TUGAS AKHIR - TF 181801

PERANCANGAN SISTEM *AUTOPILOT* BERBASIS LOGIKA *FUZZY* UNTUK *TRAJECTORY* ANTAR PULAU: STUDI KASUS KETAPANG - GILIMANUK

ACHMAD FERRY BASTIAN
NRP. 02311640000132

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 AUTOPILOT SYSTEM BASED ON FUZZY LOGIC FOR INTER-ISLAND TRJECTORY: CASE STUDY KETAPANG – GILIMANUK

ACHMAD FERRY BASTIAN
NRP. 02311640000132

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

Department Of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama	: Achmad Ferry Bastian
NRP	: 02311640000132
Departemen / Prodi	: Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas	: Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Perguruan Tinggi	: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Perancangan Sistem *Autopilot* Berbasis Sistem Logika *Fuzzy* untuk *Trajectory* Antar Pulau: Studi Kasus Ketapang - Gilimanuk" 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, 07 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,

Achmad Ferry Bastian

NRP. 02311640000132

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

PERANCANGAN SISTEM AUTOPILOT BERBASIS LOGIKA FUZZY UNTUK TRAJECTORY ANTAR PULAU: STUDI KASUS KETAPANG - GILIMANUK

Oleh:

Achmad Ferry Bastian
NRP. 02311640000132

Surabaya, Juli 2020

Menyetujui, Pembimbing I	Menyetujui, Pembimbing II
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.	Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.
NIP. 196601161989032100 1	NIP. 195808071984031001

Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS

Dr. Suyanto S.T, M.T
NIP. 197111131995121002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN SISTEM AUTOPILOT BERBASIS LOGIKA FUZZY UNTUK TRAJECTORY ANTAR PULAU: STUDI KASUS KETAPANG - GILIMANUK

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

ACHMAD FERRY BASTIAN

NRP. 02311640000132

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	Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc.	.....	(Penguji I)
5	Dr.rer.nat. Ruri Agung Wahyuono, S.T., M.T.		(Penguji II)
6	Dr. Ir. Syamsul Arifin, MT.		(Penguji III)

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERANCANGAN SISTEM AUTOPILOT BERBASIS LOGIKA FUZZY UNTUK TRAJECTORY ANTAR PULAU: STUDI KASUS KETAPANG - GILIMANUK

Nama	**:**	**Achmad Ferry Bastian**
NRP	**:**	**02311640000132**
Departemen	**:**	**Teknik Fisika FTIRS - ITS**
Dosen Pembimbing	**:**	**Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah M.T.**
		Dr. Ir. A. A. Masroeri M.Eng.

ABSTRAK

Indonesia merupakan negara kepulaun terbesar di dunia dengan jumlah pulau lebih dari 17.000 pulau berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik Nasional (BPS). Transportasi antar pulau di Indonesia mengandalkan transportasi laut. Jalur kapal *ferry* yang beroperasi di *trajectory* Ketapang – Gilimanuk sudah ditentukan oleh petugas syahbandar. Sering kali akibat adanya gangguan berupa arus laut, gelombang, dan angin kapal tidak dapat memenuhi jalur pelayaran teresbut. Penelitian ini mengusulkan sebuah rancangan sistem kendali otomatis pada trayektori kapal untuk penyeberangan antar pulau. Sistem kendali yang yang dirancang meruapakan ssistem autopilot untuk memenuhi trayektori. Sistem autopilot menggunakan metode logika fuzzy, dengan variable masukan *error* dan *yawrate*, dan variable yang dikandalikan *heading* kapal. Variabel *error* adalah selisih heading kapal *set point* dengan heading *actual*. Nilai *heading actual* digunakan untuk menentukan posisi *actual*. Selisih dari posisi yang diharapkan dengan *actual*, digunakan untuk menentukan set point heading. Sistem logika fuzzy yang digunakan adalah tipe 2, Penelitian dilakukan secara simulasi *computer*, dengan bantuan *software* Matlab. Simulasi dilakukan untuk beberapa kondisi, diantaranya pada saat tanpa dan ada gangguan dari lingkungan, yaitu tinggi gelombang variasi 0,5-meter, 1,5-meter, dan 2,5-meter serta arus laut dengan kecepatan 1 knot, 2,5 knot, dan 5 knot. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem logika *fuzzy* dengan himpunan keanggotaan berjumlah 7 dan berbentuk fungsi segitiga memiliki performansi terbaik yang ditunjukkan dengan *maximum overshoot* 22.061, *settling time* 523,05 detik, dan *error steady state* 0,46%. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu mengikuti target *trajectory* dengan *error* posisi terbesar akibat gangguan gelombang 2,5-meter dengan besar *error* posisi sebesar 7.424308-meter.

Kata Kunci: Arus Laut, Gelombang, Kapal Feri, Ketapang – Gilimanuk, Kontrol *Trajectory*, Logika *Fuzzy* Tipe 2,

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN OF AUTOPILOT SYSTEM BASED ON FUZZY LOGIC FOR INTER-ISLAND TRAJECTORY: CASE STUDY KETAPANG -GILIMANUK

Name	:	**Achmad Ferry Bastian**
NRP	:	**02311640000132**
Department	:	**Engineering Physics FTIRS - ITS**
Supervisors	:	**Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.**
		Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.

ABSTRACT

Indonesia is the biggest Archipelago in the world with the number of its island is more than 17,000 based on their national statistic department (BPS). Inter-island transportation in Indonesia depends on sea transportation. Ferry trajectory who operate in Ketapang – Gilimanuk has been determined by their fort officer. Oftentimes because of disturbance from sea current, wave, dan wind a ship can't follow their trajectory. This research proposed a design of automatic control on ship trajectory for inter-island transportation. Control system who designed is an autopilot system for trajectory control. Autopilot system using fuzzy logic, with input variable are error and yaw rate, and control variable is ship's heading. Error variable is difference of set point ship heading and actual heading. Actual heading value is used to define actual position. Difference of desired position and actual position used to define heading set point. Fuzzy logic system used in this research is type 2 fuzzy logic, research done using computer simulation, with software MATLAB. Simulation done with kind of condition, using and without environment disturbance, that is wave with height variation 0,5-meter, 1,5-meter, and 2,5-meter, *and sea current with speed variation* 1 knot, 2,5 knot, dan 5 knot. *The result of the simulation shows that fuzzy logic system with number of membership function 7 and with triangle function has the best performance shown by maximum overshoot* 22.061, *settling time* 523,05 sec, *and error steady state* 0,46%. *The result of the simulation shows that the proposed system can follow target trajectory with the biggest position error from wave disturbance 2.5 meter is 7.424308 meter.*

Keywords: *Sea Current, Sea Wave, Ferry Ship, Ketapang – Gilimanuk, Trajectory Control, Type 2 Fuzzy Logic.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَٰنِ الرَّحِيمِ

Assalamualaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan nikmat-Nya, sehingga penulis selalu menerima petunjuk da kesehatan dari-Nya. Shalawat serta salam senantia tercurah kepada Nabi Muhammad SAW. Atas izin Allah penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir beserta pembuatan laporan yang berjudul:

PERANCANGAN SISTEM AUTOPILOT BERBASIS LOGIKA FUZZY UNTUK TRAJECTORY ANTAR PULAU: STUDI KASUS KETAPANG – GILIMANUK

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Fisika di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dalam penyusunan Tugas Akhir penulis menerima banyak bantuan dari banyak pihak. Dalam kesempatan kali ini penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu penulis hingga laporan Tugas Akhir ini dapat terselesaikan, khususnya kepada:

1. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku kepala Departemen Teknik Fisisika ITS yang memberikan dukungan secara moral dan administrasi.
2. Munir, Nuriati, Bahtiar Ardhi Muzaki, dan Ramtam selaku keluarga penulis yang tiada henti memberika doa dan semangat.
3. Ibu Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT. dan Bapak Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng. selaku dosen pembimbing tugas akhir.
4. Bapak dan Ibu dosen serta staff tata usaha Teknik Fisika yang telah membantu penulis selama masa perkuliahan baik berupa ilmu maupun bantuan berupa dalam hal administrative.
5. Deaz Indra Setiawan dan Muhammad Muklis Jamali yang selalu memberi masukan penulis dalam pengerjaan tugas akhir.

6. Teman-teman F51 serta rekan-rekan penulis yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis sangat menyadari bahwa dalam laporan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan. Kritik dan saran yang membangu sangat dibutuhkan dalam menyempurnakan laporan Tugas Akhir ini.

Surabaya, 07 Juli 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL……i
COVER PAGE..... iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI v
LEMBAR PENGESAHAN vii
LEMBAR PENGESAHAN ix
ABSTRAK xi
ABSTRACT..... xiii
KATA PENGANTAR xv
DAFTAR ISI..... xvii
DAFTAR GAMBAR xix
DAFTAR TABEL..... xxi
BAB I PENDAHULUAN..... 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan.....2
1.4 Batasan Masalah.....3
1.5 Sistematika Laporan 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI..... 5
2.1 Tinjauan Pustaka 5
2.2 Kapal Feri 7
2.3 Model Dinamika Kapal 8
2.4 Model Gangguan Kapal.....12
2.5 Model Kemudi Otomatis 13
2.6 Dasar Penentuan *Trajectory* 14

2.7 Logika *Fuzzy* 15
2.8 Logika *Fuzzy* Tipe 2 16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 19
3.1 Alur Penelitian 19
3.2 Identifikasi Permasalahan 20
3.3 Studi Literatur Terkait Pemahaman Terhapad Kontrol *Trajectory* 20
3.4 Pengambilan Data Berupa Spesifikasi Kapal Ferry KMP Legundi 20
3.5 Pemodelan Dinamika Kapal 21
3.6 Pemodelan Gangguan 22
3.7 Pemodelan *Trajectory* Kapal di Ketapang – Gilimanuk 24
3.8 Perancangan Kontrol *Trajectory* 25
3.9 Pengujian Melalui Simulasi 30
3.10 Analisa Performansi 35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 37
4.1 Analisa Pengujian Sistem Kontrol 37
4.2 Analisa Sistem *Autopilot* pada Kapal tanpa Gangguan 39
4.3 Analisa Sistem *Autopilot* pada Kapal dengan Gangguan 40
4.4 Perbandingan Performansi sistem Autopilot 51
4.5 Pembahasan hasil simulasi terhadap kerealistikan kondisi actual 52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 54
5.1 Kesimpulan 54
5.2 Saran 54
DAFTAR PUSTAKA 56
LAMPIRAN 59
BIODATA PENULIS 71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 KMP Legundi (*Kapal PT ASDP Indonesia Ferry*, n.d.)..... 8
Gambar 2. 2 Derajat Kebebasan pada Dinamika Gerak kapal (Fossen, 1994) 9
Gambar 2. 3 Arah Vektor Ganguan Arus Laut(Fossen, 1994)..... 13
Gambar 2. 4 Skema Aktuator pada Kapal (Fossen, 1994) 14
Gambar 2. 5 Line Of Sight(Li et al., 2019) 15
Gambar 2. 6 Arsitektur Sistem Logika *Fuzzy* Tipe 1 16
Gambar 2. 7 *Membership Function* Sistem Logika *Fuzzy* Tipe 2(Naik & Gupta, 2017) 17
Gambar 2. 8 Arsitektur Sistem Logika *Fuzzy* Tipe 2 18
Gambar 3. 1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir..... 19
Gambar 3. 2 Alur Pelayaran Ketapang – Gilimanuk..... 24
Gambar 3. 3 Diagram Blok Perancangan Kontrol *Trajectory*..... 26
Gambar 3. 4 Arsitektur Rancangan Kontrol dengan KLF II 27
Gambar 3. 5 Fungsi Keanggotaan *Input Error*..... 28
Gambar 3. 6 Fungsi Keanggotaan *Input Yaw Rate*..... 28
Gambar 3. 7 Fungsi Keanggotaan *Ouput* 29
Gambar 3. 8 *Survace View* Sistem Logika *Fuzzy*..... 29
Gambar 3. 9 Pengujian *Open Loop* 30
Gambar 3. 10 Pengujian *Close Loop*..... 31
Gambar 3. 11 Simulasi tanpa Gangguan 33
Gambar 3. 12 Simulasi dengan Gangguan 34
Gambar 4. 1 Respon *Open Loop* dari KMP Legundi 37
Gambar 4. 2 Respon *Close Loop* dari KMP Legundi..... 38
Gambar 4. 3 Hasil Simulasi tanpa Gangguan..... 39
Gambar 4. 4 Hasil Simulasi dengan Gangguan Arus Laut 1 knot..... 42
Gambar 4. 5 Hasil Simulasi dengan Gangguan Arus Laut 2,5 knot..... 43
Gambar 4. 6 Hasil Simulasi dengan Gangguan Arus Laut 5 knot..... 44
Gambar 4. 7 Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 0,5 meter 46
Gambar 4. 8 Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 1,5 meter 47

Gambar 4. 9 Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 2,5 meter..... 48
Gambar 4. 10 Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 2,5 meter dan Arus 5 knot 50

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Derajat Kebebasan Kapal (Fossen, 1994) 9
Tabel 2. 2 Prime System I (Ashari et al., 2014) 11
Tabel 3. 1 Koefisien Hidrodinamika Kapal..... 21
Tabel 3. 2 Parameter Model Nomoto 21
Tabel 3. 3 Koordinat Alur Pelayaran *Desire* 25
Tabel 3. 4 Rancangan *Rule Base* 29
Tabel 4. 1 Performansi Rancangan Parameter *Fuzzy* Tipe 1 dalam Domain Nondimensi 38
Tabel 4. 2 Koordinat Hasil Simulasi tanpa Gangguan..... 40
Tabel 4. 3 Koordinat Hasil Simulasi dengan Gangguan Arus Laut 1 knot 41
Tabel 4. 4 Koordinat Hasil Simulasi dengan Gangguan Arus Laut 2,5 knot 43
Tabel 4. 5 Koordinat Hasil Simulasi dengan Gangguan Arus Laut 5 knot 44
Tabel 4. 6 Koordinat Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 0,5 m 45
Tabel 4. 7 Koordinat Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 1,5 meter .. 47
Tabel 4. 8 Koordinat Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 2,5 meter .. 49
Tabel 4. 9 Koordinat Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 2,5 meter dan Arus 5 knot..... 50
Tabel 4. 10 Hasil Simulasi Kapal LCT Bintang Samodra..... 53

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara kepulauan yang sebagian besar wilayahnya adalah lautan. Menurut data dari Badan Pusat Statistik (BPS) pada tahun 2016 jumlah pulau yang ada di Indonesia sebanyak 17.504 pulau (Badan Pusat Statistik, 2017). Jumlah pulau yang besar di Indonesia tidak seimbang dengan jumlah jembatan yang menghubungkan pulau satu dengan pulau lainnya. Transportasi laut merupakan sarana transportasi utama yang menghubungkan pulau satu dengan pulau lainnya

Kebutuhan transportasi antar pulau di Indonesia dilakukan dengan menggunakan kapal. Kapal di Indonesia digunakan sebagai sarana transportasi khususnya transportasi barang dan manusia. Transportasi barang dilakukan dengan menggunakan kapal berjenis *cargo* dan *container* untuk muatan berupa barang dan *tanker* untuk muatan berupa minyak dan gas. Berbeda dengan transportasi barang, transportasi penumpang dilakukan dengan kapal yang lebih kecil yaitu kapal feri. Kapal feri berlayar berdasarkan *trajectory* yang telah ditentukan sebelumnya. Penentuan *trajectory* ini dilakukan oleh petugas Syahbandar pelabuahn setempat. Penentuan *trajectory* ini dilakukan untuk mencegah adanya kecelakan pada kapal. Idealnya setiap kapal berlayar sesuai dengan *trajectory* yang telah ditentukan, namun akibat adanya gangguan pada kapal dapat menyebabkan kapal keluar dari *trajectory* yang telah ditentukan. Gangguan pada kapal ini dapat berupa angin, arus, dan gelombang laut. Gangguan laut ini dapat menyebabkan kapal keluar dari *trajectory* dan mengalami kecelakaan baik itu kandas maupun tabrakan antar kapal.

Jalur pelayaran Ketapang-Gilimanuk merupakan salah satu jalur pelayaran yang sibuk di Indonesia. Menurut data Departemen Perhubungan Indonesia terdapat 47 Kapal yang melalui jalur Ketapang-Gilimanuk. Arus Selat Bali yang cukup deras serta adanya cuaca buruk lainnya sering menimbulkan gangguan dalam perjalanan kapal feri (Usman et al., 2016). Bebeberapa kasus kecelakan yang terjadi di jalur pelayaran Ketapang-Gilimanuk diantaranya Kasus kandasnya kapal feri

KMP Prathita IV pada 2 Febuari 2019 diakibatkan oleh gangguan arus kencang yang datang dari selatan dan pada Jumat 8 Februari 2019 Kapal KPM Tunu Pratama Jaya 3888 betabrakan dengan kapal KMP Liputan XII yang mengakibatkan lambung kapal KMP Tunu Pratama Jaya 3888 bocor, selain itu kasus kapal yang terseret arus juga pernah terjadi pada Jumat, 25 Mei 2012 dimana kapal Nusa Makmur terseret arus sejauh satu mil dari pelabuhan Gilimanuk. Pada umunya kapal di Indonesia masih menerapkan system pengendalian konvensional dimana nahkoda bertugas mengembalikan posisi kapal saat keluar dari *trajectory* yang telah ditentukan. Kelemahan dari pengendalian ini adalah mudah terjadinya *human error*.

Kondisi tersebut dapat membahayakan proses transportasi pada jalur Ketapang-Gilimanuk. Keadaan tersebut dapat diatasi dengan perancangan sistem pengendali *trajectory*. Konsep pengemdalian *trajectory* dilakukan dengan mengendalikan *rudder* kapal untuk mengendalikan arah sudut kapal. Pada penelitian ini metode kontrol yang digunakan adalah Kontrol Logika Fuzzy Tipe 2. Metode kontrol ini mampu mengendalikan suatu sistem dengan tingkat ketidakpastian yang tinggi pada kondisi sebenarnya (Hagras, 2008). Beberapa penelitian pengendalian *trajectory* diantaranya pengendalian dengan metode logika fuzzy tipe 1 di *trajectory* Ketapang-Gilimanuk (Vinaya et al., 2013) dan metode *Linear Quadratic Gaussian* yang diaplikasikan pada *trajectory* Tanjung Perak (Ashari et al., 2014).

1.2 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan dari Tugas Akhir ini adalah adalah sebagai berikut:

a) Berapa nilai parameter sistem logika *fuzzy* yang mampu memberikan performansi sistem yang baik?
b) Apakah sistem *autopilot* mempunya performansi kestabilan yang baik, pada saat terjadi gangguan arus laut dan gelombang?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

a) Merancang sistem *autopilot* dengan menggunakan logika *fuzzy* dengan performansi yang baik.

b) Melakukan analisis terhadap performansi kestabilan sistem *autopilot* sebagai pengandali kapal dengan gangguan berupa arus laut dan gelombang.

1.4 Batasan Masalah

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

a) Pemodelan dinamika kapal berdasarkan spesifikasi kapal KMP Legundi berjenis Ferry roro.
b) Gangguan dari lingkungan berupa arus laut dan gelombang.
c) Metode Fuzzy yang digunakan menggunakan metode Sugeno.
d) Simulasi hasil perancangan sistem kendali dilakukan dengan *software* Matlab 2019.
e) Diasumsikan bahwa kapal KMP Legundi melayani jalur pelayayan Ketapang – Gilimanuk.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan penelitian Tugas Akhir ini disusun dengan sesitematika penulisan sebagai berikut:

BAB I **PENDAHULUAN**

Bab ini berisi tentang latar belakag, permasalahan, tujuan, Batasan masalah, dan sistematika laporan.

BAB II **TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisi tentang teori dinamika kapal, dinamika gangguan pada kapal, model kemudi otomatis, dasar penentuan *trajectory* pada kapal, dan pengendalian dengan logika *Fuzzy*.

BAB III **METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini berisi tentang langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini.

BAB IV **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisi tentang analisa hasil perancangan kontrol berbasis Logika *Fuzzy* Tipe 2 dan analisa hasil simulasi berdasarkan uji performansi untuk mengetahui tingkat keberhasilan kontrol *trajectory.*

BAB V **KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari penelitian yang dilakukan dan saran.

DAFTAR PUSTAKA

Daftar pustaka semua referensi yang digunakan dalam penyusunan Tugas Akhir.

