



TUGAS AKHIR – KM184801

**PERANCANGAN KONTROL GERAK *ROLL* PADA
KAPAL *MONO-HULL* KECEPATAN TINGGI
MENGUNAKAN METODE *FUZZY PID***

**MUHAMMAD NAFF'UL ALAM
NRP. 0611144000037**

**Dosen Pembimbing:
Dr. Dra. Mardlijah, MT**

**DEPARTEMEN MATEMATIKA
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**



FINAL PROJECT – KM184801

***ROLL-MOTION CONTROL DESIGN OF A HIGH-SPEED
MONO-HULL SHIP USING FUZZY PID METHOD***

**MUHAMMAD NAFT'UL ALAM
NRP. 0611144000037**

**Supervisors:
Dr. Dra. Mardlijah, MT**

**MATHEMATICS DEPARTMENT
Faculty of Sains and Data Analytic
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**

LEMBAR PENGESAHAN

**PERANCANGAN KONTROL GERAK *ROLL* PADA
KAPAL *MONO-HULL* KECEPATAN TINGGI
MENGUNAKAN METODE *FUZZY PID***

***ROLL- MOTION CONTROL DESIGN OF A HIGH-SPEED
MONO-HULL SHIP USING FUZZY PID METHOD***

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
Untuk memperoleh gelar Sarjana Matematika
Pada bidang studi Pemodelan dan Simulasi Sistem
Program Studi S1 Departemen Matematika
Fakultas Sains dan Analitik Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

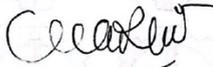
Oleh:

MUHAMMAD NAFT'UL ALAM

NRP. 0611144000037

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I



Dr. Dra. Mardijah MT.

NIP. 19670114 199102 2 001

Mengetahui,
Kepala Departemen Matematika ITS



Subchan, Ph.D

NIP. 49710513 199702 1 001

Surabaya, 01 Januari 2020

MATEMATIKA

**PERANCANGAN KONTROL GERAK *ROLL* PADA
KAPAL *MONO-HULL* KECEPATAN TINGGI
MENGUNAKAN METODE *FUZZY PID***

Nama : MUHAMMAD NAFI'UL ALAM
NRP : 061114400037
Jurusan : Matematika FSAD ITS
Pembimbing : Dr. Dra. Mardijah, MT

Abstrak

Kapal *mono-hull* adalah kapal yang memiliki satu lambung/*single hull*. Jenis/desain kapal ini merupakan yang paling umum digunakan pada saat ini. Salah satu pergerakan kapal *mono-hull* yang utama adalah gerak *roll*. Gerakan *roll* yang terlalu besar dapat menimbulkan kerugian bahkan membahayakan penumpang kapal. Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang kontrol gerak *roll* pada kapal *mono-hull* yang memiliki kecepatan tinggi menggunakan metode *Fuzzy PID* dengan menganalisa faktor linier dan non linier dari *recovery moment* dan *damping moment*. Perancangan sistem ini dilakukan menggunakan matlab. Pada penelitian ini diharapkan kontrol yang bekerja pada kapal mampu meredam gerak *roll* sehingga meminimalkan *error* yang ditimbulkan.

Kata kunci: *PID gain, mono-hull ship, Fuzzy Logic Control*

ROLL-MOTION CONTROL DESIGN OF A HIGH-SPEED MONO-HULL SHIP USING FUZZY PID METHOD

Name : MUHAMMAD NAFI'UL ALAM
NRP : 0611144000037
Department : Matematika FSAD ITS
Supervisors : Dr. Dra. Mardlijah, MT

Abstract

Mono-hull ship is a ship that has one hull / single hull. This type/ design of ship is the most commonly used at this time. One of the most important mono-hull boat movements is the roll motion. Roll movements that are too large can cause harm and even endanger passengers. The purpose of this study is to design a roll motion control on a mono-hull ship that has a high speed using the Fuzzy PID method by analyzing linear and non-linear factors of the recovery moment and damping moment. The design of this system is done using matlab. In this research, it is expected that the controls working on the ship are able to reduce the roll motion so as to minimize the errors caused.

