



TUGAS AKHIR TF141581

PERANCANGAN SISTEM KENDALI MANUVER BERBASIS LOGIKA FUZZY UNTUK ANTI TABRAKAN KAPAL BERDASARKAN NILAI DCPA-TCPA

NUR OKTA MILATINA
NRP. 2412 100 089

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

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016



FINAL PROJECT TF141581

SHIP MANUVERING CONTROL SYSTEM DESIGN BASED ON FUZZY LOGIC FOR ANTI COLLISION BASED ON DCPA-TCPA VALUE

NUR OKTA MILATINA
NRP. 2412 100 089

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

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2016

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI MANUVER
BERBASIS LOGIKA FUZZY UNTUK ANTI TABRAKAN
KAPAL BERDASARKAN NILAI DCPA-TCPA**

TUGAS AKHIR

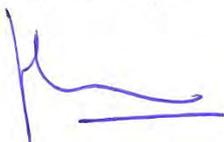
Oleh :

Nur Okta Milatina
NRP. 2412 100 089

Surabaya, 20 Juli 2016

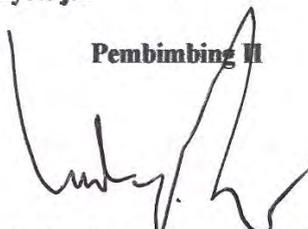
Mengetahui / Menyetujui

Pembimbing I



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

Pembimbing II



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

Mengetahui

Kaplan Jurusan Teknik Fisika



Agus Muhammad Hatta, ST, MSi, Ph.D
NIP. 19780902 200312 1 002

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI MANUVER
BERBASIS LOGIKA FUZZY UNTUK ANTI TABRAKAN
KAPAL BERDASARKAN NILAI DCPA-TCPA**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S1 Teknik Fisika
Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
NUR OKTA MILATINA
NRP. 2412 100 089

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. Ir. Yaumar, M.T. (Penguji I)
4. Dr. Ir. Purwadi Agus D, M.Sc. (Penguji II)
5. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. (Penguji III)

**SURABAYA
JULI 2016**

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI MANUVER
BERBASIS LOGIKA FUZZY UNTUK ANTI TABRAKAN
KAPAL BERDASARKAN NILAI DCPA-TCPA**

Nama : Nur Okta Milatina
NRP : 2412 100 089
Jurusan : S1 Teknik Fisika
Dosen Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T
Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. A. A. Masroeri, M. Eng

Abstrak

Tugas akhir ini merupakan pengembangan dari penelitian sebelumnya mengenai perancangan sistem kendali anti tabrakan. Pada penelitian sebelumnya belum terdapat parameter DCPA (*Distance Closest Point Approach*) dan TCPA (*Time Closest Point Approach*) sebagai parameter penentu resiko. Tujuan dari tugas akhir ini adalah didapatkan sebuah rancangan sistem kendali anti tabrakan kapal berbasis logika fuzzy berdasarkan nilai DCPA dan TCPA. DCPA merupakan jarak antara titik *Closest Point Approach* (CPA) dengan kapal kendali, sedangkan TCPA adalah waktu yang didapat dari pembagian jarak terhadap kecepatan relatif kedua kapal. Semakin kecil nilai DCPA dan TCPA merupakan tanda bahwa resiko terjadinya tabrakan kapal semakin besar. Kedua parameter, DCPA dan TCPA menjadi masukan kendali kecepatan kapal. Nilai DCPA dan TCPA dihitung dengan memanfaatkan informasi data statis dan dinamis yang tersedia dari teknologi navigasi yakni AIS. Perancangan sistem kendali anti tabrakan yang telah disusun, disimulasikan menggunakan software Simulink R2013. Dari hasil perancangan sistem kendali anti tabrakan yang telah dilakukan dalam tugas akhir ini, didapatkan hasil bahwa dengan berkurangnya nilai DCPA dan TCPA kecepatan kapal menjadi diperlambat dari 14 km/jam menjadi 7 km/jam.

Kata kunci: Anti Tabrakan, DCPA, Logika Fuzzy, Manuver, TCPA.

**SHIP MANUVERING CONTROL SYSTEM DESIGN BASED
ON FUZZY LOGIC FOR ANTI COLLISION BASED ON
DCPA-TCPA VALUE**

Name : Nur Okta Milatina
NRP : 2412 100 089
Department : SI Teknik Fisika
Advisor Lecturer I : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T
Advisor Lecturer II : Dr. Ir. A. A. Masroeri, M. Eng

Abstract

This final project is a development from previous research about control system design. In earlier research, parameter DCPA (Distance Closest Point Approach) and TCPA (Time Closest Point Approach) has not been used as collision risk parameter. This final project are done in purpose to get an anti collision control design based on DCPA and TCPA value. DCPA is defined as distance between Closest Point Approach (CPA) and Own vessel, otherwise TCPA is distance from CPA to target vessel divided by relative velocity. The smaller of DCPA and TCPA value means bigger collision risk probability. These two parameters DCPA and TCPA role as input of ship velocity control. DCPA and TCPA are calculated using static and dynamic information data which is already provided by AIS navigation technology. The control design that has been made are simulated using Simulink R2013. From this control design, the result is when DCPA and TCPA has been reach the minimum value for collision risk, ship velocity are changing from 14 km/h to 7 km/h.

Key word: *Anti Collision, DCPA, Fuzzy Logic, Manuvering, TCPA.*

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur Alhamdulillah selalu dipanjatkan kepada Allah SWT atas anugerah dan karunia-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW, atas terselesaikannya tugas akhir dengan judul “**Perancangan Sistem Kendali Manuver Berbasis Logika Fuzzy Untuk Anti Tabrakan Kapal Berdasarkan Nilai DCPA-TCPA**”. Berbagai bantuan dan motivasi telah diterima penulis selama penyelesaian Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, pada lembaran kata pengantar ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T, MSi, Ph.D, selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika ITS.
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T dan bapak Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng atas kesabaran dan keikhlasan dalam meluangkan waktu untuk membimbing penulis selama proses pengerjaan tugas akhir.
3. Bapak Totok Ruki Biyanto Ph.D selaku Ketua Laboratorium Instrumentasi atas fasilitas dan kebijakannya selama proses pelaksanaan tugas akhir.
4. Kedua orang tua penulis, ayah, ibu, kakak, adik serta keluarga yang telah banyak memberikan motivasi, doa dan bantuan finansial.

Dalam laporan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang terlihat maupun yang tidak. Oleh karena itu penulis mengharapkan saran serta kritik untuk kesempurnaan tugas akhir ini serta pengembangannya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan semua pihak yang membaca dan mempelajarinya.

Surabaya, 20 Juli 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR NOTASI	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 DCPA	5
2.2 TCPA	7
2.2 Model Dinamika Kapal	8
2.3 Pemodelan Dinamika <i>Rudder</i>	15
2.4 Pemodelan Dinamika <i>Thruster</i>	16
2.5 Pemodelan Gangguan Arus	16
2.6 Metode Root Locus	17
2.7 Sistem Kendali Logika Fuzzy	17
2.8 Aturan Mengenai Tabrakan Kapal	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Studi Kendali Anti Tabrakan Kapal	24
3.2 Pengambilan Data dan Spesifikasi Kapal	26
3.3 Pemodelan Matematis	26
3.4 Pembangkitan Gangguan Arus	31
3.5 Analisa Kestabilan Model Dinamika Kapal	32

3.6 Alur Pelayaran.....	32
3.7 Perancangan Kendali Anti Tabrakan	33
3.8 Perancangan Sistem Kendali Manuver Logika Fuzzy	38
3.9 Pengujian dan Analisis Performansi	47
3.10 Penyusunan dan Penulisan Laporan	47
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....	48
4.1 Uji Manuver Kapal	48
4.2 Uji Kecepatan Kapal.....	49
4.3 Uji Sistem Kendali Haluan dan Kecepatan tanpa	50
4.4 Uji Tanpa Halangan dengan Gangguan Arus.....	53
4.5 Uji dengan Halangan dan Gangguan Arus.....	54
BAB V KESIMPULAN	69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran.....	70

DAFTAR PUSTAKA	71
----------------------	----

LAMPIRAN A (Penurunan Model Nomoto)

LAMPIRAN B (Hubungan Matriks Davidson & Model Nomoto)

LAMPIRAN C (Regresi Clarck)

LAMPIRAN D (Alur Pelayaran Tanjung Perak-Karang Jemuang)

LAMPIRAN E (Rules Kendali Haluan)

LAMPIRAN F (Rules Kendali Kecepatan)

LAMPIRAN G (Simulink Perancangan Sistem)

LAMPIRAN H (Data DCPA per titik-Kapal Target I)

LAMPIRAN I (Data TCPA per titik-Kapal Target I)

LAMPIRAN J (DCPA&TCPA per titik-Kapal Target II)

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	D CPA dan T CPA (Shu et al, 2014)	5
Gambar 2.2	Skenario perhitungan D CPA dan T CPA (Shu et al, 2014)	6
Gambar 2.3	Gerakan kapal 6 DOF (Fossen, 2011)	8
Gambar 2.4	Sistem kemudi Van Amorgen (Fossen, 1994)	15
Gambar 2.5	Diagram blok kendali <i>rudder</i> Van Amorgen (Fossen, 1994)	15
Gambar 2.6	Struktur dasar logika fuzzy	18
Gambar 2.7	Struktur fuzzy mamdani	19
Gambar 2.8	Struktur logika fuzzy Takagi-Sugeno (Arifin, n.d.)	20
Gambar 2.9	<i>Crossing</i> (kapal kendali "Give way") (a) kapal Target dari atas (b) kapal target dari arah bawah (Lokukaluge, 2011)	21
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian tugas akhir	24
Gambar 3.2	Diagram blok <i>rudder</i> (Fossen, 1994)	31
Gambar 3.3	Grafik root locus fungsi alih kapal	32
Gambar 3.4	Diagram blok sistem pengendalian anti tabrakan kapal	36
Gambar 3.5	Diagram blok sistem KLF haluan	38
Gambar 3.6	Diagram blok perhitungan <i>error yaw</i>	38
Gambar 3.7	Diagram blok perhitungan <i>yaw rate</i>	39
Gambar 3.8	Fungsi keanggotaan <i>error</i>	40
Gambar 3.9	Fungsi keanggotaan <i>yaw rate</i>	40
Gambar 3.10	Tampilan surface interferensi KLF haluan	42
Gambar 3.11	Diagram blok sistem KLF kecepatan	42
Gambar 3.12	Diagram blok perhitungan D CPA	43
Gambar 3.13	Diagram blok perhitungan T CPA	44
Gambar 3.14	Fungsi keanggotaan D CPA	44

Gambar 3.15	Fungsi keanggotaan TCPA	45
Gambar 3.16	Tampilan surface interferensi KLF Kecepatan	46
Gambar 4.1	Uji <i>turning</i> 30°	49
Gambar 4.2	Uji <i>turning</i> 20°	50
Gambar 4.3	Uji kecepatan kapal	51
Gambar 4.4	Lintasan <i>desired</i> & aktual tanpa arus	52
Gambar 4.5	Respon dinamik kapal tanpa arus	54
Gambar 4.6	Kecepatan kapal dengan gangguan arus	55
Gambar 4.7	Lintasan dengan halangan di kanan	56
Gambar 4.8	Perbesaran koordinat tabrakan kapal	57
Gambar 4.9	Respon dinamik kapal dengan halangan	58
Gambar 4.10	Grafik kecepatan kapal dengan halangan	59
Gambar 4.11	Grafik DCPA sebelum kendali anti tabrakan	60
Gambar 4.12	Grafik TCPA sebelum kendali anti tabrakan	61
Gambar 4.13	Grafik DCPA dengan kendali anti tabrakan	62
Gambar 4.14	Grafik TCPA dengan kendali anti tabrakan	63
Gambar 4.15	Lintasan dengan kapal target II	65
Gambar 4.16	Grafik DCPA kapal target II	66
Gambar 4.17	Grafik DCPA kapal target II	67
Gambar 4.18	Grafik kecepatan kapal II	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Simbol Derajat Kebebasan (Fossen, 1994)	8
Tabel 2.2	Variabel Normalisasi	14
Tabel 3.1	Spesifikasi MV. Caraka Niaga III-7 (Saiko et al, 2011)	27
Tabel 3.2	Koefisien Hidrodinamika Kapal	28
Tabel 3.3	Pembentuk Persamaan Model Dinamika Nomoto	30
Tabel 3.4	Validasi Koefisien Hidrodinamika	30
Tabel 3.5	Koordinat Alur Pelayaran Tanjung Perak	33
Tabel 3.6	Basis Aturan KLF Haluan	41
Tabel 3.7	Basis Aturan KLF Kecepatan	46
Tabel 4.1	Error Alur Pelayaran Kapal Tanpa Arus	53
Tabel 4.2	Respon Dinamika Kapal Setiap Titik	53

DAFTAR NOTASI

x	Posisi <i>surge</i>	m
y	Posisi <i>sway</i>	m
z	Posisi <i>heave</i>	m
φ	Sudut <i>roll</i>	°
θ	Sudut <i>pitch</i>	°
ψ	Sudut <i>yaw</i>	°
u	Kecepatan <i>surge</i>	m/s
u	Kecepatan translasi pada sumbu x (<i>surge</i>)	m/s
v	Kecepatan translasi pada sumbu y (<i>sway</i>)	m/s
w	Kecepatan translasi pada sumbu z (<i>heave</i>)	m/s
p	Kecepatan rotasi pada sumbu x (<i>roll</i>)	m/s
q	Kecepatan rotasi pada sumbu y (<i>pitch</i>)	m/s
r	Kecepatan rotasi pada sumbu z (<i>yaw</i>)	m/s
\dot{u}	Percepatan translasi pada sumbu x (<i>surge</i>)	m/s ²
\dot{v}	Percepatan translasi pada sumbu y (<i>sway</i>)	m/s ²
\dot{w}	Percepatan translasi pada sumbu z (<i>heave</i>)	m/s ²
\dot{p}	Percepatan rotasi pada sumbu x (<i>roll</i>)	m/s ²
\dot{q}	Percepatan rotasi pada sumbu y (<i>pitch</i>)	m/s ²
\dot{r}	Percepatan rotasi pada sumbu z (<i>yaw</i>)	m/s ²
X	Gaya <i>surge</i>	N
Y	Gaya <i>sway</i>	N
Z	Gaya <i>heave</i>	N
N	Momen <i>yaw</i>	N.m
$X^?$	Gaya <i>surge</i> non dimensi	
$Y^?$	Gaya <i>sway</i> non dimensi	
$N^?$	Momen <i>yaw</i> non dimensi	
$Y_{\dot{v}}$	Turunan gaya <i>sway</i> terhadap \dot{v}	N.s ² /m
$Y_{\dot{r}}$	Turunan gaya <i>sway</i> terhadap \dot{r}	N.s ² /rad
$N_{\dot{v}}$	Turunan momen <i>yaw</i> terhadap \dot{v}	N.s ²

$N_{\dot{r}}$	Turunan momen <i>yaw</i> terhadap \dot{r}	$N.s^2$
X_u	Turunan gaya <i>surge</i> terhadap u	$N.s/m$
Y_u	Turunan gaya <i>sway</i> terhadap u	$N.s/m$
Y_v	Turunan gaya <i>sway</i> terhadap v	$N.s/m$
Y_r	Turunan gaya <i>sway</i> terhadap r	$N.s$
N_v	Turunan momen <i>yaw</i> terhadap v	$N.s$
N_r	Turunan momen <i>yaw</i> terhadap r	$N.s$
X_H	Gaya hidrodinamika pada lambung kapal	N
X_p	Gaya dorong dari <i>propeller</i>	N
X_R	Gaya <i>rudder</i>	N
δ	Sudut <i>rudder</i>	$^\circ$
Ψ_d	<i>Heading</i> yang diharapkan/ <i>yaw desired</i>	$^\circ$
K_R	Gain fungsi alih Nomoto	
$T_1 T_2 T_3$	Parameter fungsi alih Nomoto	
$\det(M)$	Determinan Matriks M	
$\det(N)$	Determinan Matriks N	
n_{ij}	Nilai pada Matriks n kolom ke i baris ke j	
m_{ij}	Nilai pada Matriks m kolom ke i baris ke j	
x_G	Pusat massa	m
ω	Kecepatan angular	rad/s
r_G	Jari jari girasi	m
ρ	Massa jenis	kg/m^3
L	Panjang kapal	m
L_{pp}	Panjang perpendikular	m
C_B	Koefisien blok kapal	
U	Kecepatan servis kapal	m/s
B	Lebar kapal	m
T	Kedalaman	m
A_δ	Luasan <i>rudder</i>	m^2
Y_δ	Gaya <i>rudder</i>	N
N_δ	Moment <i>rudder</i>	$N.m$

K_y	Gain fungsi alih kecepatan	
T_y	<i>Time constant</i> fungsi alih kecepatan	
$X_{\delta\delta\delta}$	Gaya yang ditimbulkan oleh <i>rudder</i> pada sumbu x	
Y_{er}	Posisi <i>engine rack</i>	
x_T	Koordinat x kapal target terhadap kapal kendali	km
y_T	Koordinat y kapal target terhadap kapal kendali	km
θ_r	Sudut relatif antara kapal kendali dan kapal target	°
θ_T	Sudut kapal target	°
V_r	Kecepatan relatif	km/jam
V_o	Kecepatan kapal kendali	km/jam
V_c	Kecepatan arus rata-rata	km/jam
V_{min}	Kecepatan minimum arus laut	km/jam
V_{max}	Kecepatan maksimum arus laut	km/jam
x_t	Koordinat x kapal target	km
y_t	Koordinat y kapal target	km
x_o	Koordinat x kapal kendali	km
y_o	Koordinat y kapal kendali	km
x_d	Koordinat x <i>desired</i> kapal kendali	km
y_d	Koordinat y <i>desired</i> kapal kendali	km
x_a	Koordinat x aktual kapal kendali	km
y_a	Koordinat y aktual kapal kendali	km
$X_{d(t-1)}$	titik <i>desired</i> sumbu X pada saat t-1	km
$Y_{d(t)}$	titik <i>desired</i> sumbu Y pada saat t	km
$Y_{d(t-1)}$	titik <i>desired</i> sumbu Y pada saat t-1	km
$X_{a(t-1)}$	titik aktual sumbu X pada saat t-1	km
$Y_{a(t-1)}$	titik aktual sumbu X pada saat t-1	km

I_z	Momen inersia pada sumbu z	Nm
KLF	Kontrol Logika <i>Fuzzy</i>	
e	<i>Error</i>	
r	<i>Yaw rate</i>	
NB	<i>Negative Big</i>	
NM	<i>Negative Medium</i>	
NS	<i>Negative Small</i>	
ZE	<i>Zero</i>	
PS	<i>Positive Small</i>	
PM	<i>Positive Medium</i>	
PB	<i>Positive Big</i>	
B	<i>Big</i>	
S	<i>Slow</i>	
M	<i>Medium</i>	
F	<i>Fast</i>	

BAB I

PENDAHULUAN

2.1 Latar Belakang

Tabrakan kapal merupakan salah satu jenis kecelakaan laut yang sering terjadi. Sebanyak 80% faktor penyebab tabrakan kapal adalah *human error*. Salah satu jenis human error dalam tabrakan kapal adalah kesalahan dalam mengestimasi kondisi alam maupun dimensi kapal lain, sehingga sering kali membuat awak kapal kurang tepat mengambil keputusan sehingga tabrakan kapal terjadi (Rothblum, 2002).

Pengambilan keputusan aksi anti tabrakan kapal secara umum dapat dilakukan berdasarkan data dimensi, posisi kedua kapal (*ship-based*) dan kondisi alam sekitar. Data-data tersebut digunakan untuk perhitungan resiko tabrakan. Besar kecilnya resiko tabrakan kapal akan menentukan bekerjanya suatu sistem anti tabrakan.

Keberadaan teknologi navigasi yaitu ARPA, GPS dan AIS berperan penting dalam perhitungan resiko tabrakan kapal (Hall et al, 2015). Informasi dari teknologi navigasi terbagi menjadi dua yakni data statis dan data dinamis. Data statis berupa data spesifikasi kapal, panjang kapal, lebar kapal, berat kapal dan nomor induk kapal. Data dinamis terdiri dari data kecepatan kapal, heading kapal, posisi kapal dan lain lain. Data-data dari teknologi navigasi tersebut dapat digunakan sebagai variabel penentu resiko tabrakan.