LAMPIRAN

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian perancangan sistem pengendali *trajectory* dengan logika *fuzzy* dengan *trajectory* Ketapang - Gilimanuk pernah dilakukan oleh Aninditha dalam penelitian tugas akhir yang berjudul "Perancangan Sistem Kontrol Trajectory pada Kondisi Gangguan Arus Laut Non Uniform di Ketapang-Gilimanuk"(Vinaya et al., 2013). Penelitian yang dilakukan Aninditha menggunakan metode kontrol logika *fuzzy* tipe 1 dengan gangguan berupa arus laut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode kontrol logika *fuzzy* tipe 1 mampu mengendalikan *trajectory* kapal dengan *error* posisi yang kecil.

Penelitian perancangan sistem pengendali *trajectory* dengan metode kontrol *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) pernah dilakuakn oleh Ashari dalam penilitian tugas akhir yang berjudul "Perancangan Sistem Kontrol Optimal *Trajectory* pada Kapal Tanker di Perairan Tanjung Perak-Surabaya dengan Metode *Linear Quadratic Gaussian* (LQG)"(Ashari et al., 2014). Penelitian yang dilakukan Ashari menggunakan metode kontrol LQG dengan gangguan berupa gelombang di perairan Tanjung Perak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu mengendalikan *trajectory* kapal.

Penelitian perancangan sistem pengendali *trajectory* dengan menggunakan *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk mengoptimalkan parameter *fuzzy* dalam *Fuzzy Model Reference Learning Controller* (FMRLC) pernah dilakukan oleh Sethuramalingan dalam penelitiannya yang berjudul "*A Proposed System of Ship Trajectory Control Using Particle Swarm Optimization*"(Sethuramalingam & Nagaraj, 2016). Penelitian dilakuakan dengan objek kapal berupa kapal Tanker dengan gangguan berupa angin, perubahan kecepatan, *sensor noise*, dan perubahan mendadak dari beban pada kapal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dirancang menunjukkan *robustness* dan kemampuan dalam mengendalikan sudut kendali kapal.

Penelitian penerapan *neural network control* untuk mengendalikan *trajectory* pernah dilakukan oleh Meilin dalam penelitiannya yang berjudul "*Adaptive NN Event-triggered Control for Path Following of Underactuated Vessels with Finite-time Convergence"* (Li et al., 2019). Dalam penelitian ini metode *line of sight* (LOS) digunakan untuk menentukan *tracking target* dari kapal. Penelitian dilakukan dengan objek penelitian kapal *mariner*. Hasil penelitian meunjukkan bahwa skema kontrol yang diajukan mampu mengendalikan *trajectory* kapal.

Penelitian penerapan sistem *adaptive output feedback control* yang berbasid *neural network feedback forward compensator* (NNFFC) pernah dilakukan oleh Zang dalam penelitiannnya yang berjudul "*NNFFC-adaptive output feedback trajectory tracking control for a surface ship at high speed"* (L. J. Zhang et al., 2011). Penelitian ini mengendalikan *trajectory* kapal dengan kecepatan tinggi. Perbedaan pengendalian kapal kecepetan tinggi dan rendah adalah pada kecepatan tinggi interaksi akibat *hydrodynamic damping* tidak dapat diabaiakn. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dirancang mampu mengendalikan dengan performansi yang baik.

Penelitian penerapan *neuro-fuzzy controller* untuk pengendalian *dynamic positioning* pernah dilakukan oleh Fang dalam penelitiannya yang berjudul *"Application of neuro-fuzzy algorithm to portable dynamic positioning control system for ships*" (Fang & Lee, 2016). Penelitian ini menggunakan gelombang, arus laut, dan *drifting force* sebagai gangguan. Algoritma *neuro-fuzzy* digunakan untuk *self-tuning* untuk mengendalikan kecepatan rotasi dari *thruster* untuk penyesuaian posisi dan *heading* kapal serta untuk *path tracking.* Hasil penelitian menunjukkan bahwa skema kontrol yang diajukan dapat bekerja dengan deviasi pada *path* dan *heading* yang masih dalam *range* yang dapat diterima.

Penelitian penerapan *neural network* dan *the robust neural damping technique* untuk pengendalian *trajectory* pernah dilakukan oleh Zhang dalam penelitiannya yang berjudul "*Robust neural path-following control for underactuated ships with the DVS obstacles avoidance guidance"* (G. Zhang et al., 2017). Penelitian ini mengendalikan *trajectory* kapal dengan fokus pada *slow time-varying obstacles avoidance.* Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem kontrol

yang di rancang mampu memberikan hasil yang sama dengan metode yang sudah ada namun dengan lebih mudah dalam pengaplikasian.

Penelitian penerapan *Extremum Seeking* dan *adaptive fuzzy control* pada pengendalian kecepatan dan *trajectory* kapal pernah dilakukan oleh Yingjie dalam penelitiannya yang berjudul "*Fuzzy logic based speed optimization and path following control for sail-assisted ships"* (Yingjie et al., 2019). Penelian ini menggunakan dua metode kontrol untuk masing-masing objek pengendalian. *Speed optimization* dilakukan dengan menggunakan algoritma *Extremum Seeking* yang dikombinasikan dengan *self-tunning fuzzy logic.* Hasil penelitian menunjukkan sistem dapat menoptimalkan kecepatan kapal dengan lebih sedikit *chattering.* Pengendalin *trajectory* kapal dilakuka dengan meotde *adaptive fuzzy control.* Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode yang dirancang mampu mengendalikan *trajectory* kapal.

Penelitian penerapan *estimator – backstepping control* dengan estimator *uncertainty* dan *disturbance* pernah dilakukan oleh Yaohong dalam penelitiannya yang berjudul "*Trajectory exponential tracking control of unmanned surface ships with external disturbance and system uncertainties"* (Qu et al., 2018). Pada penelitian memiliki tujuan untuk menghasilkan sistem kontrol yang mampu mengatasi masalah *system uncertainty*, *unknown parameters*, dan *external disturbance*. Untuk menggapai hasil teresbut maka didesai sebuah sistem control yang berbasis *estimator – backstepping control* dengan estimator *uncertainty* dan *disturbance.* Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem menghasilkan *trajectory error* dan *estimator error* yang stabil secara exponensial.

2.2 Kapal Feri

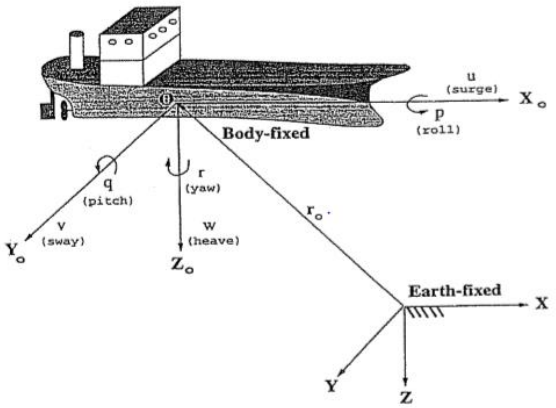
Kapal Ferry adalah salah satu jenis transportasi laut yang berfungsi sebagai media transportasi antar pulau. Indonesia sebagai negara kepulauan menjadikan kapal feri sebagai penghubung pulau satu dengan pulau lainnya. Kapal feri termasuk dalam kategori transportasi massal laut jarak dekat. Kapal Ferry KMP Legundi merupakan salah satu kapal yang melayani jalur pelayaran antar pulau di Indonesia. KMP Legundi masuk dalam jenis kapal ferry roro yang muatan

utamanya adalah manusia. Pemilihan KMP Legundi sebagai objek penelitian didasarkan pada kondisi aplikatif dimana jalur pelayaran Ketapang – Gilimanuk didominasi oleh kapal *ferry* Ro-Ro. Berdasarkan data yang dimiliki oleh Dinas Perhubungan lebih dari 65% kapal yang melayani jalur tersebut adalah kapal *ferry* ro-ro. Gambar 2.1 menunjukkan foto dari KMP Legundi.

Gambar 2. 1 KMP Legundi (*Kapal PT ASDP Indonesia Ferry*, n.d.)

2.3 Model Dinamika Kapal

Model dinamika kapal dapat dinyatakan dalam 6 buah derajat kebebasan. Derajat kebebasan tersebut dibagi menjadi dua yaitu gerak rotasi dan gerak translasi. Gerak rotasi pada kapal dibagi menjadi *roll*, *pitch*, dan *yaw* sedangkan gerak translasi pada kapal dibagi menjadi *surge*, *sway*, dan *heave*. gerakan *roll* merupakan gerakan rotasi pada sumbu depan dan belakang, gerak *pitch* merupakan gerakan rotasi pada sumbu kiri dan kanan, dan gerakan *yaw* merupakan gerakan rotasi pada sumbu atas dan bawah. Gerakan translasi *surge* merupakan gerakan translasi maju dan mundur, gerakan *sway* merupakan gerak translasi kanan dan kiri, dan gerakan *heave* merupakan gerakan translasi atas dan bawah (Fossen, 1994). Gambar 2.2 menunjukan gambar dari derajat kebebasan pada dinamika gerakan kapal.



Gambar 2. 2 Derajat Kebebasan pada Dinamika Gerak kapal (Fossen, 1994)

Tabel 2. 1 Derajat Kebebasan Kapal (Fossen, 1994)

DOF	Gerakan	Gaya & Momen	Kecepatan *linear & Angular*	Posisi & Sudut *Euler*
1	Gerakan arah-x (*surge)*	X	*u*	x
2	Gerakan arah-y (*sway)*	Y	v	y
3	Gerakan arah-z (*heave)*	Z	w	z
4	Gerakan arah-x (*roll)*	K	p	Φ
5	Gerakan arah-y (*pitch)*	M	q	θ
6	Gerakan arah-z (*yaw)*	N	r	Ψ

Tabel 2.1 Menunjukkan derajat kebebasan pada kapal serta hubunganny dengan gaya, kecepatan, dan posisi dari kapal. Persamaan umum untuk maneuver kapal ditunjukkan oleh Persamaan 2.1.

$$M\dot{v} + Nv = \tau_L \qquad \dots (2.1)$$

Dimana $\nu = [u, v, r]^T$ adalah *state vector* dan τL adalah besarnya vector momen dan gaya akibat dari rudder dan penggerak yang lain. M dan N merupakan matrik inersia dan redaman yang diperoleh dari linierisasi persamaan gaya dan momen pada arah *surge, sway* dan *yaw*. Model alternative untuk Persamaan 2.1 diajukan oleh Nomoto pada tahun 1957. Model ini didapatkan dengan

mengeliminasi kecepatan *sway* dari Persamaan 2.1 sehingga didapat fungsi transfer seperti ditunjukkan oleh Persamaan 2.2.

$$\frac{T}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1+T_3 s)}{(1+T_1 s)(1+T_2 s)} \quad \dots (2.2)$$

Persamaan 2.2 merupakan bentuk orde 2 dari model yang diajukan oleh Nomoto pada tahun 1957 (Fossen, 1994). Parameter dari fungsi transfer yang ditunjukkan oleh Persamaan 2.2 diperoleh dari persamaan 2.3 sampai 2.6.

$$T_1 T_2 = \frac{det(M)}{det(N)} \quad \dots (2.3)$$

$$T_1 + T_2 = \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{det(N)} \quad \dots (2.4)$$

$$K_R = \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{det(N)} \quad \dots (2.5)$$

$$K_R T_3 = \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b_2}{det(N)} \quad \dots (2.6)$$

Dimana nilai-nilai m_{ij}, n_{ij}, dan b_i (i = 1,2 dan j = 1,2) didapatkan dari matriks yang ditunjukkan oleh Persamaan 2.7 sampai 2.13.

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad \dots (2.7)$$

$$N(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r \\ -N_v & mx_G u_z - N_r \end{bmatrix} \quad \dots (2.8)$$

$$b = \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix} \quad \dots (2.9)$$

$$det(N) = (-Y_v)(mx_G u_z - N_r) - (-N_v)(mu_0 - Y_r) \quad \dots (2.10)$$

$$det(M) = (m - Y_{\dot{v}})(I_z - N_{\dot{r}}) - (mx_G - N_{\dot{v}})(mx_G - Y_{\dot{r}}) \quad \dots (2.11)$$

$$b_1 = \frac{(I_z - N_{\dot{r}})Y_\delta - (mx_G - Y_{\dot{r}})N_\delta}{det(M)} \quad \dots (2.12)$$

$$b_2 = \frac{(m - Y_{\dot{v}})N_\delta - (mx_G - N_{\dot{v}})Y_\delta}{det(M)} \quad \dots (2.13)$$

Untuk mendapatkan parameter-parameter dari persanamaan Nomoto diperlukan nilai koefisien hidrofinamika seperti ditunjukkan oleh persamaan 2.14 sampai 2.21.

$$\frac{-Y'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.16\frac{C_B B}{T} - 5.1\left(\frac{B}{L}\right)^2 \quad \dots (2.14)$$

$$\frac{-Y'_{\dot{r}}}{\pi(T/L)^2} = 0.67\left(\frac{B}{L}\right) - 0.0033\left(\frac{B}{T}\right)^2 \quad \ldots (2.15)$$

$$\frac{-N'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1.1\left(\frac{B}{L}\right) - 0.041\left(\frac{B}{T}\right) \quad \ldots (2.16)$$

$$\frac{-N'_{\dot{r}}}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0.017\frac{C_B B}{T} - 0.33\left(\frac{B}{L}\right) \quad \ldots (2.17)$$

$$\frac{-Y'_{v}}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.4\frac{C_B B}{T} \quad \ldots (2.18)$$

$$\frac{-Y'_{r}}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{12} + 2.2\left(\frac{B}{L}\right) - 0.08\left(\frac{B}{T}\right) \quad \ldots (2.19)$$

$$\frac{-N'_{v}}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2.4\left(\frac{T}{L}\right) \quad \ldots (2.20)$$

$$\frac{-N'_{r}}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{4} + 0.039\left(\frac{B}{T}\right) - 0.56\left(\frac{B}{L}\right) \quad \ldots (2.21)$$

Nilai hidrodinamika tersebut didapat dengan menggunakan bentuk nondimensional dimana transformasi ke bentuk nondimensi dilakukan dengan menggunakan *Prime System* 1. Tanda (‘) dalam setiap parameter menunjukkan bahwa parameter tersebut berada dalam bentuk nondimensio.

Tabel 2. 2 Prime System I (Ashari et al., 2014)

Unit	**Prime–System I**
Length	L
Mass	$\frac{\rho}{2}L^3$
Inertia Moment	$\frac{\rho}{2}L^5$
Time	$\frac{L}{U}$
Reference Area	L^2
Position	L
Angel	1
Linear Velocity	U
Angular Velocity	$\frac{U}{L}$

Unit	Prime–System I
Linear Acceleration	$\frac{U^2}{L}$
Angular Acceleration	$\frac{U^2}{L^2}$
Force	$\frac{\rho}{2}U^2L^2$
Moment	$\frac{\rho}{2}U^2L^3$

2.4 Model Gangguan Kapal

Terdapat berbagai jenis gangguan yang diberikan kepada kapal saat sedang dalam pelayaran. Beberapa contoh gangguan adalah gelombang, arus laut, dan angin. Penelitian tugas akhir ini menggunakan arus laut sebagai gangguan utama di pelayaran jalur Ketapang-Gilimanuk. Model dari gangguan arus laut dapat dibangkitkan dengan menggunakan model *Gauss-Markov process* orde satu untuk keperluan komputasi (Fossen, 1994). Persamaan 2.22 menunjukkan model *Gauss-Markov process* orde satu untuk arus laut.

$$V_c(t) + \mu_o V_c(t) = \omega(t) \qquad \ldots (2.22)$$

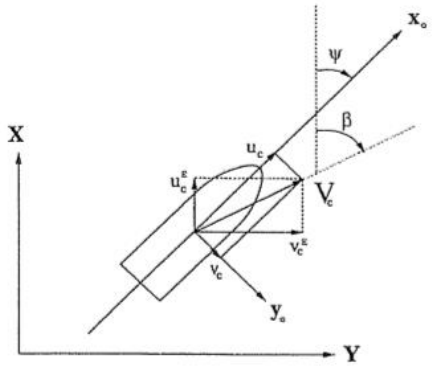
dengan keterangan sebagai berikut:

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

μ_o = *Constant value*

Vc = kecepatan arus yang dibatasi dengan $V_{min} \leq V_c(t) \leq V_{max}$

Adapun Gambar 2.3 menunjukkan arah vector arus laut terhadap kapal dalam bidang 2 dimensi.



Gambar 2. 3 Arah Vektor Ganguan Arus Laut(Fossen, 1994)

Gangguan kedua yang diberika pada kapal adalah gangguan berupa gelombang laut. Gangguan laut dapat dimodelkan menjadi fungsi transfer seperti yang ditunjukkan oleh persamaan 2.23.

$$h(s) = \frac{K_w s}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + {\omega_0}^2 s} \quad \dots (2.23)$$

Dimana parameter *gain* K_w diperoleh dari persamaan 2.24.

$$K_w = 2\xi\omega_0\sigma_w \quad \dots (2.24)$$

Nilai σ_w meunjukan konstanta yang mendeskripsikan intensitas gelombang, ξ adalah *damping coefficient* sementara ω_0 mewakili frekuensi gelombang. Nilai ω_0 diperoleh dari persamaan 2.25 dengan H merupakan tinggi gelombang dan g merupakan konstanta gravitasi.

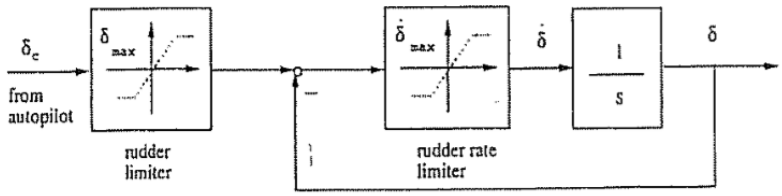
$$\omega_0 = 0.4\sqrt{\frac{g}{H}} \quad \dots (2.25)$$

Nilai parameter gravitasi (g) adalah 9,8 dan berdasarkan standar perairan internasional untuk perairan Indonesia nilai intensitas gelombang ${\sigma_w}^2 = 10$ dan koeffisien redaman $\xi = 0{,}1$.

2.5 Model Kemudi Otomatis

Kemudi otomatis pada kapal dapat dicapai dengan mengendalikan *heading* kapal. Pengendalian *heading* kapal dapat dilakukan dengan mengendalikan *rudder* atau *thruster* dari kapal. *Rudder* merupakan kemudi pada kapal yang berfungsi untuk menentukan arah kapal sesuai dengan perintah *controller* (Gunawan et al., 2013). Dalam melakukan pelayaran *rudder* berperan penting untuk mengarahkan *heading* dari kapal. Dalam proses pengendalian pada kapal maka *rudder* berperan

sebagai aktuator. Van Amerongen (1982) menyarankan menggunakan model seperti pada Gambar 2.4 dalam melakukan *computer simulation* dan *designing autopilot.*



Gambar 2. 4 Skema Aktuator pada Kapal (Fossen, 1994)

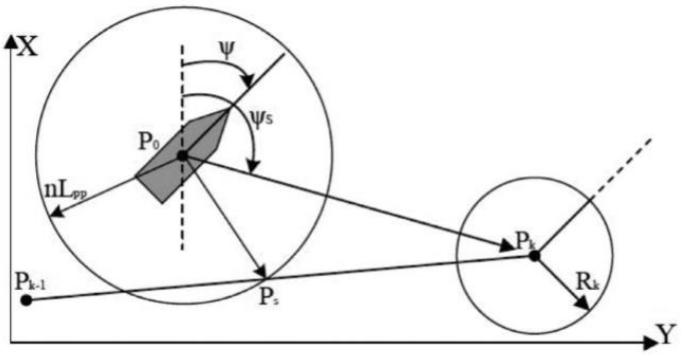
Model diatas dapat ditulis dalam persamaan *transfer function* seperti ditunjukkan oleh Persamaan 2.4.

$$\delta = \frac{K}{\sigma s + 1} \qquad \dots (2.26)$$

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

2.6 Dasar Penentuan *Trajectory*

Dalam melakukan pengendalian *trajectory* diperlukan adanya metode untuk memberikan referensi nilai sudut yang harus dicapai untuk memastikan kapal tetap berada pada *trajectory* yang telah ditentukan. Dalam penelitian ini digunakan metode *Line Of Sight* (LOS) sebagai metode untuk menentukan sudut referensi Ψ_s tersebut. Gambar 2.5 menunjukkan ilustrasi dari metode LOS dalam bidang 2 dimensi.



