titik	X_d (m)	Y_d (m)	X_a (m)	Y_a (m)	<i>Error Lintasan</i> (m)
2	279	-64	275,76	-64,37	3,261
3	562	-127	561,53	-126,98	0,47
4	832	-209	834,02	-210,06	2,281
5	1063	-303	1062,16	-303,16	0,855
6	1293	-441	1292,31	-441,43	0,813
7	1497	-627	1495,9	-627,58	1,244

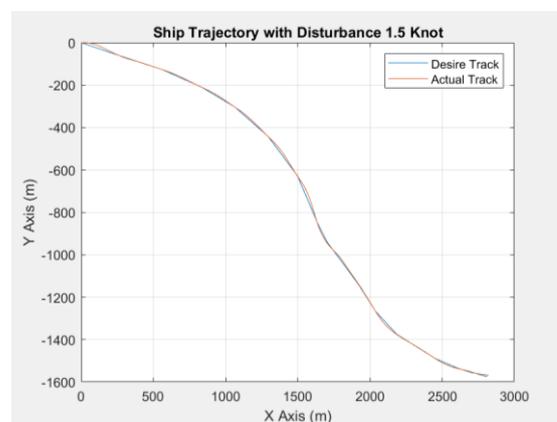
Titik	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan (m)
8	1639	-854	1637,28	-854,25	1,738
9	1703	-940	1699,5	-941,38	3,762
10	1814	-1041	1819,15	-1038,26	5,834
11	1922	-1142	1923,41	-1140,85	1,82
12	2039	-1267	2037,56	-1265,77	1,894
13	2184	-1374	2178,43	-1372,31	5,821
14	2304	-1426	2298,5	-1423,67	5,973
15	2454	-1490	2446,69	-1486,43	8,135
16	2611	-1536	2600,88	-1536,34	10,126
17	2709	-1557	2702,21	-1550,98	9,074
Way Point	2820	-1569	2819,47	-1576,11	7,13
Sandar Kapal	2820	-1617,6	2819,47	-1613,06	4,571

Berdasarkan tabel diatas, dapat dilihat bahwa pada titik 16 antara *desire track* dan *actual track* menunjukkan *error* lintasan terjauh dibanding titik-titik yang lain yaitu sebesar 10,126 meter, sedangkan pada titik ketiga menunjukkan *error* lintasan terkecil sebesar 0,47 meter. Besarnya *error* lintasan menunjukkan nilai yang bervariasi diantara titik-titiknya dan memiliki nilai *error* yang lebih besar dari perlakuan sebelumnya, hal ini dikarenakan pada tahap ini diberikan tambahan berupa gangguan arus laut sebesar 1 knot sehingga menghasilkan nilai *error* yang lebih besar, akan tetapi nilai-nilai *error* tersebut masih dalam batas kewajaran dalam hal pengendalian kapal, hal ini berarti rancangan sistem kontrol logika *fuzzy* yang dirancang sudah cukup baik dan dapat mengatasi gangguan arus laut sebesar 1 knot terhadap proses pengendalian kapal secara otomatis.

4.4 Analisis Sistem Kontrol Kapal dengan Gangguan Arus Laut 1,5 Knot

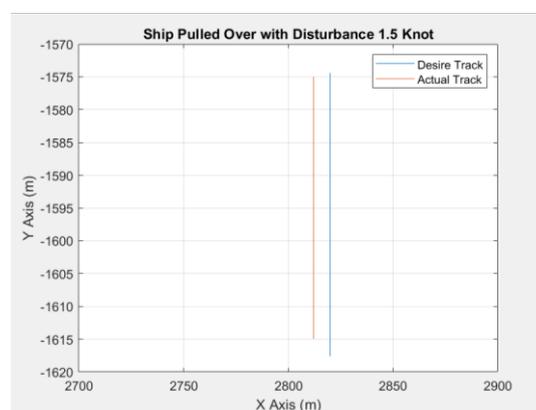
Agar simulasi kapal yang dilakukan mendekati dengan kondisi dan keadaan yang sebenarnya di Pelabuhan Tanjung Perak maka dilakukan pemodelan gangguan berupa kecepatan arus laut sebesar 1,5 knot dengan metode *Gauss-Markov process* dan arah arus sebesar -50^0 . Pemberian gangguan ini dimulai dari titik koordinat

awal kapal hingga sampai di tepi dermaga, sehingga aktuator berupa *rudder* dan *thruster* langsung bekerja menyesuaikan kondisi lingkungan sekitar untuk dapat mencapai *setpoint* berupa jalur yang telah ditentukan. Dalam pemodelan ini diasumsikan kecepatan kapal konstan walaupun terdapat gangguan arus laut. Meskipun dalam keadaan sebenarnya kecepatan kapal dipengaruhi oleh besarnya arus laut dan arah dari arus laut tersebut. Berdasarkan trayektori yang telah ditentukan, kapal dapat berjalan mendekati lintasan yang dikehendaki (*desire track*) dengan koordinat awal (0, 0) m hingga sampai pada koordinat akhir kapal pada proses pertama (*way point*) yaitu (2820, -1569) m meskipun terdapat *error* yang lebih besar dibanding proses sebelumnya (gangguan 1 knot), hal ini disebabkan karena dengan perlakuan waktu berlayar kapal yang sama selama 93,6 menit (hasil kapal berdimensi), maka dengan adanya tambahan gangguan tersebut menghasilkan posisi kapal yang sedikit berbeda dari posisi yang telah ditentukan sebelumnya. Selama kapal berlayar melintasi trayektori terdapat selisih dengan trayektori yang diharapkan (*desire track*) dengan *root square error* maksimum sebesar 11,172 m dan minimum sebesar 0,46 m. Selisih simpangan yang terjadi antara *actual track* dengan *desire track* terjadi diakibatkan karena kecepatan kapal (putaran *propeller*) yang diasumsikan konstan (arah gerak *surge*) saat berbelok melewati lintasan dan juga diberikan waktu pelayaran kapal yang sama namun terdapat penambahan berupa gangguan arus laut 1,5 knot. Pada gambar 4.11 dapat dilihat hasil dari simulasi trayektori kapal secara otomatis mulai dari koordinat awal kapal hingga *way point*.



Gambar 4. 11 Hasil simulasi trayektori kapal otomatis dengan gangguan arus 1,5 knot

Pada proses kedua yaitu bersandarnya kapal secara otomatis dimulai dari *way point* (2820, -1569) m hingga menuju tepi dermaga (2820, -1618) m sama seperti proses sebelumnya namun tetap ditambahkan berupa gangguan arus laut sebesar 1,5 knot agar mendekati keadaan yang sebenarnya di Pelabuhan. Waktu yang ditempuh kapal dari *way point* hingga mencapai tepi dermaga adalah sama yaitu 2 menit (hasil kapal berdimensi), namun terdapat *error* yang terjadi karena pengaruh dari adanya gangguan yang diberikan. Selama kapal bersandar terdapat selisih dengan lintasan yang diharapkan (*desire track*) dengan *root square error* pada posisi akhir kapal dengan tepi dermaga yaitu sebesar 9,45 m. simpangan yang terjadi antara *actual track* dengan *desire track* terjadi diakibatkan karena kecepatan *sway* kapal (putaran *thruster*) yang sebenarnya terjadi secara berubah-ubah, namun dalam penentuan waktu proses sandar diasumsikan kecepatan *sway* tersebut konstan sebesar 5,4 m/s ditambah dengan adanya pengaruh gangguan arus laut 1,5 knot, sehingga antara waktu simulasi dengan keadaan yang sebenarnya terdapat perbedaan. Pada gambar 4.12 dapat dilihat hasil dari simulasi sandar kapal secara otomatis mulai dari *way point* hingga tepi dermaga.