Salah satu variabel penentu resiko tabrakan adalah DCPA dan TCPA. DCPA (*Distance Closest Point Approach*) merupakan jarak minimal kapal mencapai CPA (*Closest Point Approach*) atau jarak kapal dari posisinya berada sampai pada titik dimana kapal harus melakukan aksi anti tabrakan (Bukhari, 2013). TCPA (*Time Closest Point Approach*) merupakan waktu minimal yang dibutuhkan untuk mengambil aksi anti tabrakan.

Jarak antar kapal merupakan variabel lain selain DCPA dan TCPA. Jarak antar kapal menggunakan data posisi kedua kapal

sebagai masukan sistem anti tabrakan. Variabel penentu lainnya adalah *dangerous zone*. *Dangerous zone* menggunakan batasan jarak pada sumbu y. Mekanisme kerja sistem anti tabrakan dengan *dangerous zone* yakni apabila kedua kapal memasuki zona yang ditentukan maka aksi anti tabrakan akan dilakukan.

Pada penelitian-penelitian sebelumnya mengenai tabrakan kapal telah digunakan variabel Penggunaan jarak antara kapal sebagai variabel penentu resiko tabrakan sudah digunakan pada tugas akhir Saiko tahun 2011 (Saiko, 2011). Variabel lainnya adalah perhitungan *dangerous zone* yang telah digunakan pada penelitian Aulia et al (Aisyah, 2011).

Berdasarkan latar belakang di atas maka dalam tugas akhir ini dilakukan penelitian yang menambahkan variabel masukan untuk sistem anti tabrakan kapal. Variabel yang ditambahkan adalah DCPA dan TCPA. Dalam tugas akhir ini dilakukan perancangan kendali otomatis dengan menggunakan DCPA dan TCPA sebagai variabel pengambilan keputusan.

2.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah

1. Apakah DCPA-TCPA dapat dijadikan variabel masukan anti tabrakan?
2. Bagaimana cara membangun rule pada sistem logika fuzzy sebagai bagian dari pengendali anti tabrakan?
3. Apakah performansi keluaran sistem kendali mampu memberikan rekomendasi sebuah sistem kendali anti tabrakan?

2.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah perancangan sistem pengendalian haluan dan kecepatan kapal untuk menghindari tabrakan berdasarkan nilai DCPA-TCPA. Nilai DCPA dan TCPA dihitung berdasarkan data AIS sebagai data masukan pada sistem logika fuzzy

2.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

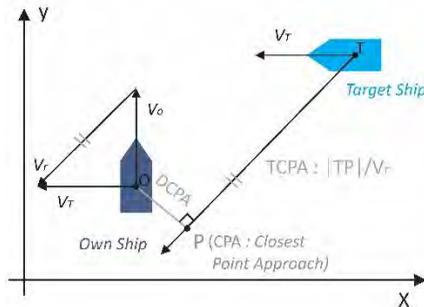
1. Kapal yang digunakan dalam penelitian adalah kapal yang telah dilengkapi dengan teknologi *AIS* (*Automatic Identification System*).
2. Variabel yang dikendalikan adalah 3 derajat kebebasan (dof) yang didekati dengan model 1 dof untuk gerak *yaw*, dengan asumsi bahwa secara eksperimen gerak *surge*, *sway*, *pitch*, *roll* dan *heave* tidak berpengaruh pada gerak maneuver kapal. Disamping *yaw*, variable lain yang dikendalikan adalah kecepatan kapal.
3. Data masukan dalam sistem kendali adalah DCPA, TCPA dan rasio kecepatan kapal target dengan kapal kendali.
4. Metode perancangan sistem pengendalian berdasar kendali logika fuzzy.
5. Gangguan (*disturbance*) pada dinamika kapal sepanjang jalur pelayaran adalah arus.
6. Kasus tabrakan kapal terjadi pada dua kapal dalam situasi crossing kapal kendali “*Give way*” (memberikan jalan).

Halaman ini memang dikosongkan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.5 DCPA (*Distance Closest Point Approach*)

DCPA merupakan singkatan dari *Distance Closest Point Approach*. DCPA merupakan besaran yang menunjukkan jarak terdekat kapal dengan titik CPA (Shu et al, 2014). CPA merupakan titik terdekat terjadinya resiko tabrakan kapal. DCPA digunakan sebagai parameter penentu resiko tabrakan kapal. Semakin kecil nilai DCPA maka semakin besar resiko tabrakan kapal. DCPA merupakan besaran skalar dengan satuan dapat berupa m atau km. Ilustrasi mengenai DCPA dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 DCPA dan TCPA (Shu et al, 2014)

Dari gambar 2.1 dapat dilihat bahwa DCPA (*Distance Closest Point Approach*) adalah jarak terdekat kapal satu dengan kapal lain dengan menarik garis tegak lurus dari kapal O terhadap garis TP. Garis TP merupakan garis yang ditarik dari posisi kapal target (T) sejajar dengan vektor kecepatan relatif antara dua kapal (V_r).

Perhitungan DPCA dapat dilakukan dengan mengetahui data statistik dan data dinamis kapal dengan menggunakan persamaan 2.1. Perbedaan perhitungan DCPA dengan besaran jarak antara kapal yang lain adalah dalam perhitungan DCPA faktor sudut datang kapal target dan sudut *heading* kapal kendali ikut diperhitungkan.

$$DCPA = |OP| = \frac{|x_T + y_T \tan \theta_r|}{\sqrt{\tan^2 \theta_r + 1}} \quad (2.1)$$

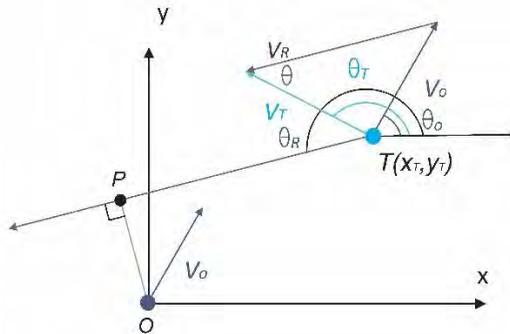
Dimana:

x_T = koordinat lintang kapal target (km)

y_T = koordinat bujur kapal target (km)

θ_r = sudut antara vektor kecepatan relatif dengan garis TP (°)

Penentuan sudut relatif dari sudut *heading* kapal target dan *heading* kapal kendali dapat dilakukan dengan menggunakan pada persamaan 2.4. Perhitungan sudut relatif untuk perhitungan DCPA dapat dipahami lebih mudah dengan melihat gambar 2.2. Pada gambar 2.2 Kapal kendali (*Own ship-O*) datang dari sisi barat laut sedangkan kapal target (*Target ship-T*) datang dari timur laut. Kedua kapal bergerak dengan kecepatan yang berbeda (V_o) dan (V_T). Sudut *yaw* kapal target (θ_T) dan kapal kendali (θ_o) dihitung dari sumbu x. Posisi kapal target x_T, y_T merupakan koordinat kapal target dengan posisi kapal kendali sebagai acuan (0,0).



Gambar 2.2 Perhitungan DCPA dan TCPA (Shu et al, 2014)

$$\theta_r = \theta_T + \theta \quad (2.2)$$

Dimana :

θ = sudut antara vektor kecepatan relatif dengan vektor kecepatan kapal target (°)

θ_T = sudut kapal target ($^\circ$)

θ_r = sudut antara vektor kecepatan relatif dengan garis TP ($^\circ$)

θ sudut antara vektor kecepatan relatif (V_r) dan kecepatan kapal target (V_T) didapatkan dengan persamaan 2.3 dan 2.4.

$$\theta = \arccos \left[\frac{V_r^2 + V_T^2 - V_o^2}{2V_r V_T} \right] \quad (2.3)$$

$$V_r = \sqrt{V_o^2 + V_T^2 - 2|V_o V_T| \cos(\theta_T - \theta_o)} \quad (2.4)$$

Dimana:

V_r = kecepatan relatif (km/jam)

V_T = kecepatan kapal target (km/jam)

V_o = kecepatan kapal kendali (km/jam)

dengan V_r pada persamaan 2.4

2.2 TCPA (*Time Closest Point Approach*)

TCPA merupakan besaran skalar. Pada gambar 2.1 terlihat adanya titik P sebagai titik *Closest Point Approach* (CPA) dan garis TP sebagai garis yang menghubungkan antara kapal target dengan CPA. TCPA menunjukkan lama waktu yang dibutuhkan untuk melewati garis TP dengan kecepatan relatif kedua kapal. TCPA merupakan fungsi bagi dari panjang garis TP dengan V_r . Persamaan untuk perhitungan TCPA terdapat pada persamaan 2.5.

$$TCPA = \frac{|TP|}{V_r} \sqrt{(x_T^2 + y_T^2) - DCPA^2} \quad (2.5)$$

Dimana:

x_T = koordinat lintang kapal target (km)

y_T = koordinat bujur kapal target (km)

V_r = kecepatan relatif kapal (km/jam)

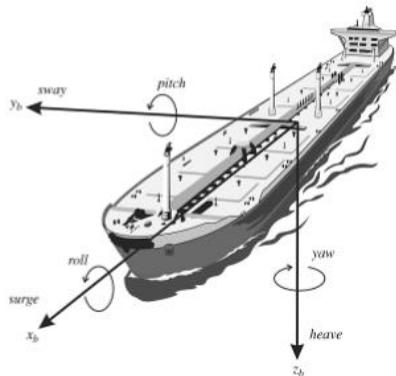
θ_r = sudut antara vektor kecepatan relatif dengan vektor kecepatan kapal target ($^\circ$)

2.3 Model Dinamika Kapal

Gerak dinamika kapal terbagi menjadi 6 *degree of freedom* (DOF) yakni gerak translasi : *heave*, *surge*, *sway* dan gerak rotasi: *yaw*, *pitch*, *roll*. Dalam perancangan kendali, derajat kebebasan yang diperhitungkan adalah *surge*, *sway* dan *yaw*. Besaran kecepatan dan gaya/momen pada masing-masing derajat kebebasan diwakili oleh simbol-simbol yang terangkum dalam tabel 2.1. Ilustrasi dari masing masing derajat kebebasan terdapat pada gambar 2.3.

Tabel 2.1 Simbol Derajat Kebebasan (Fossen, 1994)

DOF	Gerakan Kapal	Gaya dan Momen	Kecepatan Linier dan Angular
1	Translasi sumbu x (surge)	X	u
2	Translasi sumbu y (sway)	Y	v
3	Translasi sumbu z (heave)	Z	w
4	Rotasi sumbu x (roll)	K	p
5	Rotasi sumbu y (pitch)	M	q
6	Rotasi sumbu z (yaw)	N	r



Gambar 2.3 Gerakan kapal 6 DOF (Fossen, 2011)

Gambar 2.3 menunjukkan bahwa gerak kapal terdiri dari 3 sumbu utama yakni sumbu X, Y, dan Z. Masing-masing sumbu memiliki gerak rotasi dan translasi. Sehingga untuk kapal terdapat 6 gerak kapal yang disebut dengan *Degrees of Freedom* atau derajat kebebasan (DOF). Seperti yang telah disebutkan sebelumnya gerak DOF pada kapal laut (*surface ship*) hanya memperhitungkan gerak *surge*, *sway* dan *yaw* karena gerakan *roll*, *pitch*, dan *heave* diabaikan dengan asumsi bahwa gerakan tersebut bernilai sangat kecil.

Bentuk umum persamaan kendali manuvering kapal yang diturunkan dari hukum Newton II dapat dituliskan dalam bentuk persamaan 2.6

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}+\mathbf{D}\mathbf{v}=\boldsymbol{\tau}_L \quad (2.6)$$

Dimana:

\mathbf{M} = matriks inersia

$\dot{\mathbf{v}}$ = vektor percepatan $[\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}]^T$

\mathbf{D} = matrik redaman

\mathbf{v} = vektor kecepatan $[u, v, r]^T$

$\boldsymbol{\tau}_L$ = matriks gaya dan momen $[X, Y, N]^T$

Persamaan kendali manuvering kapal diturunkan berdasarkan beberapa asumsi, yakni :

- Distibusi massa homogen dan bidang xz simetris ($I_{xy} = I_{yz} = 0$)
- Gerakan *heave*, *roll* dan *pitch* diabaikan ($w = p = q = \dot{w} = \dot{p} = \dot{q}$)

Kemudian asumsi-asumsi di atas digunakan pada persamaan dinamika kapal DOF (persamaan 2.111) pada buku fossen sehingga menjadi persamaan 2.7 untuk gerakan *surge*, 2.8 untuk gerak *sway*, dan 2.9 untuk gerakan *yaw*.

$$\text{Surge} : m(\dot{u}+vr+x_G r^2) = X \quad (2.7)$$

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

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

Pemodelan dinamika kapal dapat dilakukan dengan metode, parameter atau pengaruh yang berbeda. Terdapat tiga macam pemodelan dinamika kapal yang sering digunakan dalam perancangan sistem kendali yakni Model Abkowitz (1969), Model Inoue (1981), dan Model Nomoto (1978) (Wulder, 1992). Penentuan model yang digunakan dalam tugas akhir ini, dilakukan dengan melihat model manakah yang lebih baik digunakan baik dari segi waktu, ketersediaan data, dan kesesuaian dengan spesifikasi kapal.

2.1.1 Model Davidson & Schiff (1957)

Davidson dan Schiff menurunkan gaya dan momen hidrodinamika kapal yang terdiri dari 2 DOF yakni *sway* dan *yaw* dengan asumsi bahwa nilai *surge* sangatlah kecil. Pemodelan gerak *sway* dan *yaw* oleh Davidson dan Schiff dituliskan pada persamaan 2.10 dan 2.11.

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

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

Pemodelan Davidson dan Schiff dapat disederhanakan menjadi persamaan 2.12 dengan mensubstitusi persamaan manuvering kapal (persamaan 2.8 dan 2.9).

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

Dengan

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & m x_G - Y_{\dot{r}} \\ m x_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} N(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_u & m u - Y_r \\ N_u & m x_G u - N_r \end{bmatrix} b = \begin{bmatrix} Y_{\delta} \\ N_{\delta} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Model dinamika Davidson dan Schiff dapat diturunkan ke dalam persamaan *state space*. (Fossen, 1994)

$$\dot{x} = A x + b_1 \delta_R \quad (2.14)$$

$$\text{Dengan } A = M^{-1} N = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \text{ dan } b_1 = M^{-1} b$$

2.1.4 Model Nomoto (1957)

Pemodelan Davidson dan Schiff dalam bentuk lain dipublikasikan oleh Son dan Nomoto (1982). Nomoto membentuk persamaan davidson menjadi persamaan fungsi alih *yaw* dengan *rudder* δ_R . Fungsi alih model matematis orde 2 kapal ditunjukkan dengan persamaan 2.15.

Fungsi alih model matematis kapal yang diturunkan oleh Nomoto didapatkan dari transformasi laplace persamaan hidrodinamika kapal yang dilakukan oleh Davidson dan Schiff pada persamaan 2.10 dan 2.11. Kedua persamaan *surge* dan *yaw* disubstitusikan dengan persamaan gerak manuvering kapal dari persamaan 2.8 dan 2.9. Penurunan model dan tranformasi laplace dari model nomoto dapat dilihat pada lampiran A. Hasil dari penurunan dan transformasi laplace yang dilakukan Nomoto (1982) dituliskan pada persmaan 2.15.

$$\frac{\psi}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1+T_3s)}{s(1+T_1s)(1+T_2s)} = \frac{K_R(1+T_3s)}{s[(1+(T_1+T_2)s+(T_1T_2)s^2)]} \quad (2.15)$$

Fungsi alih nomoto dalam orde 3 dapat dibentuk menjadi persamaan orde 2 dengan memindahkan pembagi s pada persamaan sebelah kiri ke kanan sehingga menjadi fungsi alih *yaw rate* dengan *rudder*. Variabel *yaw rate* ($\dot{\psi}$) sama dengan kecepatan yaw kapal r

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta_R}(s) = \frac{r}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1+T_3s)}{(1+T_1s)(1+T_2s)} = \frac{K_R(1+T_3s)}{[(1+(T_1+T_2)s+(T_1T_2)s^2)]} \quad (2.16)$$

Parameter-parameter dari fungsi alih di atas diperoleh dari penurunan persamaan hidrodinamika dimana,

$$T_1T_2 = \frac{(m-Y_{\dot{v}})(I_z-N_{\dot{r}})-N_{\dot{v}}N_{\dot{r}}}{D} \quad (2.17)$$

$$T_1 + T_2 = \frac{-Y_v(I_z - N_r) - N_r(m - N_r) + (\mu - N_r)N_v - Y_r N_r}{D} \quad (2.18)$$

$$K_R = \frac{Y_v N_\delta - N_v Y_\delta}{D} \quad (2.19)$$

$$K_R T_3 = \frac{-N_\delta(m - Y_v) - N_v Y_\delta}{D} \quad (2.20)$$

$$D = -N_v(\mu - Y_r) - N_r Y_v \quad (2.21)$$

2.1.2 Model Abkowitz (1969)

Abkowitz melakukan pemodelan dinamika kapal tanker. Gaya yang bekerja pada kapal diasumsikan sebagai persamaan kecepatan kapal, percepatan kapal, dan sudut *rudder* (persamaan 2.25). Persamaan Abkowitz dikembangkan menggunakan Taylor expansion orde 3 seperti pada persamaan 2.25

$$X(t) = f\{u(t), v(t), r(t), \dot{u}(t), \dot{v}(t), \dot{r}(t), \dot{\delta}(t)\} \quad (2.25)$$

$$X(t) = X_0 + X_u \Delta u(t) + X_v \Delta v(t) + \dots + X_{\delta\delta\delta} \Delta \delta(t^3) \quad (2.26)$$

Dimana:

$X(t)$ = gaya hidrodinamika pada arah longitudinal kapal.

$X_0, X_u, X_v, X_{\delta\delta\delta}$ = Taylor expansion dengan $X_u = \frac{\partial f}{\partial u}$.

$X(t)$ merupakan gaya pada sumbu x. Gaya dan momen pada model Abkowitz merupakan fungsi dari kecepatan, percepatan dan perubahan *rudder*. Persamaan gaya hidrodinamika ($Y(t)$) dan momen pada sumbu z ($N(t)$) memiliki bentuk persamaan yang mirip dengan persamaan 2.7. Beberapa koefisien dalam persamaan Abkowitz diasumsikan bernilai nol hingga tersisa 63 koefisien.

Koefisien hidrodinamika pada persamaan Abkowitz dapat dihitung untuk kapal tipe lain dengan melakukan skaling (Wulder, 1992).

2.1.3 Model Inoue (1981)

Pemodelan dinamika kapal yang dilakukan oleh Inoue (1981) mengasumsikan bahwa gaya yang bekerja mengarah kepada sumbu origin kapal. Gaya-gaya tersebut adalah gaya hidrodinamika dari lambung kapal (*hull*), gaya *rudder*, dan gaya dorong dari propeller. Rumusan matematis gaya yang bekerja pada kapal dapat dilihat pada persamaan 2.27 (Wulder, 1992).

$$X(t) = X_H(t) + X_p(t) + X_R(t) \quad (2.27)$$

Dimana:

X_H = gaya hidrodinamika pada lambung kapal (N)

$X_p(t)$ = gaya dorong dari *propeller* (N)

$X_R(t)$ = gaya *rudder* (N)

Gaya yang terjadi pada lambung kapal diasumsikan sebagai fungsi dari $u(t)$, $v(t)$, $r(t)$, $\dot{u}(t)$, $\dot{v}(t)$, $\dot{r}(t)$ dan $\varphi(t)$ yang dimodelkan dengan ekspansi deret Taylor dari model Inoue. Pemodelan Inoue mereduksi persamaan Taylor sehingga tersisa 25 koefisien. Pemodelan Inoue telah diuji cobakan terhadap berbagai jenis kapal diantaranya kapal kontainer, tangker, dan kargo yang berukuran lebih dari 160 m.

2.1.5 Bentuk Normalisasi

Persamaan dinamika kapal merupakan persamaan dalam bentuk non dimensi. Persamaan non dimensi dapat menggunakan *Prime-System* SNAME (1950), sehingga menjadi berdimensi. Normalisasi diperlukan karena koefisien hidrodinamika kapal yang digunakan saat pemodelan merupakan kapal dengan ukuran yang lebih kecil (prototype), agar dapat digunakan pada kapal berukuran lebih besar diperlukan normalisasi koefisien hidrodinamika.