Gambar 2. 5 Line Of Sight(Li et al., 2019)

Posisi kapal yang ditunjukkan oleh Gambar 2.5 ditunjukkan sebagai $P_0 = [x_0,y_0]^T$, titik yang diinginkan ditunjukkan sebagai $P_k = [x_k,y_k]^T$, dan titik yang diinginkan sebelumnya ditunjukkan sebagai $P_{k-1} = [x_{k-1},y_{k-1}]^T$. Titik yang menjadi target ditunjukkan sebagai $P_s = [x_s,y_s]^T$. Dalam menentukannya dibuat sebuah lingkaran dengan jari-jari sepanjang nL_{pp}, dimana L_{pp} merupakan panjangn dari kapal. Lingkaran tersebut akan berpotongan pada 2 titik pada garis yang menghubungkan P_k dan P_{k-1}. Titip perpotongan terdekat dengan P_k dijadikan sebagai lokasi dari P_s. Dari Gambar 2.5 posisi dari P_s dapat dicari dengan Persamaan 2.5 dan Persamaan 2.6.

$$\frac{y_s - y_{k-1}}{x_s - x_{k-1}} = \frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \quad \dots (2.27)$$

$$(x_s - x_0)^2 + (y_s - y_0)^2 = (nL_{pp})^2 \quad \dots (2.28)$$

Saat titik P_s didapatkan maka sudut referensi Ψ_s dapat dicari dengan Persamaan 2.7.

$$\Psi s = \tan^{-1}(y_s - y_0, x_s - x_0) \quad \dots (2.29)$$

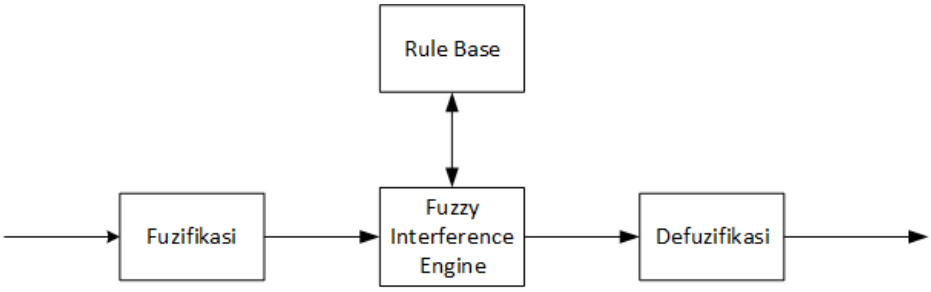
Dengan menggunakan Ψs nilai sinyal control dapat ditentukan oleh *controller* yang dirancang.

2.7 Logika *Fuzzy*

Logika Fuzzy merupakan salah satu cabang dari kecerdasan buatan (*Artificial Intelegent*) yang bekerja dengan meniru cara berfikir manusia. Sistem logika *fuzzy* bekerja dengan menerapkan prinsip bahwa suatu nilai *crisp* akan memiliki dua nilai pada dua buah keanggotaan yang berbeda. Sistem logika *fuzzy* dicetuskan untuk

menyelesaikan banyak permasalahan yang tidak dapat diseslesaikan dengan keanggotaan yang terdiri dari 0 dan 1 atau “ya” dan “tidak”. Prof. L.A. Zadeh mencetuskan bahwa suatu nilai *crisp* dapat ditunjukkan dalam bentuk suatu nilai diataran 0 dan 1.

Dalam perancangan logika *fuzzy* terdapat 3 tahapan yang harus dilakukan yaiut proses fuzzifikasi, mekanisme pengambilan keputusan, dan defuzzifikasi. Proses fuzzifikasi adalah proses perubahan suatu nilai *crisp* kedalam bentuk himpunan *fuzzy*. Mekanisme Pengambilan keputusan adalah proses operasi setiap himpunan *fuzzy* dengan *rule base* dari sistem yang disusun. Defuzzifikasi adalah proses perubahan nilai himpunan *fuzzy* yang telah melalui operasi dengan *rule base* kedalam bentuk bilangan *crisp*. Arsitektur dari sistm pengendalian dengan logika *fuzzy* ditunjukkan oleh Gambar2.6.



Gambar 2. 6 Arsitektur Sistem Logika *Fuzzy* Tipe 1

Keuntungan dari penggunaan sistem pengendalian *fuzzy* adalah:

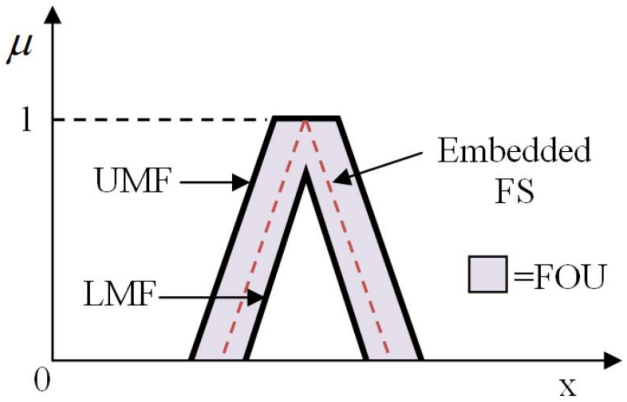
a. Aplikasinya didasarkan pada kepakaran operator dimana bergantung pada situasi / kondisi / aksi yang diinginkan dimana hal tersebut tidak bisa dinyatakan dalam bentuk parameter persamaan diferensial PID.
b. Pengendali *fuzzy* mampu bekerja pada *range* parameter yang lebar dan mampu mengheandel akibat adanya gangguan pada *plant* khususnya untuk kondisi yang kurang baik atau model plant yang dikendalikan adalah komplek, (Aisjah & Arifin, 2018).

2.8 Logika *Fuzzy* Tipe 2

Dalam penelitian ini digunakan system logika *fuzzy* tipe 2 yang merupakan pengembangan dari system logika *fuzzy* tipe 1. Perancangan sistem logika *fuzzy* tipe 2 dialakukan dengan menggunakan arsitektur sistem logika *fuzzy* tipe 1 dengan performasnsi terbaik. Proses ini dilakukan untuk medapatkan performansi sistem

logika *fuzzy* tipe 2 yang terbaik. Hal tersebut didasarkan pada fakta bahwa meksipun dengan arsitektur yang sama sistem logika *fuzzy* tipe 2 memiliki performansi yang lebih baik daripada sistem logika *fuzzy* tipe 1.

Dalam logika *fuzzy* tipe 2 basis pengetahuan yang digunakan untuk menysusun aturan memiliki ketidakpastian. Aristektur dari sistem logika *fuzzy* tipe 2 ditunjukkan oleh Gambar 2.7. Logika *fuzzy* tipe 1 tidak dapat menyelesaikan ketidakpastian ini. Arsitektur dari logika *fuzzy* tipe 2 memiliki kemiripan dengan tipe 1 pada bagian fuzifikasi tipe 2 dilakukan di daerah yang disebut *Footprint Uncertainty* yang merupakan suatu daerah yang dibatasi oleh 2 buah himpunan *fuzzy* tipe 1 yaitu *Upper Membership Function* (UMF) dan *Lower Membership Function* (LMF) (Ardhany & Aisjah, 2017). Gambar 2.7 menunjukkan bentuk dari *Membership Function* sistem logika *fuzzy* tipe 2.

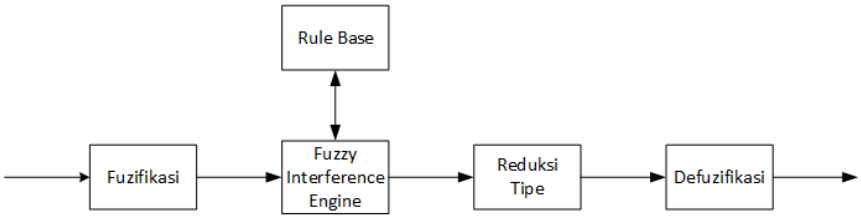


Gambar 2. 7 *Membership Function* Sistem Logika *Fuzzy* Tipe 2(Naik & Gupta, 2017)

Mekanisme pengambilan keputusan pada sistem logika *fuzzy* tipe 2 hampir sama dengan tipe 1 hanya saja pada sistem logika *fuzzy* tipe 2 mekanisme pengambilan keputusan dilakukan di 2 fungsi keanggotaan yaitu di *Upper Membership Function* (UMF) dan *Lower Membership Function* (LMF). Berdasarkan proses teresbut maka diperoleh 2 nilai dari hasil operasi bilangan *fuzzy* dengan *rule base.* Selanjutnya kedua nilai tersebut kemudian dibandingkan untuk didapatkan nilai terbaik. Proses tersebut terjadi pada blok reduksi tipe seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.8.

Perbedaan arsitektur dari logika *fuzzy* tipe 1 dan 2 adalah pada logika *fuzzy* tipe 2 terdapat sebuah proses yang disebut proses reduksi tipe. Gambar 2.8 menunjukkan arsitektur dari sistem logika *fuzzy* tipe 2. Untuk mendapatkan nilai keluaran berupa *crisp* maka hasil *fuzzy interference* yang masih memiliki 2 nilai dari *Upper Membership Function*

(UMF) dan *Lower Membership Function* (LMF) direduksi tipe menjadi logika *fuzzy* tipe 1 oleh proses reduksi tipe. Proses reduksi tipe yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan Karnik Mendel algorithm (KM). Banyak metode baru yang muncul yang terinspirasi dari metode ini. Tujuan utama dari metode ini adalah untuk menemukan *critical points* yang mendefinisikan gabungan antara himpunan keanggotaan *upper* dan *lower* yang disebut dengan *switch points* (Ontiveros-Robles et al., 2017).

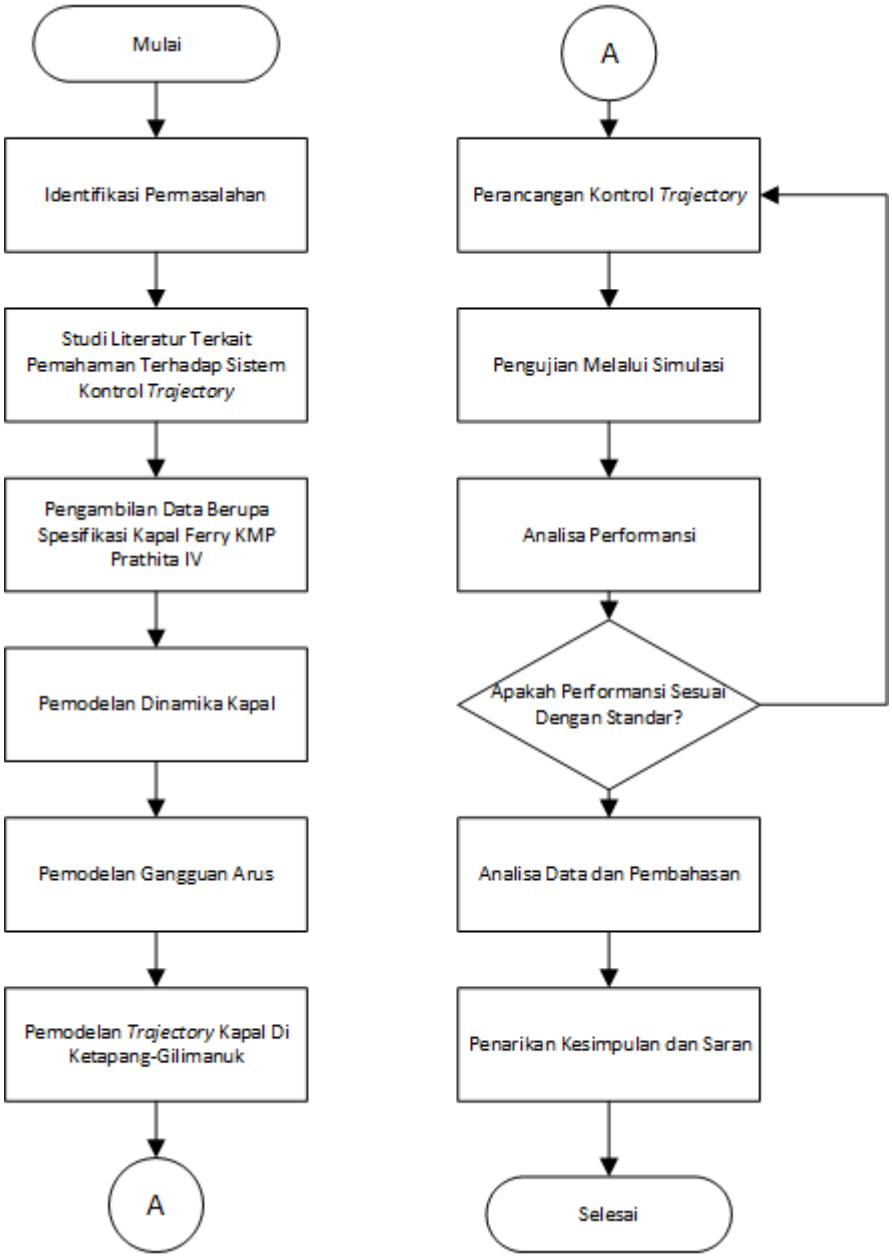


Gambar 2. 8 Arsitektur Sistem Logika *Fuzzy* Tipe 2

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Pada sub bab ini dijelaskan alur penelitian tugas akhir yang dilakukan. Penjelasan alur penelitian dilakukan untuk mempermudah alur pengerjaan. Gambar 3.1 menunjukkan diagram alir pelaksanaan tugas akhir yang dilakukan.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

3.2 Identifikasi Permasalahan

Fakta-fakta seputar pengendalian otomatis pada kapal khususnya di Indonesia ditinjau untuk mengetahui bagaimana kondisi pengendalian otomatis pada kapal di Indonesia. Dari fakta yang telah didapat diketahui bahwa pengendalian kapal di Indonesia belum banyak diterapkan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem *autopilot* untuk kapal antar pulau dengan studi khasus di jalur Ketapang – Gilimanuk.

3.3 Studi Literatur Terkait Pemahaman Terhapad Kontrol *Trajectory*

Studi literatur yang telah dilakukan meliputi spesifikasi kapal, kondisi perairan di jalur Ketapang – Gilimanuk, hidrodinamika kapal, dan sistem pengendalian dengan menggunakan metode sistem logika *fuzzy* tipe 2. Beberapa sumber diambil dari buku, jurnal, dan hasil penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya.

3.4 Pengambilan Data Berupa Spesifikasi Kapal Ferry KMP Legundi

Dalam melakukan pemodelan dinamika kapal diperlukan data-data spesifikasi koefisien hidrodinamika kapal yang diperoleh dari spesifikasi yang dimiliki oleh kapal feri KMP Legundi. Adapun data spesifikasi KMP Legundi yang dibutuhkan dalam pemodelan dinamika kapal adalah sebagai berikut:

L_{pp} (Panjang, m)	= 99,2
B (lebar, m)	= 19,6
T (tinggi, m)	= 4,1
Δ (*displacement*, ton)	= 3120,07
U (kecepatan, m/s)	= 7,7
C_B	= 0,567
X_G (*center of gravity)*	= 8,417
A_δ (luas *rudder*, m^2)	= 7,19
r (jari-jari, m)	= 29,923
m’	= 0,000005212

3.5 Pemodelan Dinamika Kapal

Pemodelan dinamika kapal dilakukan pada KMP Legundi berdasarkan data spesifikasi yang dimiliki oleh KMP Legundi. Pemodelan matematis didapatkan dari pendekatan yang dilakukan oleh Nomoto (1954) sehingga menghasilkan fungsi alih orde dua seperti ditunjukkan oleh Persamaan 2.2. Data spesifikasi yang telah diperoleh disubstitusikan ke Persamaan 2.14 sampai 2.21 sehingga diperoleh nilai koefisien hidrodinamika kapal seperti ditunjukkan oleh Tabel 3.1. perhitungan besarnya koefisien hidrodinamika kapal ditunjukkan pada Lampiran A

Tabel 3. 1 Koefisien Hidrodinamika Kapal

Koeffisien Hidrodinamika Kapal	
$-Y'_{\dot{v}} = 0{,}00662$	$-Y'_{v} = 0{,}01118$
$-N'_{\dot{v}} = 0{,}00011$	$-N'_{v} = 0{,}00321$
$-Y'_{\dot{r}} = 0{,}00031$	$-Y'_{r} = 0{,}002402$
$-N'_{\dot{r}}$ =0,00034	$-N'_{r} = 0{,}00175$
$-Y'_{\delta} = -14{,}2658$	$-N'_{\delta} = 7{,}1329$

Nilai koefisien hidrodinamika kemudian disubstitusikan ke Persamaan 2.7 sampai 2.13 sehingga diperoleh hasil seperti ditunjukkan Tabel 3.2. Perhitungan koefisien pada matrik M, N dan TL ditunjukkan pada Lampiran …., Nilai parameter fungsi transfer Nomoto, ditunjukkan pada Tabel 3.2, berdasarkan hasil perhitungan di Lampiran A

Tabel 3. 2 Parameter Model Nomoto

Parameter Model Nomoto	
$M = \begin{bmatrix} 0{,}00662733 & 0{,}00034941 \\ 0{,}00015832 & 0{,}00331019 \end{bmatrix}$	$N = \begin{bmatrix} 0{,}011179 & -0{,}00236158 \\ 0{,}003214 & 0{,}002085293 \end{bmatrix}$
$M' = \begin{bmatrix} 0{,}01108840 & 0{,}05799380 \\ 0{,}00026490 & 0{,}54940791 \end{bmatrix}$	$N' = \begin{bmatrix} 0{,}001452 & -0{,}0304245 \\ 0{,}000417 & 0{,}026865078 \end{bmatrix}$
$b' = \begin{bmatrix} 8{,}181229821 \\ -8{,}150937945 \end{bmatrix}$	$T_1T_2 = 117{,}5296$

Parameter Model Nomoto	
$T_1 + T_2 = 20{,}87689$	$K_r = 294{,}929$
$K_r T_3 = 1789{,}977$	

Matriks M dan N merupakan matriks inersia dalam persamaan umum *motion* untuk kapal seperti yang dintunjukkan oleh Persamaan 2.1. Tanda aksen (‘) pada setiap parameter menunjukkan bahwa parameter tersebut berada dalam bentuk nondimensional. Bentuk nondimensional pada model dinamika kapal menunjukkan bahwa model dinamika kapal mampu mewakili semua kapal berjenis *ferry* ro-ro. Hal tersebut didasarkan pada spedifikasi kapal *ferry* ro-ro yang memiliki perbandingan ukuran dengan spesifikasi yang sama. Konversi bentuk parameter dilakukan dengan menggunakan Tabel *Prime System I* seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2.1. Nilai parameter Nomoto kemudian disubstitusikan kedalam Persamaan 2.2 sehingga diperoleh Persamaan 3.3.

$$\frac{T}{\delta_R}(s) = \frac{294{,}929 + 1789{,}977s}{117{,}5296s^3 + 20{,}87689s^2 + s} \quad \dots (3.1)$$

3.6 Pemodelan Gangguan

Gangguan pada jalur pelayaran Ketapang-Gilimanuk diakibatkan oleh arus laut dan gelombang laut. Gangguan dalam perancangan sistem kendali dalam tugas akhir ini adalah berupa arus laut dan gelombang laut. Gangguan arus laut dimodelkan dengan menggunakan *Gauss-Markov process* pada persamaan 2.22. Gangguan gelombang laut dimodelkan dalam bentuk fungsi transfer orde-2 seperti terdapat pada persamaan 2.23. Variasi gangguan arus didasarkan pada kondisi aktual dari jalur Ketapang – Gilimanuk dengan kuat arus maksimal 5 knot (Setiawan et al., 2020). Variasi gangguan gelombang didasarkan pada kondisi aktual dari jalur Ketapang – Gilimanuk dengan ketinggian maksimal gelombang 2,5 meter (Pribadi & Mulsandi, 2015).

3.6.1 Pemodelan Gangguan Arus Laut

Pemodelan arus laut dilakukan dengan kecepatan maksimum arus yang bervariasi dari 1, 2.5, dan 5 knot sehingga diperoleh hasil seperti ditunjukkan oleh persamaan 3.2 sampai 3.4.

Untuk arus laut sebesar 1,0 knot

$$V_c(s) = 0{,}514444 + (-0{,}1.\,\omega(t).\,e^{-t.0{,}1}) \qquad \ldots (3.2)$$

Untuk arus laut sebesar 2,5 knot

$$V_c(s) = 1{,}28611 + (-0{,}1.\,\omega(t).\,e^{-t.0{,}1}) \qquad \ldots (3.3)$$

Untuk arus laut sebesar 5,0 knot

$$V_c(s) = 2{,}57222 + (-0{,}1.\,\omega(t).\,e^{-t.0{,}1}) \qquad \ldots (3.4)$$

Gangguan arus laut yang dimodelkan dalam simulai dibuat dengan bentuk gangguan yang tidak dapat diprediksi. Bentuk tersebut didapatkan dengan memasukkan fungsi *white noise* yang nilainya berubah-ubah terhadap waktu. Diharapkan dengan menggunakan fungsi ini didaptkan hasil mendekati kondisi sebenarnya.