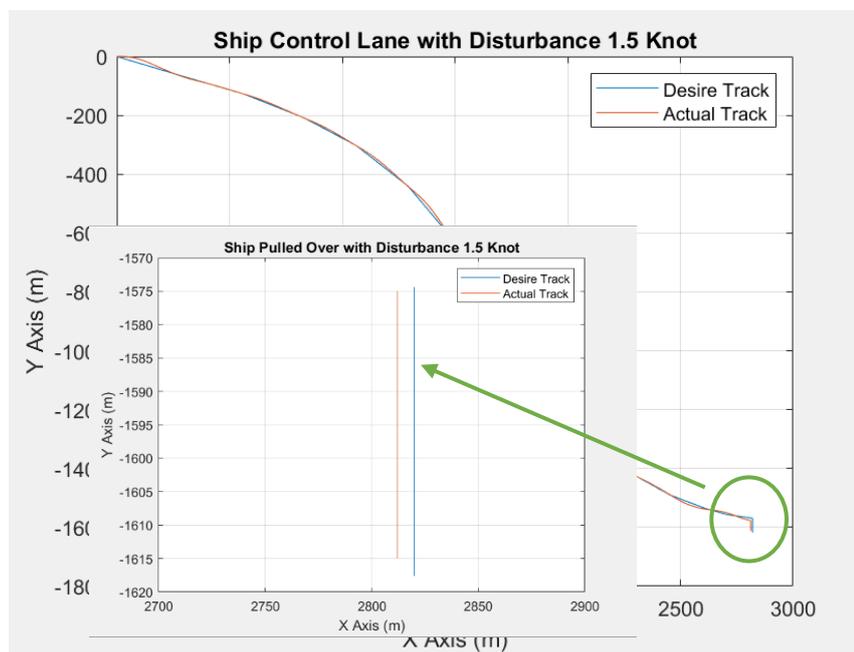


Gambar 4. 12 Hasil simulasi sandar kapal otomatis dengan gangguan arus 1,5 knot

Pada saat kapal mendekat ke pelabuhan maka dari KLF sandar akan memberikan keluaran tegangan *thruster* yang semakin menurun, hal ini sesuai dengan *rule base* yang telah dirancang. Hal ini mengakibatkan kecepatan *sway* menurun dari tegangan maksimal sebesar 6 V hingga menjadi 0 V saat mendekati tepi dermaga. Aksi kontroler pada aktuator *stern* dan *bow thruster* terjadi perbedaan antara yang sebenarnya dengan hasil simulasi yaitu terdapat *error* berjarak 9,45

meter dari *center of mass* kapal terhadap tepi dermaga, dengan demikian tali pengikat kapal dapat dilemparkan ke dermaga oleh awak kapal dan diharapkan kapal dapat berjalan secara perlahan meskipun tidak ada aktuator karena gerakan hidrodinamika dari kapal tersebut.

Hasil simulasi manuver gabungan antara trayektori dan sandar kapal secara otomatis tanpa adanya gangguan dapat dilihat seperti pada gambar 4.13, dan juga pada tabel 4.3 merupakan nilai analisis *root square error* yang terjadi selama proses kapal berlayar sekaligus bersandar.



Gambar 4. 13 Hasil simulasi gabungan trayektori dan sandar kapal otomatis dengan gangguan arus 1,5 knot

Tabel 4. 3 Root square error pelayaran kapal dengan gangguan arus 1,5 knot

Titik	X_d (m)	Y_d (m)	X_a (m)	Y_a (m)	<i>Error Lintasan</i> (m)
2	279	-64	275,76	-64,37	3,261
3	562	-127	561,54	-126,98	0,46
4	832	-209	834,02	-210,06	2,281
5	1063	-303	1062,16	-303,16	0,855
6	1293	-441	1292,31	-441,43	0,813
7	1497	-627	1495,9	-627,58	1,244
8	1639	-854	1637,28	-854,25	1,738

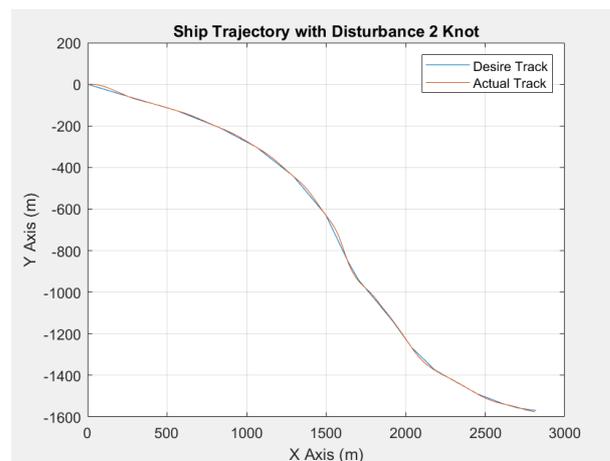
Titik	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan (m)
9	1703	-940	1699,5	-941,38	3,762
10	1814	-1041	1819,15	-1038,26	5,834
11	1922	-1142	1923,41	-1140,85	1,82
12	2039	-1267	2037,55	-1265,77	1,901
13	2184	-1374	2178,44	-1372,31	5,811
14	2304	-1426	2298,5	-1423,69	5,965
15	2454	-1490	2447,11	-1486,6	7,683
16	2611	-1536	2600,87	-1536,37	10,137
17	2709	-1557	2699,95	-1550,45	11,172
Way Point	2820	-1569	2819,45	-1576,15	7,171
Sandar Kapal	2820	-1617,6	2819,45	-1613,06	4,573

Berdasarkan tabel diatas, dapat dilihat bahwa pada titik 17 antara *desire track* dan *actual track* menunjukkan *error* lintasan terjauh dibanding titik-titik yang lain yaitu sebesar 11,172 meter, sedangkan pada titik ketiga menunjukkan *error* lintasan terkecil sebesar 0,46 meter. Besarnya *error* lintasan menunjukkan nilai yang bervariasi diantara titik-titiknya dan memiliki nilai *error* yang jauh lebih besar dari perlakuan sebelumnya, hal ini dikarenakan pada tahap ini diberikan gangguan arus laut yang lebih kuat yaitu sebesar 1,5 knot sehingga tentu akan menghasilkan nilai *error* yang lebih besar pula, akan tetapi nilai-nilai *error* tersebut masih dalam batas kewajaran dalam hal pengendalian kapal, hal ini berarti rancangan sistem kontrol logika *fuzzy* yang dirancang sudah cukup baik dan dapat mengatasi gangguan arus laut sebesar 1,5 knot terhadap proses pengendalian kapal secara otomatis.

4.5 Analisis Sistem Kontrol Kapal dengan Gangguan Arus Laut 2 Knot

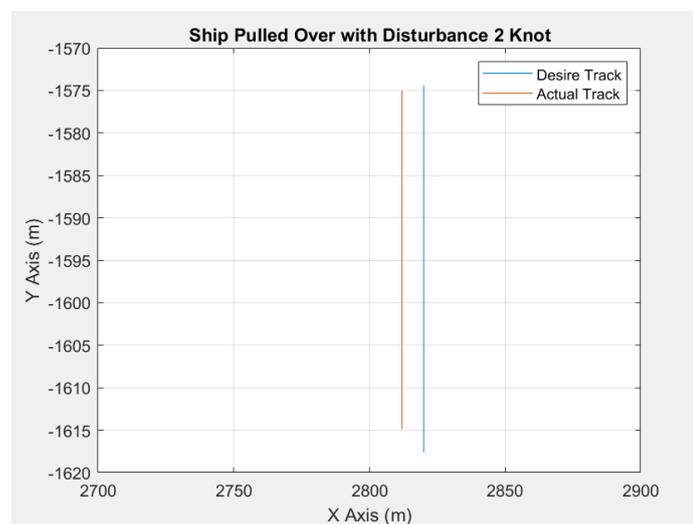
Agar simulasi kapal yang dilakukan mendekati dengan kondisi dan keadaan yang sebenarnya di Pelabuhan Tanjung Perak maka dilakukan pemodelan gangguan berupa kecepatan arus laut sebesar 2 knot dengan metode *Gauss-Markov process* dan arah arus sebesar -75^0 . Pemberian gangguan ini dimulai dari titik koordinat awal kapal hingga sampai di tepi dermaga, sehingga aktuator berupa *rudder* dan