Prime-System I menggunakan parameter kecepatan kapal U , panjang kapal $L=L_{pp}$. Sedangkan, *Prime-system* II terinspirasi dari

wing theory. Alternatif normalisasi lain adalah *Bis-system* yang diusulkan oleh Norrbin (1970). *Bis-system* digunakan pada benda yang diam di laut seperti kilang minyak *offshore*. Variabel normalisasi yang digunakan pada *Prime-system* dan *Bis-system* dapat dilihat pada tabel 2.2 (Fossen, 1994).

Tabel 2.2 Variabel Normalisasi (Fossen, 1994)

No	Unit	<i>Prime-System I</i>	<i>Prime-System II</i>	<i>Bis-System</i>
1	Panjang	L	L	L
2	Massa	$\frac{\rho}{2} L^3$	$\frac{\rho}{2} L^2 T$	$\mu \rho \nabla$
3	Momen Inersia	$\frac{\rho}{2} L^5$	$\frac{\rho}{2} L^4 T$	$\mu \rho \nabla L^2$
4	Waktu	$\frac{L}{U}$	$\frac{L}{U}$	$\sqrt{L/g}$
5	Area Referensi	L^2	LT	$\frac{2\nabla}{\mu L}$
6	Posisi	L	L	L
7	Sudut	1	1	1
8	Kecepatan Linear	U	U	\sqrt{Lg}
9	Kecepatan Angular	$\frac{U}{L}$	$\frac{U}{L}$	$\frac{\sqrt{g}}{\sqrt{L}}$
10	Percepatan Linear	$\frac{U^2}{L}$	$\frac{U^2}{L}$	G

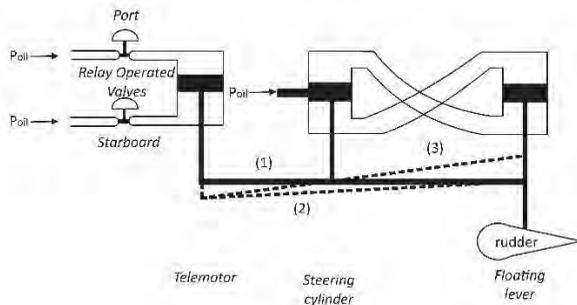
2.3 Pemodelan *Rudder*

Rudder yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah *rudder* dengan tipe Van Amorgen. Spesifikasi rudder Van Amorgen yang digunakan pada simulasi bekerja pada range -35° sampai 35° . Sistem kerja *rudder* digambarkan pada gambar 2.4.

Cara kerja *rudder* Van Amorgen adalah sebagai berikut:

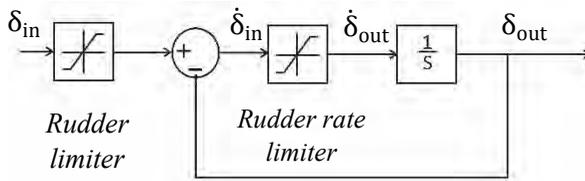
1. Sebelum rudder bekerja, rudder berada pada posisi 1.

2. Adanya perubahan tekanan pada *port* yang lebih tinggi menyebabkan bukaan *valve* berada pada *port* sehingga *valve* silinder *steering* terbuka
3. Hal ini mengakibatkan bukaan *valve* pada *starboard*.
4. Demikian sebaliknya, jika tekanan pada *starboard* lebih tinggi. Respon *rudder* Van Amorgen pada saat sinyal menggerakkan rudder berbentuk linear sampai mencapai *steady*.



Gambar 2.4 Sistem kemudi Van Amorgen (Fossen, 1994)

Dalam perancangan desain autopilot dengan simulasi computer, Van Amorgen menyarankan menggunakan susunan diagram blok seperti yang terdapat pada gambar 2.5. Masukan dari diagram blok adalah sudut *rudder in* (*setpoint*) sedangkan keluarannya adalah sudut *rudder out*. Error sudut rudder yang didapatkan akan menjadi nilai masukan pada diagram blok selanjutnya dengan dikonversi menjadi besaran lain yakni *rudder rate*. Konversi dari nilai *error rudder* menjadi *rudder rate* tertulis pada persamaan 2.28. Diagram blok saturasi berfungsi sebagai pembatas masukan *rudder rate* dari -7 sampai 7.



Gambar 2.5 Diagram blok kendali rudder Van Amornen (Fossen, 1994)

$$\dot{\delta} = \begin{cases} \dot{\delta}_{\max}(1-\exp(-\Delta\delta)/\Delta)) & \text{jika } \Delta\delta \leq 1 \\ -\dot{\delta}_{\max}(1-\exp((-\Delta\delta)/\Delta)) & \text{jika } \Delta\delta > 1 \end{cases} \quad (2.28)$$

2.4 Pemodelan Thruster

Pemodelan *thruster* kapal menggunakan model horigome (1990). Horigome menurunkan pemodelan *thruster* kapal berdasarkan pemodelan blanke (1980) dengan mengasumsikan bahwa *delay time* mesin saat pembakaran dapat diabaikan. Pemodelan Horigome merupakan persamaan matematis orde satu 2.29 (Souza, 2009).

$$\frac{Q_m(s)}{Y_{er}(s)} = \frac{K_y}{1+T_y s} \quad (2.29)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} Q_m &= \text{Kecepatan kapal} \\ Y_{er} &= \text{Posisi } engine \text{ rack} \\ T_y &= \text{Time constant } (0.9 \cdot 2\pi/n) \end{aligned}$$

2.5 Pemodelan Gangguan Arus

Model arus yang digunakan adalah dua dimensi. Komponen arus dapat dijelaskan dengan dua parameter yakni kecepatan rata-rata arus- V_c dan arah arus- β_c . Arus laut dapat dibangkitkan menggunakan process Gauss-Markov orde satu. Arah arus $-\beta_c$ diasumsikan konstan. Persamaan Gauss Markov orde satu terdapat pada persamaan 2.30

$$\frac{dV_c(t)}{dt} + \mu_0 V_c(t) = \omega(t) \quad (2.30)$$

Dimana:

$\omega(t)$ = akar dari *zero mean Gaussian white noise*

$\mu_0 \geq 0$ = konstan

$V_c(t)$ = kecepatan arus rata-rata (km/jam)

2.6 Metode *root locus* (Letak Kedudukan Akar)

W.R Even menemukan metode dimana akar akar persamaan karakteristik dapat diplot dalam grafik untuk semua nilai dari suatu parameter. Metode tersebut dinamakan metode *root locus* atau letak kedudukan akar. Metode *root locus* dapat digunakan untuk menganalisa kestabilan sistem dengan melihat letak kedudukan dari akar persamaan karakteristik sistem.

Desain sistem kendali menggunakan *root locus* dapat dilakukan dengan melakukan penambahan parameter (pada umumnya *gain*) untuk mencapai respon sistem yang sesuai. Apabila dengan perubahan nilai *gain* tidak respon sistem masih belum sesuai, maka dilakukan modifikasi pada *poles* atau *zero*. Penambahan *pole* pada persamaan fungsi alih *open loop* akan mengakibatkan *root locus* bergeser ke kanan, memberikan sistem stabilitas yang lebih rendah dan memperlambat *settling time*. Sebaliknya, penambahan *zero* akan menggeser *root locus* ke sebelah kiri sehingga akan meningkatkan kestabilan sistem dan menurunkan *settling time* respon sistem.

2.7 Sistem Kendali Logika Fuzzy

Logika fuzzy pertama kali dikenalkan oleh Lotfi A. Zadeh, professor ilmu pengetahuan komputer dari Universitas California, Barkeley. Logika fuzzy adalah suatu cara yang tepat untuk memetakan suatu ruang masukan kedalam suatu ruang keluaran (Arifin, n.d.). Pengaplikasian fuzzy dibuat pertama kali pada tahun

1990 pada mesin cuci di Jepang. Struktur dasar logika fuzzy dapat dilihat pada gambar 2.7.



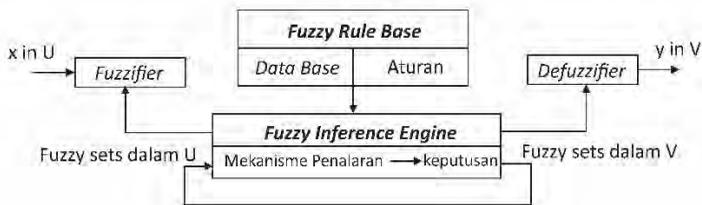
Gambar 2.6 Struktur dasar logika fuzzy

Struktur logika fuzzy terdiri dari fuzzifikasi, basis pengetahuan (rule base), logika pengambilan keputusan, dan defuzzifikasi.

- Fuzzifikasi** berfungsi untuk mentransformasikan sinyal masukan yang bersifat *crisp* (bukan fuzzy) ke himpunan fuzzy dengan menggunakan operator fuzzifikasi.
- Basis pengetahuan** berisi basis data dan aturan dasar yang mendefinisikan himpunan fuzzy atas daerah-daerah masukan dan keluaran dan menyusunnya dalam perangkat aturan kendali.
- Logika pengambilan keputusan** memiliki kemampuan dalam mengambil keputusan. Aksi atur fuzzy disimpulkan dengan menggunakan implikasi fuzzy dan mekanisme inferensi fuzzy.
- Defuzzifikasi** berfungsi untuk mentransformasikan kesimpulan tentang aksi atur yang bersifat fuzzy menjadi sinyal sebenarnya yang bersifat *crisp* dengan menggunakan operator defuzzifikasi.

Struktur kendali logika fuzzy yang digunakan pada tugas akhir ini menggunakan struktur mamdani dan takagi-sugeno. Berikut merupakan penjelasan kedua struktur:

1. **Logika Fuzzy Mamdani** dengan masukan berupa linguistik dan keluaran berupa linguistik. Struktur Mamdani dapat digunakan untuk MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) dan MISO (*Multiple Input Single Output*). Struktur Mamdani dalam sebuah penelitian yang dilakukan oleh Salman dalam *Anbar Journal for Engineering Science* memiliki kinerja yang baik dalam hal *robustness* terhadap *noise*.



Gambar 2.7 Struktur fuzzy mamdani

Gambar 2.7 merupakan ilustrasi dari struktur fuzzy mamdani. Masukan dari logika fuzzy mamdani berupa himpunan crisp (x) akan mengalami fuzzifikasi ke dalam himpunan fuzzy (U), selanjutnya mengalami mekanisme penalaran berdasarkan *rule base* yang ada. Keluaran dari sistem pengambilan keputusan adalah himpunan crisp (y) yang akan defuzzifikasi ke himpunan fuzzy (V).

2. **Logika Fuzzy Takagi dan Sugeno** merupakan logika fuzzy dimana masukannya berupa linguistik dan keluarannya numerik. Struktur Sugeno hanya cocok untuk sistem MISO. Keunggulan dari struktur ini adalah tingkat sensitivitas yang tinggi selain itu, struktur sugeno lebih efisien dibandingkan dengan mamdani karena proses defuzzifikasi yang kompleks di gantikan oleh nilai rata rata.

Struktur logika fuzzy Takagi-Sugeno dapat dilihat pada gambar 2.8. Masukan kendali logika fuzzy berupa himpunan crisp (x) di fuzzifikasi ke dalam himpunan fuzzy (U). Anggota Himpunan fuzzy (U) akan memiliki fungsi keanggotaan berbeda

beda sesuai dengan kebutuhan/rancangan contohnya fungsi keanggotaan *error yaw* pada gambar 3.9. Mekanisme penalaran pada logika fuzzy Takagi dan Sugeno dapat dinyatakan dengan persamaan 2.31.

$$L^{(l)}: \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^l, \quad (2.31)$$

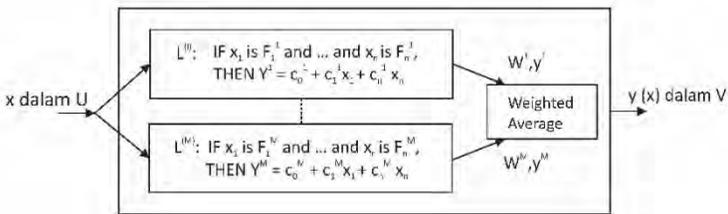
$$\text{THEN } Y^l = c_0^l + c_1^l x_1 + c_n^l x_n$$

dimana F_1^l adalah set fuzzy, c_1 adalah parameter berharga riil, y^l keluaran sistem oleh kaidah $L^{(l)}$ dimana $l = 1, 2, \dots, M$ adalah jumlah kaidah fuzzy. Dari kaidah tersebut diatas dapat dilihat bahwa, bagian **IF** berupa set fuzzy, sedangkan pada bagian **THEN** adalah bernilai *crisp*, berupa kombinasi linier dari variabel masukan. Masukan vektor berharga riil $\underline{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$, dan keluarannya adalah $y(\underline{x})$ yang bernilai sesuai dengan *weighted average* y^l pada persamaan 2.32.

$$y(\underline{x}) = \frac{\sum_{l=1}^M w^l y^l}{\sum_{l=1}^M w^l} \quad (2.32)$$

rumus *weighting* w^l dirumuskan pada persamaan 2.32 :

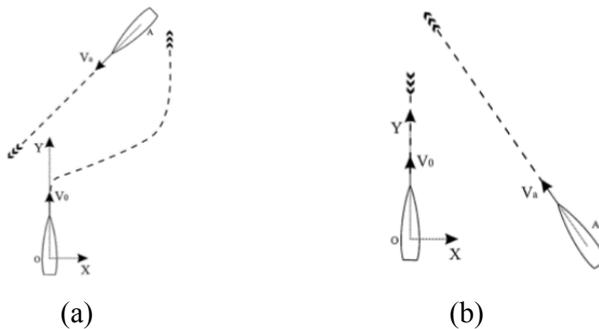
$$w^l = \prod_{i=1}^M \mu_{F_i^l}(x_i) \quad (2.32)$$



Gambar 2.8 Struktur logika fuzzy Takagi-Sugeno (Arifin, n.d.)

2.8 Aturan Mengenai Tabrakan Kapal : GOLREGS

Peraturan IMO mengenai tabrakan dibahas pada bagian B *Steering and Sailing*. Ada tiga jenis macam teknik manuver anti tabrakan yakni *head-on*, *overtake*, dan *crossing*. Tugas akhir ini mengambil kasus manuever crossing yang belum pernah dilakukan oleh tugas akhir sebelumnya. Gambar 2.9 merupakan gambaran-gambaran pengaplikasian peraturan COLREGS dan regulasinya untuk anti tabrakan tipe menyilang “*give way*” (Lokukaluge, 2011). O merupakan kapal kendali sedangkan A merupakan kapal target. V_o adalah kecepatan kapal kendali dan V_a adalah kecepatan kapal target. Gambar a menunjukkan bahwa jika kapal target datang dari atas maka kapal kendali harus berbelok, sedangkan gambar b menunjukkan bahwa kapal target datang dari arah bawah maka kapal kendali harus mengurangi kecepatan.



Gambar 2.9 *Crossing* (kapal kendali “*Give Way*”)(a) kapal target dari arah atas (b) kapal target dari arah bawah (Lokukaluge, 2011)

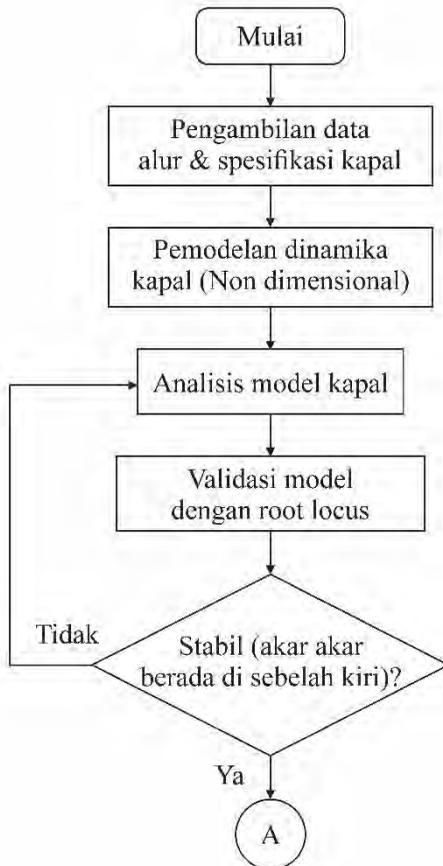
Peraturan Tertulis mengenai tabrakan pada COLREGS: **Rule 15 “*Crossing Situation*” International** (Benjamin, 2006).

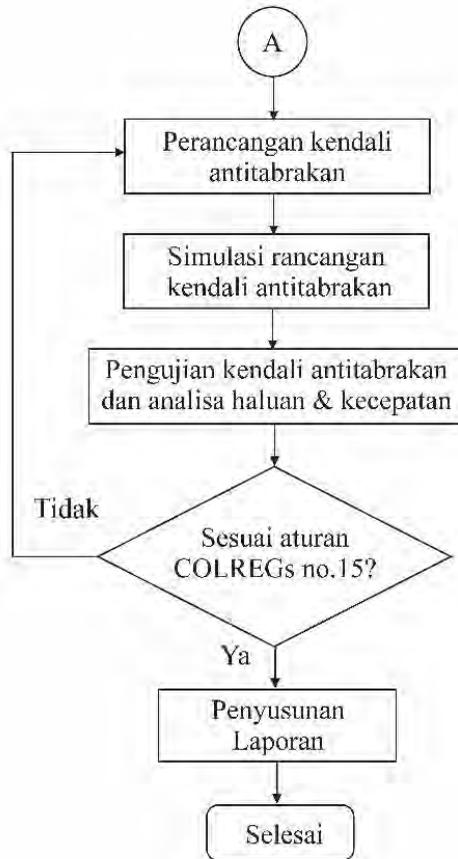
“Saat dua kapal yang sama-sama bergerak menyilang dan berada pada kemungkinan tabrakan, kapal yang berada pada sisi kanan keluar dari jalan yang seharusnya.”

Halaman ini memang dikosongkan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab III berisi mengenai tahapan dalam penelitian tugas akhir. Dalam bab ini terdapat penjelasan mengenai langkah-langkah yang diambil dalam pengerjaan tugas akhir termasuk pemodelan dinamika kapal yang digunakan, sistem kendali yang dirancang beserta validasi model dan pengujian perancangan kendali.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian bagian akhir

3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan terhadap materi yang mendukung topik tugas akhir, mengenai:

1. Pemahaman mengenai anti tabrakan.

Studi literatur mengenai anti tabrakan meliputi aturan-aturan yang berlaku, jenis jenis tabrakan, dan jenis jenis maneuver

antitabrakan. Aturan yang digunakan dalam merancang sistem kendali antitabrakan adalah Rule 15 IMO Part B (*Steering and Sailing*) mengenai situasi menyilang “*Crossing Situation*”. Model tabrakan menyilang dipilih karena belum ada tugas akhir yang melakukan perancangan mengenai jenis tabrakan ini.

2. Pemahaman mengenai DCPA (*Distance Closest Point Approach*) dan TCPA (*Time Closest Point Approach*)

DCPA dan TCPA merupakan dua faktor utama dalam penentuan resiko tabrakan kapal. DCPA dan TCPA menjadi masukan kendali kecepatan kapal. Pada tahap studi literatur juga dilakukan pemahaman mengenai cara perhitungan DCPA dan TCPA.

3. Pemahaman Pemodelan Dinamika Kapal

Model dinamika kapal dalam penelitian ini menggunakan pendekatan yang dilakukan oleh Nomoto (1957) sebagai bentuk matematis orde 2. Pemodelan matematis aktuator *rudder* dan *thruster* juga diperlukan dalam tugas akhir ini. Model matematik dari *rudder* menggunakan tipe *Van Amorengen* dan untuk *thruster* didapatkan dari pendekatan yang dilakukan oleh Horigome, Hara, Hotta dan Hotsu (1990) sebagai bentuk matematis orde 1.

4. Pemahaman pengendalian logika *fuzzy*.

Kendali logika fuzzy dipilih dengan pertimbangan bahwa untuk pengendalian antitabrakan, sistem pengambilan keputusan dirancang berdasarkan pada pengalaman nahkoda kapal dan peraturan-peraturan yang berlaku. Sistem fuzzy dipilih karena aksi maupun nilai parameter masukan tidak presisi, misalnya aksi yang diambil adalah merubah haluan 20 derajat ke arah kanan, hal ini tidak berarti bahwa perubahan pada arah tersebut lebih baik dibanding merubah haluan 21 derajat ke arah kanan (Jingsong, 2008).