3.6.2 Pemodelan Gangguan Gelombang Laut

Pemodelan gangguan gelomang laut dilakukan dengan ketinggian masksimum gelombang yang bervariasi dari 0,5, 1.5, dan 2,5 meter. Pemodelan gangguna gelombang dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.23 sampai 2.25 sehingga diperoleh hasil seperti ditujukkan oleh persamaan 3.5 sampai 3.7.

Ketika ketinggian gelombang 0,5 meter.

$$h(s) = \frac{1{,}119193s}{s^2 + 0{,}354175s + 3{,}136} \qquad \ldots (3.5)$$

Ketika ketinggian gelombang 1,5 meter.

$$h(s) = \frac{0{,}646167s}{s^2 + 0{,}204483s + 1{,}045333} \qquad \ldots (3.6)$$

Ketika ketinggian gelombang 2,5 meter.

$$h(s) = \frac{0{,}500518s}{s^2 + 0{,}158392s + 0{,}6272} \qquad \ldots (3.7)$$

Pemodelan dilakukan dengan pendekatan yang dilakukan oleh Pierson dan Moskowitz (1963). Ganggian gelombang yang dimodelkan disimulasikan dengan

bentuk yang tidak dapat diprediksi. Bentruk tersebut didapatkan dengan memasukkan fungsi *white noise* yang nilainya berubah-ubah terhadap waktu. Diharapakan dengan menggunakan fungsi ini didapatkan kondisi yang menyerupai kondisi aslinya.

3.7 Pemodelan *Trajectory* Kapal di Ketapang – Gilimanuk

Penentuan jalur pelayaran dari Ketapang menuju Gilimanuk dilakukan dengan bantuan *software google earth.* Pemodelan *trajectory* kapal dilakukan dengan menentukan titik-titik yang harus dilalui oleh kapal. Titik-titik yang sudah ditentukan direpresentasikan dalam bentuk koordinat posisi berdasarkan garis lintang dan garis bujur. Titik koordinat pertama digunakan sebagai titik acuan utama sedangkan titik paling akhir digunakan sebagai titik tujuan pelayaran. Dalam penelitian ini titik acuan utama berada di wilayah pelabuhan Ketapang dan titik tujuan pelayaran berada di wilayah pelabuahn Gilimanuk.

Gambar 3. 2 Alur Pelayaran Ketapang – Gilimanuk

Gambar 3.2 merupakan alur pelayaran Ketapang – Gilimanuk yang telah ditentukan sebelumnya. Penentuan titik-titik koordinat dilakukan dengan mengacu pada alur pelayaran Ketapng – Gilimanuk yang telah ditetapkan. Titik-titik koordinat yang telah ditentukan digunakan sebagai *setpoint* dalam pengendalian dengan menggunakan sistem logika *fuzzy* tipe 2. Sistem pengendalian yang dibuat diharapkan mampu untuk memenuhi *setpoint* tersebut dengan optimal.

Penentuan lintasan pada alur pelayaran Ketapang – Gilimanuk dilakukan dengan dibuat menjadi 11 macam titik koordinat. Titik-titik tersebut dinyatakkn dalam bentuk *Degree Minute Second* (DMS) yang ditunjukkan dalam bentuk koordinat posisi x dan y. Tabel 3.1 menunjukkan titik-titik koordinat pelayaran serta posisi dalam bentuk DMS. Titik 1 merupakan kondisi awal yang juga merupakan titik acuan utama sebagai posisi awal kapal yang berada di Pelabuhan Ketapang sedangkan Titik 11 merupakan kondisi akhir yang juga merupakan titik tujuan pelayaran yang berada di Pelabuhan Gilimanuk. Kapal akan melalui setiap titik dalam melakukan pelayaran dari Ketapang menuju Gilimanuk. Koordinat kemudian dikonversi menjadi bentuk *Universal Transverse Mercator* (UTM).

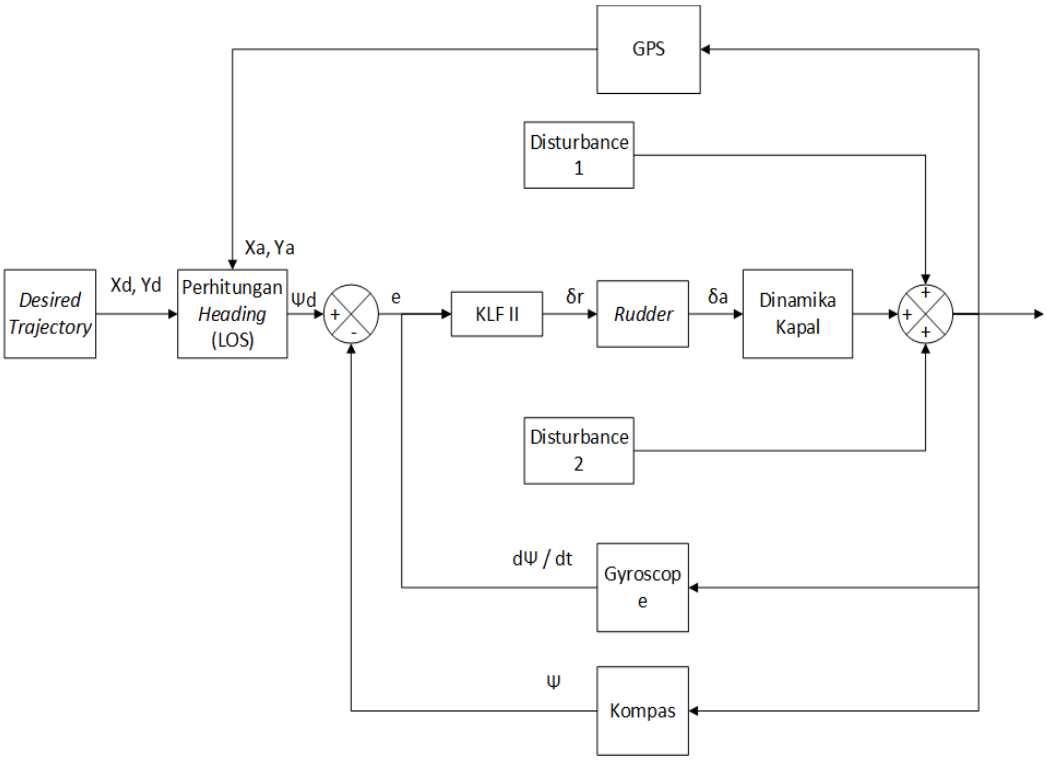
Tabel 3. 3 Koordinat Alur Pelayaran *Desire*

Point	Koordinat			
	Lintang Selatan	Bujur Timur	X (UTM)	Y (UTM)
1	8°08'37.7" LS	114°24'07.2" BJ	213708.916	9098884.227
2	8°08'40.0" LS	114°24'18.5" BJ	214055.494	9098815.749
3	8°08'43.0" LS	114°24'36.1" BJ	214595.179	9098726.989
4	8°08'46.7" LS	114°24'51.8" BJ	215076.800	9098616.334
5	8°08'55.4" LS	114°25'15.8" BJ	215813.625	9098353.602
6	8°09'00.6" LS	114°25'28.0" BJ	216188.326	9098196.143
7	8°09'05.8" LS	114°25'38.3" BJ	216504.827	9098038.312
8	8°09'15.0" LS	114°25'51.3" BJ	216904.807	9097758.049
9	8°09'23.7" LS	114°26'00.7" BJ	217194.420	9097492.453
10	8°09'28.9" LS	114°26'05.6" BJ	217345.517	9097333.566
11	8°09'36.3" LS	114°26'10.8" BJ	217506.231	9097107.112

3.8 Perancangan Kontrol *Trajectory*

Perancangan kontrol *trajectory* pada kapal feri KMP Legundi menggunkan metode kontrol logika *fuzzy* tipe 2. Skema kontrol yang dirancang ditunjukkan oleh diagram blok seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.3. Gambar 3.3 menunjukkan diagram blok perancangan control *trajectory* yang diterapkan pada KMP Legundi untuk jalur pelayaran Ketapang-Gilimanuk. Proses pengendalian dimulai dengan penentuan *desired trajectory* yang menjadi acuan dalam proses pengendalian. Perhitungan *heading* kapal dilakukan dengan menggunakan metode *Line of Sight* (LOS) untuk mendapatkan *set point* berupa sudut *heading* kapal. Perhitungan *heading* dilakukan dengan menggunakan data posisi kapal dan *desired trajectory.*

Set point dibandingkan dengan kondisi aktual kapal yang ditunjukkan oleh kompas. Nilai *error* dan *yaw rate* dijadikan masukan untuk Kontrol Logika *Fuzzy* Tipe 2 (KLF II) yang akan memberikan perintah untuk merubah sudut *rudder*. Proses pengendalian akan dilakukan dengan adanya *disturbance* berupa arus laut dan gelombang laut.



Gambar 3. 3 Diagram Blok Perancangan Kontrol *Trajectory*

.

3.8.1 Perancangan Kontrol Logika *Fuzzy* Tipe 1

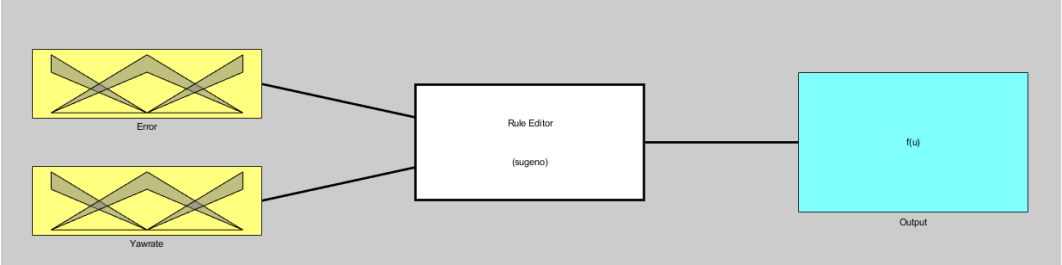
Perancangan sistem kontrol logika *fuzzy* tipe 1 dilakukan untuk mendapatkan nilai parameter terbaik yang selanjutnya dijadikan dasar perancangan kontrol logika *fuzzy* tipe 2. Perancangan kontrol logika *fuzzy* tipe 1 dilakukan dengan menggunakan empat macam variasi. Analisa performansi dilakukan dengan melakukan pengujian *close loop* untuk mengetahui perormansi terbaik dari empat macam variasi rancangan. Variasi parameter logika *fuzzy* yang dilakukan adalah dengan variasi jumlah himpunan keanggotaan *fuzzy* 7 dan 5 serta fungsi keanggotaan *fuzzy* segitiga dan trapezium.

3.8.2 Perancangan Kontrol Logika *Fuzzy* Tipe 2

Perancangan kontrol logika *fuzzy* tipe 2 dilakukan dengan menggunakan rancangan control logika *fuzzy* tipe 1 dengan performansi terbaik. Perancangan kontrol logika *fuzzy* tipe 2 dilakukan melalui beberpa tahapan yaitu penentuan arsitektur dan fungsi keanggotan logika *fuzzy* serta penentuan *rule base* untuk menentukan hubungan antar *input* terhadap *output* logika *fuzzy*. Adapun penjelasan untuk masing-masing tahapan seperti berikut:

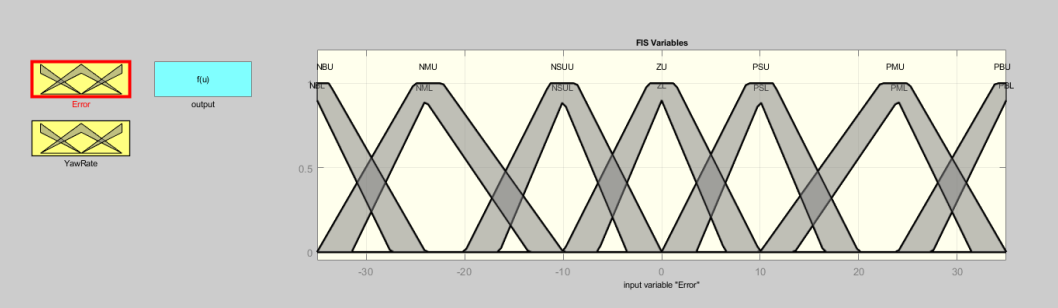
- **Penentuan Arsitektur**

Proses pertama dalam penentuan arsitektur adalah penentuan model Sugeno sebagai model logika *fuzzy* yang digunakan. Peroses keduan adalah penentuan *Input* yang digunakan dalam kontrol yang dirancang yaitu berupa *error yaw* antara *set point heading* dengan actual kompas dan *yaw rate* luaran dari gyroscope. Luaran dari logika *fuzzy* yang dirancangan adalah *command rudder* yang memberi perintah sudut keluaran untuk *rudder* kapal. Perancangan kontrol logika *fuzzy* tipe 2 dengan menggunakan KLF II ditunjukkan oleh Gambar 3.4.



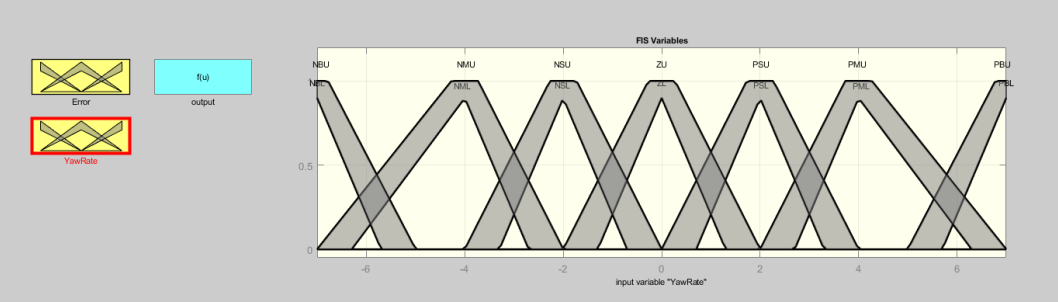
Gambar 3. 4 Arsitektur Rancangan Kontrol dengan KLF II

Proes ketiga adalah penentuan fungsi keanggotaan untuk masing masing *input* dan *output*. Logika *fuzzy* tipe 2 menggunakan fungsi keanggotaan yang memiliki rentang yang dibatasi oleh *lower bound* dan *upper bound*. Nilai fungsi keanggotaan untuk *input error* ditunjukkan oleh Gambar 3.5. Fungsi keanggoataan untuk *input error* dibagi menjadi 7 tingkatan yaitu *Negative Big* (NB), *Negative Medium* (NM), *Negative Small* (NS), *Zero* (Z), *Positive Small* (PS), *Positive Medium* (PM), *Positive Big* (PB). Setiap tingkatan dibentuk dengan menggunakan fungsi yang berbentuk segitiga dengan nilai *upper bound* dan *lower bound* yang bervariasi. Rentang *input error* adalah antara -35° sampai dengan 35° sesuai dengan rentang dari *rudder* kapal.



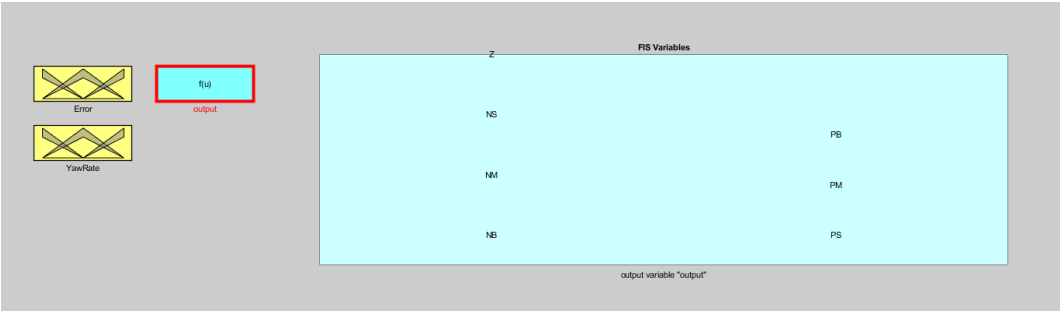
Gambar 3. 5 Fungsi Keanggotaan *Input Error*

Fungsi keanggotaan untuk *input yaw rate* ditunjukkan oleh Gambar 3.6. Sama sperti fungsi kenggotaan untuk *input error*, fungsi keanggotaan *input yaw rate* dibagi menjadi 7° tingkatan yaitu *Negative Big* (NB), *Negative Medium* (NM), *Negative Small* (NS), *Zero* (Z), *Positive Small* (PS), *Positive Medium* (PM), *Positive Big* (PB). Setiap tingkatan dibentuk dengan menggunakan fungsi yang berbentuk segitiga dengan nilai *upper bound* dan *lower bound* yang bervariasi. Rentang *input yaw rate* adalah antara -7°/s sampai dengan 7°/s.



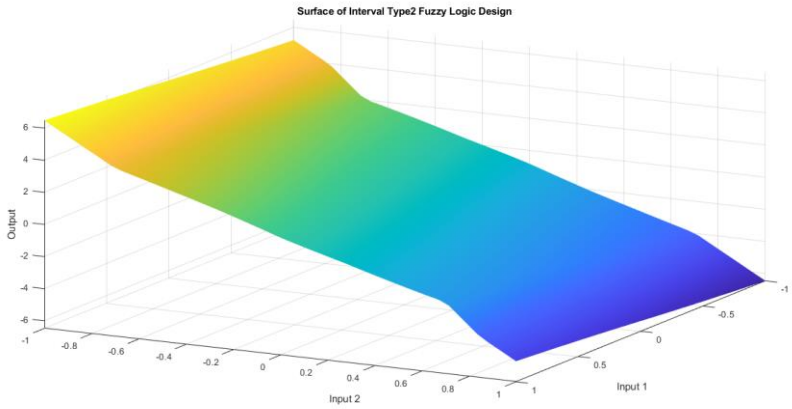
Gambar 3. 6 Fungsi Keanggotaan *Input Yaw Rate*

Fungsi keanggotaan untuk *output* ditunjukkan oleh Gambar 3.7. Sama seperti fungsi kenggotaan pada *input*, fungsi keanggotaan *output* dibagi menjadi 7 tingkatan yaitu *Negative Big* (NB), *Negative Medium* (NM), *Negative Small* (NS), *Zero* (Z), *Positive Small* (PS), *Positive Medium* (PM), *Positive Big* (PB). Model logika *fuzzy* yang digunakan dalam perancangan KLF II adalah model Sugeno yang dimana *ouput* logika *fuzzy* akan berbentuk *single tone.* Rentang *ouput* adalah antara -35° sampai dengan 35° dengan silisih masing masing tingkatan adalah 10°.



Gambar 3. 7 Fungsi Keanggotaan *Ouput*

Gambar 3.8 menunjukkan *survace view* dari sistem logika *fuzzy* tipe 2 yang dirancang. Gambar 3.8 menunjukkan hubungan antara masukan 1 dan masukan 2 terhadap luaran dari sistem logika *fuzzy* yang dirancang.



Gambar 3. 8 *Survace View* Sistem Logika *Fuzzy*

- **Penentuan *Rule Base***

Rule base merupakan hubungan antar *input* dengan *ouput* dari logika *fuzzy* yang dirancang. *Rule base* disusun berdasarkan kondisi aktual dari hubungan *input* dengan *output* dalam kondisi yang sebenarnya. Dalam rancangan kontrol logika *fuzzy* tipe 2 yang disusun hubungan antar nilai *input error* dan *yaw rate* dengan *output* disusun sesuai dengan masing-masing fungsi keanggotaan. Adapun rancangan *rule base* yang digunakan ditunjukkan oleh Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Rancangan *Rule Base*

Yaw rate / Error	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB
NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB

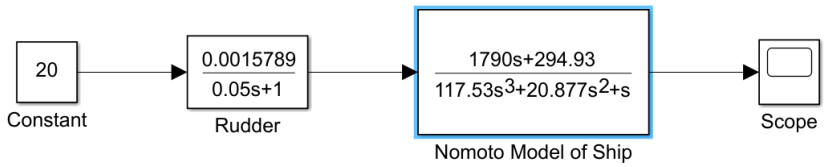
Yaw rate / Error	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NS	NM	NS	Z	PS	Z	PS	PM
Z	PB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
PM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
PB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z

3.9 Pengujian Melalui Simulasi

Pengujian melalui simulasi dilakukan untuk mengetahui apakahar rancangan sistem *autopilot* sudah bekerja sesuai dengan tujuan. Pengujian simulasi dilakukan dengan munggunakan *tools* Simulink yang disediakan oleh *software* matlab. Pengujian simulai kontroler logika *fuzzy* tipe 2 dilakukan pada *toolbox* hasil penelitian yang dilakukan oleh (Taskin & Kumbasar, 2015). Validasi dari *toolbox* dan kontrol yang digunakan ditunjukkan pada Lampiran D. Pengujian yang dilakukan terdiri dari pengujian *open loop*, *close loop*, simulasi tanpa gangguan, dan simulasi dengan gangguan.