Keywords: PID gain, mono-hull ship, Fuzzy Logic Control

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT, karena berkah, rahmat dan ridho-Nya, penulis dapat menyelesaikan Penelitian Tugas Akhir yang berjudul **“PERANCANGAN KONTROL GERAK *ROLL* PADA KAPAL *MONO-HULL* KECEPATAN TINGGI MENGGUNAKAN METODE FUZZY PID”** yang merupakan salah satu syarat akademis untuk menyelesaikan Program Sarjana Strata Tingkat 1 Departemen Matematika, Fakultas Sains dan Analitika Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik berkat doa, kerja sama, bantuan, dan dukungan dari berbagai pihak. Sehubungan dengan hal tersebut, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak, ibu dan teman-teman penulis yang senantiasa memberikan dukungan, motivasi dan doa kepada penulis.
2. Subchan, Ph.D selaku Kepala Departemen Matematika ITS.
3. Dr. Dra. Mardijah, MT. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan arahan akademis selama penulis kuliah di Departemen Matematika ITS dan senantiasa memberikan bimbingan, ilmu. Motivasi, dukungan dan doa kepada penulis dapat menyelesaikan dengan baik.
4. Dr. Didik Khusnul Arif, S.Si, M.Si selaku Ketua Program Studi S1 Departemen Matematika ITS dan Bapak Iis Herisman selaku Sekretaris Program Studi S1 Departemen Matematika ITS yang telah memberikan arahan akademis selama penulis kuliah di Departemen Matematika ITS.
5. Bapak Drs. Sentot Didik Surjanto, M.Si selaku Dosen Wali dari semester 1 sampai semester 7, yang memberikan bimbingan dan motivasi

6. Bapak Dr. Chairul Imron, MI. Komp. selaku Dosen Wali penulis sejak semester 8 sampai penulis lulus kuliah, yang telah memberikan bimbingan dan motivasi selama penulis menjalani perkuliahan di Departemen Matematika ITS.
7. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Departemen Matematika ITS yang telah memberikan ilmu, bimbingan, dan motivasi kepada penulis selama kuliah di Departemen Matematika ITS.
8. Seluruh Staff Departemen Matematika ITS yang telah memberikan pelayanan dan membantu penulis selama kuliah di Departemen Matematika ITS.
9. Kepada kedua orang tua dan adik-adik saya yang selalu mendukung saya, memberi semangat saya, dan selalu mendoakan saya setiap detiknya.
10. Teman-teman seperjuangan yang mengambil TA di semester ini.
11. Teman temanku Joi Squad dan teman-teman lainya yang senantiasa memberikan dukungan, motivasi, bantuan, doa serta menemani penulis selama kuliah di Departemen Matematika ITS.
12. Teman-teman istimewa Aji, Feri, Aqil, Jonbon, Wik Jung yang selalu membantu di saat kesulitan.
13. Teman-teman seperjuangan Wisuda 121 yang telah memberikan dukungan, semangat, bantuan serta mengingatkan penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
14. Teman istimewa yang selalu memberi dukungan dan doa sepenuh tenaga, Bekti Setyorani.
15. Teman-teman Matematika 2013, 2014, 2017, 2018, yang telah memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis selama perkuliahan.
16. Semua pihak yang belum disebutkan yang telah membantu dalam penyusunan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih belum sempurna, masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca sehingga Tugas Akhir ini bisa lebih baik lagi. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkan.

Surabaya, 9 Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
Abstrak.....	vii
<i>Abstract</i>	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxi
DAFTAR NOTASI.....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Deskripsi Kapal	6
2.3 Mekanime Gerak Kapal.....	7
2.4 Model Linier Kapal	10
2.5 Tahapan desain kontrol	11
2.5.1 Kestabilan	11
2.5.2 Keteramatan dan keterkendalian.....	12