thruster langsung bekerja menyesuaikan kondisi lingkungan sekitar untuk dapat mencapai *setpoint* berupa jalur yang telah ditentukan. Dalam pemodelan ini diasumsikan kecepatan kapal konstan walaupun terdapat gangguan arus laut. Meskipun dalam keadaan sebenarnya kecepatan kapal dipengaruhi oleh besarnya arus laut dan arah dari arus laut tersebut. Berdasarkan trayektori yang telah ditentukan, kapal dapat berjalan mendekati lintasan yang dikehendaki (*desire track*) dengan koordinat awal (0, 0) m hingga sampai pada koordinat akhir kapal pada proses pertama (*way point*) yaitu (2820, -1569) m meskipun terdapat *error* yang lebih besar dibanding proses sebelumnya (gangguan 1,5 knot), hal ini disebabkan karena dengan perlakuan waktu berlayar kapal yang sama selama 93,6 menit (hasil kapal berdimensi), maka dengan adanya tambahan gangguan tersebut menghasilkan posisi kapal yang sedikit berbeda dari posisi yang telah ditentukan sebelumnya. Selama kapal berlayar melintasi trayektori terdapat selisih dengan trayektori yang diharapkan (*desire track*) dengan *root square error* maksimum sebesar 11,905 m dan minimum sebesar 0,757 m. Selisih simpangan yang terjadi antara *actual track* dengan *desire track* terjadi diakibatkan karena kecepatan kapal (putaran *propeller*) yang diasumsikan konstan (arah gerak *surge*) saat berbelok melewati lintasan dan juga diberikan waktu pelayaran kapal yang sama namun terdapat penambahan berupa gangguan arus laut 2 knot. Pada gambar 4.14 dapat dilihat hasil dari simulasi trayektori kapal secara otomatis mulai dari koordinat awal kapal hingga *way point*.



Gambar 4. 14 Hasil simulasi trayektori kapal otomatis dengan gangguan arus 2 knot

Pada proses kedua yaitu bersandarnya kapal secara otomatis dimulai dari *way point* (2820, -1569) m hingga menuju tepi dermaga (2820, -1618) m sama seperti proses sebelumnya namun tetap ditambahkan berupa gangguan arus laut sebesar 2 knot agar mendekati keadaan yang sebenarnya di Pelabuhan. Waktu yang ditempuh kapal dari *way point* hingga mencapai tepi dermaga adalah sama yaitu 2 menit (hasil kapal berdimensi) namun terdapat *error* yang terjadi karena pengaruh dari adanya gangguan yang diberikan. Selama kapal bersandar terdapat selisih dengan lintasan yang diharapkan (*desire track*) dengan *root square error* pada posisi akhir kapal dengan tepi dermaga yaitu sebesar 9,44 m. simpangan yang terjadi antara *actual track* dengan *desire track* terjadi diakibatkan karena kecepatan *sway* kapal (putaran *thruster*) yang sebenarnya terjadi secara berubah-ubah, namun dalam penentuan waktu proses sandar diasumsikan kecepatan *sway* tersebut konstan sebesar 5,4 m/s ditambah dengan adanya pengaruh gangguan arus laut 2 knot, sehingga antara waktu simulasi dengan keadaan yang sebenarnya terdapat perbedaan. Pada gambar 4.15 dapat dilihat hasil dari simulasi sandar kapal secara otomatis mulai dari *way point* hingga tepi dermaga.

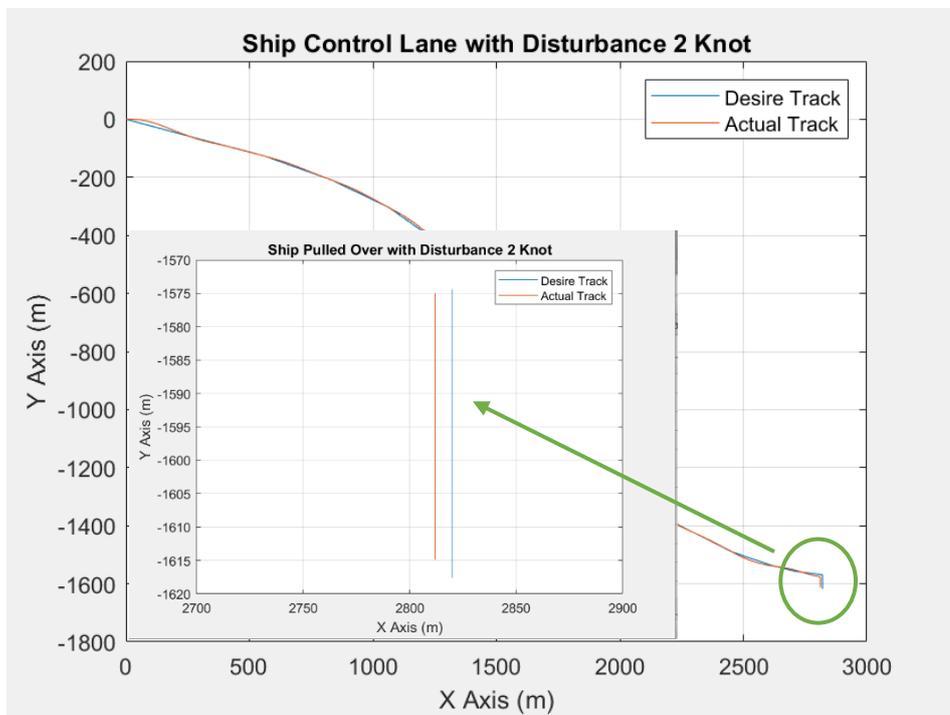


Gambar 4. 15 Hasil simulasi sandar kapal otomatis dengan gangguan arus 2 knot

Pada saat kapal mendekat ke pelabuhan maka dari KLF sandar akan memberikan keluaran tegangan *thruster* yang semakin menurun, hal ini sesuai dengan *rule base* yang telah dirancang. Hal ini mengakibatkan kecepatan *sway* menurun dari tegangan maksimal sebesar 6 V hingga menjadi 0 V saat mendekati tepi dermaga. Aksi kontroler pada aktuator *stern* dan *bow thruster* terjadi perbedaan

antara yang sebenarnya dengan hasil simulasi yaitu terdapat *error* berjarak 9,44 meter dari *center of mass* kapal terhadap tepi dermaga, dengan demikian tali pengikat kapal dapat dilemparkan ke dermaga oleh awak kapal dan diharapkan kapal dapat berjalan secara perlahan meskipun tidak ada aktuator karena gerakan hidrodinamika dari kapal tersebut.

Hasil simulasi manuver gabungan antara trayektori dan sandar kapal secara otomatis tanpa adanya gangguan dapat dilihat seperti pada gambar 4.16, dan juga pada tabel 4.4 merupakan nilai analisis *root square error* yang terjadi selama proses kapal berlayar sekaligus bersandar.