3.9.1 Pengujian *Open Loop*

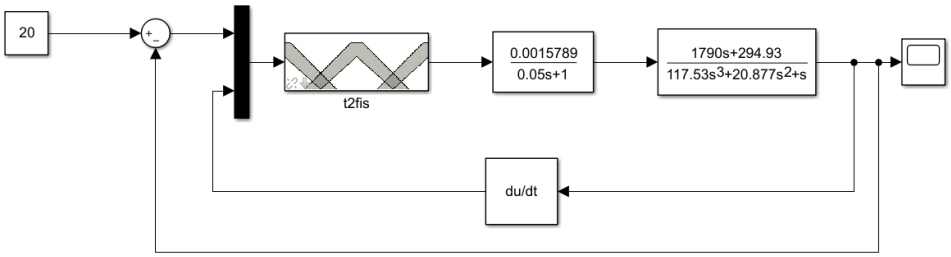
Pengujian *open loop* dilakukan untuk mengetahui respon sistem saat diberi masukan suatu konstanta tanpa menggunakan pengendalian. Masukan yang diberikan berupa konstanta sebesar 20° yang masih berada dalam rentang operasional dari *rudder* kapal. Gambar 3.8 menunjukkan skema dari pengujian *open loop* yang dilakukan pada *tools* Simulink.



Gambar 3. 9 Pengujian *Open Loop*

3.9.2 Pengujian *Close Loop*

Pengujian *close loop* dilakukan untuk mengetahui respon sistem saat diberi masukan suatu konstanta dengan adanya pengendalian. Masukan yang diberikan berupa konstantan sebesar 20° yang masih berada dalam rentang operasional dari *rudder* kapal. Pengendali yang diberikan pada sistem adalah kontroler logika *fuzzy* tipe 2 yang telah dirancang. Gambar 3.9 meunjukkan skema dari pengujian *close loop* yang dilakukan pada *tools* Simulink.

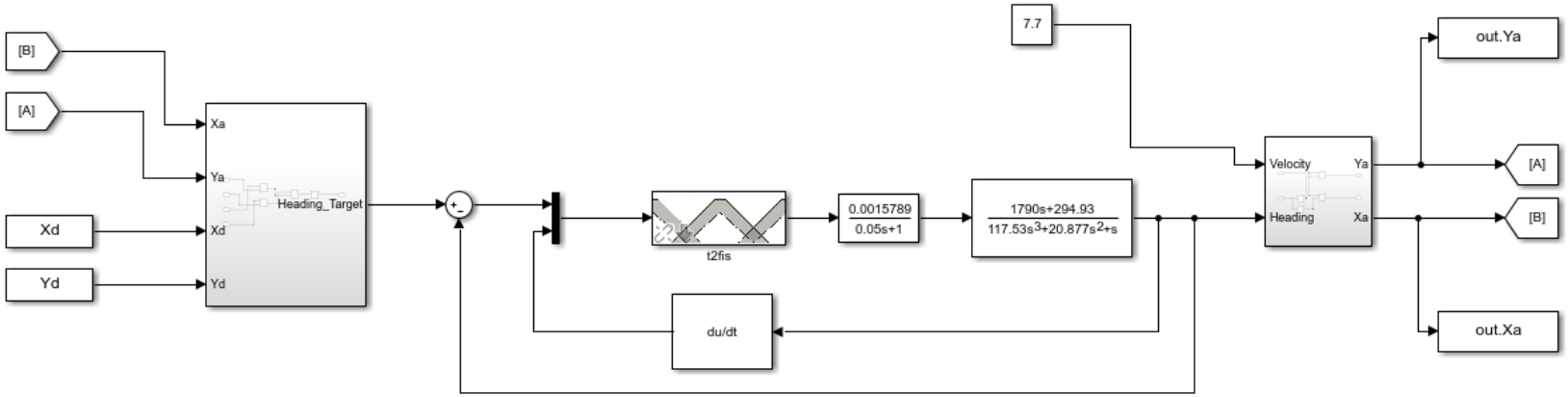


Gambar 3. 10 Pengujian *Close Loop*

3.9.3 Simulasi Tanpa Gangguan

Simulasi tanpa gangguan dilakukan untuk mengatahui apakah sistem yang dirancang mampu bekerja sesui dengan tujuan. Simulasi tanpa gangguan dilakukan dengan menggunakan skema seperti diagram blok yang ditunjukkan oleh Gambar 3.3. simulasi tanpa gangguan dilakukan dengan menggunakan kontroler berupa logika *fuzzy* tipe 2 yang telah dirancang. Gambar 3.10 menunjukkan skema simulasi tanpa gangguan yang dilakukan dengan menggunakan *tools* Simulink.

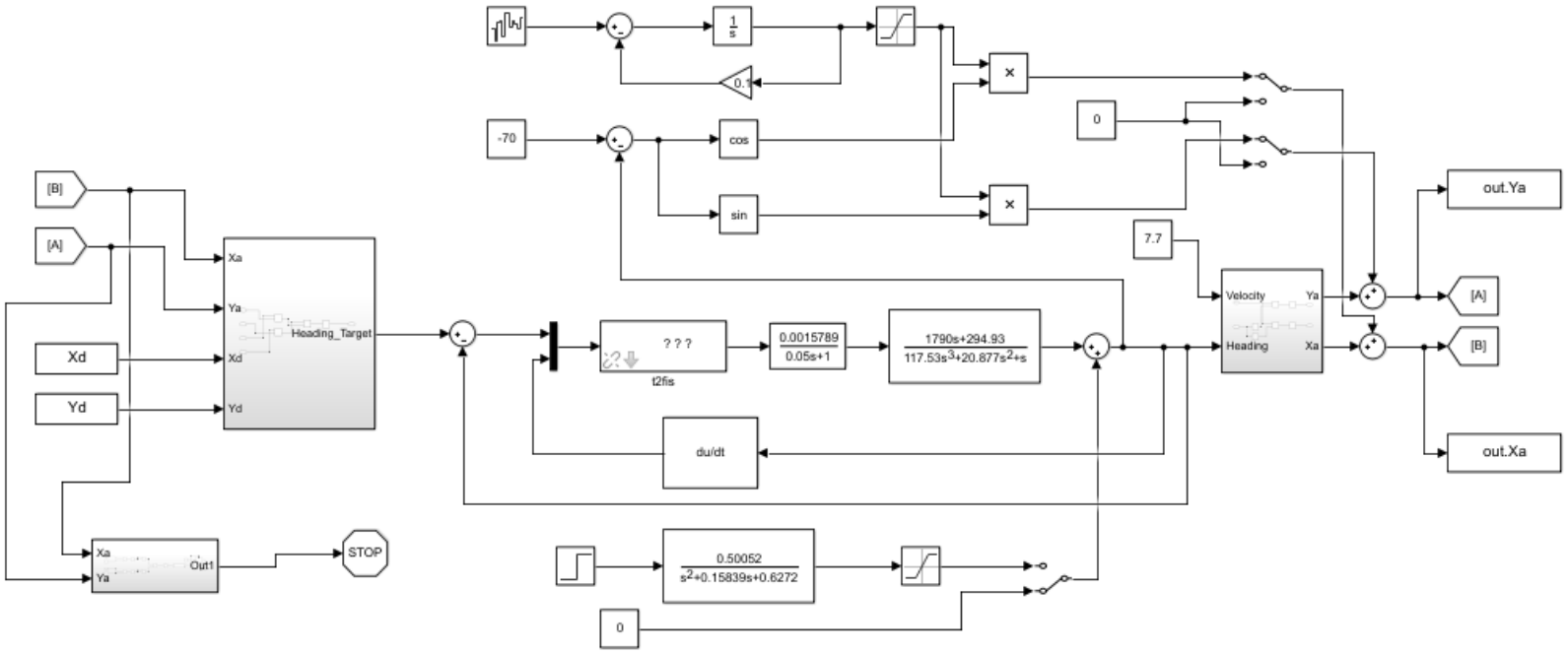
Halaman ini sengaja dikosongkan



Gambar 3. 11 Simulasi tanpa Gangguan

3.9.4 Simulasi Dengan Gangguan

Simulasi dengan gangguan dilakukan unuk mengetahu apakah sistem mampu bekerja sesuai dengan tujuan saat diberikan gangguan. Gangguan yang diberika berupa arus laut dan gelombang laut. Simulasi dilakukan dengan menggunakan skema sepeti ditunjukkan oleh Gambar 3.11. Parameter gangguan didapat sesuai dengan niali yang ditunjukkan oleh Persamaan 3.2 sampai 3.7.



Gambar 3. 12 Simulasi dengan Gangguan

3.10 Analisa Performansi

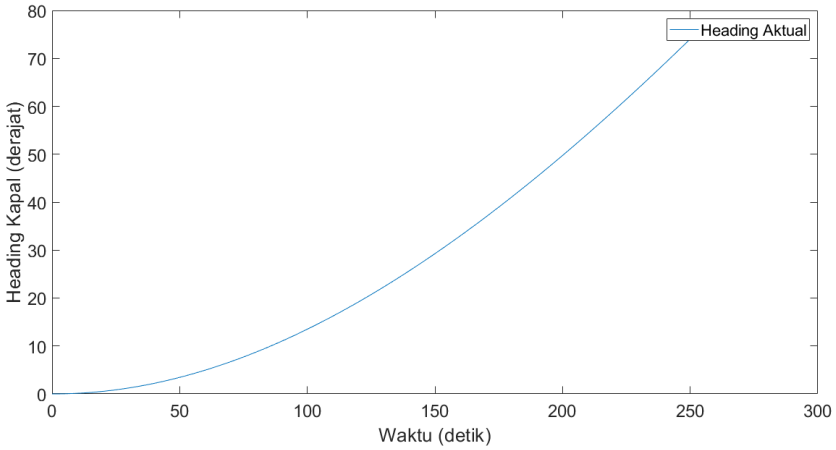
Analisa performansi dilakukan untuk melihat respon sistem *autopilot* yang dirancang. Respon sistem akan dianalisa untuk diketahui performa dari sistem *autopilot* yang dirancang. Respon sistem didapat melalui uji simulasi dengan menggunakan *software* matlab baik dengan gangguan dan tanpa gangguan. Analisa performansi dilakukan untuk mengetahui apakah sistem mampu mencapai target pelayaran serta apakah control logika *fuzzy* yang dirancang mampu mengurangi *error* lintasan akibat adanya gangguan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Pengujian Sistem Kontrol

Analisa pengujian sistem kontrol dilakukan dengan menganalisa respon sistem saat dilakukan uji *open loop* dan *close loop.* Uji *open loop* dilakukan untuk mengatahui bagaimana respon sistem dalam kondisi tanpa kontroler logika *fuzzy* tipe 2 yang dirancang. Gambar 4.1 menunjukkan respon sistem saat diberikan masukan tanpa adanya kontroler.



Gambar 4. 1 Respon *Open Loop* dari KMP Legundi

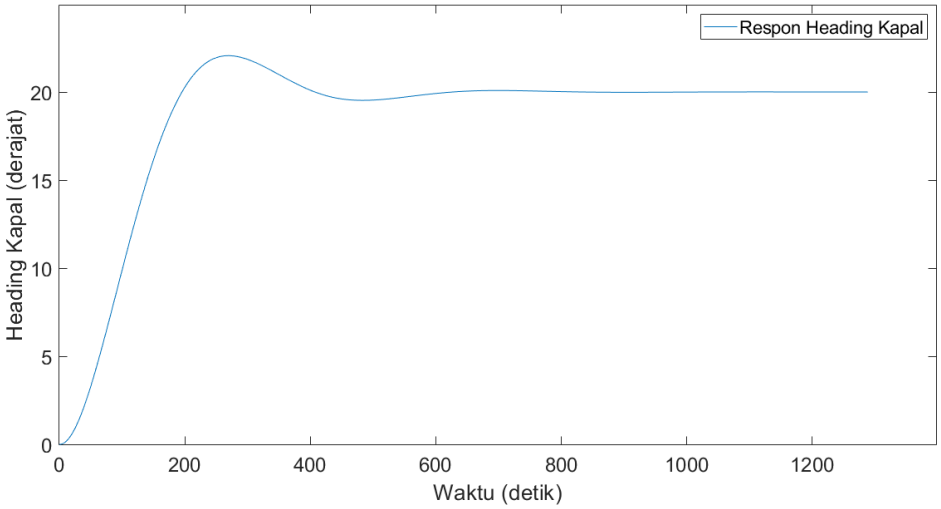
Pada uji sistem *open loop* masukan yang diganakan berupa konstanta yang bernilai 20°. Gambar 4.1 menunjukkan respon sistem setelah diberi masukkan sebesar 20° tidak dapat memenuhi *setpoint* yang telah ditentukan. Terlihat bahwa nilai luaran dari sistem terus meningkat seiring berjalannya waktu. Sistem dapat memenuhi *setpoint* apabila diberi kontroler yang mengendalikan sistem. Kontroler yang diberikan merupakan kontroler logika *fuzzy* tipe 2 yang telah dirancang.

Perancangan sistem control logika *fuzzy* tipe 2 dilakukan dengan menggunakn rancangan sistem logika *fuzzy* tipe 1 dengan performansi terbaik. Pengujian dilakuakan dengan melakukan uji *close loop* pada sistem. Tabel 4.1 menunjukkan perbandingan performansi setiap variasi dari parameter logika *fuzzy* yang dirancang.

Tabel 4. 1 Performansi Rancangan Parameter *Fuzzy* Tipe 1 dalam Domain Nondimensi

No	Jumlah Fungsi Keanggotan	Fungsi Keanggotaan	*Maximum Overshoot*	*Settling Time*	*Error Steady State*
1	5	Segitiga	31.02	226	30.28%
2	5	Trapesium	31.02	177	30.28%
3	7	Segitiga	21.99	47.2	0.43%
4	7	Trapesium	22.06	42	0.52%

Berdasarkan datat yang ditunjukkan oleh Tabel 4.1 maka rancangan parameter *fuzzy* tipe 1 terbaik ditunjukkan jumlah fungsi keanggotaan 7 dan fungsi keanggotaan segitiga dengan *maximum overshoot* 21.99, *settling time* 608,08 detik, dan *error steady state* 0.43%. Rancangan tersebut kemudian dijadikan dasar dalam perancangan sistem kontrol logika *fuzzy* tipe 2. Gambar 4.2 menunjukkan respon sistem dengan masukan yang sama saat diberi kontroler.



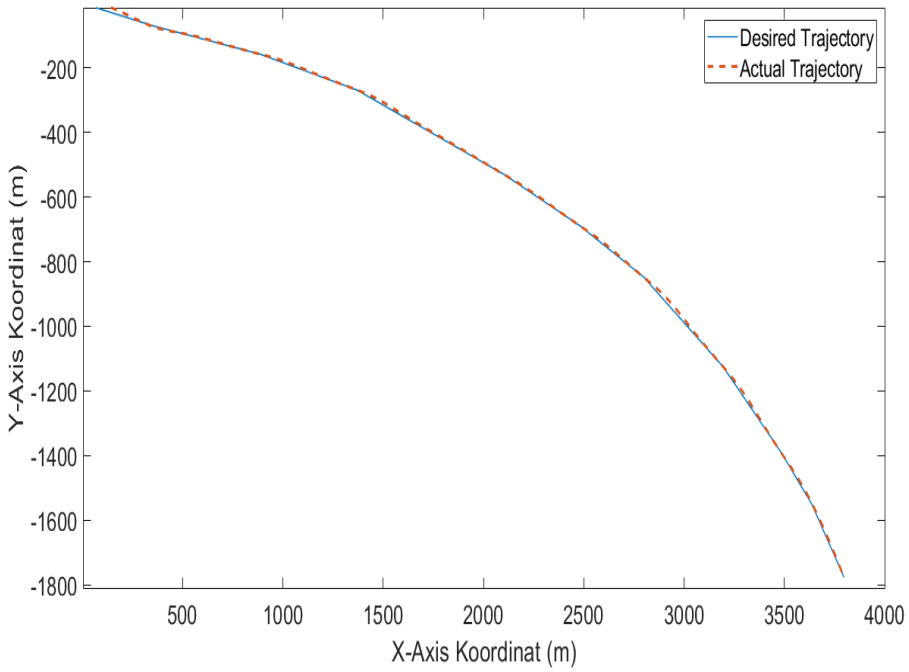
Gambar 4. 2 Respon *Close Loop* dari KMP Legundi

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa saat diberi masukkan berupa konstanta berilai 20° sistem akan bekerja dan memenuhi target tersebut. Penambahan kontroler pada sistem membuat sistem mampu mencapai *setpoint* yang telah ditetapkan. Hal tersebut menadakan bahwa sistem kontrol logika *fuzzy* tipe 2 yang dirancang dapat bekerja dengan baik. Respon sistem dengan kontrol logika *fuzzy* tipe 2 memiliki *maxsimum overshoot* sebesar 22,061. Sistem dapat mencapai

setpoint dengan rentang waktu sebesar 523,05 detik (gambar koordinat sumbu x x → berdimensi menit). Dalam keadaan tunak sistem bberoperasi dengan *error steady state* sebesar 0,46% yang menandakan kontroler dapat digunakan karena memiliki *error system* kurang dari ±5%.

4.2 Analisa Sistem *Autopilot* pada Kapal tanpa Gangguan

Analisa sistem *autopilot* tanpa gangguan dilakukan untuk mengetahui bagaiman respon sistem dalam melakukan simulasi pelayaran jalur Ketapang – Gilimanuk tanpa gangguan. Percobaan ini menggunakan dua lintasan yaitu *desired trajectory* yang merupakan jalur pelayaran yang diinginkan dan *actual trajectory* yang merupakan jalur pelayaran aktual yang dilalui oleh kapal selama proses simulasi. Gambar 4.3 menunjukkan perbandingan *desired trajectory* dan *actual trajectory* hasil simulasi tanpa gangguan.



Gambar 4. 3 Hasil Simulasi tanpa Gangguan

Gambar 4.3 garis berwarna *orange* menunjukkan *desire trajectory* dan garis berwarna *blue* menunjukkan *actual trajectory*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kapal dengan kontrol logika *fuzzy* tipe 2 yang dirancang mampu mengikuti *desired*

trajectory. Hal tersebut ditunjukkan oleh garis *actual trajectory* yang mewakili posisi actual kapal yang mampu mengikuti garis *desired trajectory*. Titik awal yang diwakili oleh titik (0,0) merupakan pelabuhan Ketapang yang menjadi titik awal pelayaran dan titik akhir (3797.315, -1777.115) yang merupakan pelabuhan Gilimanuk. Tabel 4.1 menunjukkan nilai koordinat hasil simulasi tanpa gangguan pada jalur pelayaran Ketapang – Gilimanuk. Berdasarkan Tabel 4.1 terlihat bahwa kontrol logika *fuzzy* tipe 2 mampu mengendalikan *trajectory* kapal. Hal tersebut ditunjukkan oleh nilai *error* lintasan yang sangat kecil.

Tabel 4.1 menunjukkan nilai koordinat dari sistem baik koordinat yang diinginkan (*desired trajectory)* maupun koordinat aktual yang dilalui oleh kapal (*actual trajectory).* Hasil simulasi yang ditunjukkan oleh Tabel 4.1 menunjukkan *error* lintasan terbesar adalah senilai 3,698-meter yang terjadi pada titik 2. Hal tersebut terjadi karena adanya penyesuaian sudut *heading* kapal di awal pelayaran menuju titik 2. *Error* lintasan terkecil hasil simulasi adalah senilai 0,637 yang terjadi pada titik 11.