2.5.3	Kontrol PID	13
2.5.4	Fuzzy Logic Kontrol	16
2.5.5	<i>Fuzzy PID</i>	17
2.6	Spesifikasi Performansi Sistem	20
2.6.1	Spesifikasi Performa Respon Waktu	20
2.6.2	Spesifikasi Performansi Respon Frekuensi	22
BAB III METODE PENELITIAN		23
3.1	Tahapan Penelitian	23
3.2	Diagram Alir Penelitian	25
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN		27
4.1	Pengumpulan Data	27
4.1.1	<i>State Space</i>	27
4.1.2	Model Linier Kapal	28
4.1.3	Kesetabilan Sistem	29
4.1.4	<i>PID Control System</i>	29
4.2	Fungsi <i>Transfer</i>	30
4.3	<i>PID gain</i>	32
4.4	Penerapan Fuzzy-PID pada <i>system</i>	34
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		45
5.1	Kesimpulan	45
5.2	Saran	46
DAFTAR PUSTAKA		47
LAMPIRAN		49
BIODATA PENULIS		55

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Kapal <i>Fujin</i>	7
Gambar 2.2 Gerak Kapal.....	8
Gambar 2.3 Skema Blok Sistem Kontrol <i>Loop</i> Tertutup.....	14
Gambar 2.4 Sistem Kontrol PID	15
Gambar 2.5 Struktur Dasar Fuzzy <i>Logic Controller</i>	17
Gambar 2.6 Kendali PID yang diadaptasikan dengan Fuzzy.....	18
Gambar 2.7 Pendefinisian Kendali PID dan Fuzzy	19
Gambar 2.8 Spesifikasi Respon <i>Transient</i>	21
Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian.....	25
Gambar 4.1 Fungsi <i>Transfer</i> tanpa Kontrol	31
Gambar 4.2 Plot Fungsi <i>Transfer</i>	32
Gambar 4.3 Plot gabungan P, PI, PID.....	33
Gambar 4.4 Desain Simulink untuk PID.....	34
Gambar 4.5 Hasil Simulasi PID	35
Gambar 4.6 Gambar Simulink Fuzzy PID	36
Gambar 4.7 Gambar <i>Input dan Output</i>	39
Gambar 4.8 Anggota dari K_p	39
Gambar 4.9 Anggota dari K_i	40
Gambar 4.10 Anggota dari K_d	40
Gambar 4.11 Anggota <i>input error</i> yang diinginkan.....	41
Gambar 4.12 Anggota <i>output error</i> yang diinginkan.....	42
Gambar 4.13 Gambar <i>surface</i> Fuzzy	42
Gambar 4.14 Gambar Kendali Fuzzy PID	43

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Formula Ziegler-Nichols tuning	16
Tabel 4.2 Step PID	33
Tabel 4.3 <i>Rule</i> untuk K_p	37
Tabel 4.4 <i>Rule</i> untuk K_i	37
Tabel 4.5 <i>Rule</i> untuk K_d	38

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran A. Step Respon PID.....	49
Lampiran B. Step Respon PID.....	50
Lampiran C. Zieger-Nicols.....	51
Lampiran D. Mencari Fungsi <i>Transfer</i>	52
Lampiran E. Plot Fungsi <i>Transfer</i>	53

DAFTAR NOTASI

Notasi	Keterangan
η	Vektor orientasi arah
u	Kecepatan <i>surge</i>
v	Kecepatan <i>sway</i>
w	Kecepatan <i>heave</i>
p	Kecepatan <i>roll</i>
q	Kecepatan <i>pitch</i>
r	Kecepatan <i>yaw</i>
x	Posisi <i>surge</i>
y	Posisi <i>sway</i>
z	Posisi <i>heave</i>
φ	Sudut <i>roll</i>
θ	Sudut <i>pitch</i>
ψ	Sudut <i>yaw</i>
X	Gaya <i>surge</i>
Y	Gaya <i>sway</i>
Z	Gaya <i>heave</i>
N	Momen <i>yaw</i>
K	Momen <i>roll</i>
M	Momen <i>pitch</i>
m	Massa kapal
$X\dot{u}$	Turunan gaya arah <i>surge</i> terhadap \dot{u}
$Y\dot{v}$	Turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap \dot{v}
$N\dot{r}$	Turunan momen <i>yaw</i> terhadap \dot{r}
Xu	Turunan gaya arah <i>surge</i> terhadap u
Yv	Turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap v
Yr	Turunan momen <i>sway</i> terhadap r
Nv	Turunan momen <i>yaw</i> terhadap v
Nr	Turunan momen <i>yaw</i> terhadap r
$N\dot{v}$	Turunan momen <i>yaw</i> terhadap \dot{v}
Iz	Momen inersia terhadap sumbu z
Y'	Gaya <i>swan</i> non dimensi