5. Pemahaman mengenai hasil penelitian-penelitian sebelumnya

Berikut ini adalah beberapa hasil penelitian sebelumnya yang digunakan sebagai tinjauan pustaka dalam pengerjaan Tugas Akhir, yaitu :

- a. Jingsong, Zhao. 2008. "*Automatic Collision Avoidance Systems : Towards 21st Century*", Departement of Ship Science University of Southampton, didapatkan kriteria-kriteria sistem pengendalian anti tabrakan serta pemilihan sistem fuzzy sebagai sistem pengembalan keputusan. Dalam penelitian ini juga didapatkan metode terbaik untuk menentukan kapan dibutuhkan kendali anti tabrakan yakni menggunakan DCPA dan TCPA.
- b. Chen shu. 2015. "*Composition ship collision risk based on fuzzy theory*" yang diterbitkan oleh Central South University Press. Berdasarkan jurnal ini didapatkan perhitungan matematis DCPA, TCPA beserta penentuan besarnya resiko tabrakan terhadap nilai DCPA dan TCPA.
- c. Pada tugas akhir Saiko, 2011 berjudul "*Pengendalian pada Kapal Berbasis Data AIS untuk Menghindari Tabrakan*" Pada tugas akhir ini, dilakukan perancangan kendali anti tabrakan kapal menggunakan data AIS.

3.2 Pengambilan Data

Data-data yang digunakan diantaranya adalah:

1. Data spesifikasi kapal, meliputi: Lpp (panjang), U (kecepatan), B (lebar), T (tinggi), C_B (koefisien Blok), XG (*center of gravitation*), A_δ dan m (*displacement*).
2. Data koordinat lintasan kapal dari Pelabuhan Tanjung Perak menuju Karang Jemuang.

3.3 Pemodelan Matematis

3.3.1 Model Matematis Kapal

Pemodelan dinamika kapal menggunakan model Nomoto (1957) dalam bentuk fungsi alih orde 2. Model Nomoto dipilih karena dalam tugas akhir ini pengendalian yang dilakukan adalah kendali yaw (1 DOF) dan waktu perhitungan yang lebih cepat dibandingkan model lain. Data spesifik MV Caraka Niaga III-7 didapatkan dari tugas akhir sebelumnya yang dilakukan oleh Saiko

pada tahun 2011. Tabel 3.1 merupakan data spesifikasi MV. Caraka Niaga III-7

Tabel 3.1 Spesifikasi MV. Caraka Niaga III-7 (Saiko et al, 2011)

No	Spesifikasi	Besar	Satuan
1	Panjang (L)	92.53	Meter
2	Lebar (B)	16.5	Meter
3	Kedalaman (T)	7.8	Meter
4	Koefisien Blok (CB)	0.41	-
5	Kecepatan (U)	4.63	m/s
6	Pusat gravitasi (XG)	6.8	Meter
7	Displacement(m)	5245	Ton
9	R	15.8	Meter
10	A_{δ}	0.69	-
11	m'	0,0000648	-
12	X_G'	0,010303	-

Data spesifikasi kapal digunakan untuk mendapatkan koefisien hidrodinamika, menggunakan rumusan dari regresi Clark (1892). Nilai koefisien hidrodinamika digunakan untuk melihat perlakuan kapal dalam manuver. Koefisien hidrodinamika digunakan dalam memodelkan dinamika kapal. Regresi Clark dipilih karena Clark dapat menjelaskan 8 koefisien hidromika untuk gerak *sway* dan *yaw* (Tjossword, 2012).

Persamaan Clark yang digunakan untuk menentukan koefisien hidrodinamika kapal secara rinci dapat dilihat pada lampiran C. Dari perhitungan tersebut didapatkan nilai koefisien hidrodinamika pada tabel 3.2

Tabel 3.2 Koefisien Hidrodinamika Hasil Perhitungan

No	Koefisien	Nilai	No	Koefisien	Nilai
1	Y'_v	0.021791	7	N'_v	0.015670
2	Y'_r	0.002336	8	N'_r	0.005190
3	N'_v	0.002442	9	Y'_δ	-0.000750
4	N'_r	0.003836	10	N'_δ	0.000375
5	Y'_v	0.030054	11	I'_z	0.010866
6	Y'_r	-0.006179	12	I'_r	0.010866

Nilai koefisien hidrodinamika pada tabel 3.2 dan data spesifikasi kapal pada tabel 3.1 digunakan untuk membentuk fungsi alih Nomoto. Pembentukan fungsi alih Nomoto dapat dilakukan dengan dua cara, pertama dengan menggunakan rumus yang telah dijabarkan pada lampiran A mengenai pemodelan Nomoto. Cara kedua adalah dengan menggunakan matrik Davidson dan Schiff (1952) persamaan 2.13.

Dalam tugas akhir ini dilakukan pemodelan Nomoto dengan menggunakan matrik Davidson dan Schiff. Penjelasan mengenai hubungan antara matrik Davidson dengan pemodelan Nomoto tertulis di Lampiran B. Koefisien hidrodinamika dan spesifikasi kapal dibentuk menjadi matrik M dan N persamaan 2.13 sehingga didapatkan parameter-parameter untuk persamaan model Nomoto pada persamaan 3.1 dan 3.2. Determinan matriks M dan N kemudian diolah menjadi koefisien pembentuk fungsi alih Nomoto seperti yang tertulis dari persamaan 3.3 sampai dengan 3.8.

$$M = \begin{bmatrix} 0.094244702 & 0.934393771 \\ 0.010552295 & 5.872230042 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Persamaan matrik 3.1 merupakan matriks M pada persamaan 2.13, matriks M digunakan untuk menghitung koefisien K_r , T_1 dan T_2 .

$$N = \begin{bmatrix} 0.006491059 & -0.122616279 \\ 0,003384568 & 0.103738655 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Matriks N didapatkan dari persamaan 2.13 dengan memasukkan nilai koefisien hidrodinamika dan massa kapal. Komponen matriks N digunakan untuk menghitung koefisien-koefisien pada persamaan model dinamika Nomoto T_1, T_2, T_3

$$b = \begin{bmatrix} 0.00075048 \\ 0.00037524 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Persamaan 3.3 merupakan matriks gaya dan momen *rudder* dapat digunakan untuk menghitung koefisien K_r dan T_3 dengan menggunakan persamaan B5 dan B6 pada lampiran B.

Hasil perhitungan dari matriks Davidson kemudian digunakan untuk menghitung koefisien pembentuk model dinamika Nomoto. Berikut merupakan penjabaran perhitungan koefisien model dinamika Nomoto dari matriks Davidson.

Determinan matriks M

$$(\det M) = 0.543566573 \quad (3.4)$$

Determinan matriks N

$$(\det N) = 0.001088377 \quad (3.5)$$

$$T_1.T_2 = \frac{\det(M)}{\det(N)} = 499.4286287 \quad (3.6)$$

$$K_r = \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b}{\det N} = 0.004571747 \quad (3.7)$$

$$K_r.T_3 = \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b}{\det M} = 0.039769233 \quad (3.8)$$

$$T_3 = 8.698913397 \quad (3.9)$$

Hasil perhitungan dari persamaan 3.4 sampai dengan 3.9 merupakan koefisien pembentuk fungsi alih Nomoto seperti yang telah dijabarkan pada Bab II. Koefisien pembentuk fungsi alih Nomoto dapat dirangkum menjadi tabel 3.3.

Tabel 3.3 Pembentuk Persamaan Model Dinamika Nomoto

Koefisien	Besaran
T1T2	499.4286287
T1+T2	42.28789902
Kr	0.004571747
KrT3	0.003976923
T3	8.698913397

Koefisien-koefisien tersebut kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan fungsi alih Nomoto pada persamaan 2.5 sehingga model dinamika kapal MV. Caraka Niaga III-7 dapat dituliskan menjadi persamaan 3.10.

$$\frac{\psi}{\delta_R}(s) = \frac{0.004571747 + 0.003979233s}{499.4286287s^3 + 42.28789902s^2 + s} \quad (3.10)$$

3.3.1 Validasi koefisien hidrodinamika kapal

Koefisien hidrodinamika yang telah didapatkan dari persamaan regresi Clarck divalidasi dengan membandingkan koefisien hidrodinamika yang terdapat dalam thesis yang berjudul “*Veryfying and Validation of Manouvering Model for NTNU`s research vessel MV “Gunnerus”*” oleh Sissel Tjoswold. Kapal yang digunakan pada thesis tersebut adalah kapal prototipe MV-Gunnerus (Tjoswold, 2012). Hasil validasi koefisien hidrodinamika hasil perhitungan pada tugas akhir ini dengan jurnal yang telah tersebut di atas terdapat pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Validasi Koefisien Hidrodinamika

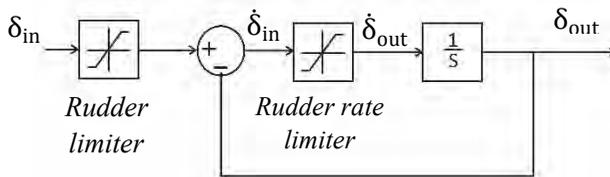
No	Koefisien	Hasil Perhitungan	Jurnal (Tjoswold, 2012)	Error
1	$Y'_{\dot{y}}$	-0.021478	-0.021478	0
2	$Y'_{\dot{r}}$	-0.002336	-0.005187	0.002851
3	$N'_{\dot{y}}$	-0.002446	-0.006323	0.003877

Lanjutan tabel 3.4

No	Koefisien	Hasil Perhitungan	Jurnal (Tjoswold, 2012)	Error
4	N'_r	-0.003836	-0.000213	0.003623
5	Y'_v	-0.030053	-0.051047	0.020994
6	Y'_r	0.006178	0.001379	0.004799
7	N'_v	-0.015671	-0.020719	0.005048
8	N'_r	-0.005191	-0.005693	0.000502
<i>Error rata rata</i>				0.005212
<i>Persen error rata-rata</i>				0.521175

3.3.2 Model matematis *rudder*

Pemodelan matematis *rudder* pada kapal menggunakan model yang direkomendasikan oleh Van Amorgen untuk kendali otomatis. Model matematis yang digunakan berbentuk diagram blok seperti yang tertera pada gambar 3.3. Dalam diagram blok tersebut terdapat blok saturasi yang berfungsi sebagai limit nilai *rudder* Van Amorgen yakni dari -35 sampai 35.



Gambar 3.2 Diagram blok *rudder* (Fossen, 1994)

3.3.3 Model matematis *thruster*

Pemodelan matematis *thruster* dalam tugas akhir ini dilakukan menggunakan pemodelan Horigome (persamaan 2.24). Model ini dipilih karena mesin *thruster* yang digunakan pada kapal memiliki kecepatan putar 150 rpm. Informasi rpm kapal maka dapat di

hitung *time constant* fungsi alih *thruster* seperti yang tertulis pada persamaan 3.11.

$$\begin{aligned} T_y &= (0.9 \cdot 2\pi / n) \\ &= (0.9 \cdot 2\pi / 150) \\ &= 0.03768 \end{aligned} \quad (3.11)$$

sehingga *time constant* (T_y) adalah 0.03768. Gain fungsi alih *thruster* bernilai 1 (Souza, 2009). Dari *time constant* and gain fungsi alih *thruster*, didapat fungsi alih *thruster* pada persamaan 3.12.

$$\frac{Q_m(s)}{Y_{er}(s)} = \frac{K_y}{1 + T_y s} = \frac{1}{1 + 0.03768s} \quad (3.12)$$

3.4 Pembangkitan Gangguan Arus

Gangguan arus dibangkitkan dengan menggunakan *Gauss Markov* orde 1. Gangguan arus akan mempengaruhi kecepatan kapal. Kecepatan arus dapat dirumuskan dengan persamaan diferensial 3.13.

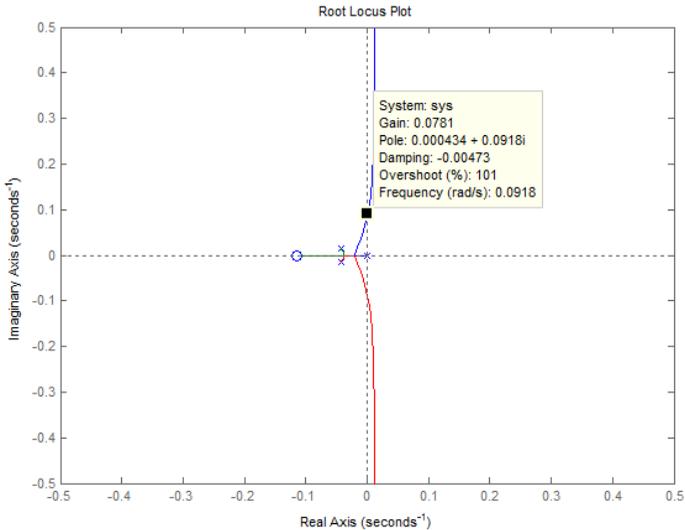
$$\dot{V}_c(t) + \mu_0 V_c(t) = \omega(t) \quad (3.13)$$

$\omega(t)$ adalah *zero mean gaussian white noise* dengan $\mu_0 \geq 0$ bernilai konstan. Pembangkitan arus juga harus dibatasi $V_{\min} \leq V_c \leq V_{\max}$. Tugas akhir ini menggunakan nilai μ_0 sebesar 0.1 untuk mendekati arus laut yang realistis. Nilai kecepatan minimum dan maksimum disesuaikan dengan kondisi nyata perairan selat Madura pada permukaan berkisar 0.013 m/s sampai dengan 0.77 m/s (P3DSLPL, 2013).

3.5 Analisa Kestabilan Model Dinamika Kapal

Fungsi alih yang telah dihitung dengan model Nomoto selanjutnya dianalisa kestabilannya dengan metode letak kedudukan akar (*Root Locus*). Grafik *root locus* dari fungsi alih dinamika kapal terdapat pada gambar 3.2. Berdasarkan gambar 3.3 diketahui bahwa akar-akar fungsi alih dinamika kapal berada pada sisi kiri sehingga kapal dapat dikatakan stabil. Fungsi alih dinamika

kapal dapat menjadi tidak stabil apabila nilai gain diperbesar lebih dari 0.0781.



Gambar 3.3 Grafik *root locus* fungsi alih kapal

3.6 Alur Pelayaran

Alur pelayaran yang digunakan kapal kendali adalah Pelabuhan Tanjung Perak-Karang Jombang. Koordinat alur pelayaran pada Pelabuhan Tanjung Perak didapatkan dari *Google Maps*. Koordinat pelayaran yang didapat dalam bentuk koordinat bujur diubah menjadi koordinat kartesian, dengan menggeser titik pusat koordinat dari Greenwich menuju Karang Jombang.

Tabel 3.5 merupakan titik koordinat setiap belokan pada lintasan Tj. Perak - Karang Jombang dengan pusat koordinat (0,0) terletak di Karang Jombang. Koordinat terbagi menjadi 12 titik berdasarkan letak buoy pada alur pelayaran. Plot Alur pelayaran Tj.Perak-Karang Jombang dapat dilihat pada lampiran D.

Tabel 3.5 Koordinat Alur Pelayaran Tanjung Perak (Saiko et al., 2011)

Titik	Bujur (km)	Lintang (km)
12	0.000	0.000
11	-4.041	-1.986
10	-5.484	-2.492
9	-8.750	-4.670
8	-10.015	-7.185
7	-20.559	-6.802
6	-24.389	-5.924
5	-27.423	-3.554
4	-28.333	-1.834
3	-28.712	-0.267
2	-28.826	0.458
1	-29.319	0.573

Alur pelayaran yang dilewati kapal kendali adalah alur pelayaran dari pelabuhan Tj Perak menuju Karang Jamuang sedangkan untuk alur pelayaran kapal target bergerak dari Karang Jamuang ke arah barat daya dengan sudut heading 34° . Kecepatan kapal target dalam berlayar adalah 7.3 km/jam atau setara dengan 4.26 knot.

3.7 Perancangan Kendali Anti Tabrakan

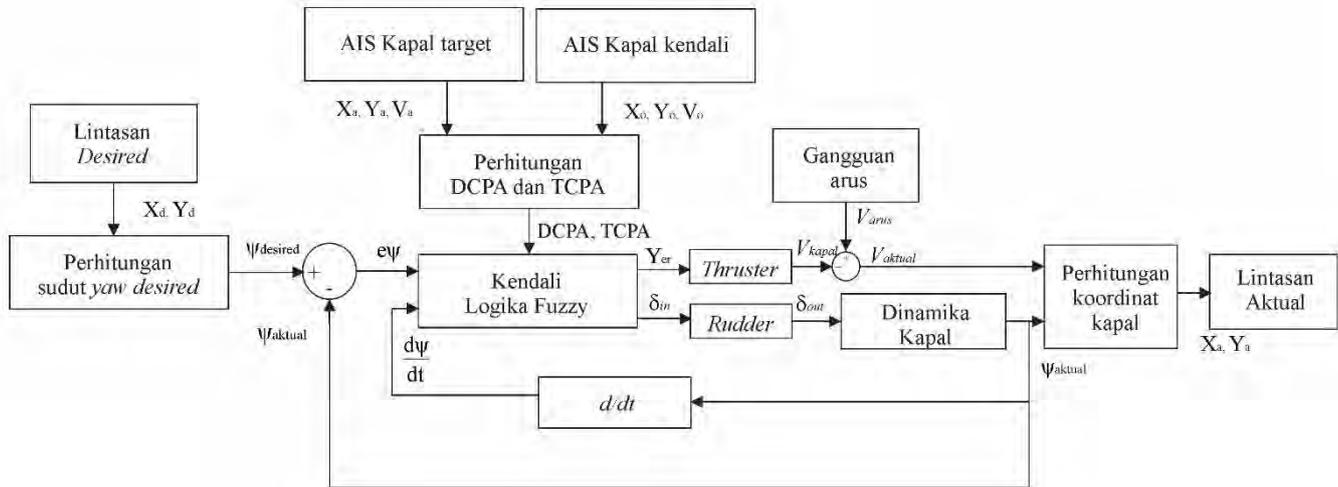
Perancangan kendali anti tabrakan menggunakan 2 sistem kendali yakni kendali kecepatan dan kendali haluan. Jenis kendali yang digunakan dalam tugas akhir ini merupakan kendali logika fuzzy. KLF dalam perancangan tugas akhir ini mengendalikan dua parameter yakni heading dan kecepatan. Diagram blok perancangan kendali anti tabrakan dapat dilihat pada gambar 3.4. Masukan dari rancangan kendali merupakan data posisi dan kecepatan baik kapal kendali maupun kapal target.

Gambar 3.4 menunjukkan aktuator yang dikendalikan adalah truster dan rudder. Masing masing aktuator dikendalikan oleh kendali logika fuzzy (KLF). Data masukan sistem perancangan anti tabrakan akan diolah menjadi parameter *error yaw*, *yaw rate*, DCPA dan TCPA. *Error yaw* akan menjadi masukan kendali haluan dimana *rudder* menjadi aktuator. DCPA dan TCPA menjadi masukan kendali kecepatan dengan *thruster* sebagai aktuator.

Thruster merupakan aktuator kecepatan kapal dengan masukan berupa Y_{er} (posisi *engine rack*) dan keluaran berupa kecepatan kapal (V_{kapal}). Fungsi alih *thruster* secara lebih detail dapat dilihat pada persamaan (2.29). Gangguan arus dalam tugas akhir ini akan mempengaruhi kecepatan kapal berdasarkan metode pembangkitan arus yang digunakan yakni Gauss Markov. Kecepatan kapal yang telah dipengaruhi oleh arus laut menjadi V_{aktual} .

Sudut yaw kapal dikendalikan oleh rudder. KLF haluan memiliki keluaran berupa sudut *rudder* (δ_{in}). Pemodelan *rudder* menggunakan diagram blok yang direkomendasikan Van Amorgen untuk *rudder* seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 2.3 sehingga keluaran dari *rudder* adalah sudut *rudder* yang telah melewati *limiter* (δ_{out}). Keluaran dari *rudder* ini kemudian akan menjadi masukan pada dinamika kapal. Data variabel sudut *rudder* akan diolah menjadi variabel *yaw* (ψ_{aktual}) melalui fungsi alih dinamika kapal. Nilai *yaw* tersebut akan digunakan untuk menghitung posisi koordinat kartesian kapal dengan persamaan 3.11 dan 3.12.

Penjelasan mengenai perhitungan *yaw desired* dan perhitungan posisi aktual kapal masing-masing akan dibahas pada sub sub-bab 3.7.1 dan 3.7.2. Sistem kendali logika fuzzy secara rinci dijelaskan pada sub bab 3.8 termasuk didalamnya perhitungan DCPA dan TCPA. Diagram blok untuk gangguan arus dijelaskan lebih detail pada sub bab 3.4. Diagram blok untuk dinamika kapal dapat dilihat penjabarannya pada sub bab 3.3.