Tabel 4. 2 Koordinat Hasil Simulasi tanpa Gangguan

Titik	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan (m)
2	346.578	-68.478	346.7912	-70.7379	2.26991
3	886.263	-157.238	887.1812	-157.473	0.947734
4	1367.884	-267.893	1368.81	-267.99	0.931404
5	2104.709	-530.625	2103.765	-530.335	0.987449
6	2479.41	-688.084	2478.399	-687.99	1.015171
7	2795.911	-845.915	2796.321	-847.041	1.198081
8	3195.891	-1126.178	3195.061	-1125.51	1.062099
9	3485.504	-1391.774	3485.201	-1392.65	0.929115
10	3636.601	-1550.661	3638.319	-1549.46	2.094387
11	3797.315	-1777.115	3796.89	-1776.641	0.637

4.3 Analisa Sistem *Autopilot* pada Kapal dengan Gangguan

Simulasi dilakukan dengan memberikan gangguan yang menyerupai keadaan sebenarnya dari *trajectory* Ketapang – Gilimanuk. Gangguan yang terdapat di jalur

trajectory Ketapang – Gilimanuk berupa arus laut dan gelombang. Simulasi dilakukan dalam 3 skenario yaitu simulasi dengan gangguan arus saja, gangguan gelombang saja, dan gangguan arus serta gelombang. Simulasi sistem *autopilot* dilakukan dengan variasi gangguan yang disesuaikan dengan keadaan aslinya.

4.3.1 Analisa Sistem *Autopilot* dengan Gangguan Arus Laut

Simulasi dilakukan dengan menggunakan gangguan berupa arus laut di *trajectory* Ketapang – Gilimanuk. Variasi gangguan dilakukan berdasarkaan keadaan asli dari jalur tersebut. Variasi kecepatan arus sebagai gangguan yaitu 1 knot, 2.5 knot, dan 5 knot. Arus mengalir menuju arah selatan dengan membentuk sudut sebesar 70°.

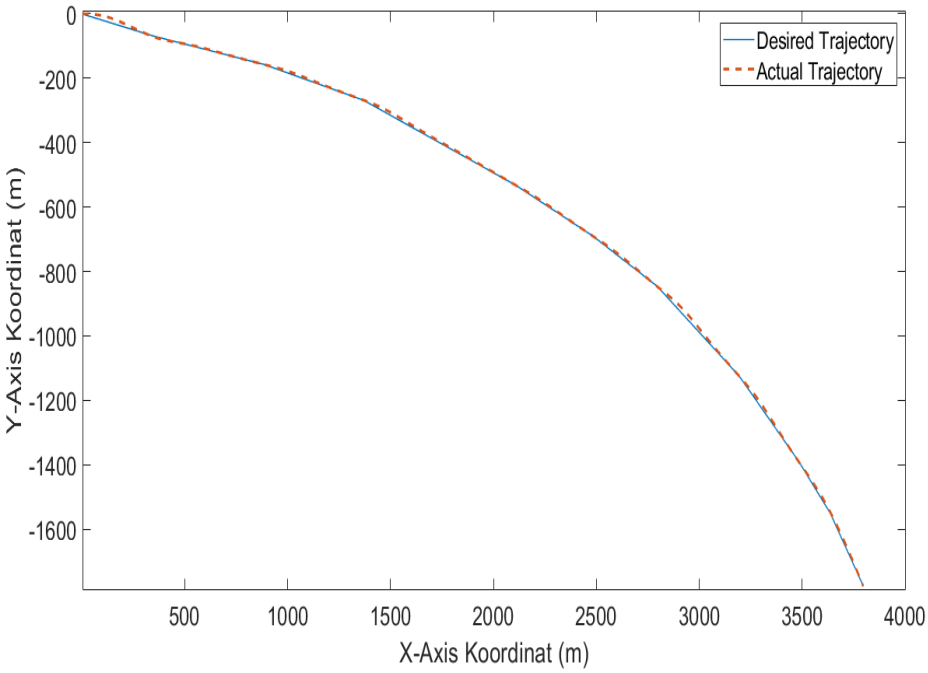
a) Gangguan arus laut dengan kecepatan 1 knot

Simulasi dilakukan dengan menggunakan gangguan yang memiliki kecepatan 1 knot. Hasil simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.4 dimana *trajectory* yang diinginkan ditunjukkan dengan garis berwarna biru dan *trajectory* aktual kapal ditunjukkan dengan garis putus-putus berwarna orange. Dari Gambar 4.4 terlihat bahwa kapal dengan sistem autopilot dapat mengikuti *desired trajectory*.

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa terjadi *error* lintasan selama pelayaran *trajectory* Ketapang – Gilimanuk. Hal tersebut terjadi karena adanya gangguan pada jaalur pelayaran tersebut Nilai *error* lintasan untuk setiap posisi *setpoint* ditunjukkan oleh Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Koordinat Hasil Simulasi dengan Gangguan Arus Laut 1 knot

Titik	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan (m)
2	346.578	-68.478	346.7936	-70.7129	2.245283
3	886.263	-157.238	885.3161	-157.279	0.947798
4	1367.884	-267.893	1366.991	-267.603	0.938416
5	2104.709	-530.625	2104.189	-530.494	0.536805
6	2479.41	-688.084	2478.384	-687.91	1.040583
7	2795.911	-845.915	2794.71	-846.166	1.227178
8	3195.891	-1126.18	3195.353	-1125.66	0.744352
9	3485.504	-1391.77	3485.64	-1392.66	0.896138
10	3636.601	-1550.66	3638.553	-1549.59	2.224786
11	3797.315	-1777.12	3795.337	-1774.87	0.784962

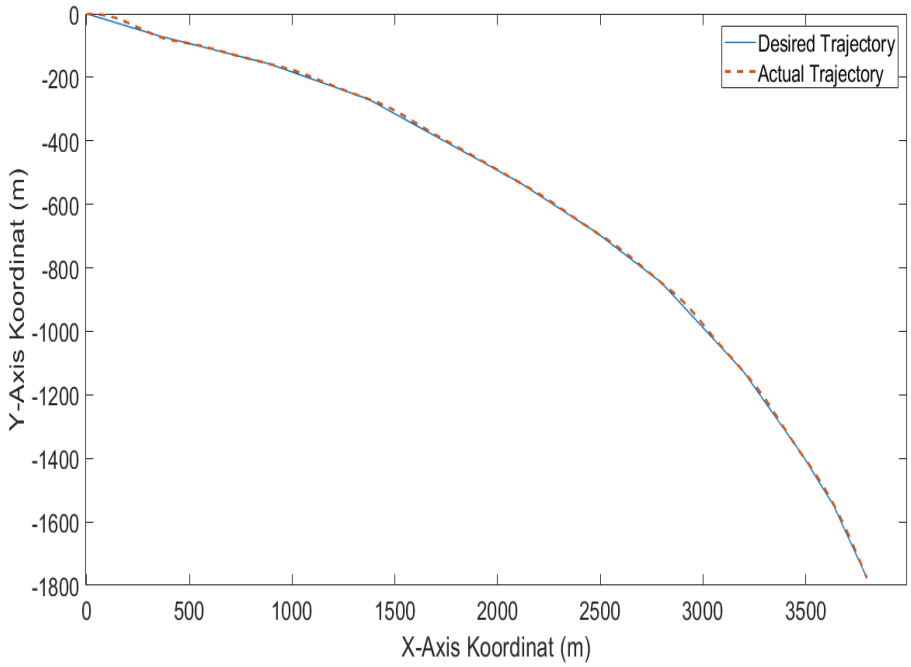


Gambar 4. 4 Hasil Simulasi dengan Gangguan Arus Laut 1 knot

Tabel 4.3 menunjukkan bahwa gangguan arus 1 knot mengakibatkan adannya *error* lintasan pada *actual trajectory*. Hasil simulasi dengan gangguan arus laut 1 knot menunjukkan bahwa *error* lintasan terbesar terjadi pada titik 2 yang merupakan titik tujuan dengan nilai *error* lintasan 2.245283 meter. Hal tersebut terjadi karena gangguan arus laut mempengaruhi sudut *heading* dari kapal

b) Gangguan arus laut dengan kecepatan 2,5 knot

Simulasi dilakukan dengan menggunakan gangguan yang memiliki kecepatan 2,5 knot. Hasil simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.5 dimana *trajectory* yang diinginkan ditunjukkan dengan garis berwarna biru dan *trajectory* aktual kapal ditunjukkan dengan garis putus-putus berwarna orange. Dari Gambar 4.5 terlihat bahwa kapal dengan sistem autopilot dapat mengikuti *desired trajectory*.



Gambar 4. 5 Hasil Simulasi dengan Gangguan Arus Laut 2,5 knot

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa terjadi *error* lintasan selama pelayaran *trajectory* Ketapang – Gilimanuk. Hal tersebut terjadi karena adanya gangguan pada jaalur pelayaran tersebut Nilai *error* lintasan untuk setiap posisi *setpoint* ditunjukkan oleh Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Koordinat Hasil Simulasi dengan Gangguan Arus Laut 2,5 knot

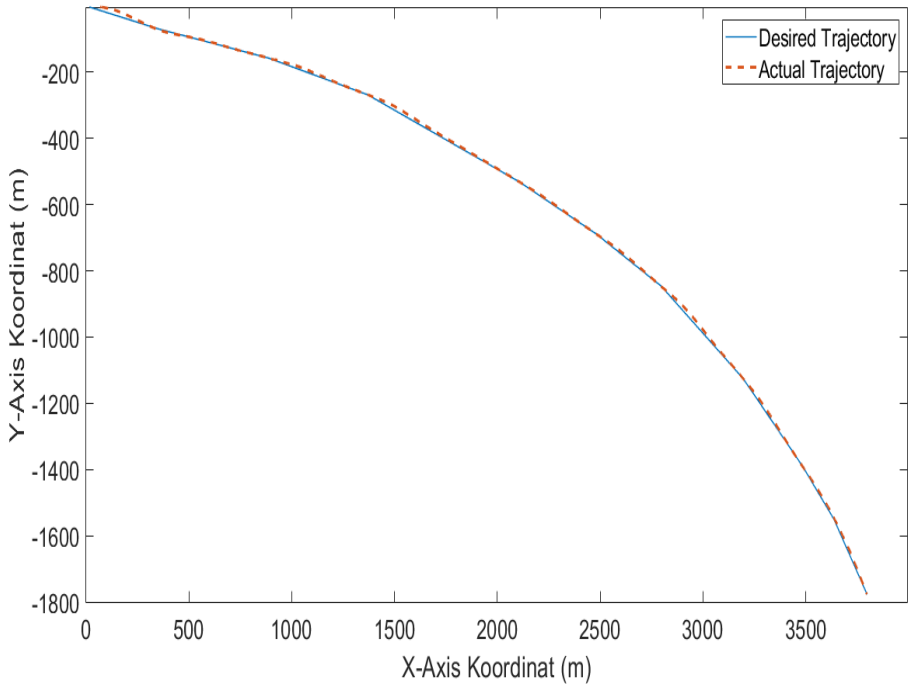
Titik	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan (m)
2	346.578	-68.478	346.8024	-70.6665	2.199931
3	886.263	-157.238	886.1839	-157.725	0.493442
4	1367.884	-267.893	1368.084	-268.07	0.266973
5	2104.709	-530.625	2105.226	-530.843	0.560589
6	2479.41	-688.084	2480.227	-688.623	0.978321
7	2795.911	-845.915	2794.814	-846.315	1.167808
8	3195.891	-1126.18	3195.069	-1125.79	0.909618
9	3485.504	-1391.77	3485.926	-1392.64	0.964002
10	3636.601	-1550.66	3638.833	-1549.77	2.401417
11	3797.315	-1777.12	3796.509	-1776.72	0.89735

Tabel 4.4 menunjukkan bahwa gangguan arus 2,5 knot mengakibatkan adannya *error* lintasan pada *actual trajectory*. Hasil simulasi dengan gangguan arus laut 2,5 knot menunjukkan bahwa *error* lintasan terbesar terjadi pada titik 10 yang

merupakan titik tujuan dengan nilai *error* lintasan 2.401417 meter. Hal tersebut terjadi karena gangguan arus laut mempengaruhi sudut *heading* dari kapal

c) Gangguan arus laut dengan kecepatan 5,0 knot

Simulasi dilakukan dengan menggunakan gangguan yang memiliki kecepatan 2,5 knot. Hasil simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.6 dimana *trajectory* yang diinginkan ditunjukkan dengan garis berwarna biru dan *trajectory* aktual kapal ditunjukkan dengan garis putus-putus berwarna orange. Dari Gambar 4.6 terlihat bahwa kapal dengan sistem autopilot dapat mengikuti *desired trajectory*.



Gambar 4. 6 Hasil Simulasi dengan Gangguan Arus Laut 5 knot

Gambar 4.6 menunjukkan bahwa terjadi *error* lintasan selama pelayaran *trajectory* Ketapang – Gilimanuk. Hal tersebut terjadi karena adanya gangguan pada jaalur pelayaran tersebut Nilai *error* lintasan untuk setiap posisi *setpoint* ditunjukkan oleh Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Koordinat Hasil Simulasi dengan Gangguan Arus Laut 5 knot

Titik	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan (m)
2	346.578	-68.478	346.7984	-70.6836	2.216625
3	886.263	-157.238	885.9284	-157.611	0.500857
4	1367.884	-267.893	1367.587	-267.879	0.297235
5	2104.709	-530.625	2104.782	-530.722	0.121183
6	2479.41	-688.084	2478.252	-687.866	1.178487

Titik	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan (m)
7	2795.911	-845.915	2795.037	-846.362	0.981229
8	3195.891	-1126.18	3195.31	-1125.78	0.706877
9	3485.504	-1391.77	3486.019	-1392.74	1.095651
10	3636.601	-1550.66	3639.017	-1549.8	2.566684
11	3797.315	-1777.12	3796.608	-1776.87	0.74891

Tabel 4.5 menunjukkan bahwa gangguan arus 5 knot mengakibatkan adannya *error* lintasan pada *actual trajectory.* Hasil simulasi dengan gangguan arus laut 5 knot menunjukkan bahwa *error* lintasan terbesar terjadi pada titik 10 yang merupakan titik tujuan dengan nilai *error* lintasan 2.566684 meter. Hal tersebut terjadi karena gangguan arus laut mempengaruhi sudut *heading* dari kapal.

4.3.2 Analisa Sistem *Autopilot* dengan Gangguan Gelombang

Simulasi dilakukan dengan gangguan berupa gelombang di *trajectory* Ketapang – Gilimanuk. Variasi gangguan dilakukan berdasarkaan keadaan asli dari jalur tersebut. Variasi ketinggian gelombang sebagai gangguan yaitu 0,5-meter, 1,5 meter, dan 2,5 meter.

a) Gangguan gelombang dengan ketinggian 0,5 meter

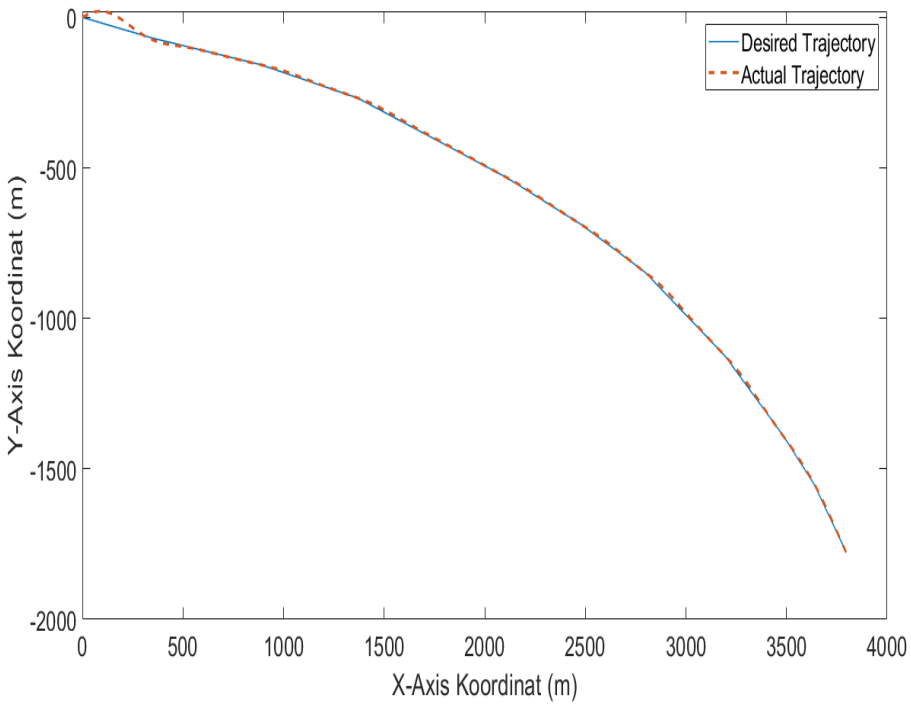
Simulasi dilakukan dengan menggunakan gangguan yang memiliki ketinggian 0,5 meter. Hasil simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.7 dimana *trajectory* yang diinginkan ditunjukkan dengan garis berwarna biru dan *trajectory* aktual kapal ditunjukkan dengan garis putus-putus berwarna *orange.* Dari Gambar 4.7 terlihat bahwa kapal dengan sistem *autopilot* dapat mengikuti *desired trajectory.*

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa terjadi *error* lintasan selama pelayaran *trajectory* Ketapang – Gilimanuk. Hal tersebut terjadi karena adanya gangguan pada jaalur pelayaran tersebut Nilai *error* lintasan untuk setiap posisi *setpoint* ditunjukkan oleh Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Koordinat Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 0,5 m

Titik	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan (m)
2	346.578	-68.478	345.6021	-74.0263	5.633501
3	886.263	-157.238	886.3675	-157.433	0.221276
4	1367.884	-267.893	1368.025	-267.761	0.193378
5	2104.709	-530.625	2105.232	-530.87	0.577928
6	2479.41	-688.084	2479.894	-688.525	0.654331

Titik	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan (m)
7	2795.911	-845.915	2795.785	-846.638	0.734026
8	3195.891	-1126.18	3196.765	-1126.53	0.942046
9	3485.504	-1391.77	3485.142	-1392.35	0.68375
10	3636.601	-1550.66	3637.469	-1550.04	1.06582
11	3797.315	-1777.12	3796.219	-1777.11	1.096003



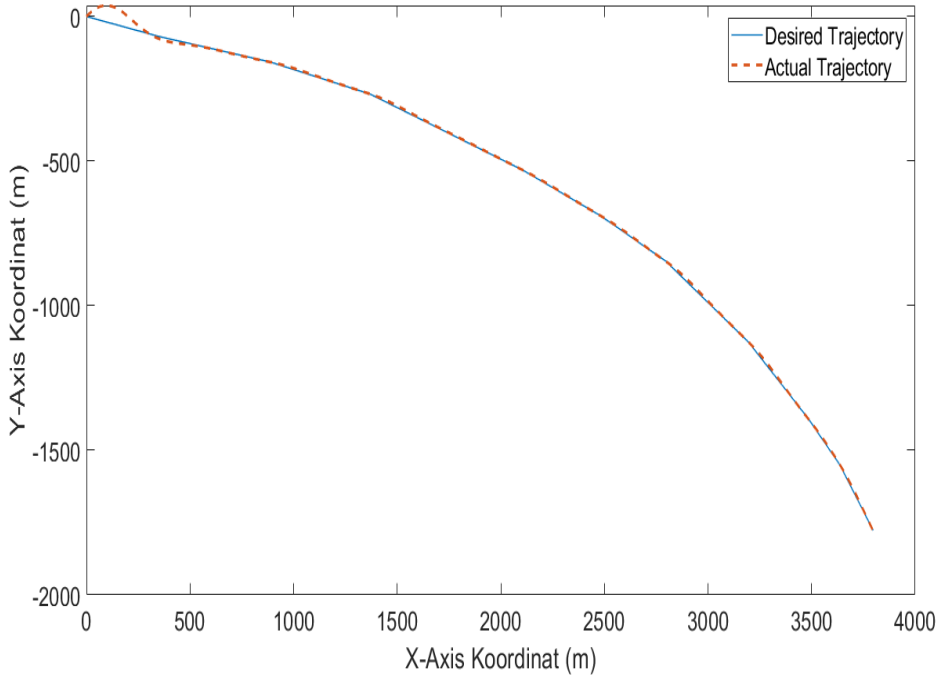
Gambar 4. 7 Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 0,5 meter

Tabel 4.6 menunjukkan bahwa gangguan gelombang 0,5-meter mengakibatkan adannya *error* lintasan pada *actual trajectory*. Hasil simulasi dengan gangguan gelombang 0,5-meter menunjukkan bahwa *error* lintasan terbesar terjadi pada titik 1 dengan nilai *error* lintasan 5.633501 meter. Hal tersebut terjadi karena gangguan gelombang mempengaruhi sudut *heading* dari kapal.

b) Gangguan gelombang dengan ketinggian 1,5 meter

Simulasi dilakukan dengan menggunakan gangguan yang memiliki ketinggian 1,5 meter. Hasil simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.8 dimana *trajectory* yang diinginkan ditunjukkan dengan garis berwarna biru dan *trajectory* aktual kapal ditunjukkan dengan garis putus-putus berwarna *orange*. Dari Gambar

4.8 terlihat bahwa kapal dengan sistem *autopilot* dapat mengikuti *desired trajectory*.