Gambar 4. 16 Hasil simulasi gabungan trayektori dan sandar kapal otomatis dengan gangguan arus 2 knot

Tabel 4. 4 *Root square error* pelayaran kapal dengan gangguan arus 2 knot

Titik	X_d (m)	Y_d (m)	X_a (m)	Y_a (m)	<i>Error Lintasan</i> (m)
2	279	-64	275,97	-64,43	3,06
3	562	-127	560,78	-126,81	1,235
4	832	-209	834,14	-210,1	2,406
5	1063	-303	1061,73	-302,96	1,271
6	1293	-441	1292,46	-441,53	0,757
7	1497	-627	1496,03	-627,71	1,202

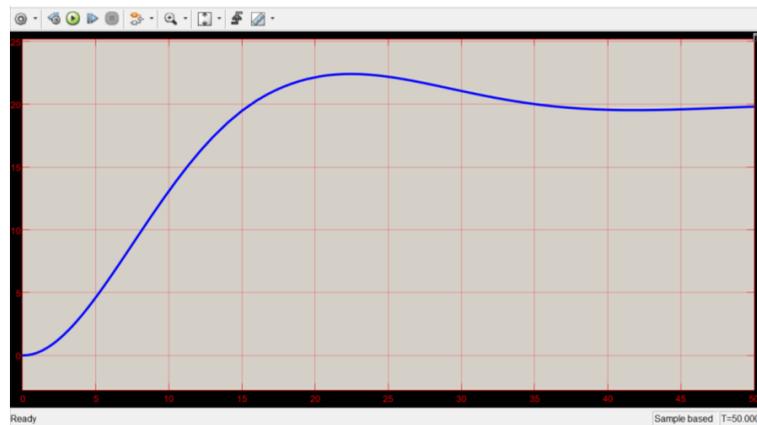
Titik	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan (m)
8	1639	-854	1637,39	-854,46	1,674
9	1703	-940	1699,68	-941,55	3,664
10	1814	-1041	1819,21	-1038,33	5,854
11	1922	-1142	1923,53	-1140,97	1,844
12	2039	-1267	2037,86	-1266,11	1,446
13	2184	-1374	2177,75	-1371,95	6,578
14	2304	-1426	2298,5	-1423,7	5,962
15	2454	-1490	2447,53	-1486,77	7,231
16	2611	-1536	2600,1	-1536,28	10,904
17	2709	-1557	2699,2	-1550,24	11,905
Way Point	2820	-1569	2817,89	-1576,1	7,407
Sandar Kapal	2820	-1617,6	2817,89	-1613,24	4,844

Berdasarkan tabel diatas, dapat dilihat bahwa pada titik 17 antara *desire track* dan *actual track* menunjukkan *error* lintasan terjauh dibanding titik-titik yang lain yaitu sebesar 11,905 meter, sedangkan pada titik keenam menunjukkan *error* lintasan terkecil sebesar 0,757 meter. Besarnya *error* lintasan menunjukkan nilai yang bervariasi diantara titik-titiknya dan memiliki nilai *error* yang jauh lebih besar dari perlakuan sebelumnya, hal ini dikarenakan pada tahap ini diberikan gangguan arus laut yang paling kuat yaitu sebesar 2 knot sehingga tentu akan menghasilkan nilai *error* yang lebih besar pula dibanding sebelumnya, akan tetapi nilai-nilai *error* tersebut masih dalam batas kewajaran dalam hal pengendalian kapal, hal ini berarti rancangan sistem kontrol logika *fuzzy* yang dirancang sudah cukup baik dan dapat mengatasi gangguan arus laut sebesar 2 knot sekalipun terhadap proses pengendalian kapal secara otomatis.

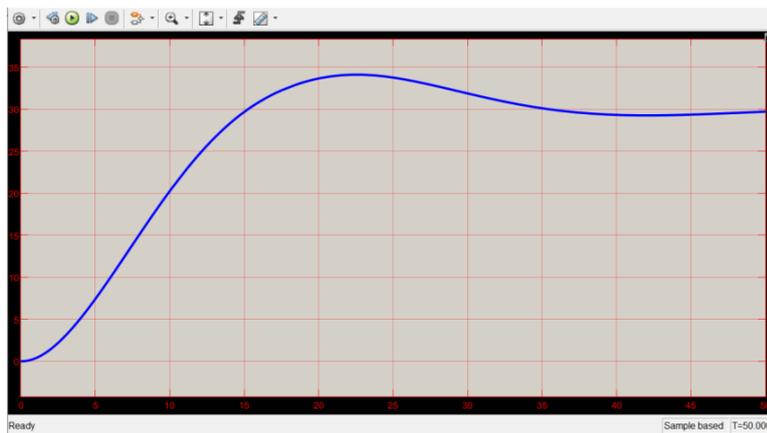
4.6 Analisis Perbandingan Kontrol Sistem Kapal Berbasis KLF dan Pengendali Konvensional PID

Setelah dilakukan pengujian *close loop rudder* dengan menggunakan KLF dan pengendali konvensional PID yang masing-masing diberikan *input setpoint*

sebesar 20^0 dan 30^0 , dilakukanlah perbandingan diantara kedua jenis kontroler tersebut. Hasil respon sistem kedua jenis kontroler dapat dilihat pada gambar berikut.



(a)



(b)

Gambar 4. 17 Respon sistem KLF (kapal tak berdimensi)
(a) masukan 20^0
(b) masukan 30^0



(a)



(b)

Gambar 4. 18 Respon sistem pengendali konvensional masukan 20^0
(kapal tak berdimensi)
(a) pengendali P, (b) pengendali PI



(A)



(B)

Gambar 4. 19 Respon sistem pengendali konvensional masukan 30^0
(kapal tak berdimensi)
(A) pengendali P, (B) pengendali PI

Setelah dilakukan simulasi uji pengendalian *close loop rudder* berbasis KLF dan *tuning* PID, selanjutnya dilakukan perbandingan antara hasil respon yang dihasilkan oleh kedua jenis kontrol tersebut. Dari data yang diperoleh, untuk hasil respon dengan jenis kontrol logika *fuzzy* untuk konstanta 20^0 dan 30^0 didapatkan parameter-parameter respon diantaranya *rise time* sebesar 38 menit, *maximum overshoot* sebesar 13,125% yang dicapai pada 61,7 menit, dan *settling time* selama 138 menit. Sedangkan untuk hasil respon dengan jenis kontrol konvensional PID untuk konstanta 20^0 dan 30^0 didapatkan parameter-parameter respon diantaranya: untuk pengendali P dihasilkan *rise time* sebesar 66 menit, *maximum overshoot* sebesar 24,975% yang dicapai pada 130 menit, dan *settling time* selama 497 menit. Untuk pengendali PI dihasilkan *rise time* sebesar 66 menit, *maximum overshoot* sebesar 25,596% yang dicapai pada 132 menit, dan *settling time* selama 497 menit. Nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Parameter-parameter respon kedua jenis kontroler hasil simulasi (hasil kapal berdimensi)

Tipe Pengendali	Max. Overshoot	Rise time	Settling time	Peak time
Fuzzy	13,125%	38 menit	138 menit	61,7 menit
P	24,975%	66 menit	497 menit	130 menit
PI	25,596%	66 menit	497 menit	132 menit

Dengan parameter-parameter yang didapatkan dari respon kedua jenis kontrol, jika dibandingkan maka hasil yang paling baik ditunjukkan oleh kontroler berjenis sistem logika *fuzzy*, hal ini dikarenakan dari semua parameter yang ada menunjukkan hasil yang paling kecil/singkat, seperti *rise time* yang lebih cepat, *maximum overshoot* yang lebih kecil dengan waktu yang singkat, dan *settling time* (waktu untuk mencapai kondisi *steady state*) yang sangat jauh lebih cepat dibanding jenis kontroler konvensional PID. Oleh karena itu pemilihan kontroler jenis logika *fuzzy* sudah sangat sesuai dan tepat dalam mengendalikan proses berlayar maupun sandar kapal secara otomatis.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan diantaranya:

- a) Hasil perancangan sistem pengendalian kapal otomatis berbasis logika *fuzzy* dapat memberikan hasil yang jauh lebih baik dalam proses pengendalian trayektori maupun sandar kapal, hal ini karena sistem kontrol *fuzzy* dapat mengatasi semua variasi gangguan arus laut yang diberikan, sehingga sistem KLF yang dirancang dapat membuat performansi sistem menjadi lebih baik.
- b) Proses berlayar maupun bersandar kapal secara otomatis akan menghasilkan keluaran respon sistem yang lebih baik jika menggunakan jenis kontroler logika *fuzzy* dibanding jenis konvensional PID, hal ini dikarenakan jenis kontroler logika *fuzzy* memiliki semua nilai parameter yang lebih kecil/singkat seperti *rise time* hanya sebesar 38 menit, *maximum overshoot* sebesar 13,125% yang dicapai pada 61,7 menit, dan *settling time* sebesar 138 menit (berdasarkan hasil kapal berdimensi).