Gambar 3.4 Diagram blok sistem pengendalian anti tabrakan kapal

3.7.1 Perhitungan *Yaw desired*

Perhitungan *yaw desired* dilakukan dengan menggunakan persamaan 3.14. Masukan berupa koordinat X_d dan Y_d diolah menjadi sudut yaw dengan menggunakan operator arctan. Arctan selisih antara X_d pada t dan $t-1$ dibagi dengan selisih Y_d pada t dan $t-1$ merupakan sudut *yaw desired/heading* kapal.

$$\Psi_{\text{desired}} = \arctan \frac{X_{d(t)} - X_{d(t-1)}}{Y_{d(t)} - Y_{d(t-1)}} \quad (3.14)$$

Dimana:

$X_{d(t)}$ = titik *desired* sumbu X pada saat t

$X_{d(t-1)}$ = titik *desired* sumbu X pada saat $t-1$

$Y_{d(t)}$ = titik *desired* sumbu Y pada saat t

$Y_{d(t-1)}$ = titik *desired* sumbu Y pada saat $t-1$

Ψ_{desired} = sudut *yaw desired*

3.7.2 Perhitungan Posisi Kapal

Posisi kapal pada tugas akhir ini diwakili oleh koordinat x, y . Koordinat posisi kapal ditentukan oleh sudut heading/yaw kapal. Keluaran kendali *rudder* kapal berupa sudut *rudder* δ_R akan menjadi masukan pada gerak dinamis kapal sehingga memiliki keluaran berupa sudut yaw ψ seperti yang tertulis pada persamaan 3.10. Rumus sudut yaw kapal menjadi posisi kapal pada koordinat x, y tertulis di persamaan 3.15 dan 3.16.

$$X = X_{a(t-1)} + v \cos \psi \cdot t \quad (3.15)$$

$$Y = Y_{a(t-1)} + v \sin \psi \cdot t \quad (3.16)$$

Dimana:

$X_{a(t-1)}$ = titik aktual sumbu X pada saat $t-1$

$Y_{a(t-1)}$ = titik aktual sumbu X pada saat $t-1$

ψ = sudut *yaw*

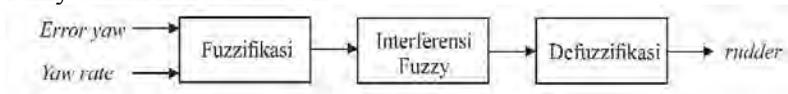
v = kecepatan kapal

t = waktu tempuh

3.8 Perancangan Sistem Kendali Logika Fuzzy

3.8.1 KLF sistem pengendalian haluan

Kendali haluan pada perancangan ini memiliki dua masukan yakni *error yaw* dan *yaw rate* dengan satu keluaran yakni sudut rudder. Gambar 3.5 merupakan diagram sistem kendali logika fuzzy dalam kendali haluan.

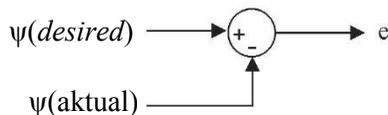


Gambar 3.5 Diagram blok sistem KLF haluan

Berikut merupakan penjelasan pada masing masing masukan sistem KLF Haluan yang terdapat pada gambar 3.5:

- *Error yaw* adalah besar nilai pengurangan sudut *yaw* aktual dengan sudut *yaw desired*. Perhitungan *error yaw* menggunakan persamaan 3.17 dengan diagram blok perhitungan pada gambar 3.6. Gambar 3.6 menunjukk bahwa masukan dari diagram blok perhitungan *yaw* adalah $\psi(desired)$ dan $\psi(aktual)$ dengan operator penhubung kedua variabel masukan adalah operator pengurangan. Keluaran dari diagram blok ini merupakan *error yaw*

$$e = \psi(desired) - \psi(aktual) \quad (3.17)$$



Gambar 3.6 Diagram blok perhitungan *error yaw*

Dimana:

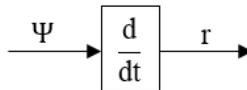
e = error *yaw*

$\psi(desired)$ = sudut *yaw* yang diinginkan

$\psi(aktual)$ = sudut *yaw* aktual

- *Yaw rate* merupakan perubahan sudut *yaw* kapal per detik. Perhitungan *yaw rate* dapat digambarkan dengan diagram blok pada gambar 3.7 dan pada persamaan 3.18. Diagram blok perhitungan *yaw rate* pada gambar 3.7 memiliki masukan berupa *yaw* (ψ) dengan operator penghubung adalah diferensial seingga keluaran dari diagram blok perhitungan *error yaw* adalah *yaw rate*.

$$r = \frac{d\psi}{dt} \quad (3.18)$$



Gambar 3.7 Diagram blok perhitungan *Yaw rate*

Dimana:

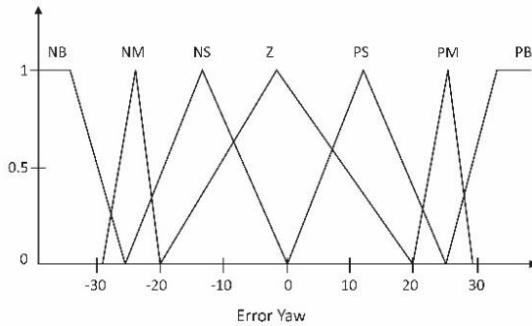
r = *yaw rate*

$\frac{d\psi}{dt}$ = turunan sudut *yaw* terhadap waktu

1. Fuzzifikasi

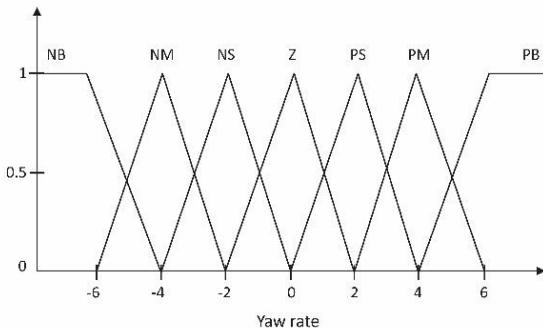
Masukan kendali haluan kapal adalah variabel *error yaw* dan *yaw rate* dengan masing masing variabel menggunakan 7 fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan *error yaw* dan *yaw rate* adalah NB (*Negative Big*), NM (*Negative Medium*), NS (*Negative Small*), ZE (*Zero*), PS (*Positiive Small*), PM (*Positive Medium*) dan PB (*Positive Big*).

Struktur kendali logika fuzzy yang digunakan untuk kendali haluan kapal adalah Sugeno. Masukan kendali haluan berupa *error* dan *yaw rate* dengan keluaran berupa perubahan *rudder*. Fungsi keanggotaan *error* diilustrasikan pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Fungsi keanggotaan *error*

Gambar 3.8 menunjukkan range fungsi keanggotaan berdasarkan nilai masukkan *error yaw*. Sumbu y merupakan nilai keanggotaan himpunan fuzzy, sedangkan sumbu x merupakan nilai crisp *error yaw*. Range *error yaw* berada pada angka -35° sampai 35° . Fungsi keanggotaan NB berada pada nilai *error* -35 s.d -25° , NM pada *error* dengan nilai dari -30° s.d -20° , NS dengan *error* -25° s.d 0° , ZE dengan *error* -20° s.d 10° , PS dengan *error* 0° s.d 25° , PM dengan *error* 20° s.d 30° dan PB dengan range 25° s.d 35° .



Gambar 3.9 Fungsi keanggotaan *yaw rate*

Range fungsi kanggotaan untuk variabel *yaw rate* dapat dilihat pada gambar 3.9. Dari gambar tersebut, *yaw rate* dibagi menjadi tujuh keanggotaan yakni PB (*Positive Big*), PM (*Positive Medium*),

PS (*Positive Small*), Z (*Zero*), NS (*Negative Small*), NM (*Negative Medium*), dan NB (*Negative Big*). PB untuk nilai *yawrate* antara 7 s.d 4, PM pada nilai 6 s.d 2, PS pada range 0 s.d 4, Z untuk nilai 2 s.d -2, NS dengan nilai 0 s.d -4, NM untuk range -6 s.d -2 dan NB untuk nilai *yaw rate* -4 s.d -7. Fungsi keanggotaan yang digunakan untuk variabel *error yaw* dan *yaw rate* adalah bentuk segitiga. Bentuk segitiga dipilih karena bentuk tersebut memberikan keringkasan dalam perhitungan.

Fungsi keanggotaan untuk keluran sistem kendali haluan adalah sudut *rudder* yang terbagi menjadi 7 MF. Ketujuh fungsi keanggotaan tersebut adalah PB (*Positive Big*), PM (*Positive Medium*), PS (*Positive Small*), Z (*Zero*), NS (*Negative Small*), NM (*Negative Medium*), dan NB (*Negative Big*) dengan masing masing bernilai 35° , 35° , 15° , 0° , -15° , -25° dan -35° .

2. Interferensi Fuzzy

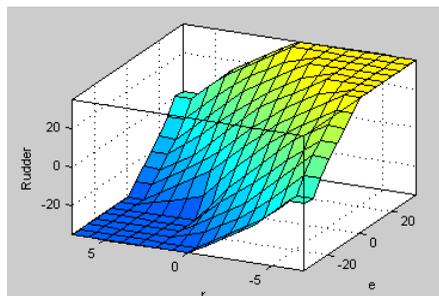
Sebelum interferensi fuzzy, perlu dilakukan penyusunan basis aturan. Basis aturan untuk kendali haluan secara rinci dapat dilihat pada tabel 3.6 dan lampiran E.

Tabel 3.6 Basis Aturan KLF Haluan

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

Tampilan interferensi dari aturan fuzzy dapat direpresentasikan dengan *rule viewer* atau *surface* pada FIS-Editor. Gambar 3.10 merupakan *surface* dari rule KLF haluan. Tampilan

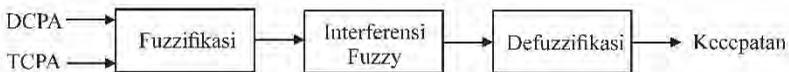
surface menghubungkan aturan fuzzy dalam grafik masukan dan keluaran. Sumbu x merupakan *yaw rate* dengan rentang 7 sampai dengan -7. Sumbu y merupakan *error yaw* yang memiliki rentang -35° sampai dengan 35° . Sumbu z merupakan sinyal *rudder* dengan rentang -35° sampai dengan 35° . Gambar 3.10 menunjukkan saat nilai *error yaw* bernilai negatif dan *yaw rate* bernilai positif, sinyal kendali akan bergerak ke nilai negatif. Sinyal kendali yang bernilai negatif ini ditandai oleh grafik yang berwarna biru tua.



Gambar 3.10 Tampilan *surface* interferensi KLF haluan

3.2.2 KLF sistem pengendalian kecepatan

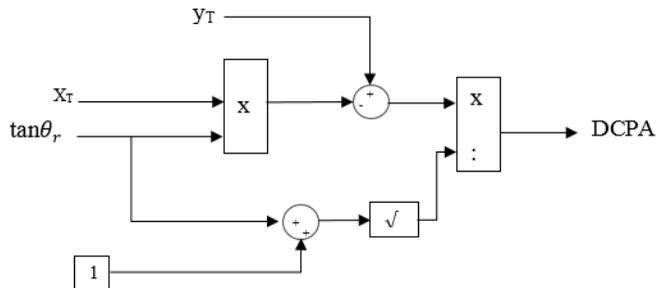
Kendali kecepatan memiliki tiga masukan yakni DCPA, TCPA dan rasio kecepatan kapal. 3.11 merupakan diagram blok dari sistem KLF kecepatan.



Gambar 3.11 Diagram blok sistem KLF kecepatan

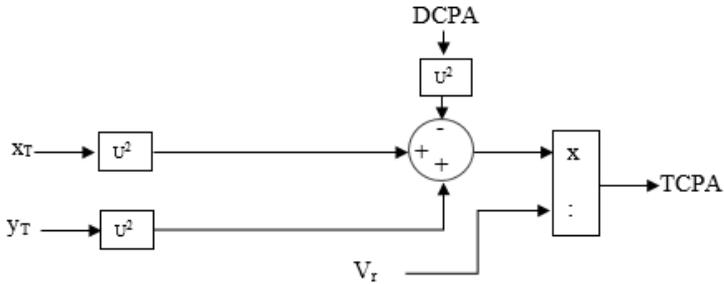
Berikut merupakan rincian masing masing masukan pada perancangan kendali kecepatan.

- DCPA merupakan parameter yang menunjukkan jarak teraman untuk kapal melakukan aksi anti tabrakan. Perhitungan DCPA memerlukan informasi sudut relatif antar kapal (θ_r), posisi kapal target (x_T, y_T). Persamaan DCPA dapat dilihat menggunakan persamaan 2.1. Diagram blok untuk perhitungan DCPA dapat lihat pada gambar 3.12. Masukan dari diagram blok ini adalah sudut antar kapal (θ_r) dan posisi kapal target (x_T, y_T). Koordinat kapal target yang digunakan adalah koordinat dengan acuan posisi kapal kendali sebagai oordinat (0,0).



Gambar 3.12 Diagram blok perhitungan DCPA

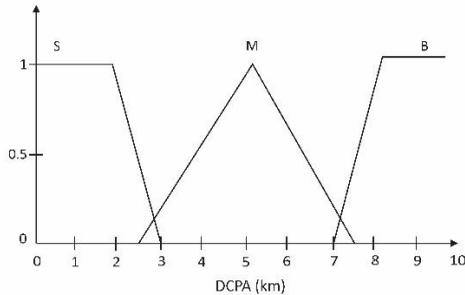
- TCPA adalah waktu yang direkomendasikan untuk kapal mengambil langkah anti tabrakan. Perhitungan TCPA dapat dilihat pada persamaan 2.33. Gambar 3.13 merupakan diagram blok perhitungan TCPA. Masukan untuk perhitungan TCPA berupa informasi posisi Kapal target (x_T, y_t), kecepatan relatif (v_r), dan waktu saat dilakukan pengambilan data. Operator perhitungan TCPA menggunakan kuadrat, pengurangan dan penjumlahan sesuai dengan persamaan perhitungan TCPA pada persamaan 2.33.



Gambar 3.13 Diagram blok perhitungan TCPA

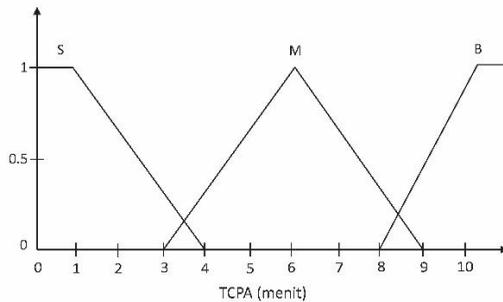
1. Fuzzifikasi

Fungsi keanggotaan dari DCPA terdiri dari 3 yakni *Big*, *Small*, dan *Medium*. Gambar 3.14 merupakan gambar fungsi keanggotaan DCPA. DCPA akan bernilai *Big* (B) apabila hasil perhitungan berada pada range 7-10 km, bernilai *Medium*(M) untuk nilai 2.5-7.5 km dan bernilai *Small* (S) untuk nilai 0-3 km.



Gambar 3.14 Fungsi keanggotaan DCPA

Fungsi keanggotaan TCPA terlampir pada gambar 3.15. TCPA memiliki 3 fungsi keanggotaan yakni *Big* (B), *Medium* (M) dan *Small* (S). *Big* (B) merupakan kelas untuk TCPA dengan nilai 8-11 menit, *medium*(M) untuk 3-9 menit dan *Small*(S) pada 0-4 menit.



Gambar 3.15 Fungsi keanggotaan TCPA

Fungsi keanggotaan keluaran *rudder* terbagi menjadi 3 yakni *slow* (S), *netral* (N) dan *fast* (F). *Slow* berada pada kecepatan 7 km/jam, *Netral* pada 14 km/jam dan *Fast* pada 16 km/jam. *Slow* dan *netral* digunakan untuk pengaturan kecepatan tabrakan ketika kapal target datang dari arah depan dan kanan, sedangkan *fast* dan *netral* digunakan ketika kapal target datang dari arah kiri.

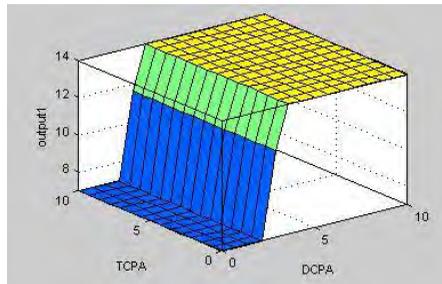
2. Interferensi Fuzzy

Basis aturan untuk kendali kecepatan disusun berdasarkan aturan IMO Part B nomor 15. Dalam peraturan tersebut dikatakan bahwa apabila sebuah kapal melihat ada kapal lain datang dari arah *starboard* (kanan) maka kapal tersebut wajib melakukan tindakan anti tabrakan dengan mengubah haluan dan atau mengubah kecepatan kapal (Guard, n.d.). Pembentukan peraturan ke dalam *fuzzy rules* terlampir pada tabel 3.7.

Berdasarkan tabel 3.7 untuk anti tabrakan dengan kapal target datang dari sebelah kanan, apabila DCPA bernilai *small* dan TCPA bernilai *small* maka kecepatan kapal akan berkurang sebaliknya ketika DCPA bernilai *big* dan TCPA juga bernilai *big* maka kecepatan kapal akan berada pada nilai *netral*. Nilai *netral* kecepatan kapal adalah kecepatan servis kapal.

Tabel 3.7 Basis Aturan KLF Kecepatan

DCPA	TCPA	V Thruster
S	S	S
	M	S
	B	S
M	S	N
	M	N
	B	N
B	S	N
	M	N
	B	N

**Gambar 3.16** Tampilan *surface* interferensi KLF kecepatan

Ilustrasi interferensi KLF kecepatan dalam bentuk *surface* terdapat di gambar 3.18. Sinyal keluaran dari KLF kecepatan adalah kecepatan kapal. Berdasarkan tampilan *surface* pada gambar 3.18, apabila DCPA bernilai kecil pada semua rentang TCPA maka sinyal keluaran bergerak dari kecepatan 14 km/jam ke kecepatan 7 km/jam. Perlambatan kecepatan kapal akibat nilai DCPA dan TCPA ditandai dengan warna biru tua.

3. Defuzzifikasi

Setelah melewati tahap inferensi dalam pengambilan keputusan maka proses KLF baik untuk kendali haluan dan kecepatan berlanjut pada defuzzifikasi untuk mengubah keputusan yang diambil hasil inferensi (dalam bentuk *fuzzy set*) menjadi bilangan kembali (*crisp*). Kedua KLF menggunakan metode defuzzifikasi *weighted average*. Metode defuzzifikasi *weighted average* digunakan karena jenis struktur fuzzy dalam tugas akhir ini adalah sugeno, selain itu metode ini dinilai baik dalam kecepatan komputasi karena tidak melalui proses perhitungan yang rumit (Reznik, 1997).

3.9 Pengujian dan Analisa Performasi

Pengujian performansi dan analisa dilakukan menggunakan software Matlab R2013 untuk mengetahui apakah kendali yang digunakan telah sesuai dengan tujuan yang diinginkan..

3.9.1 Uji manuvering dan kecepatan kapal

Uji manuvering dilakukan dengan menggunakan KLF haluan. Sinyal masukan adalah kendali *step*. Dalam uji ini akan dilihat respon sistem apakah dapat mencapai setpoint dengan ess kurang dari 5%. Sedangkan untuk kecepatan kapal dilakukan uji tanpa KLF kecepatan dengan *setpoint* sebesar 14 km/jam.

3.9.2 Uji KLF pengendali haluan dan kecepatan

Pengujian dilakukan dengan menggunakan kendali KLF Haluan untuk mengetahui apakah kendali haluan mampu mengikuti *set point* lintasan pelayaran. Sedangkan untuk KLF kecepatan, pengujian dilakukan untuk mengetahui apakah sistem dapat mempertahankan kecepatan dengan adanya arus dan menurunkan kecepatan ketika melakukan aksi anti tabrakan.

3.10 Penyusunan dan Penulisan Laporan

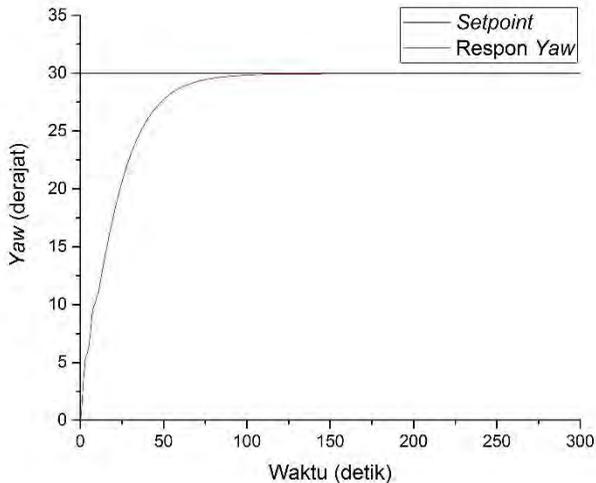
Setelah semua tahap selesai, maka dilakukan penyusunan dan penulisan laporan.