N'	Momen <i>yaw</i> non dimensi
XG	Pusat massa
LPP	Panjang kapal
B	Lebar kapal
∇	<i>Displacement</i>
U	Kecepatan kapal
C_B	Koefisien blok
A_δ	<i>Rudder area</i>
R	Jari-jari
T	Kedalaman Kapal
σ_w	Intensitas gelombang
ω_n	Frekuensi natural
ζ	Koefisien redaman

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal *mono-hull* adalah kapal yang memiliki satu lambung atau *single hull*. Jenis atau desain kapal ini merupakan yang paling umum digunakan saat ini. Dalam setiap jenis desain kapal kecil, kapal layar bahkan super tanker dan kargo di laut terbuka, desain *mono-hull* adalah jenis kapal yang cukup teruji sukses. Keuntungan menggunakan kapal *mono-hull* adalah kemampuan memotong melalui gelombang berat dengan mudah sehingga kapal ini mampu melaju lebih lancar. Salah satu penggunaan kapal *mono-hull* pada kapal kargo yang dapat mendistribusikan berat sehingga memberikan keseimbangan paling baik saat kapal melakukan perjalanan hingga ke tujuan.

Indonesia merupakan negara maritim yang mayoritas wilayahnya terdiri dari lautan yang menunjang hampir semua bidang kehidupan di antaranya yang paling menonjol adalah bidang logistik. Pendistribusian logistik di Indonesia mayoritas masih menggunakan jalur laut menggunakan kapal kargo. Badan pusat statistik menyebutkan bahwa pada tahun 2017-2018 volume bongkar muat barang untuk pelayaran dalam negeri mengalami peningkatan dari tahun sebelumnya sebesar 13,21 persen di 25 pelabuhan strategis di Indonesia [11]. Tentu saja semakin banyaknya kegiatan bongkar muat barang melalui jalur laut maka waktu tempuh dari kapal tersebut harus diperhatikan.

Dalam kapal kargo, kemampuan *maneuver* dan kestabilan yang baik adalah hal yang sangat penting. Pengendalian *maneuver* juga dibutuhkan dalam navigasi kapal untuk menghindari beberapa hal yang menyebabkan kerusakan. Salah satu gerak kapal yang paling berpengaruh adalah gerak *roll*. Besarnya amplitudo dari gerakan *rolling* ini dapat menyebabkan

kerugian materi dan kemungkinan bisa membahayakan penumpang atau awaknya. Pada penelitian sebelumnya, Katrina Legursky yang pada tahun 2013 melakukan penelitian analisa tentang sistem dan juga gerak pada kapal *yacht*. Pada penelitian ini, kapal *yacht* diberi 3 jenis layar secara bergantian untuk mencari model yang paling cocok. [1]

Pada tugas akhir ini penulis membahas mengenai kontrol yang akan digunakan pada gerak *roll* kapal *mono-hull* kecepatan tinggi yang mengacu pada penelitian sebelumnya Katrina Legursky (2013) yang belum memiliki kontrol. Kontrol yang akan dipakai penulis yaitu dengan metode Fuzzy PID. Berdasarkan manfaatnya, kontrol PID cukup banyak digunakan dalam kasus gerak pada kapal. Kontrol PID adalah kontrol yang sederhana dan sangat banyak digunakan, akan tetapi kontrol tersebut masih memiliki beberapa kekurangan yaitu berubahnya setiap parameter akan mempengaruhi *control* PID tersebut sehingga penulis disini penulis tertarik menambahkan metode Fuzzy untuk meminimalisir *error* yang terjadi dan juga menentukan parameter yang akan diolah kontrol PID tersebut. Penggunaan kontrol Fuzzy PID disini diharapkan mampu menghasilkan spesifikasi performansi yang lebih baik dibandingkan dengan spesifikasi performansi tanpa kontrol Fuzzy PID, sehingga mendapat kontrol yang baik untuk gerak *roll* kapal *mono-hull* berkecepatan tinggi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disajikan di atas, penulis menuliskan beberapa permasalahan yang dibahas dalam Penelitian Tugas Akhir ini sebagai berikut:

1. Bagaimana model desain kontrol Fuzzy PID pada gerak *roll* kapal *mono-hull* kecepatan tinggi?
2. Bagaimana penerapan Fuzzy PID kontrol pada gerak *roll* kapal *mono-hull* kecepatan tinggi?
3. Bagaimana analisa performasi gerak *roll* kapal *mono-hull* kecepatan tinggi dengan metode Fuzzy PID?

1.3 Batasan Masalah

Pada tugas akhir ini, penulis membatasi permasalahan sebagai berikut:

1. Kapal jenis *mono-hull* / *single-hull* (satu lambung).
2. Variable yang dikontrol adalah kecepatan sudut.
3. Hambatan eksternal diabaikan.
4. Model yang digunakan berdasarkan jurnal Katrina Legursky pada tahun 2013.

1.4 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah diatas, tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Mendapatkan model desain kontrol Fuzzy PID pada gerak *roll* kapal *mono-hull* kecepatan tinggi
2. Menerapkan kontrol Fuzzy PID pada gerak *roll* kapal *mono-hull* kecepatan tinggi.
3. Melakukan analisa performasi control gerak *roll* pada kapal *mono-hull* kecepatan tinggi.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penulisan tugas akhir ini adalah sebagai bentuk pengembangan ilmu matematika terapan dan diharapkan dapat digunakan sebagai referensi serta bermanfaat dibidang teknologi dan industri maritim.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian-penelitian terkait yang pernah dilakukan sebelumnya diantaranya oleh Kresna Oktafianto tahun 2014 yang berjudul “*Design of Autonomous Underwater Vechiles motion control using Sliding Mode Control Method*”. Berdasarkan pengendali SMC sering muncul osilasi keluaran pengendali atau *chattering* yang menyebabkan system menjadi tidak stabil. Sehingga digunakanlah kendali FSMC. [12]

Selanjutnya pada tahun 2014, Rudi Kurniawan melakukan penelitian dengan metode pengendalian *Proportional Integral Derivative* (PID) dan *Sliding Mode Control* (SMC) untuk mengatasi permasalahan yang terjadi pada UAV Trirotor mengenai permasalahan kontrol kestabilannya. Permasalahan kontrol kestabilan pada UAV Trirotor adanya momen *yaw* yang disebabkan oleh reaksi torsi yang tidak berpasangan serta sudut kemiringan yang tidak akurat dalam menjaga kestabilan sistem pada UAV Trirotor saat melakukan gerakan *hover*. Penelitian ini menghasilkan sebuah model pengendalian yang dapat menjaga kestabilan sistem serta mendapatkan sudut kemiringan yang akurat untuk mengatasi momen *yaw* pada UAV Trirotor saat melakukan gerakan *hover* (melayang). Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontroler PID dapat menjaga kestabilan sudut *roll*, sudut *pitch*, sudut *yaw*, serta mampu menekan *error* yang timbul ketika terjadi ketidakpastian dalam pengukuran parameter dan respon sistem mampu mencapai referensi yang diberikan. Waktu respon untuk mencapai kondisi *steady state* sangat

dipengaruhi oleh besaran nilai β dan λ . Respon dari sudut kemiringan untuk motor servo yang didapat dari hasil pengendalian sudut yaw adalah 0,1788 rad atau sebesar 10,24 derajat. Dari hasil pengendalian ini juga didapatkan nilai sudut kemiringan pada salah satu rotor. Kemudian, kontroler PID dan SMC juga mampu mengatasi gangguan yang diberikan dan mempertahankan posisi ketinggian serta menjaga kekokohan pada *system*. [13]