5.2 Saran

Untuk dapat mengembangkan penelitian selanjutnya, maka dapat diberikan beberapa saran seperti berikut:

- a) Pemodelan kapal dapat dilakukan secara non-linier, sehingga dapat dibandingkan hasilnya.
- b) Untuk dapat membuat hasil kontroler menjadi lebih baik dapat menggunakan variasi gabungan antara *fuzzy* tipe-2 dengan jaringan syaraf tiruan.
- c) Dapat menambahkan beberapa tambahan gangguan lain seperti gelombang laut dan kecepatan angin, hal ini agar hasil simulasi yang dihasilkan akan lebih mendekati kondisi yang sebenarnya.
- d) Dapat dibuat 1 sistem KLF yang didalamnya sudah termasuk proses berlayar (trayektori) dan proses sandar sekaligus, hal ini agar dalam mendesain dan menjalankan simulink menjadi lebih efisien.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Ariany, Z., Hendra, A., & Febriary, S. (2018). STANDART PELAYANAN MINIMAL (SPM) DAN SISTEM LASING PADA KAPAL RO-RO UNTUK KESELAMATAN TRANSPORTASI PENYEBRANGAN LAUT (Studi Kasus KMP. LEGUNDI). *Gema Teknologi*, 20(1), 26. <https://doi.org/10.14710/gt.v20i1.21081>
- Detik-Detik Kapal Tak Terkendali hingga Tabrak Dermaga Pelabuhan Semarang _ Okezone News.* (n.d.).
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicle*. John Willey & Sons, Inc.
- 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*, 2(2), 1–62.
- Indonesia, P. A. (n.d.). asdp indonesia ferry. Retrieved from https://www.indonesiaferry.co.id/siaran_pers/detail_siaran/41
- Kusumadewi, S. (2002). *Analisis dan Desain Sistem Fuzzy Menggunakan Tool Box Matlab*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Lee, S. Der, Tzeng, C. Y., & Chen, B. J. (2014). Design and experiment of a fuzzy PID track-keeping ship autopilot. *Oceans 2014 - Taipei*. <https://doi.org/10.1109/OCEANS-TAIPEI.2014.6964524>
- Murdoch, E. (2004). *A Master's Guide to Berthing*. Retrieved from www.standard-club.com
- Nguyen, P.-H., & Jung, Y.-C. (2007). Automatic Berthing Control of Ship Using Adaptive Neural Networks. *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 31, pp. 563–568. <https://doi.org/10.5394/kinpr.2007.31.7.563>
- Oda, H., Ohtsu, K., Hotta, T. (1996). Statistical Analysis and Design of A Rudder Roll Stabilization System. *Control Engineering Practice*, Vol 4, 351–358.
- Ogata, K. (1996). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- Perhubungan, D. J. P. D. A. K. (2013). *Laporan Studi Desain Kapal Penyebrangan*

Penumpang Multi Hull (Catamaran) RO-RO 1000GT. Jakarta.

Yao, Z. G. e. H. P. Sen. (1997). A Multivariable Neural Controller for Automatic Ship Berthing. *IEEE*.

LAMPIRAN

A. Pemodelan Dinamika Kapal

Dinamika kapal dimodelkan berdasarkan spesifikasi kapal yang didapat dari PT. ASDP Indonesia Ferry. Kapal yang digunakan adalah kapal jenis ferry Ro-Ro Legundi Surabaya. Berikut adalah spesifikasi umum dari KMP Legundi Surabaya:

L_{pp} (Panjang, m)	= 99,2
B (Lebar, m)	= 19,6
T (Kedalaman, m)	= 4,1
Δ (<i>Displacement</i> , ton)	= 3120,07
U (Kecepatan, m/s)	= 7,7
C_B (<i>Coefficient Block</i>)	= 0,567
X_G (<i>Center of Gravity</i>)	= 8,417
A_δ (<i>Rudder Area</i> , m ²)	= 7,19
r (Jari-jari, m)	= 22,32
m'	= 0,000005212

Pemodelan kapal ini dilakukan berdasarkan model matematis yang diturunkan dari model Nomoto orde II:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$b1 = \frac{(Iz - N'_r) Y'\delta - (m.Xg - Y'_v) N'\delta}{\det(M)}$$

$$b2 = \frac{(m - Y'_v) N'\delta - (m.Xg - N'_v) Y'\delta}{\det(M)}$$

Berdasarkan spesifikasi kapal yang telah diketahui, maka koefisien-koefisien yang tak berdimensi dengan notasi (') dapat diketahui.

Y'_v	Y'_r	N'_v	N'_r
-0.00663	-0.00031	-0.000114	-0.000344
Y'_v	Y'_r	N'_v	N'_r
-0.01119	0.0024	-0.003215	-0.001748
$Y'\delta$	$N'\delta$	$I'z$	$I'r$
14.24526	-7.12263	0.00295	0.00259

b1 =	8.173461466
b2 =	-8.178266972

Dari nilai tabel tersebut maka dapat dibuat matriks seperti berikut:

$M' =$	$\frac{m' - Y'_v}{m'.Xg - N'_v}$	$\frac{m'.Xg - Y'_r}{I'z - N'_r}$
$M' =$	$\frac{0.006630212}{0.000157869}$	$\frac{0.000353869}{0.003294}$

$N' =$	$\frac{(-)Y'_v}{(-)N'_v}$	$\frac{m'u' - Y'_r}{m'.Xg.u' - N'_r}$
$N' =$	$\frac{0.011185}{0.003215}$	$\frac{-0.00235987}{0.002085794}$

Kedua matriks ini dilinierisasi sehingga didapatkan koefisien-koefisien yang berdimensi seperti berikut:

$M =$	$\frac{m'11 \times L/U^2}{m'21 \times L/U^2}$	$\frac{m'12 \times L^2/U^2}{m'22 \times L^2/U^2}$
$M =$	$\frac{0.01109322}{0.000264136}$	$\frac{0.058733368}{0.546720664}$

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{N} = \frac{\begin{array}{cc} n'_{11}/U & n'_{12} \times L/U \\ n'_{21}/U & n'_{22} \times L/U \end{array}}{} \\
 \mathbf{N} = \frac{\begin{array}{cc} 0.001452597 & -0.03040245 \\ 0.000417532 & 0.026871533 \end{array}}{}
 \end{array}$$

Determinan dari matriks M dan N adalah sebagai berikut:

$$\det(M) = 0,006049379$$

$$\det(N) = 0,00005172$$

Persamaan dibawah ini digunakan untuk mendapatkan fungsi transfer dinamika kapal berdasar dari nilai yang telah diperoleh diatas.

$$\frac{\psi}{\delta r}(s) = \frac{Kr(1+T_3s)}{s(1+T_1s)(1+T_2s)}$$

Parameter dari fungsi transfer diatas diperoleh dari:

$$T_1T_2 = \frac{\det(M)}{\det(N)}$$

$$T_1 + T_2 = \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{\det(N)}$$

$$Kr = \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det(N)}$$

$$KrT_3 = \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b_2}{\det(N)}$$

T1T2	T1 + T2	Kr	KrT3
116.947	20.79674346	295.634	1795.605292

Sehingga didapatkan model matematis dari sebuah kapal motor penumpang Legundi Surabaya berdasarkan model Nomoto orde II:

$$\frac{\psi}{\delta r}(s) = \frac{1795,605s + 295,634}{116,947s^3 + 20,797s^2 + s}$$

B. Pemodelan Gangguan Arus Laut

Pemodelan gangguan arus pada penelitian ini menggunakan pendekatan model *Gauss-Markov process* orde satu (Fossen, 1994). Dengan menggunakan model arus dua dimensi dan hanya menggunakan dua parameter yakni berupa kecepatan arus dan arah arus, maka perhitungan dapat dilakukan seperti berikut:

1. Inisialisasi nilai awal

Diasumsikan menggunakan kecepatan arus maksimum di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya untuk bulan Maret 2020, sehingga diperoleh:

$$V_c(0) \approx 1 \text{ knot} = 0,514 \text{ m/s}$$

$$V_c(0) \approx 1,5 \text{ knot} = 0,772 \text{ m/s}$$

$$V_c(0) \approx 2 \text{ knot} = 1,029 \text{ m/s}$$

2. Integrasi Euler dengan waktu sampling t

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

Penyelesaian menggunakan deret Euler:

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

Maka:

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

Keterangan:

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

μ_0 : *Constant value (0,1)*

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

Maka ketika arus maksimum sebesar 1 knot, persamaan model matematis kecepatan arus laut menjadi:

$$V_c(t) = 0,514 + t(\omega(t) - (0,1 \cdot 0,514))$$

Maka ketika arus maksimum sebesar 1,5 knot, persamaan model matematis kecepatan arus laut menjadi:

$$V_c(t) = 0,772 + t(\omega(t) - (0,1 \cdot 0,772))$$

Maka ketika arus maksimum sebesar 2 knot, persamaan model matematis kecepatan arus laut menjadi:

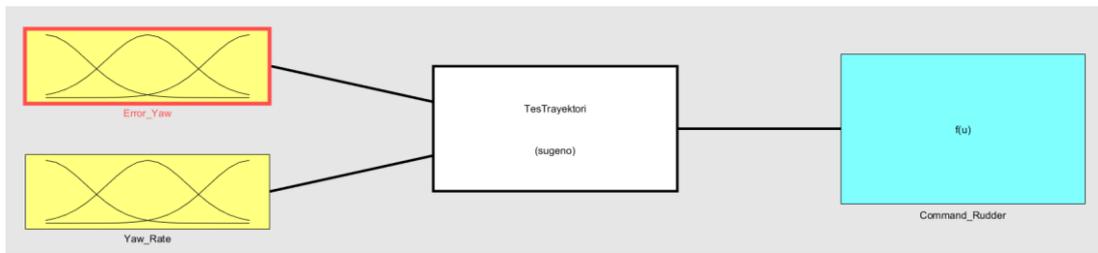
$$V_c(t) = 1,029 + t(\omega(t) - (0,1 \cdot 1,029))$$

C. Hasil Perancangan Sistem Kontrol Logika Fuzzy (KLF)

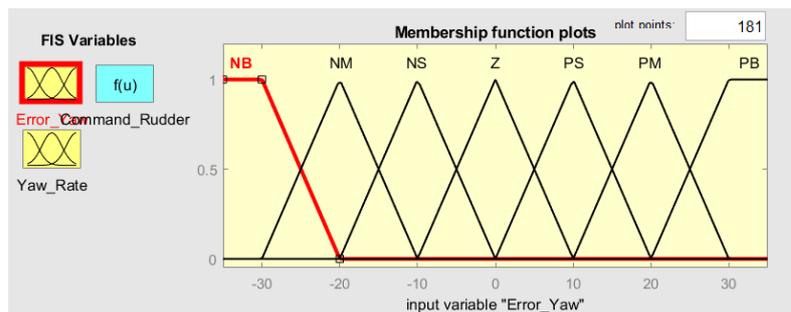
- **Perancangan Pertama**

Metode Penalaran : Model *fuzzy* Sugeno-Takagi

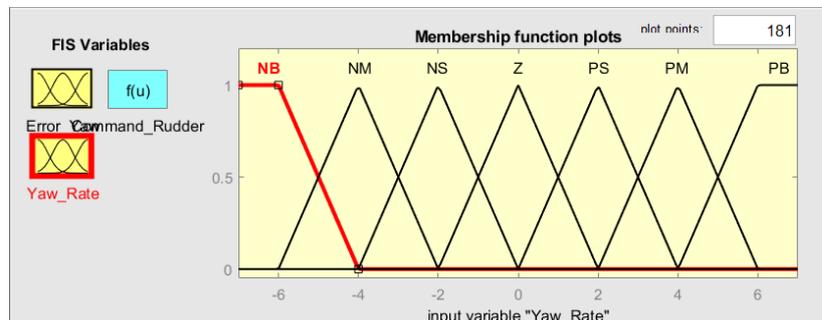
Operator dasar (*fuzzy inference*) : logika AND



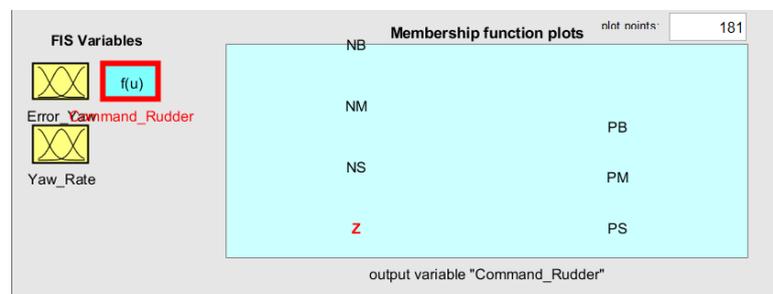
Gambar C.1 Perancangan ke-1 sistem KLF trayektorji



Gambar C.2 Membership function error yaw (1)

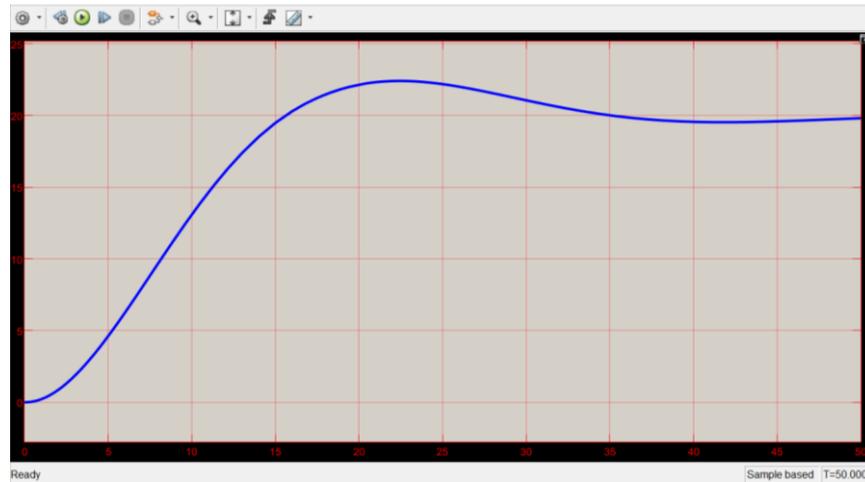


Gambar C.3 Membership function yaw rate (1)



Gambar C.4 Membership function command rudder (1)

Hasil respon :

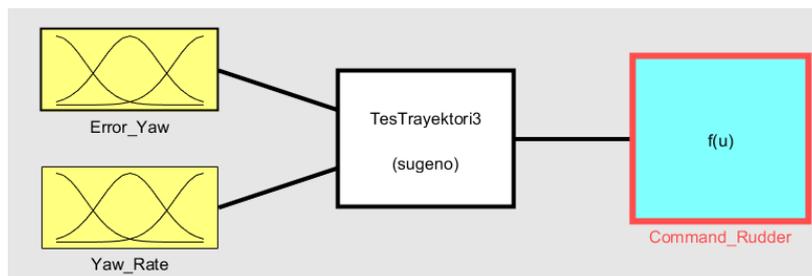


Gambar C.5 Hasil respon sistem KLF trayektori perancangan 1

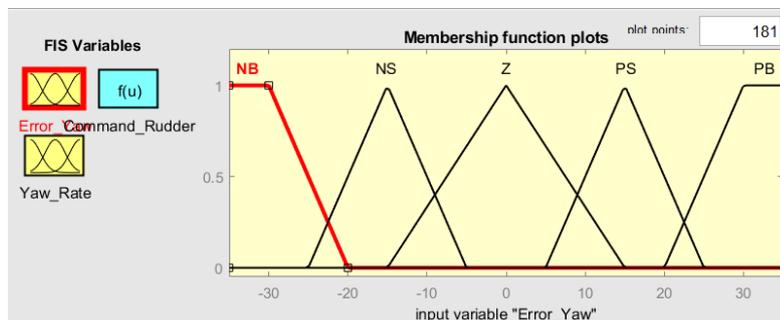
- **Perancangan Kedua**

Metode Penalaran : Model *fuzzy* Sugeno-Takagi

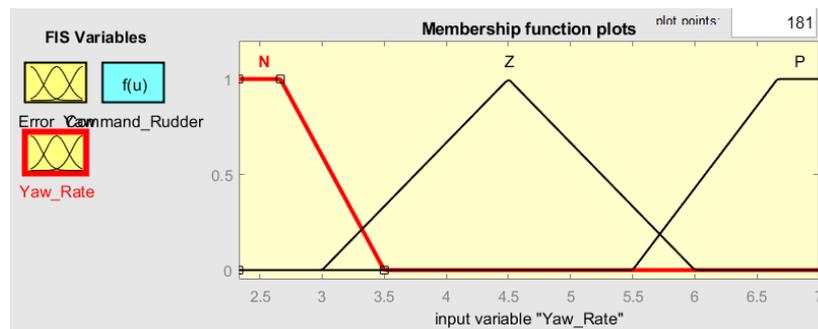
Operator dasar (*fuzzy inference*) : logika AND