Halaman ini memang dikosongkan.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Uji manuver kapal

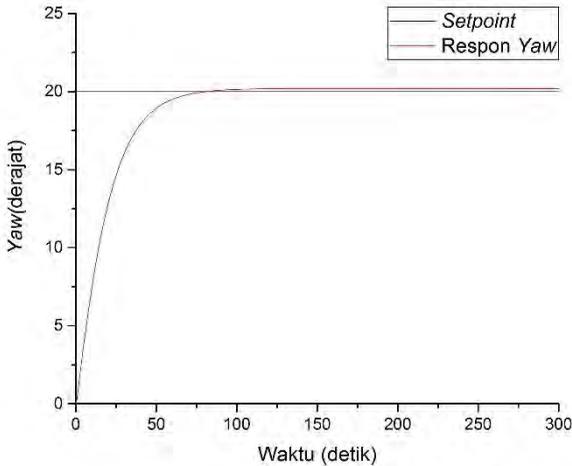
Uji manuver kapal dilakukan dengan dua sudut *yaw* uji yakni pada sudut 30° dan 2° . Kemampuan manuver kapal di uji secara *close loop* dengan tambahan kendali logika fuzzy dan *feedback* sistem berupa *error yaw* dan *yaw rate*. Uji manuver mengikuti standar dengan peraturan IMO (*International Maritime Organization*) mengenai sudut uji kendali manuver. Gambar 4.1 merupakan uji sudut turning 30° dan gambar 4.2 sudut turning 20° .



Gambar 4.1 Uji turning 30°

Pada uji turning 30° didapatkan hasil berupa *settling time* respon sistem sebesar 150 detik untuk kapal non dimensional sedangkan setelah dinormalisasi dengan prime system I adalah 999 detik. *Error steady state* dari respon sistem adalah 0.312%. Uji

turning 30° dapat dikatakan memenuhi kriteria dengan ess yang kurang dari 5%.



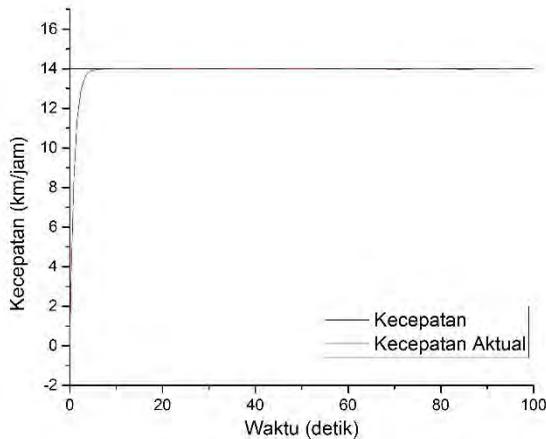
Gambar 4.2 Uji *turning* 20°

Dari gambar 4.2 dapat dilihat bahwa respon sistem mencapai *setpoint* pada detik ke 100 untuk kapal non dimensional, sedangkan setelah dibuat berdimensi settling time untuk sudut 20° adalah 666 s atau sebesar 10 menit. Respon uji turning 20° dapat dikatakan melebihi *setpoint*, namun setelah dianalisa respon memiliki *error steady state* kurang dari 5% yakni sebesar 0.963%. Dapat dikatakan kendali logika fuzzy haluan yang digunakan dalam tugas akhir ini cukup baik.

4.2 Uji Kecepatan Kapal

Uji kecepatan kapal dilakukan dengan menggunakan model Horigome, Hotta, Hotsu yang telah dijelaskan pada Bab II. Uji kecepatan kapal dilakukan secara *open loop*. Hal ini dilakukan dengan pertimbangan bahwa untuk pengujian secara *close loop*

menggunakan kendali dibutuhkan masukan parameter lain berupa DCPA dan TCPA. Selain itu, pemodelan dinamika kapal berbentuk orde satu sehingga untuk pengujian model kapal dapat dilakukan secara *open loop*.



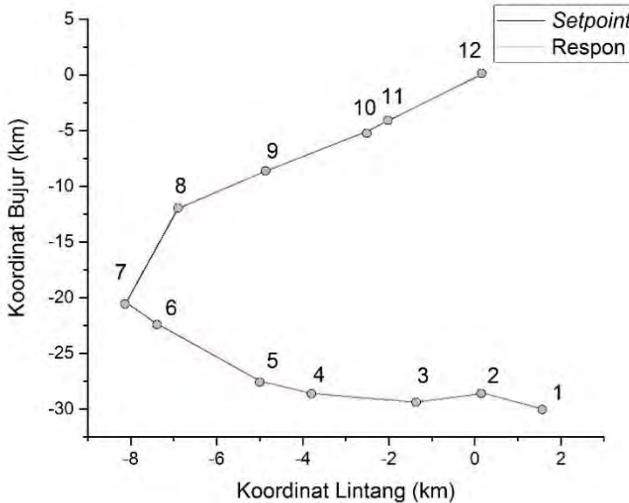
Gambar 4.3 Uji kecepatan kapal

Hasil simulasi uji kecepatan terdapat pada gambar 4.3. *Settling time* respon kecepatan kapal untuk mencapai steady adalah 8 detik. *Error steady state* (ess) hasil uji kecepatan kapal sebesar 0.6.

4.3 Uji Sistem Kendali Haluan dan Kecepatan Tanpa Halangan & Gangguan

Pengujian tanpa adanya halangan kapal dan gangguan arus bertujuan untuk mengetahui apakah sistem kendali yang digunakan memenuhi lintasan pelayaran. Hasil dari uji lintasan menunjukkan bahwa lintasan aktual dapat mengikuti lintasan *desired*, walaupun ada perbedaan antara kedua lintasan apabila diperbesar. Perbedaan tersebut adalah error lintasan. Gerak kapal dengan kendali haluan kapal dapat dilihat pada gambar 4.4.

Lintasan kapal ditandai pada setiap titik belokan kapal. Dari gambar tidak terlihat begitu jelas perbedaan lintasan antara *set point* (*desired*) dengan respon kapal (*actual*).



Gambar 4.4 Lintasan *desired* dan lintasan aktual tanpa arus

Perbedaan antara lintasan *desired* dengan aktual dapat dianalisa dengan menggunakan tabel perbandingan antara kedua lintasan. Tabel 4.1 berisi perbandingan antara lintasan *desired* dengan aktual baik pada sumbu y dan sumbu x dengan satuan km. Koordinat titik per belokan dihitung nilai selisihnya antara *desired* dan aktual hingga didapatkan hasil berupa nilai *error*. Hasil simulasi haluan kapal tanpa halangan dan gangguan menunjukkan error pada sumbu y sebesar 0.013 km dan pada sumbu x sebesar 0.008 km. Nilai *error* yang didapat kurang dari nilai error maksimum yang diterima untuk kapal yaitu sebesar setengah kali panjang kapal 0.046 km.

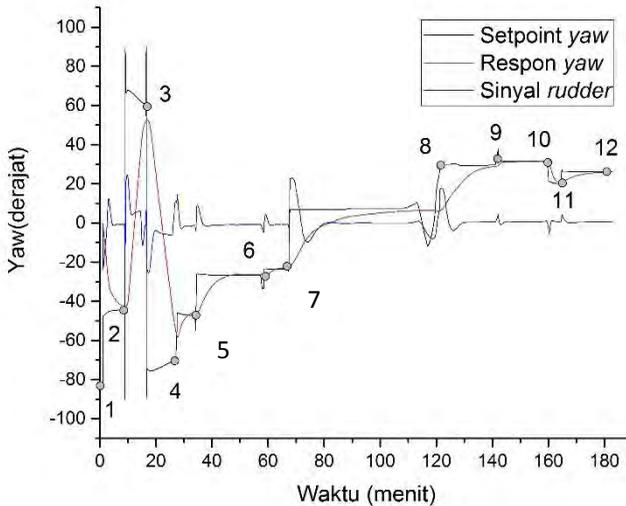
Tabel 4.1 Error alur pelayaran kapal tanpa arus (km)

Titik	Y			X		
	<i>respon</i>	<i>actual</i>	<i>error</i>	<i>desired</i>	<i>actual</i>	<i>error</i>
1	-29.897	-29.912	0.014	1.496	1.496	0.000
2	-28.583	-28.593	0.010	0.212	0.220	0.007
3	-29.376	-29.364	0.012	-1.346	-1.340	0.005
4	-28.611	-28.626	0.015	-3.763	-3.759	0.003
5	-27.535	-27.545	0.01	-4.943	-4.933	0.010
6	-22.499	-22.493	0.006	-7.305	-7.318	0.012
7	-20.452	-20.456	0.004	-8.110	-8.096	0.014
8	-12.028	-12.026	0.002	-6.913	-6.896	0.017
9	-8.530	-8.523	0.006	-4.804	-4.791	0.012
10	-5.049	-5.044	0.005	-2.491	-2.480	0.011
11	-3.151	-3.163	0.012	-1.513	-1.508	0.004
12	0.017	0.011	0.006	0.144	0.145	0.001
	Error rata rata		0.013	Error rata rata		0.008

Respon dinamik sistem berupa *yaw* dan *rudder* kapal terdapat pada gambar 4.5 dimana respon *yaw* selalu mengikuti *set point* (*yaw desired*). Settling time dan *error steady state* dari respon dinamik kapal pada setiap titik dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Respon Dinamika Kapal Setiap Titik

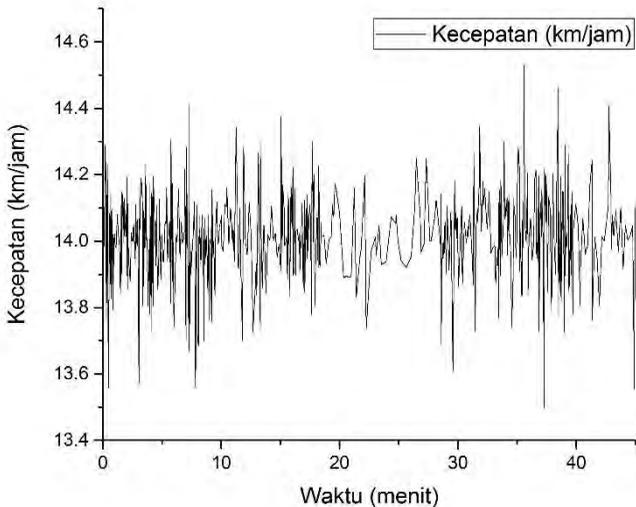
Titik	<i>Settling time</i> (menit)	Ess (%)	Titik	<i>Settling time</i> (menit)	Ess (%)
1-2	8.567	4.207	7-8	45.665	51.845
2-3	7.888	5.790	8-9	16.981	3.299
3-4	10.504	0.381	9-10	5.371	1.488
4-5	17.504	3.254	10-11	4.679	1.697
5-6	14.172	2.305	11-12	12.618	0.427
6-7	14.222	0.176			



Gambar 4.5 Respon dinamik kapal tanpa arus

4.4 Uji Tanpa Halangan Dengan Gangguan Arus

Uji tanpa halangan dengan gangguan arus menggunakan kecepatan arus V_C adalah 0.0915 cm/s. Kecepatan arus maksimum dan minimum kapal masing masing adalah 0.013 m/s dan 0.77 m/s (P3DSDLP, 2013). Gangguan arus dalam simulasi tugas akhir ini dibangkitkan melalui proses *Gauss Markov*. Proses pembangkitan arus dengan metode *Gauss Markov* telah dijelaskan pada bab sebelumnya yakni Bab II dan Bab III. Gangguan arus pada kapal berpengaruh pada kecepatan kapal dan tidak mengganggu arah gerak kapal. Dalam tugas akhir ini, arah gangguan arus mengikuti arah gerak kapal. Hasil simulasi uji gangguan arus tanpa halangan tergambar pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Respon uji dengan gangguan arus

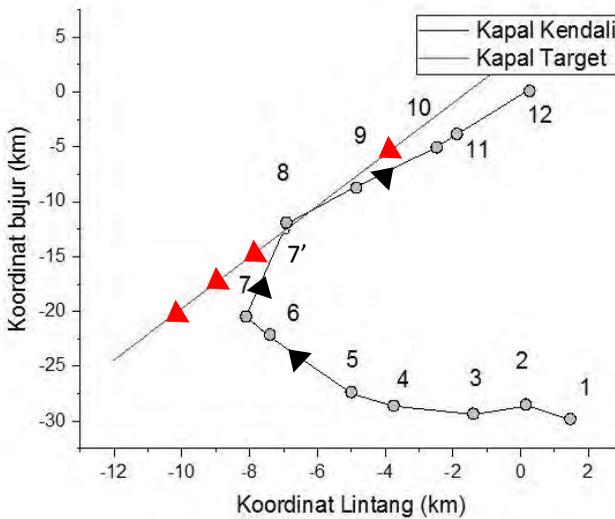
Kecepatan kapal disetting pada nilai 14 km/jam. Dapat dilihat pada gambar 4.6 gangguan arus pada pelayaran akan berakibat pada perubahan nilai kecepatan. *Error* kecepatan dengan adanya gangguan arus sebesar 0.1. Nilai *error* ini sesuai dengan besar nilai *noise* pada proses pembangkitan arus dengan *Gauss markov* yakni 0.1.

4.5 Uji dengan Halangan dan Gangguan Arus

Uji dengan halangan dan gangguan arus dilakukan menggunakan tabrakan tipe *give way*. Kapal kendali berlayar dengan kecepatan 14 km/jam dari (Tanjung Perak menuju Karang Jombang-panah hitam) mengikuti trayektori yang telah ditentukan. Kapal target sebagai halangan bergerak kapal kendali, berlayar dari barat ke timur (panah merah). Kecepatan kapal target adalah 23

km/jam. Kedua kapal diprediksi akan bertabrakan pada menit ke 110 dengan daerah tabrakan di titik 7'. Titik 7' berada di antara titik 7 dan titik 8.

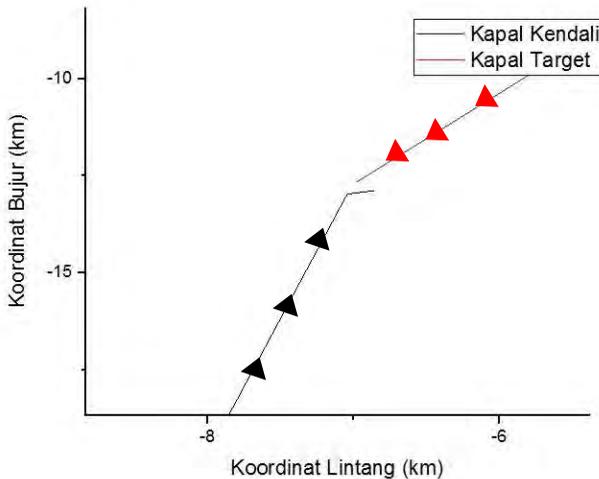
Hasil simulasi tabrakan kapal terdapat di gambar 4.7. Dapat dilihat bahwa tabrakan terjadi pada daerah titik 7'. Adanya mekanisme antitabrakan membuat kapal menghindari pertemuan dengan kapal target pada titik tabrakan. Alur trayektori kapal yang sebelumnya berbentuk garis miring dari titik 7 ke 8 mengalami sedikit perubahan dengan adanya belokan sebelum kapal berada pada titik 7'.



Gambar 4.7 Lintasan dengan halangan di kanan

Apabila hasil simulasi di perbesar dapat dilihat bahwa jarak antara kapal dari pusat kapal adalah 300 m. Berdasarkan data kapal, jarak minimum antara kapal agar tidak terjadi tabrakan adalah

setengah kali dari penjumlahan panjang kedua kapal. Perbesaran jarak antar kapal saat terjadi belokan diilustrasikan pada gambar 4.8.

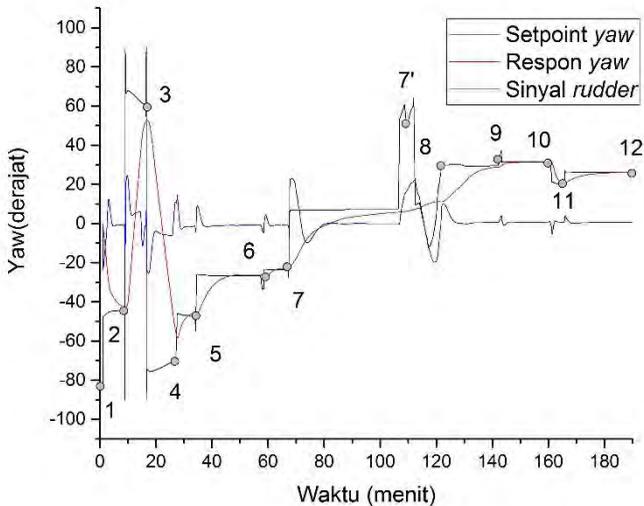


Gambar 4.8 Perbesaran koordinat tabrakan kapal

Grafik respon dinamika kapal berupa *yaw setpoint*, respon *yaw*, dan respon *rudder* tidak jauh berbeda dari respon dinamika kapal tanpa halangan dengan gangguan di gambar 4.5. Respon dinamika kapal saat terjadi tabrakan dapat dilihat pada gambar 4.9. Perjalanan kapal dari titik 1 sampai dengan 7 tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan respon dinamik kapal tanpa halangan pada gambar 4.5. Perbedaan baru terlihat pada titik 7 ke 8 dimana antara kedua titik ini terjadi tabrakan kapal.

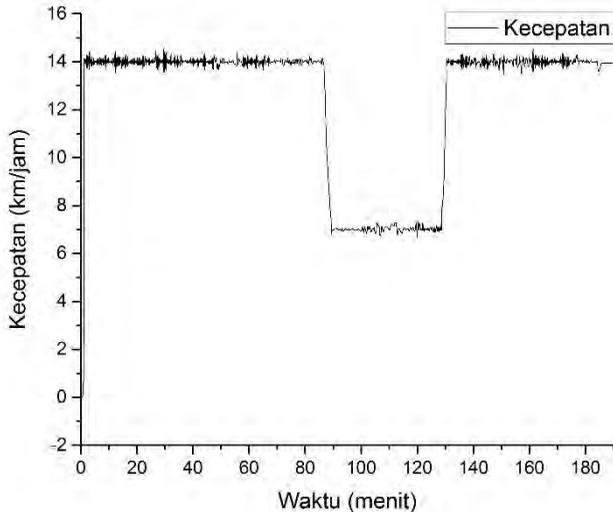
Titik 7^c pada gambar 4.9 menandakan bahwa pada titik tersebut seharusnya terjadi tabrakan apabila kapal tidak merubah haluan. Bila dibandingkan dengan gambar 4.5 dari titik 7 ke titik 8 respon *yaw* dan set point *yaw* kapal berbentuk lurus namun pada gambar 4.6 baik respon *yaw* dan *set point yaw* berbentuk tidak beraturan dengan sudut *yaw* yang lebih tinggi. Perubahan sudut

yaw ini merupakan bentuk mekanisme berbeloknya kapal dari trayektori untuk menghindari tabrakan. Sudut *yaw* yang bernilai positif mengindikasikan bahwa kapal berbelok ke arah kanan.



Gambar 4.9 Respon dinamik kapal dengan gangguan halangan

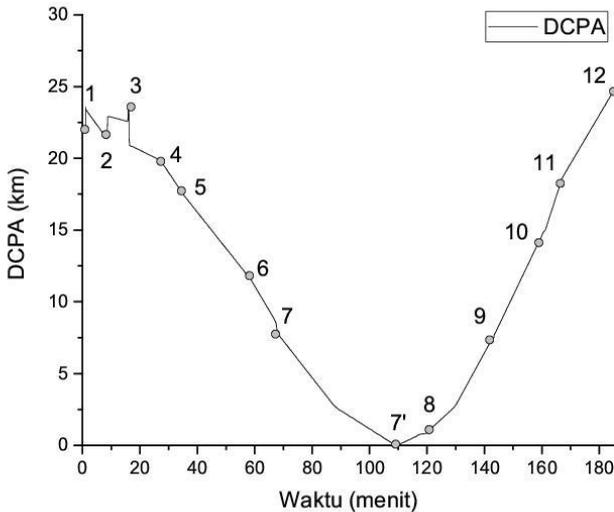
Respon kecepatan kapal dalam menghadapi tabrakan dapat dilihat pada gambar 4.10. Dari grafik tersebut terlihat bahwa kapal mengurangi kecepatan pada menit ke 90 sampai dengan 130. Tabrakan kapal diperkirakan terjadi pada menit ke 110. Rentang waktu tersebut merupakan rentang waktu terjadinya tabrakan. DCPA dan TCPA yang bernilai *small* mengakibatkan kapal mengurangi kecepatan. Berdasarkan gambar 4.10 dapat diartikan pula bahwa pada rentang waktu 90-130 menit DCPA bernilai *small*.