Gambar 4. 8 Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 1,5 meter

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa terjadi *error* lintasan selama pelayaran *trajectory* Ketapang – Gilimanuk. Hal tersebut terjadi karena adanya gangguan pada jaalur pelayaran tersebut Nilai *error* lintasan untuk setiap posisi *setpoint* ditunjukkan oleh Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Koordinat Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 1,5 meter

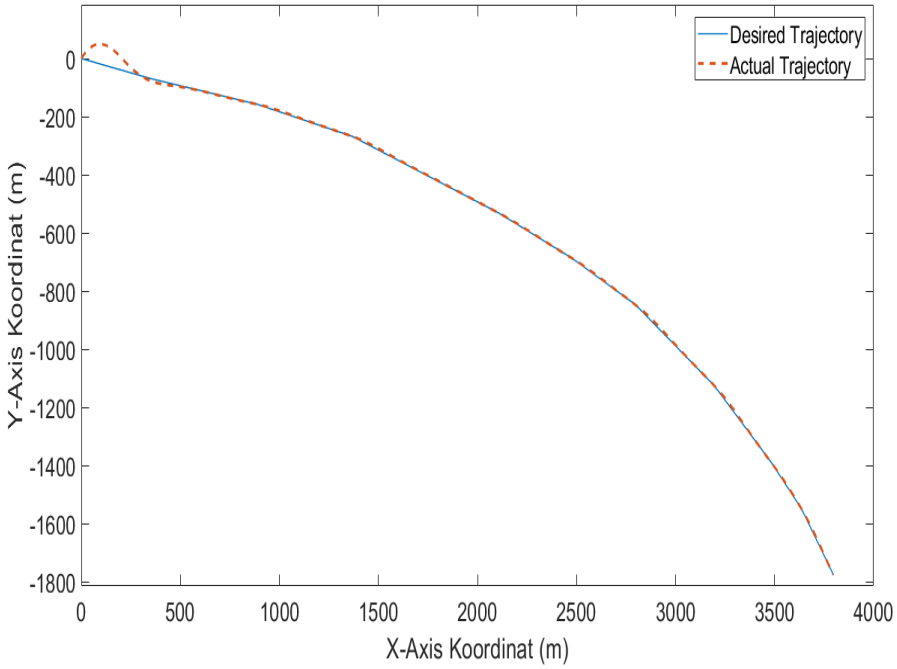
Posisi	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan
2	346.578	-68.478	344.5946	-75.3512	7.153644
3	886.263	-157.238	885.5417	-157.355	0.73078
4	1367.884	-267.893	1367.258	-267.621	0.682727
5	2104.709	-530.625	2104.576	-530.649	0.135051
6	2479.41	-688.084	2479.289	-688.221	0.182662
7	2795.911	-845.915	2795.242	-846.316	0.779636
8	3195.891	-1126.18	3196.404	-1126.25	0.517952
9	3485.504	-1391.77	3484.989	-1392.01	0.567723
10	3636.601	-1550.66	3636.829	-1550.23	0.491782

Posisi	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan
11	3797.315	-1777.12	3796.037	-1776.99	1.283248629

Tabel 4.7 menunjukkan bahwa gangguan gelombang 1,5-meter mengakibatkan adannya *error* lintasan pada *actual trajectory*. Hasil simulasi dengan gangguan gelombang 1,5-meter menunjukkan bahwa *error* lintasan terbesar terjadi pada titik 2 dengan nilai *error* lintasan 7.153644 meter. Hal tersebut terjadi karena gangguan gelombang mempengaruhi sudut *heading* dari kapal. Nilai *error* lintasan gangguan gelombang 1,5-meter lebih tinggi dikarenakan intensitas gelombang yang lebih besar.

c) **Gangguan gelombang dengan ketinggian 2,5 meter**

Simulasi dilakukan dengan menggunakan gangguan yang memiliki ketinggian 2,5 meter. Hasil simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.9 dimana *trajectory* yang diinginkan ditunjukkan dengan garis berwarna biru dan *trajectory* aktual kapal ditunjukkan dengan garis putus-putus berwarna *orange*. Dari Gambar 4.9 terlihat bahwa kapal dengan sistem *autopilot* dapat mengikuti *desired trajectory*.



Gambar 4. 9 Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 2,5 meter

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa terjadi *error* lintasan selama pelayaran *trajectory* Ketapang – Gilimanuk. Hal tersebut terjadi karena adanya gangguan pada jaalur pelayaran tersebut Nilai *error* lintasan untuk setiap posisi *setpoint* ditunjukkan oleh Tabel 4.8.

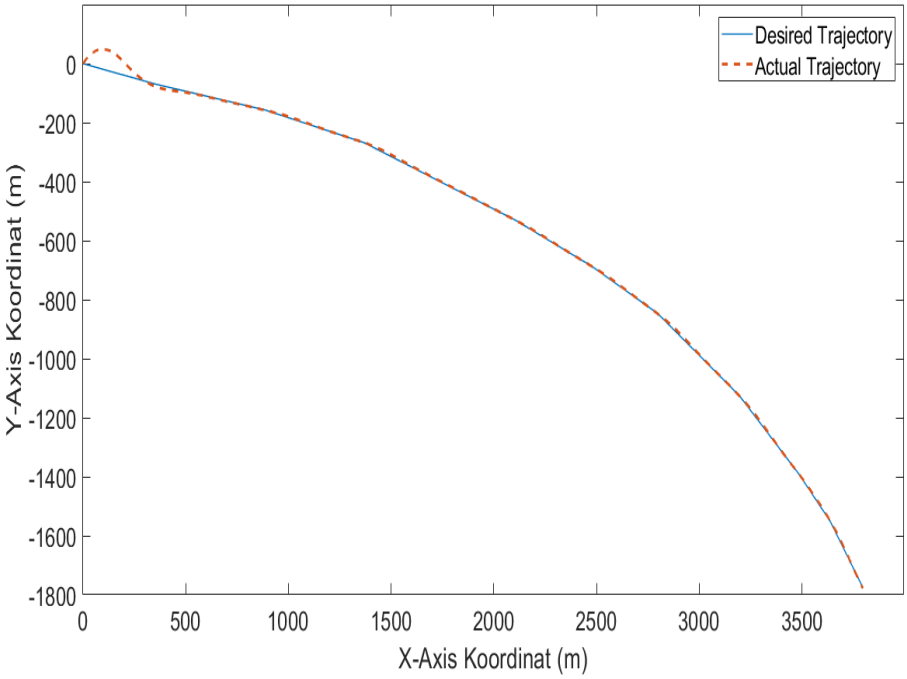
Tabel 4. 8 Koordinat Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 2,5 meter

Posisi	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan
2	346.578	-68.478	344.1286	-75.4866	7.424308
3	886.263	-157.238	885.1388	-157.338	1.128625
4	1367.884	-267.893	1366.884	-267.67	1.024508
5	2104.709	-530.625	2104.299	-530.599	0.410825
6	2479.41	-688.084	2479.045	-688.126	0.367643
7	2795.911	-845.915	2795.008	-846.265	0.968501
8	3195.891	-1126.18	3196.26	-1126.27	0.381032
9	3485.504	-1391.77	3485.028	-1391.96	0.510494
10	3636.601	-1550.66	3636.521	-1550.53	0.151624
11	3797.315	-1777.12	3796.037	-1776.99	1.283399

Tabel 4.8 menunjukkan bahwa gangguan gelombang 2,5-meter mengakibatkan adannya *error* lintasan pada *actual trajectory*. Hasil simulasi dengan gangguan gelombang 2,5-meter menunjukkan bahwa *error* lintasan terbesar terjadi pada titik 2 dengan nilai *error* lintasan 7.424308 meter. Hal tersebut terjadi karena gangguan gelombang mempengaruhi sudut *heading* dari kapal. Nilai *error* lintasan gangguan gelombang 2,5-meter lebih tinggi dikarenakan intensitas gelombang yang lebih besar.

4.3.3 Analisa Sistem *Autopilot* dengan Gangguan Arus Laut dan Gelombang

Simulasi dilakukan dengan menggunakan gangguan yang memiliki *error* posisi terbesar yaitu gelombang dengan ketinggian 2,5-meter dan arus laut dengan kecepatan 5 knot. Hasil simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.10 dimana *trajectory* yang diinginkan ditunjukkan dengan garis berwarna biru dan *trajectory* aktual kapal ditunjukkan dengan garis putus-putus berwarna *orange.* Dari Gambar 4.10 terlihat bahwa kapal dengan sistem *autopilot* dapat mengikuti *desired trajectory*.



Gambar 4. 10 Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 2,5 meter dan Arus 5 knot

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa terjadi *error* lintasan selama pelayaran *trajectory* Ketapang – Gilimanuk. Hal tersebut terjadi karena adanya gangguan pada jaalur pelayaran tersebut Nilai *error* lintasan untuk setiap posisi *setpoint* ditunjukkan oleh Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Koordinat Hasil Simulasi dengan Gangguan Gelombang 2,5 meter dan Arus 5 knot

Posisi	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan
2	346.578	-68.478	346.626	-75.3245	6.846642
3	886.263	-157.238	887.128	-157.151	0.869392
4	1367.884	-267.893	1366.934	-266.839	1.4195
5	2104.709	-530.625	2104.362	-530.698	0.354038
6	2479.41	-688.084	2478.304	-687.668	1.18144
7	2795.911	-845.915	2795.312	-846.466	0.813953
8	3195.891	-1126.18	3195.316	-1127.26	1.222293
9	3485.504	-1391.77	3485.836	-1390.11	1.695641
10	3636.601	-1550.66	3636.758	-1549	1.667615

Posisi	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan
11	3797.315	-1777.12	3795.694	-1777	1.625121

Tabel 4.9 menunjukkan bahwa gangguan gelombang 2,5-meter mengakibatkan adannya *error* lintasan pada *actual trajectory*. Hasil simulasi dengan gangguan gelombang 2,5-meter dan arus 5 knot menunjukkan bahwa *error* lintasan terbesar terjadi pada titik 2 dengan nilai *error* lintasan 6.846642 meter. Hal tersebut terjadi karena gangguan gelombang dan arus mempengaruhi sudut *heading* dari kapal. Nilai *error* lintasan gangguan gelombang dan arus lebih rendah daripada gangguan gelombang pada ketinggian 2,5-meter dikarenakan arah gangguan arus yang menuju selatan membuat *error* posisi untuk gangguan gelombang dan arus dititik 2 lebih kecil daripada hanya dengan gangguan gelombang setinggi 2,5 meter.

4.4 Perbandingan Performansi sistem Autopilot

Performansi sistem *autopilot* yang dirancang dibandingkan dengan performansi dari sistem kontrol *trajectory* yang dilakukan oleh (Vinaya et al., 2013). Dalam tugas akhir yang berjudul “Perancangan Sistem Kontrol Trajectory pada Kondisi Gangguan Arus Laut Non Uniform di Ketapang-Gilimanuk”, (Vinaya et al., 2013) menggunakan metode kontrol logika *fuzzy* tipe 1 pada kapal 1000 GT dengan gangguan berupa arus 3 knot dan 7 knot. Dalam tugas akhir ini penulis menggunakan metode kontrol logika *fuzzy* tipe 2 pada kapal 5000 GT dengan gangguan berupa arus 1 knot, 2,5 knot, dan 5 knot serta gelombang 0,5-meter, 1,5 meter, dan 2,5 meter.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem *autopilot* yang dirancangan memiliki peformansi yang lebih baik dibandingan dengan sistem kontrol *trajectory* yang dilakukan oleh (Vinaya et al., 2013). *Error* posisi terbesar pada sistem kontrol *trajectoty* yang dirancang oleh (Vinaya et al., 2013) dengan gangguan arus 3 knot adalah 5,24 meter sementara *error* posisi terbesar pada sistem *autpilot* yang dirancangan oleh penulis dengan gangguan arus 5 knot adalah 2.606532 meter. Meskipu gangguan yang diberikan pada sistem *autopilot* yang dirancangn oleh penulis lebih besar yaitu arus 5 knot *error* posisi yang muncul lebih kecil

dibandingkan dengan sistem kontrol *trajectory* yang disuse oleh (Vinaya et al., 2013).

Perbedaan performansi yang muncul dalam penelitian ini diakibatkan oleh 3 faktor yaitu *trajectory* yang digunakan, ukuran kapal, dan performansi dari metode kontrol yang digunakan. Perbedaan *trajectory* yang digunakan akan menghasilkan perbedaan *error* posisi akibat besarnya perubahan sudut *heading* yang dialami oleh kapal. Semakin besar perubahan sudut *heading* makan akan semakin besar *error* posisi yang muncul. Ukuran kapal juga mempengaruhi performansi dari sistem kontrol yang dirancang. Spesifikasi kapal yang berbeda akan menghasilkan respon sistem yang berbeda. Terakhir adalah penggunaan metode kontrol yang berbeda dimana penulis menggunakan kontrol logika *fuzzy* tipe 2 yang memiliki performnasi lebih baik dibandingkan dengan kontrol logika *fuzzy* tipe 1 yang digunaka oleh (Vinaya et al., 2013).

.

4.5 Pembahasan hasil simulasi terhadap kerealistikan kondisi actual

Pemilihan KMP Legundi sebagai objek penelitian didasarkan pada kondisi aplikatif dimana jalur pelayaran Ketapang – Gilimanuk didominasi oleh kapal *ferry* Ro-Ro. Berdasarkan data yang dimiliki oleh Dinas Perhubungan lebih dari 65% kapal yang melayani jalur tersebut adalah kapal *ferry* Ro-Ro. Pemodelan dinamika kapal pada penelitian ini dilakukan dalam bentuk nondimensi. Hal tersebut menunjukkan bahwa respon untuk model dinamika kapal yang diperoleh akan identik untuk semua kapal dengan jenis yang sama. Hal ini dikarenakan desain dari kapal *ferry* Ro-Ro memiliki perbandingan ukuran yang relatif sama.

Dalam penelitian ini juga dilakukan pengujian performansi sistem *autopilot* yang dirancang pada kapal dengan ukuran yang lebih kecil. Pengujian dilakukan untuk mengetahui performansi sistem *autopilot* pada kapal yang lebih kecil dengan besar gangguan yang sama. Ukuran kapal yang lebih kecil akan menerima dampak yang lebih besar dari gangguan yang diberikan. Pengujian dilakukan pada kapal LCT Bintang Samodra dengan gangguan berupa arus 5 knot. Hasil simulasi yang ditunjukkan pada Lampiran C menunjukkan bahwa sistem kontrol logika *fuzzy* tipe 2 yang dirancang mampu mengendalikan kapal LCT Bintang Samodra dengan

error posisi terbesar terjadi pada titik 11 dengan nilai sebesar 13.96071136 meter. *Error* posisi untuk kapal LCT Bintang Samodra ditunjukkan olehTtabel 4.10.

Sistem *autopilot* yang dirancangan juga diuji dengan arah gangguan arus yang berlawanan. Hal tersebut dilakukan karena jalur pelayaran Ketapang – Gilimanuk memiliki 2 arah arus yaitu menuju selatan dan menuju utara. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem yang dirancang mampu mengendalikan *trajectory* kapal. *Error* posisi terbesar terjadi pada titik 2 dengan besar *error* posisi adalah 4.984742759. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem *autopilot* yang dirancangn *robust* terhadap variasi arah dari gangguan arus

Tabel 4. 10 Hasil Simulasi Kapal LCT Bintang Samodra

Posisi	Xd	Yd	Xa	Ya	Error Posisi
2	346.578	-68.478	347.4964	-66.118	2.532422
3	886.263	-157.238	886.6241	-158.438	1.253133
4	1367.884	-267.893	1366.395	-273.134	5.448286
5	2104.709	-530.625	2108.64	-529.901	3.996786
6	2479.41	-688.084	2480.808	-687.512	1.510106
7	2795.911	-845.915	2798.56	-844.183	3.165087
8	3195.891	-1126.18	3196.127	-1128.42	2.254095
9	3485.504	-1391.77	3487.53	-1389.99	2.701741
10	3636.601	-1550.66	3647.748	-1545	12.50168
11	3797.315	-1777.12	3809.266	-1769.9	13.96071

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perancangan sistem *autopilot* yang telah dilakukan pada KMP Legundi untuk *trajectory* Ketapang - Gilimanuk, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Arsitektur kontrol sistem logika *fuzzy* dengan performansi terbaik dintujukkan oleh sistem dengan himpunan keanggotaan *fuzzy* berbentuk fungsi segitiga dengan jumlah himpunan keanggotaan sebanyak 7 ditunjukkan dengan *maximum overshoot* 22.061, *settling time* 523,05 detik, dan *error steady state* 0,46%.
2. Sistem *autopilot* berbasis logika *fuzzy* tipe 2 untuk *trajectory* Ketapang – Gilimanuk mampu mengikuti target *trajectory* yang telah ditentukan dengan *error* posisi terbesar terjadi akibat gangguan gelombang setinggi 2,5 meter dengan *error* posisi bernilai 7.424308 meter.

5.2 Saran

Penelitian ini masih perlu dilakukan pengembangan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik. Disarankan dilakukan pengaturan pada sistem *update* set point *trajectory* secara otomatis untuk mendapatkan *error* posisi yang lebih kecil. Untuk memperbaiki performansi dari kontrol logika *fuzzy* tipe 2 dapat dilakukan optimasi pada rentang himpunan keanggotaan *fuzzy* dan *rule base* untuk mendapatkan performansi yang optimal.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

Aisjah, A. S., & Arifin, S. (2018). *Sistem Pengendalian Otomatis Perkembangan Implementasi di Era Revolusi Industri 1.0 - 4.0* (1st ed.). ITS Press.

Ardhany, M., & Aisjah, A. S. (2017). *Perancangan Sistem Kontrol Sudut Pitch Berbasis Interval Logika Fuzzy Tipe-2 pada Prototipe Turbin Angin Skala Kecil*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Ashari, A. R., Aisjah, A. S., & Masroeri, A. A. (2014). *Perancangan Sistem Kontrol Optimal Trajectory Pada Kapal Tanker Di Perairan Tanjung Perak-Surabaya Dengan Metode Linier Quadratic Gaussian (LQG)* [Istitut Teknologi Sepulun Nopember]. http://repository.its.ac.id/51472/

Badan Pusat Statistik. (2017). *Badan Pusat Statistik* (pp. 335–358). https://doi.org/10.1055/s-2008-1040325

Fang, M. C., & Lee, Z. Y. (2016). Application of neuro-fuzzy algorithm to portable dynamic positioning control system for ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, *8*(1), 38–52. https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2015.09.003

Fossen, T. I. (1994). *Guidance an Control of Ocean Vehicles* (1st ed.). Jhon Wiley & Sons Lid.

Gunawan, R., Aisjah, A. S., & Masroeri, A. A. (2013). Perancangan Sistem Kontrol Sandar Kapal Otomatis Berbasis Logika Fuzzy di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya. In *Sandar Kapal Menggunakan Logika Fuzzy*.

Hagras, H. (2008). Type-2 fuzzy logic controllers: A way forward for fuzzy systems in real world environments. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 5050 LNCS*, 181–200. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68860-0_9

Kapal PT ASDP Indonesia Ferry. (n.d.). https://www.indonesiaferry.co.id/kapal/detail_kapal/630

Li, M., Li, T., Gao, X., Shan, Q., Chen, C. L. P., & Xiao, Y. (2019). Adaptive NN Event-triggered Control for Path Following of Underactuated Vessels with

Finite-time Convergence. *Neurocomputing*, *xxxx*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.10.044

Naik, K. A., & Gupta, C. P. (2017). Performance comparison of Type-1 and Type-2 fuzzy logic systems. *4th IEEE International Conference on Signal Processing, Computing and Control, ISPCC 2017*, *2017-Janua*, 72–76. https://doi.org/10.1109/ISPCC.2017.8269652

Ontiveros-Robles, E., Melin, P., & Castillo, O. (2017). New methodology to approximate type-reduction based on a continuous root-finding Karnik Mendel algorithm. *Algorithms*, *10*(3). https://doi.org/10.3390/a10030077

Pribadi, B., & Mulsandi, A. (2015). SIMULASI TINGGI GELOMBANG SIGNIFIKAN DENGAN MENGGUNAKAN MODEL WAVEWATCH-III (Studi Kasus Kejadian Tanggal 15-16 Juni 2014 di Perairan Selat Bali) Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. *Jurnal Meteorologi Klimatologi Dan Geofisika*.