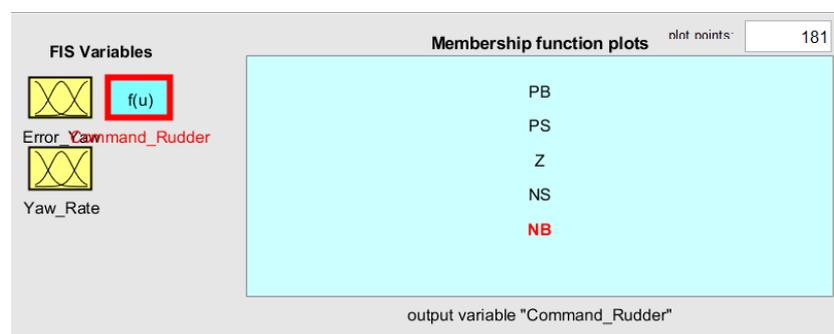
Gambar C.6 Perancangan ke-2 sistem KLF trayektori



Gambar C.7 Membership function error yaw (2)



Gambar C.8 Membership function yaw rate (2)



Gambar C.9 Membership function command rudder (2)

Hasil respon :

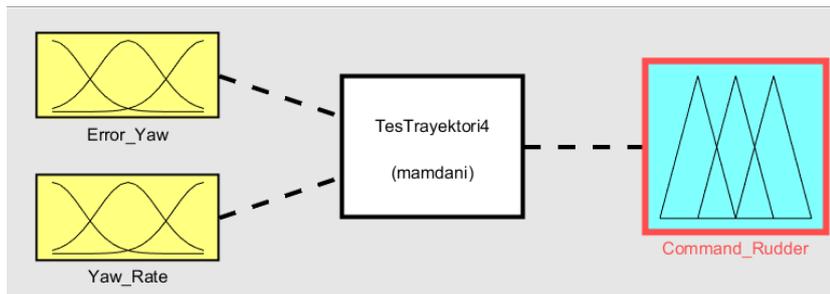


Gambar C.10 Hasil respon sistem KLF trayektori perancangan 2

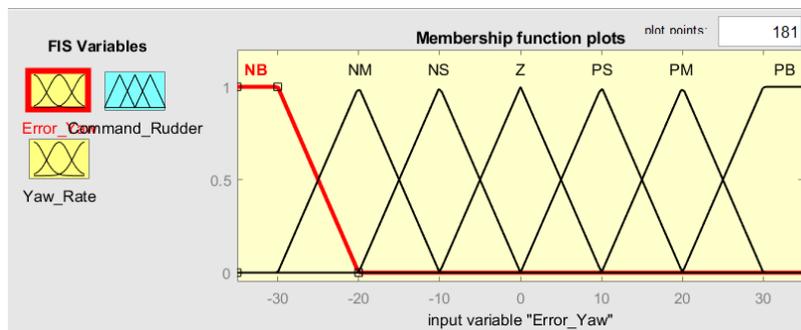
- **Perancangan Ketiga**

Metode Penalaran : Model *fuzzy* Mamdani

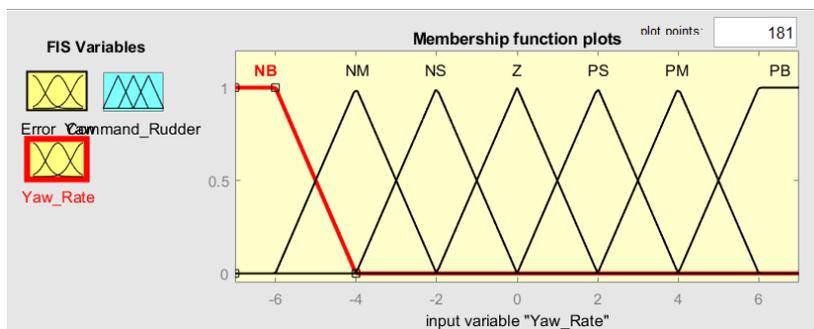
Operator dasar (*fuzzy inference*) : logika AND



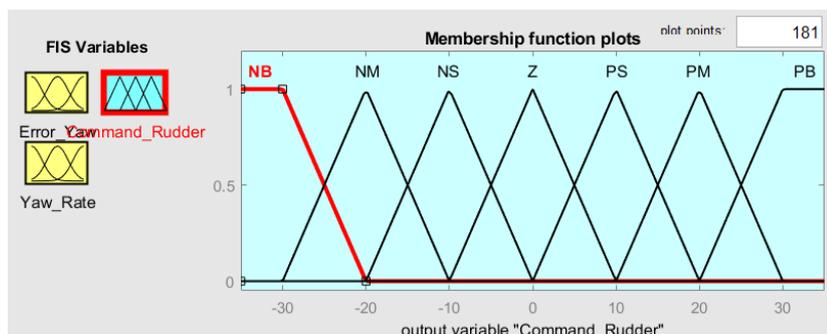
Gambar C.11 Perancangan ke-3 sistem KLF trayektori



Gambar C.12 Membership function error yaw (3)



Gambar C.13 Membership function yaw rate (3)



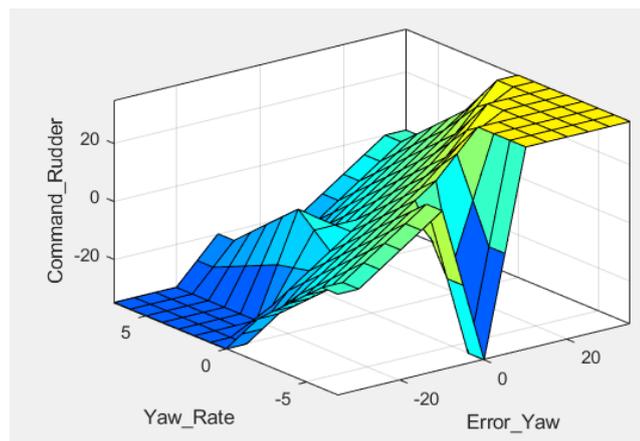
Gambar C.14 Membership function command rudder (3)

Hasil respon :