Gambar 4.10 Grafik kecepatan

Sebelum dilakukan analisa terhadap grafik DCPA dan TCPA setelah adanya kendali untuk berbelok, ada baiknya grafik DCPA dan TCPA sebelum adanya kendali dianalisis terlebih dahulu. Grafik DCPA sebelum adanya kendali berbelok, ditunjukkan pada gambar 4.11. DCPA pada titik 1 ke 2 hingga mencapai titik 7' terus mengalami penurunan dari 21.935 km sampai dengan 0 km. Nilai DCPA nilai terendah berada pada titik 7'. Nilai DCPA mencapai 0 km pada titik ini namun, pergerakan nilai DCPA kembali naik dari titik 7 ke 8 dan seterusnya sampai titik 12. Hal ini menunjukkan bahwa kedua kapal saling mendekat ketika kapal target berlayar dari titik 1 ke titik 7'. Perancangan simulasi anti tabrakan yang dilakukan dalam tugas akhir ini akan terus berjalan walaupun telah terjadi tabrakan, sehingga dari titik 7' ke titik 8 kapal diasumsikan masih berlayar. Dari grafik DCPA pada gambar

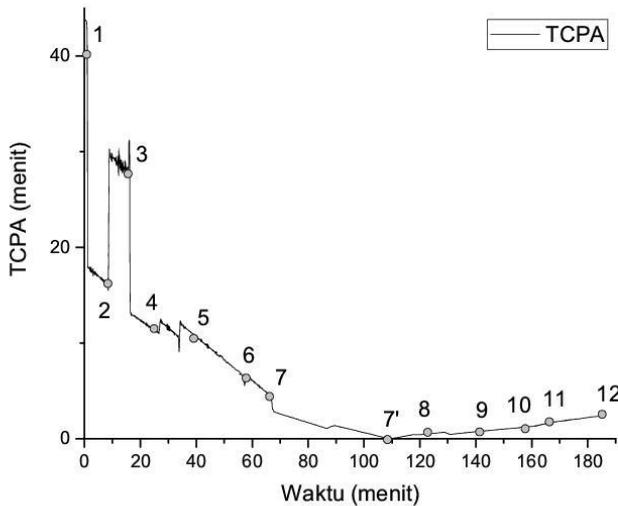
4.11 terlihat bahwa pergerakan kedua kapal dari titik 7' sampai dengan titik 12 terus menerus meningkat. Nilai DCPA setelah mencapai titik 7' naik dari 0 km sampai dengan 24.558 km. Hal ini dapat diartikan bahwa setelah mengalami tabrakan, kedua kapal terus bergerak saling menjauh.



Gambar 4.11 Grafik DCPA sebelum kendali anti tabrakan

Pembahasan yang sama juga terlihat pada grafik TCPA di gambar 4.12. Pergerakan dari titik 1 ke titik 2, TCPA mengalami penurunan. Pada titik 2 ke titik 3, TCPA mengalami peningkatan karena pada bentuk alur pelayaran kapal kendali menuju ke arah sumbu negatif. Pergerakan kapal ke arah sumbu negatif akan memperbesar sudut yaw kapal target (θ_T) pada persamaan 2.4. Sudut yaw yang membesar akan memperkecil nilai V_r . Hubungan antara nilai TCPA dan V_r adalah berbanding terbalik seperti yang

tertulis pada persamaan 2.5. Semakin kecil nilai V_r maka nilai TCPA akan semakin meningkat.

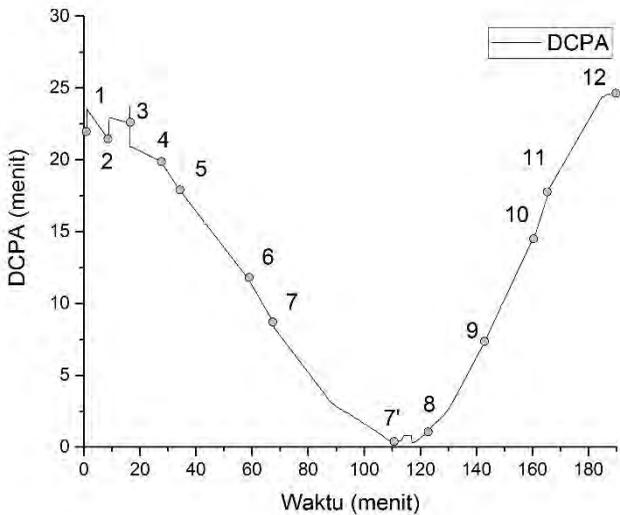


Gambar 4.12 Grafik TCPA sebelum kendali anti tabrakan

Nilai TCPA dari titik 1 ke titik terjadinya tabrakan turun dari 17.954 menit sampai dengan 0 menit, walaupun sempat naik kembali dari titik 2 ke titik 3. Peningkatan nilai TCPA dari titik 2 ke titik 3 disebabkan oleh bentuk alur pelayaran kapal kendali yang menjauhi kapal target namun kembali turun ke 10.976 menit dari titik 3 ke titik 4.

TCPA mengalami penurunan secara terus menerus dari titik 3 ke titik 7'. Hal tersebut dikarenakan oleh pergerakan kedua kapal yang terus menerus mendekat sampai di titik 7' nilai TCPA menyentuh 0 menit. Nilai TCPA kembali naik dari titik 7' sampai dengan titik 12 yang menunjukkan bahwa kedua kapal saling menjauh setelah terjadi tabrakan. Berdasarkan grafik pergerakan

DCPA dan TCPA pada gambar 4.11 dan 4.12 dapat disimpulkan bahwa dibutuhkan pembelokan kapal untuk menghindari tabrakan kapal.

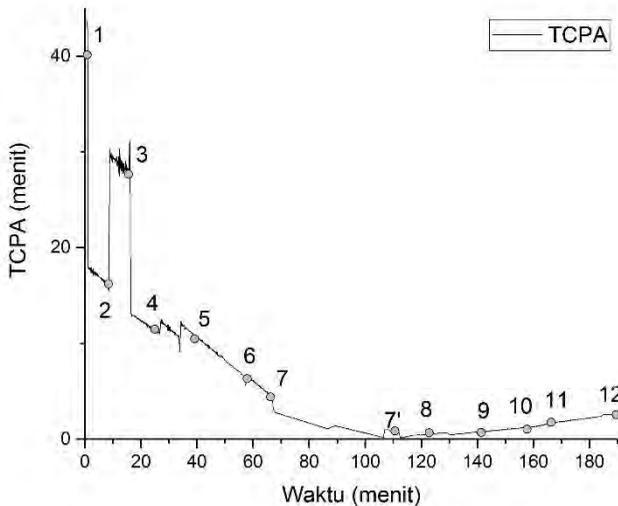


Gambar 4.13 Grafik DCPA dengan kendali anti tabrakan

Analisa selanjutnya dilakukan terhadap grafik DCPA dan TCPA dengan belokan. Grafik DCPA dengan belokan terdapat pada gambar 4.13 sedangkan untuk grafik TCPA terdapat pada gambar 4.14. Adanya kendali berbelok pada kapal ketika akan bertemu kapal target, menyebabkan nilai DCPA dan TCPA kapal tidak lagi menyentuh nilai 0.

Nilai DCPA dengan adanya belokan dari titik 1 sampai dengan 7 memiliki nilai yang sama dengan DCPA tanpa belokan pada gambar 4.11. Perbedaan utama terletak pada titik 7' yang tidak menyentuh nilai 0 km. Adanya belokan menyebabkan nilai DCPA pada titik 7' menjadi 0.441 km atau 441 meter. Pergerakan kapal

dari titik 7' sampai dengan 12 menunjukkan nilai yang sama dengan gambar 4.11 dimana kedua kapal berlayar menjauhi satu sama lain. Nilai DCPA dan TCPA pada setiap titik tertulis pada lampiran H dan I.



Gambar 4.14 Grafik TCPA dengan kendali anti tabrakan

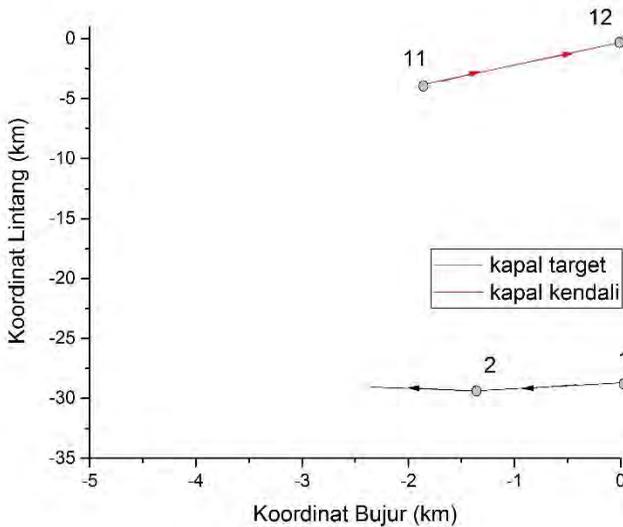
Gambar 4.14 menunjukkan grafik TCPA dengan kendali belokan, juga memiliki pola yang sama dengan gambar 4.12. Perbedaan pada titik 7' dimana TCPA kapal tidak menyentuh angka 0 menit lagi. Peningkatan TCPA disebabkan oleh adanya belokan pada titik tersebut. Adanya belokan menyebabkan nilai θ_T menjadi 60° dari 5° , sehingga nilai $\cos(\theta_T - \theta)$ meningkat. Hal tersebut dan mengakibatkan nilai V_r mengecil sesuai dengan rumus kecepatan relatif pada persamaan 2.4. TCPA akan meningkat dengan mengecilnya nilai V_r . Adanya kendali menyebabkan nilai TCPA pada titik seharusnya terjadi tabrakan

meningkat dari 0 menit menjadi 0.942 menit. Pada titik titik selanjutnya dari 7' menuju 12 TCPA mengalami peningkatan dengan nilai yang sama, seperti yang terlihat ketika kapal belum diberikan kendali pada gambar 4.12. Data perbandingan antara DCPA dan TCPA sebelum dan setelah diberikan kendali dapat dilihat pada lampiran H dan I.

Gambar 4.13 dan 4.14 menunjukkan juga bahwa pada menit ke 90 sampai ke 130, DCPA dan TCPA mulai memasuki nilai *small*. Dari grafik 4.13 DCPA pada menit tersebut berada pada nilai di bawah 3 km sedangkan TCPA berada pada nilai kurang dari 4 menit. DCPA dan TCPA pada nilai *small* akan mengakibatkan sinyal kendali bernilai *slow* dengan kecepatan 7 km/jam seperti yang telah dicantumkan pada tabel 3.6. Hubungan antara DCPA, TCPA dan kecepatan yang telah berhasil mengurangi kecepatan kapal pada nilai *small* dapat diartikan bahwa kendali kecepatan dalam tugas akhir ini telah berhasil memenuhi aturan COLREGs no.15.

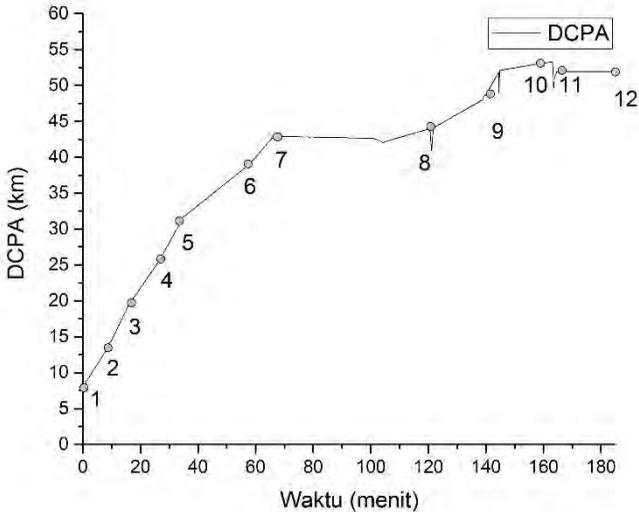
Uji halangan juga dilakukan dengan kapal lain yang bergerak ke tujuan sama yakni Karang Jamuang. Alur pelayaran kapal kendali dengan kapal target yang berlayar dari titik 11 menuju karang jamuang sedangkan kapal kendali berlayar dari titik 1. Gambar 4.15 menampilkan alur pelayaran kedua kapal pada simulasi ke dua ini. Kecepatan kapal target 2 ini sebesar 11.05 knot.

Pada simulasi dengan halangan kapal target 2, kedua kapal tidak bertabrakan. Kapal target bergerak terlebih dahulu sehingga ketika kapal kendali bergerak dari titik 1, kapal target diasumsikan sudah mencapai titik 11. Kedua kapal bergerak menuju arah yang sama yakni Karang Jamuang.



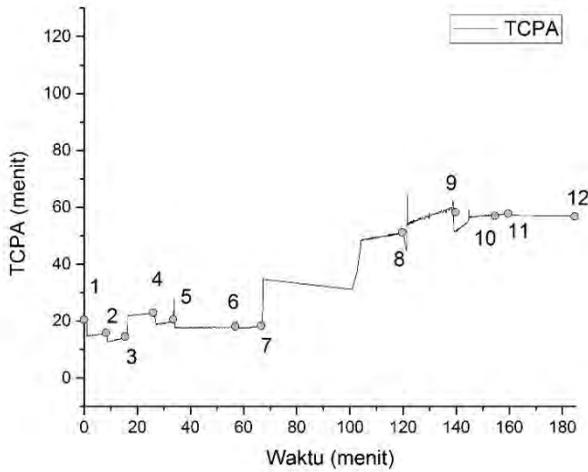
Gambar 4.15 Lintasan dengan kapal target 2

Hasil dari simulasi ke dua ini menunjukkan bahwa DCPA & TCPA kapal semakin naik seiring terus Bergeraknya kedua kapal. Nilai DCPA yang terlihat dari grafik gambar 4.16 terlihat bahwa saat kapal kendali mulai bergerak bernilai 7.911 km, dan terus meningkat sampai pada titik 12 bernilai 31.834 km. Pada pergerakan dari titik 7 ke titik 8 nilai DCPA sempat mengalami penurunan karena bentuk alur pelayaran, dimana pada titik 6 ke 7 kapal bergerak menjauhi karang jemuang, namun pada titik 7 ke 8 kapal menuju karang jemuang.

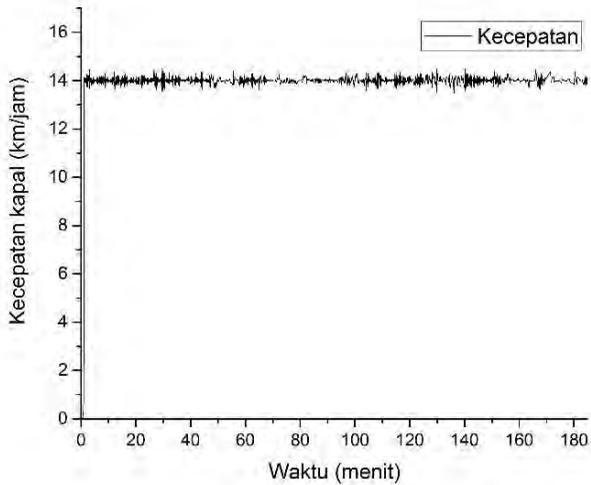


Gambar 4.16 Grafik DCPA kapal 2

Hasil TCPA juga menunjukkan pola yang sama dengan grafik DCPA. Grafik TCPA ditampilkan pada gambar 4.17. Pada saat awal kedua kapal bergerak nilai TCPA kedua kapal tercatat bernilai 20.415 menit dan terus bergerak naik sampai mencapai titik tertinggi pada lintasan Tanjung Perak-Karang Jamuang sebesar 82.07 menit. Pada titik 7 ke titik 8 nilai TCPA mengalami peningkatan drastis dikarenakan alasan yang sama yakni perubahan haluan kapal. Pola pergerakan kapal dari Tanjung Perak-Karang Jamuang lebih lengkap dapat dilihat pada lampiran D.



Gambar 4.17 Grafik DCPA kapal 2



Gambar 4.18 Grafik kecepatan kapal 2

Nilai TCPA dan DCPA yang terus naik, dan tidak menyentuh nilai small pada kendali logika fuzzy menyebabkan kecepatan kapal kendali tetap pada nilai 14 km/jam. Grafik kecepatan kapal pada simulasi kedua dapat dilihat pada gambar 4.18. Nilai TCPA dan DCPA per titik untuk simulasi dengan kapal target 2 dapat dilihat pada lampiran J.

LAMPIRAN A (Penurunan Model Nomoto)

Gerak Sway

Persamaan kendali maneuvering pada persamaan A1,

$$m(\dot{v}+ur+x_G\dot{r}) = Y \quad A1$$

disubstitusikan dengan persamaan A2 yakni persamaan hidrodinamika kapal untuk gaya-gaya yang bekerja pada sumbu Y,

$$Y_{\dot{v}}\dot{v}+Y_{\dot{r}}\dot{r}+Y_vv+Y_r r+Y_{\delta}\delta= Y \quad A2$$

Substitusi persamaan A1 dan A2 akan membentuk persamaan A3

$$m(\dot{v}+ur+x_G\dot{r}) = Y_{\dot{v}}\dot{v}+Y_{\dot{r}}\dot{r}+Y_vv+Y_r r+Y_{\delta}\delta \quad A3$$

Persamaan A3 dapat disederhanakan menjadi persamaan A4

$$(m-Y_{\dot{v}})\dot{v}-Y_vv+(mx_G-Y_{\dot{r}})\dot{r}+(mu-Y_r)r=Y_{\delta}\delta \quad A3$$

Gerak Yaw

Persamaan kendali manuver untuk gerak yaw pada persamaan A4,

$$I_z\dot{r}+mx_G(\dot{v}+ur) = N \quad A4$$

Persamaan hidrodinamika untuk momen yang bekerja pada sumbu Z yang tertuliskan pada persamaan A5, disubstitusikan dengan persamaan A4.

$$N_{\dot{v}}\dot{v}+N_{\dot{r}}\dot{r}+N_vv+N_r r+N_{\delta}\delta= N \quad A5$$

Substitusi kedua persamaan tersebut akan membentuk persamaan A6

$$I_z\dot{r}+mx_G(\dot{v}+ur) = N_{\dot{v}}\dot{v}+N_{\dot{r}}\dot{r}+N_vv+N_r r+N_{\delta}\delta \quad A6$$

Persamaan A6 dapat disederhanakan menjadi persamaan A7

$$(I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} + (m x_G u - N_r)r + (m x_G - N_{\dot{v}})\dot{v} - N_v v = N_{\delta} \delta \quad A7$$

Transformasi Laplace

Persamaan gaya *sway* dan momen *yaw* pada persamaan A6 dan A7 dapat diubah ke dalam bentuk laplace, sehingga menjadi persamaan A8 dan A9.

$$[(m - Y_{\dot{v}})s - Y_v]v + [(m x_G - Y_{\dot{r}})s + (\mu - Y_r)]r = Y_{\delta} \delta \quad A8$$

$$[(I_z - N_{\dot{r}})s + (m x_G u - N_r)]r + [(m x_G - N_{\dot{v}})s - N_v]v = N_{\delta} \delta \quad A9$$

Fungsi Alih Nomoto

Persamaan A9 dan A8 kemudian dibentuk menjadi fungsi transfer dengan output berupa kecepatan yaw (r) dan input berupa sudut *rudder* (δ). Untuk memudahkan dalam membentuk fungsi alih, maka dilakukan permisalan dengan sebagai berikut:

Permisalan untuk persamaan Laplace *sway*.