Qu, Y., Xiao, B., Fu, Z., & Yuan, D. (2018). Trajectory exponential tracking control of unmanned surface ships with external disturbance and system uncertainties. *ISA Transactions*, *78*, 47–55. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2017.12.020

Sethuramalingam, T. K., & Nagaraj, B. (2016). A Proposed System of Ship Trajectory Control Using Particle Swarm Optimization. *Procedia Computer Science*, *87*, 294–299. https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.164

Setiawan, F., Prasita, V. D., & Widagdo, S. (2020). Pergerakan Arus Permukaan Laut Selat Bali Berdasarkan Parameter Angin Dan Cuaca. *Jurnal Riset Kelautan Tropis (Journal of Tropical Marine Research) (J-Tropimar)*, *1*(2), 1. https://doi.org/10.30649/jrkt.v1i2.25

Taskin, A., & Kumbasar, T. (2015). An Open Source Matlab / Simulink Toolbox for Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems. *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence*, 1561–1568. https://doi.org/10.1109/SSCI.2015.220

Usman, E., Novico, F., Budiono, K., & Raharjo, P. (2016). Analisis Geoteknik Kelautan Pada Sisi Ketapang (Selat Bali) Untuk Pengembangan Penghubung Jawa - Bali. *Jurnal Geologi Kelautan*, *2*(2). https://doi.org/10.32693/jgk.2.2.2004.113

Vinaya, A. A., Aisjah, A. S., & Masroeri, A. A. (2013). Perancangan Sistem Kontrol Trajectory pada Kondisi Gangguan Arus Laut Non Uniform di Ketapang-Gilimanuk. *Jurnal Teknik POMITS*, *2*, 201–206.

Yingjie, D., Xianku, Z., & Guoqing, Z. (2019). Fuzzy logic based speed optimization and path following control for sail-assisted ships. *Ocean Engineering*, *171*, 300–310. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.11.006

Zhang, G., Deng, Y., & Zhang, W. (2017). Robust neural path-following control for underactuated ships with the DVS obstacles avoidance guidance. *Ocean Engineering*, *143*, 198–208. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.08.011

Zhang, L. J., Jia, H. M., & Qi, X. (2011). NNFFC-adaptive output feedback trajectory tracking control for a surface ship at high speed. *Ocean Engineering*, *38*(13), 1430–1438. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.07.006

LAMPIRAN

A. Pemodelan Dinamika Kapal

Dinamika kapal dimodelkan dengan menggunakan pendekatan yang dilakukan oleh Nomoto dengan bentuk fungsi alih orde 2. Model dinamika kapal disusun dengan menggunakan spesifikasi dari KMP Legundi seperti berikut:

L_{pp} (Panjang, m)	= 99,2
B (lebar, m)	= 19,6
T (tinggi, m)	= 4,1
Δ (*displacement*, ton)	= 3120,07
U (kecepatan, m/s)	= 7,7
C_B	= 0,567
X_G (*center of gravity)*	= 8,417
A_δ (luas *rudder*, m^2)	= 7,19
r (jari-jari, m)	= 29,923
m’	= 0,000005212

Nilai spesifikasi kapal diatas digunakan untuk mencari koefisien hidrodinamika kapal dengan menggunakan persamaan berikut:

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

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

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

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

$$\frac{-Y'_{v}}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.4\frac{C_B B}{T}$$

$$\frac{-Y'_{r}}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{12} + 2.2\left(\frac{B}{L}\right) - 0.08\left(\frac{B}{T}\right)$$

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

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

Berdasarkan persamaan diatas maka nilai koefisien hidrodinamika kapal dapat diketahui.

Y'vdot	**Y'rdot**	**N'vdot**	**N'rdot**
-0.00662	-0.00031	-0.00011	-0.00034
Y'v	**Y'r**	**N'v**	**N'r**
-0.01118	0.002402	-0.00321	-0.00175
Y'δ	**N'δ**	**I'z**	**I'r**
14.2658	-7.1329	0.002966	0.002597

Kemudian dibentuk kedalam persamaan gerak kapal dalam bentuk matriks inesrsia seperti berikut:

M =	**m' - Y'vdot**	**m'.Xg - Y'rdot**
	m'.Xg - N'vdot	**I'z - N'rdot**
M =	0.006627336	0.000349414
	0.000158326	0.003310191

N =	**(-)Y'v**	**m'u' - Y'r**
	(-)N'v	**m'.Xg.u' - N'r**
N =	0.011179	-0.00236158
	0.003214	0.002085293

Matriks teresbut kemudian di konversi menjadi bentuk nondimensional menjadi:

M' =	**m'11 x L/U^2**	**m'12 x L^2/U^2**
	m'21 x L/U^2	**m'22 x L^2/U^2**
M' =	0.011088408	0.057993802
	0.000264901	0.549407911

N' =	**n'11/U**	**n'12 x L/U**
	n'21/U	**n'22 x L/U**
N' =	**0.001452**	**-0.0304245**
	0.000417	**0.026865078**

Dengan menggunakan determinan dari matriks M' (det(M)) dan determinan dari matriks N' (det(N)) dapat diperoleh nilai parameter untuk persamaan fungsi alih orde 2 yang dilakukan Nomoto dengan menggunakan persamaan berikut:

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

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

Dan parameter dari persamaan fungsi alih Nomoto sebagai berikut:

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

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

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

$$K_RT_3 = \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b_2}{det(N)}$$

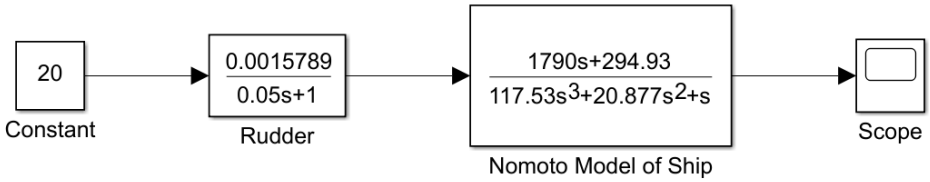
Sehingga diperoleh model matematika untuk kapal dengan persamaan berikut:

$$\frac{T}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1 + T_3s)}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)}$$

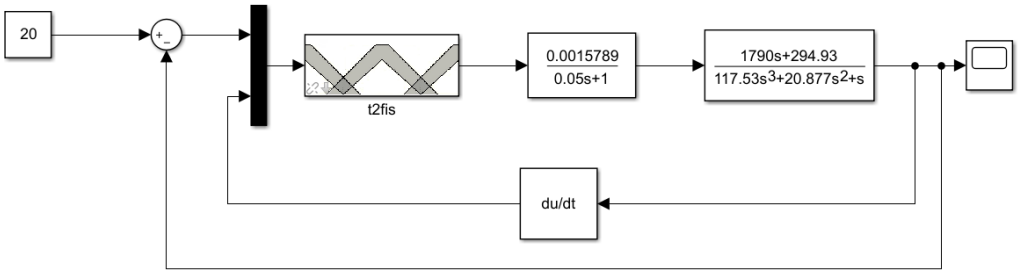
Halaman ini sengaja dikosongkan

B. Rancangan Simulasi dengan Software Matlab

Model siimulasi untuk pengujian *open loop* dan *close loop* ditunjukkan oleh gambar berikut:



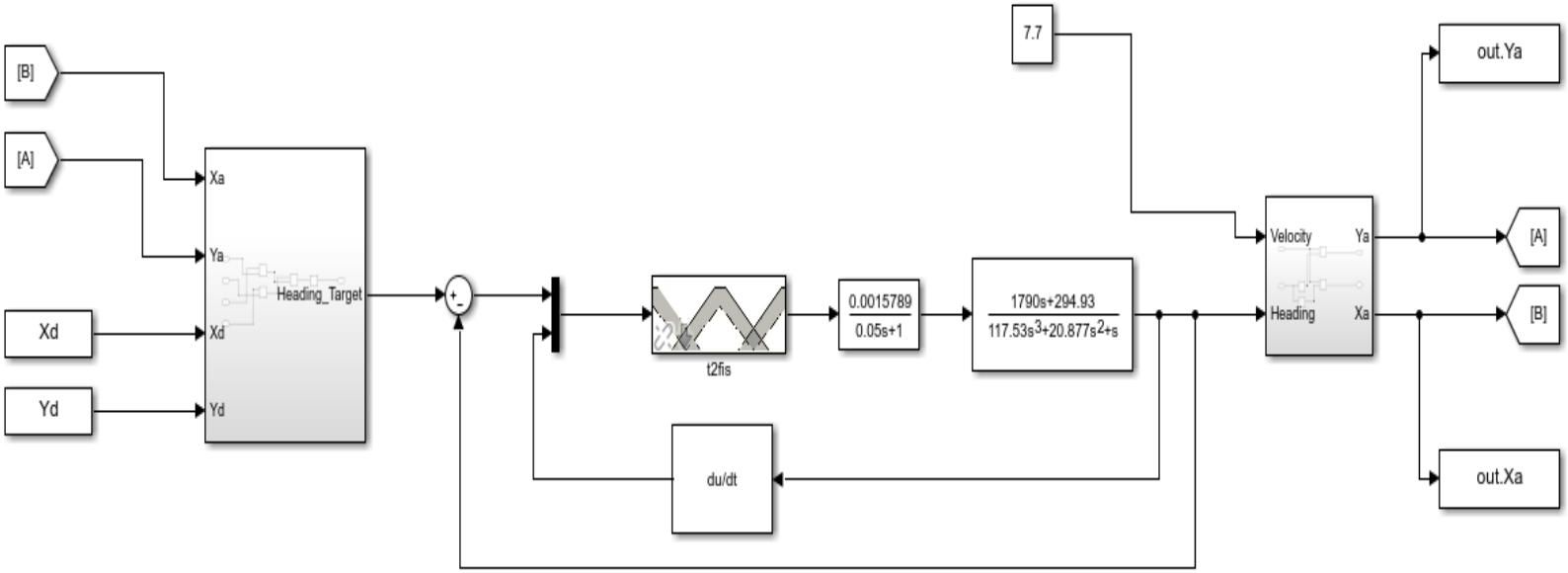
Model pengujian *open loop*



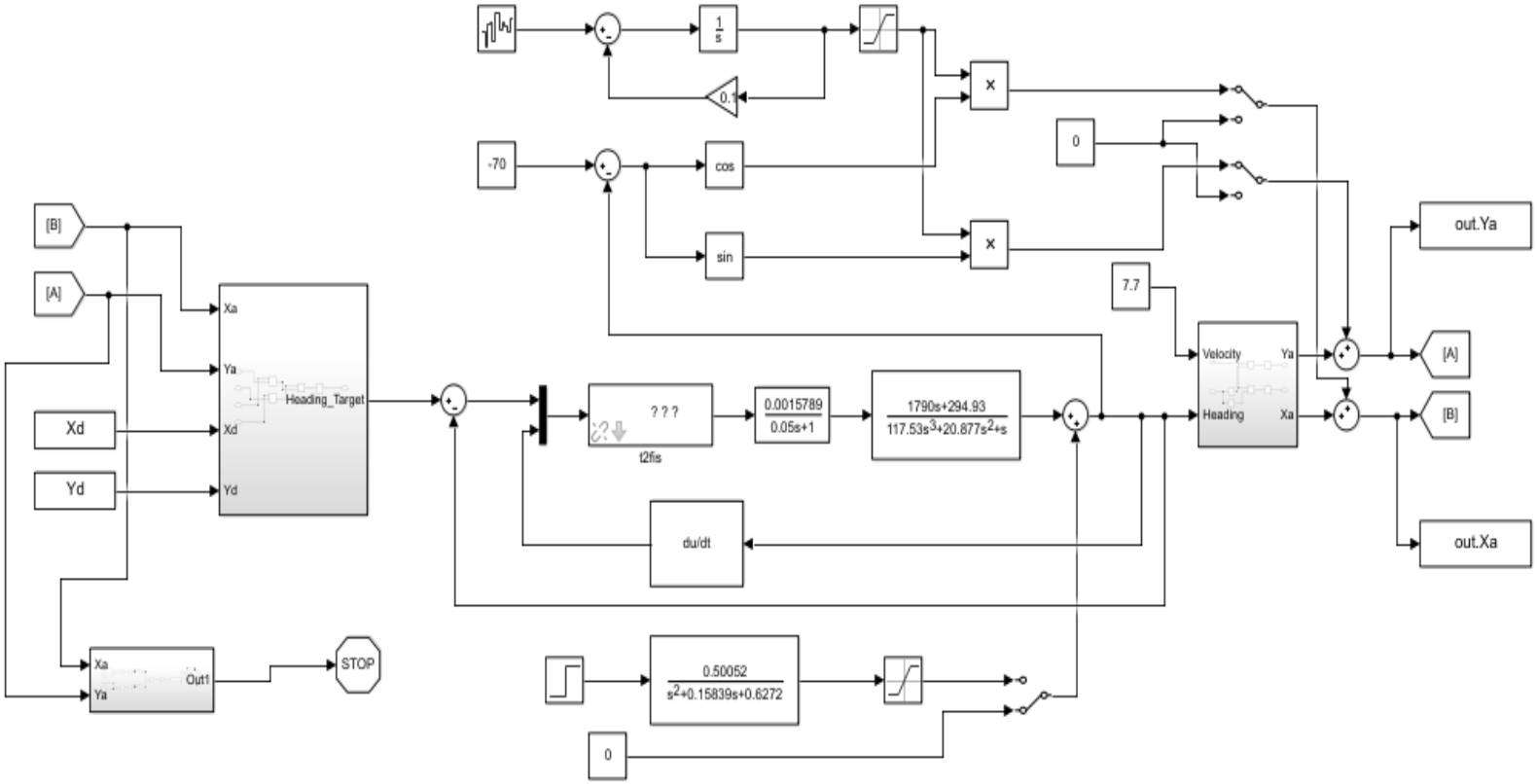
Model pengujian *close loop*

Halaman ini sengaja dikosongkan

Model Simulasi *trajectory* dari pelayaran Ketapang - Gilimanuk dengan atau tanpa gangguan ditunjukkan oleh gambar berikut:



Simulasi tanpa gangguan



Simulasi dengan gangguan

C. Kapal LCT Bintang Samodra

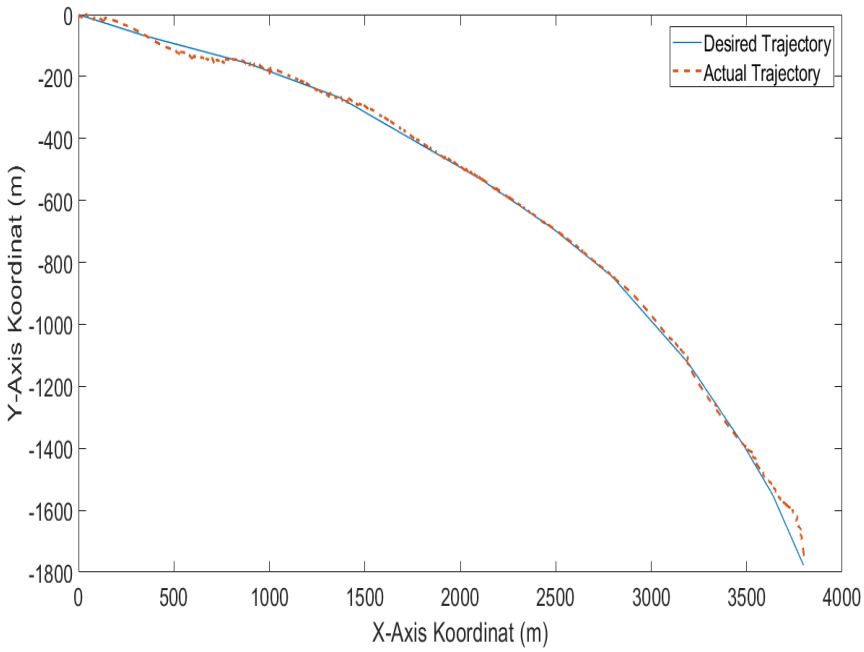
Spesifikan dari kapal LCT Bintang Samodra adalah sebagai berikut:

Spesifikasi Kapal LCT Bintang Samodra	
Lpp (m)	53.2
B (m)	12.5
T (m)	3
Δ (ton)	1700
U (m/s)	6
Cb	0.8313
Xg	2.39
Aδ (m2)	0.69
r (m)	11.97
m'	0.000021966
Ro	1028

Berdasarkan spesifikasi kapal tersebut maka model matematika untuk kapal LCT Bintangan Samodra adalah sebagai berikut:

$$\frac{T}{\delta_R} = \frac{149{,}496 + 636{,}5099s}{41{,}11106s^3 + 12{,}24779s^2 + s}$$

Hasil simulasi ditunjukkan oleh gambar berikut

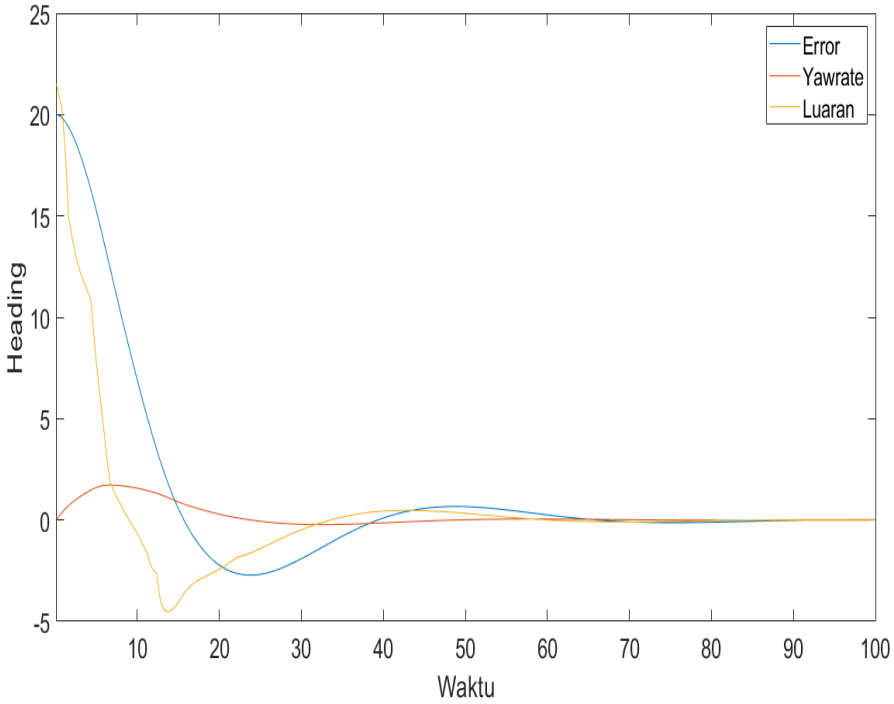


Hasil simulasi *trajectory* LCT Bintang Samodra

Halaman ini sengaja dikosongkan

D. Validasi *Toolbox* dan Kontroller

Simulasi kontrol logika *fuzzy* tipe 2 dilakukan pada *toolbox* yang disediakan oleh jurnal hasil penelitian (Taskin & Kumbasar, 2015). Validasi *toolbox* dan kontrol dilakukn dengan menggunakan grafik masukan dan luaran kontroler yang berupa *error* dan *yawrate* serta luaran.



Uji kontroler dan *toolbox*

Grafik diatas menujukkan bahwa *toolbox* dan *kontrol* yang digunakan valid karena respon sistem yang sesuai dengan table kebenaran yang disusun saat perancangan sistem kontrol logika *fuzzy* tipe 2. Pengujian dilakuakn dengan masukan berupa *heading* 20 derajat.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS

Penulis lahir di kota Gresik 7 Januari 1998. Penulis menempuh pendidikan di SDN 007 Samarinda lulus tahun 2010, SMPN 1 Samarinda lulus tahun 2013, dan SMAN 10 Samarinda lulus 2016. Pendidikan sarjana ditempuh di Jurusan Teknik Fisika ITS melalui jalur Mandiri 2016. Selama aktif menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam organisasi kemahasiswaan Jamaah Masjid Manarul Ilmi selama periode 2017-2018 dalam Departemen Jaringan. Pengalaman internship program selama 1 bulan di PT Indonesia Power khususnya di PLTU Banten 3 Lontar dengan project *tuning* pengendalian *level* pada *Hotwell* dengan menggunakan metode *Ziegler Nichols*. Bidang minat penulis adalah elektronika, instrumentasi dan kontrol. Penulis dapat dihubungi di email ferrybstn17@gmail.com.