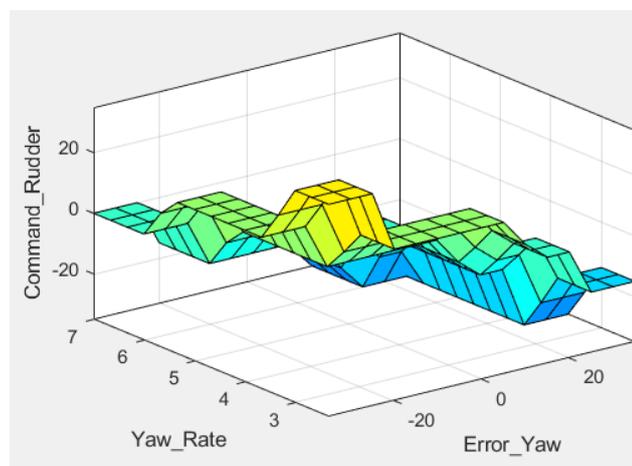


Gambar C.15 Hasil respon sistem KLF trayektori perancangan 3

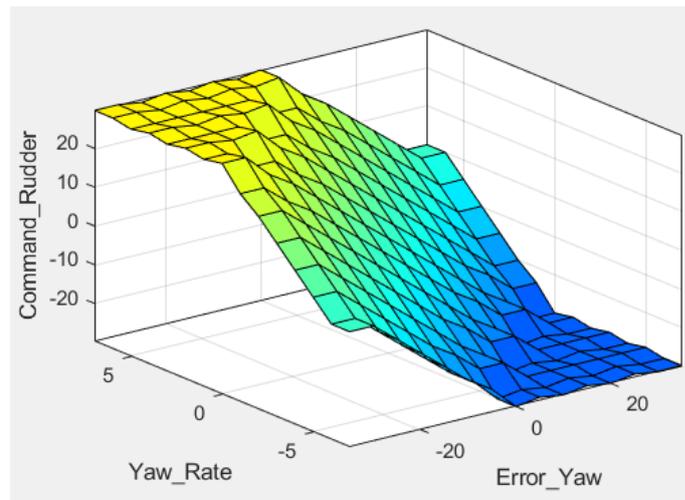
• Hasil *view surface* ketiga percobaan perancangan



Gambar C.16 Tampilan view surface sistem KLF trayektori (1)



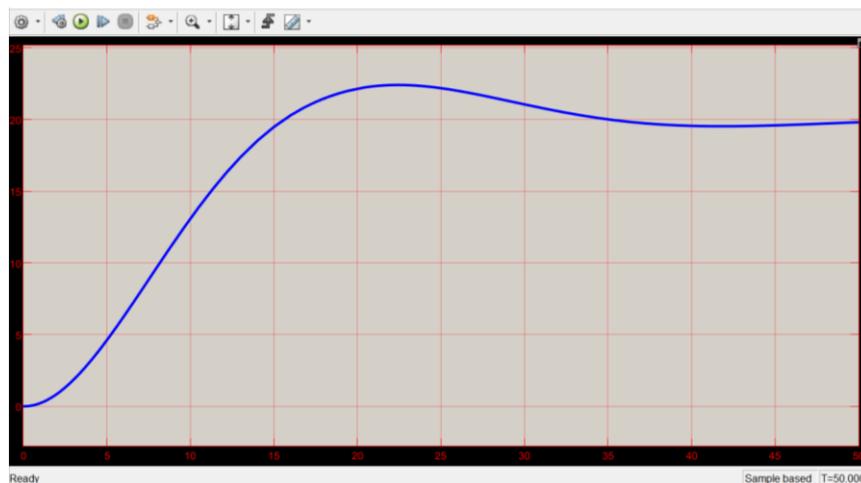
Gambar C.17 Tampilan view surface sistem KLF trayektori (2)



Gambar C.18 Tampilan view surface sistem KLF trayektori (3)

D. Hasil Perhitungan Perbandingan Jenis-jenis Sistem Kontrol (Hasil Kapal tak Berdimensi)

1.) Kontrol *Fuzzy*



Gambar D.1 Hasil respon sistem KLF

- *Maximum Overshoot* : $\frac{22,41-19,81}{19,81} \times 100\% = 13,125\%$
- *Settling Time* : 643,94 sekon
- *Rise Time* : 177,08 sekon (5% = 8,86 sekon; 95% = 185,94 sekon)
- *Peak Time* : 287,5 sekon

2.) Mode Kontrol P (P = 0,17198)



- *Maximum Overshoot* : $\frac{24,87-19,9}{19,9} \times 100\% = 24,975\%$
- *Settling Time* : 2316,65 sekon
- *Rise Time* : 308,8 sekon (5% = 64,75 sekon; 95% = 373,55 sekon)
- *Peak Time* : 608,66 sekon

3.) Mode Kontrol PI (P = 0,17198; I = 0,00018496)



- *Maximum Overshoot* : $\frac{25,27-20,12}{20,12} \times 100\% = 25,596\%$
- *Settling Time* : 2316,65 sekon
- *Rise Time* : 310,54 sekon (5% = 66,55 sekon; 95% = 377,09 sekon)
- *Peak Time* : 614,87 sekon

E. Nilai Hasil Kapal tak Berdimensi vs Nilai Hasil Kapal Berdimensi

1. Hasil Uji *Closetloop*:

- Kapal tak berdimensi (*steady state* saat mencapai waktu 49,8 detik)
- Kapal berdimensi (*steady state* saat mencapai waktu 10,7 menit)

2. Hasil simulasi kontrol kapal tanpa gangguan:

- Kapal tak berdimensi (Proses trayektori selama 33,7 menit, dan proses sandar selama 9 detik)
- Kapal berdimensi (Proses trayektori selama 93,5 menit, dan proses sandar selama 1,9 menit)

3. Parameter respon jenis kontroler:

- Kapal tak berdimensi

Tipe Pengendali	<i>Max. Overshoot</i>	<i>Rise time</i>	<i>Settling time</i>	<i>Peak time</i>
<i>Fuzzy</i>	13,125%	2,9 menit	10,7 menit	4,8 menit
P	24,975%	5,1 menit	38,5 menit	10,1 menit
PI	25,596%	5,1 menit	38,5 menit	10,2 menit

- Kapal berdimensi

Tipe Pengendali	<i>Max. Overshoot</i>	<i>Rise time</i>	<i>Settling time</i>	<i>Peak time</i>
<i>Fuzzy</i>	13,125%	38 menit	138 menit	61,7 menit
P	24,975%	66 menit	497 menit	130 menit
PI	25,596%	66 menit	497 menit	132 menit

F. Spesifikasi Pada Kapal

1. *Propeller*

Motor speed : 500 rpm

v : 7,7 m/s

2. *Rudder* (kemudi)

$A\delta$: 7,19 m²

$\Delta\delta$: -35⁰ sampai 35⁰

Vcc : 380 volt

Time constant : 0,05

3. Bow Thruster

Type : TC-70N

Motor output : 115 kW

Motor speed : 1760 rpm

Weight : 700 kg

Diameter : 700 mm

v : 5,376 m/s

4. Stern Thruster

Type : TC-70N

Motor output : 115 kW

Motor speed : 1760 rpm

Weight : 700 kg

Diameter : 700 mm

v : 5,376 m/s

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Deaz Indra Setiawan adalah nama penulis tugas akhir ini. Penulis lahir dari orang tua H. Munin Niin Kisin, S.E. dan Hj. Rd. Leli Budianti sebagai anak ke-tiga dari lima bersaudara. Penulis dilahirkan di Bogor pada tanggal 22 Desember 1997. Penulis pernah menempuh pendidikan di SDN Pajeleran 01 Cibinong, SMPN 2 Cibinong, SMAN 2 Cibinong, dan S1 Teknik Fisika ITS. Selama masa perkuliahan penulis pernah aktif di bidang organisasi, dan minat bakat yang ada dalam lingkup kampus, diantaranya Staff Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa (PSDM) Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika (HMTF) ITS, dan anggota Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) futsal ITS. Selain aktif dalam bidang kemahasiswaan, penulis juga aktif dalam bidang akademik yaitu menjadi asisten di Laboratorium Pengukuran Fisis dan kalibrasi, sedangkan bidang minat yang diambil untuk tugas akhir ini adalah bidang rekayasa instrumentasi dan kontrol.

Dengan ketekunan, motivasi tinggi untuk terus belajar, dan berusaha, Penulis telah berhasil menyelesaikan pengerjaan tugas akhir ini. Semoga dengan penulisan tugas akhir ini mampu memberikan kontribusi positif bagi dunia pendidikan.

Akhir kata, Penulis mengucapkan rasa syukur yang sebesar-besarnya atas terselesaikannya tugas akhir yang berjudul **“Perancangan Sistem Kendali Trayektori dan Sandar Kapal Otomatis berbasis Sistem Logika Fuzzy di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya”**. Apabila terdapat hal-hal yang ingin didiskusikan mengenai topik tugas akhir ini, Penulis dapat dihubungi melalui email deazindra25@gmail.com.