$$a_1 = [(m - Y_{\dot{v}})s - Y_v] \quad A10$$

$$a_2 = [(m x_G - Y_{\dot{r}})s + (\mu - Y_r)] \quad A11$$

$$a_3 = [Y_{\delta}] \quad A12$$

sehingga, persamaan A8 dapat ditulis ke dalam bentuk persamaan A13

$$a_1 v + a_2 r = a_3 \delta \quad A13$$

Persamaan A13 dapat juga ditulis menjadi persamaan A14

$$v = \frac{a_3 \delta - a_2 r}{a_1} \quad A14$$

Permisalan juga dilakukan untuk persamaan Laplace gerak *yaw*

$$b_1 = [(I_z - N_r)s + (m x_G u - N_r)] \quad A15$$

$$b_2 = [(m x_G - N_v)s - N_v] \quad A16$$

$$b_3 = [N_\delta] \quad A17$$

sehingga, persamaan A9 dapat ditulis ke dalam bentuk persamaan A18.

$$b_1 r + b_2 v = b_3 \delta \quad A18$$

Variabel v dapat dieleminasi dengan mensubstitusikan persamaan A14 ke dalam persamaan A18 sehingga hanya terdapat variabel kecepatan yaw dan sudut *rudder* menjadi persamaan A19.

$$b_1 r + b_2 \frac{a_3 \delta - a_2 r}{a_1} = b_3 \delta \quad A19$$

Fungsi alih dari pemodelan Nomoto dapat diturunkan dari persamaan A19 menjadi persamaan A20.

$$\frac{r}{\delta} = \frac{b_3 a_1 - b_2 a_3}{b_1 a_1 - b_2 a_2} \quad A20$$

dengan memasukkan persamaan permisalan pada A10-A12 dan A15-A17 ke persamaan A20 didapatkan fungsi alih Nomoto sebagai berikut:

$$\frac{r}{\delta} = \frac{N_\delta [(m-Y_v)s - Y_v] - Y_\delta [(mx_G - N_v)s - N_v]}{[(I_z - N_f)s + (mx_G u - N_r)] [(m-Y_v)s - Y_v] - [(mx_G - N_v)s - N_v] [(mx_G - Y_f)s + (\mu - Y_r)]} \quad A21$$

Persamaan A21 dapat disederhanakan ke dalam bentuk persamaan 2.6.

$$\frac{r}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1+T_3s)}{(1+T_1s)(1+T_2s)} = \frac{K_R + K_R T_3 s}{(1+(T_1+T_2)s + (T_1 T_2)s^2)} \quad A21$$

Koefisien K_R , T_1 , T_2 , T_3 merupakan koefisien hasil penyederhanaan persamaan A20. Koefisien-koefisien tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$\frac{r}{\delta} = \frac{N_\delta [(m-Y_v)s - Y_v] - Y_\delta [(mx_G - N_v)s - N_v]}{[(I_z - N_f)(m-Y_v)s^2 + (-Y_v(I_z - N_f) + ((mx_G u - N_r)(m-Y_v))s - ((mx_G - N_v)(mx_G - Y_f)s^2 + ((\mu - Y_r)(mx_G - N_v) - N_v(mx_G - Y_f))s + N_v(\mu - Y_r))]} \quad A22$$

$$\frac{r}{\delta} = \frac{[(N_\delta(m-Y_v) - Y_\delta(mx_G - N_v))s + (Y_\delta N_v - N_\delta Y_v)]}{\left[\frac{((I_z - N_f)(m-Y_v) - (mx_G - N_v)(mx_G - Y_f))s^2 + ((-Y_v(I_z - N_f) + ((mx_G u - N_r)(m-Y_v)) - ((\mu - Y_r)(mx_G - N_v) - N_v(mx_G - Y_f)))s + (-((mx_G u - N_r)Y_v) - N_v(\mu - Y_r))}{(-((mx_G u - N_r)Y_v) - N_v(\mu - Y_r))} \right]} \quad A23$$

Persamaan A33 disederhanakan menjadi bentuk A21 dengan membentuknya menjadi persamaan kuadrat

$$\frac{r}{\delta} = \frac{\frac{(Y_\delta N_v - N_\delta Y_v)}{(-((mx_G u - N_r)Y_v) - N_v(\mu - Y_r))} \left[1 + \frac{(N_\delta(m-Y_v) - Y_\delta(mx_G - N_v))}{(-((mx_G u - N_r)Y_v) - N_v(\mu - Y_r))} s \right]}{\left[1 + \frac{((I_z - N_f)(m-Y_v) - (mx_G - N_v)(mx_G - Y_f))}{(-((mx_G u - N_r)Y_v) - N_v(\mu - Y_r))} s^2 + \frac{((-Y_v(I_z - N_f) + ((mx_G u - N_r)(m-Y_v)) - ((\mu - Y_r)(mx_G - N_v) - N_v(mx_G - Y_f)))}{(-((mx_G u - N_r)Y_v) - N_v(\mu - Y_r))} s \right]} \quad A24$$

$$\frac{r}{\delta} = \frac{\frac{(Y_\delta N_v - N_\delta Y_v)}{(-((mx_G u - N_r)Y_v) - N_v(\mu - Y_r))} + \frac{(N_\delta(m-Y_v) - Y_\delta(mx_G - N_v))}{(-((mx_G u - N_r)Y_v) - N_v(\mu - Y_r))} s}{\left[1 + \frac{((I_z - N_f)(m-Y_v) - (mx_G - N_v)(mx_G - Y_f))}{(-((mx_G u - N_r)Y_v) - N_v(\mu - Y_r))} s^2 + \frac{((-Y_v(I_z - N_f) + ((mx_G u - N_r)(m-Y_v)) - ((\mu - Y_r)(mx_G - N_v) - N_v(mx_G - Y_f)))}{(-((mx_G u - N_r)Y_v) - N_v(\mu - Y_r))} s \right]} \quad A25$$

Dengan nilai

$$T_1 T_2 = \frac{((I_z - N_{\dot{r}})(m - Y_{\dot{v}}) - (mx_G - N_{\dot{v}})(mx_G - Y_{\dot{r}}))}{D} \quad A26$$

$$T_1 + T_2 = \frac{((-Y_v(I_z - N_{\dot{r}}) + ((mx_G u - N_r)(m - Y_{\dot{v}})) - ((\mu - Y_r)(mx_G - N_{\dot{v}}) - N_v(mx_G - Y_{\dot{r}})))}{D} \quad A27$$

$$K_R = \frac{Y_v N_{\delta} - N_v Y_{\delta}}{D} \quad A28$$

$$K_R T_3 = \frac{(-N_{\delta}(m - Y_{\dot{v}}) + Y_{\delta}(mx_G - N_{\dot{v}}))}{D} \quad A29$$

$$D = -((mx_G u - N_r)Y_v) - N_v(\mu - Y_r) \quad A30$$

LAMPIRAN B
(Hubungan Matriks Davidson dan Model Nomoto)

Koefisien pembentuk model dinamika Nomoto pada persamaan 2.16 dapat dicari berdasarkan matriks Davidson dan Schiff.

Model Nomoto

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1+T_3s)}{(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad \text{B1}$$

Matriks Davidson dan Schiff

$$M = \begin{bmatrix} m-Y_v & mx_G-Y_r \\ mx_G-N_v & I_z-N_r \end{bmatrix} N = \begin{bmatrix} -Y_v & mu-Y_r \\ N_v & mx_Gu-N_r \end{bmatrix} b = \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix} \quad \text{B2}$$

Hubungan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T_1 T_2 = \frac{\det(M)}{\det(N)} \quad \text{B3}$$

$$T_1 + T_2 = \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{\det(N)} \quad \text{B4}$$

$$K_R = \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det(N)} \quad \text{B5}$$

$$K_R T_3 = \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det(N)} \quad \text{B6}$$

Elemen m_{ij} , n_{ij} dan b_i ($i=1,2$ dan $j=1,2$) didapatkan dari matriks persamaan 2.13 (Fossen, 1994)

LAMPIRAN C (Regresi Clarck)

Persamaan diperoleh berdasarkan penurunan dari Hukum Newton II dengan koefisien hidrodinamika yang didapat dari regresi Clarck (Fossen, 2002).

$$\frac{-Y'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.16 \frac{C_B B}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{L}\right)^2 \quad C1$$

$$\frac{-Y'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 0.67 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.0033 \left(\frac{B}{L}\right)^2 \quad C2$$

$$\frac{-N'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1.1 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.041 \left(\frac{B}{L}\right) \quad C3$$

$$\frac{-N'_{\dot{i}}}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0.017 \frac{C_B B}{T} - 0.33 \left(\frac{B}{L}\right) \quad C4$$

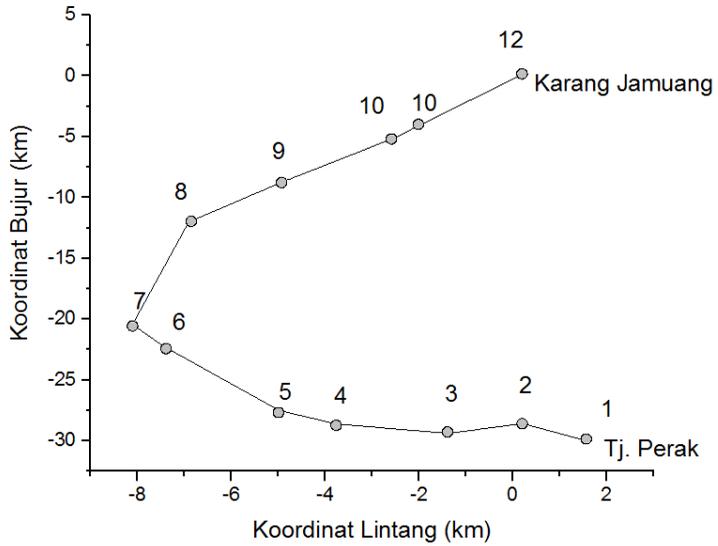
$$\frac{-Y'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.14 \frac{C_B B}{T} \quad C5$$

$$\frac{-Y'_{\dot{r}}}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2.2 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.08 \left(\frac{B}{L}\right) \quad C6$$

$$\frac{-N'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2.4 \left(\frac{T}{L}\right) \quad C7$$

$$\frac{-N'_{\dot{r}}}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{4} + 0.039 \left(\frac{B}{T}\right) - 0.56 \left(\frac{B}{L}\right) \quad C8$$

Lampiran D (Alur Pelayaran Tanjung Perak-Karang Jamuang)



LAMPIRAN E
(Rules Kendali Haluan)

1. If (e is NB) and (r is PB) then (*Rudder is NB*)
2. If (e is NB) and (r is PM) then (*Rudder is NB*)
3. If (e is NB) and (r is PS) then (*Rudder is NB*)
4. If (e is NB) and (r is Z) then (*Rudder is NB*)
5. If (e is NB) and (r is NS) then (*Rudder is NM*)
6. If (e is NB) and (r is NM) then (*Rudder is NS*)
7. If (e is NB) and (r is NB) then (*Rudder is Z*)
8. If (e is NM) and (r is PB) then (*Rudder is NB*)
9. If (e is NM) and (r is PM) then (*Rudder is NB*)
10. If (e is NM) and (r is PS) then (*Rudder is NB*)
11. If (e is NM) and (r is Z) then (*Rudder is NM*)
12. If (e is NM) and (r is NS) then (*Rudder is NS*)
13. If (e is NM) and (r is NM) then (*Rudder is Z*)
14. If (e is NM) and (r is NB) then (*Rudder is PS*)
15. If (e is NS) and (r is PB) then (*Rudder is NB*)
16. If (e is NS) and (r is PM) then (*Rudder is NB*)
17. If (e is NS) and (r is PS) then (*Rudder is NB*)
18. If (e is NS) and (r is Z) then (*Rudder is NS*)
19. If (e is NS) and (r is NS) then (*Rudder is Z*)
20. If (e is NS) and (r is NM) then (*Rudder is PS*)
21. If (e is NS) and (r is NB) then (*Rudder is PM*)
22. If (e is Z) and (r is PB) then (*Rudder is NB*)
23. If (e is Z) and (r is PM) then (*Rudder is NM*)
24. If (e is Z) and (r is PS) then (*Rudder is NS*)
25. If (e is Z) and (r is Z) then (*Rudder is Z*)
26. If (e is Z) and (r is NS) then (*Rudder is PS*)
27. If (e is Z) and (r is NM) then (*Rudder is PM*)
28. If (e is Z) and (r is NB) then (*Rudder is PB*)
29. If (e is PS) and (r is PB) then (*Rudder is NM*)
30. If (e is PS) and (r is PM) then (*Rudder is NS*)
31. If (e is PS) and (r is PS) then (*Rudder is Z*)
32. If (e is PS) and (r is Z) then (*Rudder is PS*)
33. If (e is PS) and (r is NS) then (*Rudder is PM*)
34. If (e is PS) and (r is NM) then (*Rudder is PB*)
35. If (e is PS) and (r is NB) then (*Rudder is PB*)

36. If (e is PM) and (r is PB) then (*Rudder* is NS)
37. If (e is PM) and (r is PM) then (*Rudder* is Z)
38. If (e is PM) and (r is PS) then (*Rudder* is PS)
39. If (e is PM) and (r is Z) then (*Rudder* is PM)
40. If (e is PM) and (r is NS) then (*Rudder* is PB)
41. If (e is PM) and (r is NM) then (*Rudder* is PB)
42. If (e is PM) and (r is NB) then (*Rudder* is PB)
43. If (e is PB) and (r is PB) then (*Rudder* is Z)
44. If (e is PB) and (r is PM) then (*Rudder* is PS)
45. If (e is PB) and (r is PS) then (*Rudder* is PM)
46. If (e is PB) and (r is Z) then (*Rudder* is PB)
47. If (e is PB) and (r is NS) then (*Rudder* is PB)
48. If (e is PB) and (r is NM) then (*Rudder* is PB)
49. If (e is PB) and (r is NB) then (*Rudder* is PB)

LAMPIRAN F
(Rules Kendali Kecepatan)

1. If (DCPA is S) and (TCPA is S) then (Thruster is S)
2. If (DCPA is S) and (TCPA is M) then (Thruster is F)
3. If (DCPA is S) and (TCPA is B) then (Thruster is F)
4. If (DCPA is M) and (TCPA is S) then (Thruster is N)
5. If (DCPA is M) and (TCPA is M) then (Thruster is N)
6. If (DCPA is M) and (TCPA is B) then (Thruster is N)
7. If (DCPA is B) and (TCPA is S) then (Thruster is N)
8. If (DCPA is B) and (TCPA is M) then (Thruster is N)
9. If (DCPA is B) and (TCPA is B) then (Thruster is N)

LAMPIRAN H
(Data DCPA per titik-Kapal Target I)

Titik	DCPA Tanpa Kendali (km)	DCPA dengan Kendali (km)
1	21.935	21.935
2	21.443	21.443
3	22.504	22.504
4	19.804	19.804
5	17.894	17.894
6	11.859	11.859
7	8.735	8.735
7'	0.000	0.441
8	1.146	1.146
9	7.393	7.393
10	14.482	14.482
11	17.750	17.750
12	24.558	24.558

LAMPIRAN I
(Data TCPA Per Titik-Kapal Target 1)

Titik	TCPA Tanpa Kendali (menit)	TCPA dengan Kendali (menit)
1	17.954	17.954
2	16.464	16.464
3	27.898	27.898
4	10.976	10.976
5	12.071	12.071
6	6.506	6.506
7	4.240	4.240
7'	0.000	0.942
8	0.636	0.636
9	1.018	1.018
10	1.337	1.337
11	1.655	1.655
12	2.674	2.674

LAMPIRAN J
(Data DCPA & TCPA per titik-Kapal Target II)

Titik	DCPA (km)	TCPA (menit)
1	20.415	7.911
2	16.185	13.372
3	14.006	18.522
4	22.761	24.623
5	20.582	31.358
6	17.493	38.647
7	17.928	43.242
8	51.165	43.837
9	59.049	48.392
10	56.870	52.354
11	57.741	53.265
12	56.434	51.760

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Telah dilakukan perancangan kendali manuver antitabrakan dengan menggunakan nilai DCPA-TCPA. Dari hasil simulasi kapal berhasil menurunkan kecepatan ketika akan bertabrakan dan melakukan mekanisme belok. Dengan kesimpulan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. DCPA dan TCPA dapat dijadikan variabel masukan anti tabrakan. DCPA dan TCPA ketika bernilai kecil akan mengakibatkan sinyal kendali kecepatan bernilai *slow*. DCPA dan TCPA akan menunjukkan penurunan ketika kedua kapal akan bertabrakan sedangkan ketika kapal saling menjauh akan terjadi peningkatan.
2. Pembangunan rule KLF kecepatan untuk anti tabrakan dibangun berdasarkan aturan COLREGs. Hal ini dapat dilihat ketika DCPA dan TCPA bernilai *small* maka kecepatan kapal berkurang. Sedangkan untuk KLF haluan rule dibangun dengan mengembangkan penelitian sebelumnya. Dengan mengubah range MF didapatkan *ess (error steady state)* turning minimum sebesar 0.176% sedangkan *time settling* terendah adalah 4.679 menit.
3. Performansi sistem kendali mampu memberikan rekomendasi untuk sistem kendali anti tabrakan. Kecepatan kapal ketika akan bertabrakan berhasil turun dan kembali naik lagi ketika nilai DCPA dan TCPA sudah memasuki level *medium (M)*. Dengan demikian respon kecepatan kapal telah sesuai dengan aturan COLREGS no.15, selain itu sistem kendali juga mampu mengurangi resiko tabrakan dengan meningkatnya nilai DCPA dan TCPA pada titik tabrakan masing masing dari 0 km dan 0 menit menjadi 0.441 km dan 0.942 menit.

5.2 Saran

Adapun saran dari tugas akhir ini:

1. Kendali anti tabrakan yang menggunakan kendali logika fuzzy sebaiknya diuji secara eksperimen juga agar dapat disesuaikan dengan keadaan perairan yang sesungguhnya
2. Kendali anti tabrakan dapat menggunakan strategi kendali lain seperti jaringan syaraf tiruan dikarenakan banyaknya faktor yang berpengaruh pada pergerakan kapal.

DAFTAR PUSTAKA

- Aisyah et al(2011). *Perancangan Sistem Pengendalian pada Kapal Berbasis Data AIS (Automatic Identification System) intuk Menghindari Tabrakan di Perairan*. Seminar Nasional Teori Dan Aplikasi Teknologi Kelautan SENTA 2011, (February).
- Arifin, S. (n.d.). *Sistem Fuzzy*. Surabaya: Teknik Fisika.
- Benjamin, M. (2006). *Navigation of Unmanned Marine Vehicles in Accordance with the Rules of the Road*, (May).
- Fossen. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles - Thor I*. Fossen -1994.
- Jingsong, Z. (2008). *Automatic Collision Avoidance Systems : Towards 21st Century*, 1–10.
- Saiko, Aisjah, A. S., & Masroeri, A. A. (2011). *Pengendalian pada Kapal Berbasis Data AIS untuk Menghindari Tabrakan*, 1–4.
- Lokukaluge, P. (2011). *Fuzzy Logic Based Decision Making System for Collision Avoidance of Ocean Navigation Under Critical Collision Conditions. Journal of Marine Science and Technology*, (October2015),010–016.
- There are no sources in the current document.** Rothblum, A. M. (2002). *Key to Succesful Incident Inquiry*.
- Shu, C., Ahmad, R., Lee, B., & Kim, D. (2014). *Composition ship collision risk based on fuzzy theory*, 4296–4302.
- Souza, F. de. (2009). *Ajuste Iterativo Do Controle De Um Sistema De Propulsao Diesel*. Rio De Jenerio.
- Wulder, J. H. (1992). *The Implementation of A Ship Manouvering Model in An Integrated Navigation System*.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Nur Okta Milatina yang akrab disapa Okta adalah anak ke-empat dari enam bersaudara, terlahir di kota Jakarta pada tanggal 7 Oktober 1994. Penulis menempuh pendidikan tingkat atas di SMA Negeri 78 Jakarta, kemudian dilanjutkan dengan berkuliah di Jurusan Teknik Fisika ITS. Selama perkuliahan penulis aktif dikegiatan kepanitiaan, organisasi dan program kreativitas mahasiswa. Penulis mendapatkan amanah sebagai sekertaris kepanitiaan EPW 2013 dan pada tahun 2014 sebagai sekertaris II HMTF Kabinet Bahagia periode 2014-2015. Beberapa program kreativitas mahasiswa yang pernah penulis lakukan adalah desa biogas di Kecamatan Sidayu, Gresik serta program penerapan teknologi *Integrated Monitoring System* pada tambak udang UD Tambak Asri, Yogyakarta. Bagi pembaca yang ingin berdiskusi atau memiliki kritik dan saran mengenai tugas akhir ini, bisa menghubungi penulis melalui oktamilatina@live.com.