Lebih lanjut, Muhammad Alif Faraby pada tahun 2018 dalam penelitiannya berjudul “Perbandingan PID Model *Reference Adaptive Control* dengan *L1 Adaptive Control* untuk Kemudi Kapal Tanpa Awak dalam Kontrol *Waypoint*” menjelaskan jika PID mrac mampu menghasilkan respon sudut *heading* kapal tanpa awak yang diinginkan sesuai dengan kriteria desain. [14]

2.2 Deskripsi Kapal

Berdasarkan Gambar 2.1, dalam penelitian ini kapal yang digunakan adalah kapal layar jenis *fujin*. Kapal ini pada awalnya digunakan untuk melakukan test pada layar untuk perlombaan Jepang-Amerika pada tahun 1994. Desain dari kapal *fujin* ini berdasarkan pada kelas YR-10,3m yang merupakan kapal balap menggunakan *International Measurement System (IMS)* yang di produksi oleh Yamaha Motor Co, Ltd.

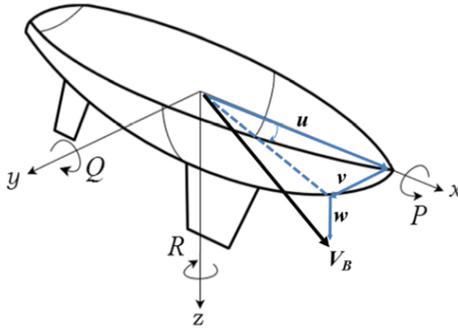


Gambar 2.1 Kapal *Fujin*

2.3 Mekanime Gerak Kapal

Dalam penelitian ini penulis menggunakan persamaan gerak kapal dengan 4 derajat kebebasan dari 6 derajat kebebasan yaitu *surge*, *sway*, *roll* dan *yaw*. Secara umum gerakan kapal dibagi menjadi dua macam yaitu gerak translasi dan rotasi. Gerak translasi dibagi menjadi tiga yaitu *surge*, *sway* dan *heave*. Sedangkan gerak rotasi dibagi menjadi tiga yaitu *roll*, *pitch* dan *yaw*. Gerak *surge* merupakan gerak kapal maju mundur kearah sumbu x. Gerakan *sway* merupakan gerak kapal kearah samping searah dengan sumbu y. Gerak *heave* adalah gerak kapal naik turun searah sumbu z. Gerak *roll* merupakan gerak rotasi kapal dengan sumbu x sebagai sumbu putar. Gerak *pitch* merupakan gerak rotasi kapal dengan sumbu y sebagai sumbu putar. Gerak *yaw* merupakan gerak rotasi kapal dengan sumbu z sebagai sumbu putar. Berikut ilustrasi gerakan pada kapal dapat dilihat pada Gambar 2.2.

Linear Velocities	Names	Angular Rates	Names
U	Surge	P	Roll
V	Sway	Q	Pitch
W	Heave	R	Yaw



Gambar 2.2 Gerak Kapal

Pada persamaan benda apung dalam 4 DOF dapat dinyatakan sebagai persamaan berikut :

Surge :

$$(m + m_x)\dot{U} - (m + m_y \cos^2 \phi + m_z \sin^2 \phi)VR = X_0 + X_{Hydro} + X_{Rud} + X_s \quad \dots(2.3.1)$$

Sway :

$$(m + m_y \cos^2 \phi + m_z \sin^2 \phi)\dot{V} + (m + m_x)UR + 2(m_z - m_y)\sin\phi\cos\phi.VP = Y_{Hydro} + Y_{Rud} + Y_s \quad \dots(2.3.2)$$

Roll :

$$(I_{xx} + J_{xx})\dot{P} - (I_{yy} + J_{yy} - I_{zz} + J_{zz})\sin\phi\cos\phi.R^2 = K_{Hydro} + K_{Rud} + K_s - mg\overline{GM}\sin\phi \quad \dots(2.3.3)$$

Yaw :

$$\left((I_{yy} + J_{yy}) \sin^2 \phi + (I_{zz} + J_{zz} \cos^2 \phi) \right) \dot{R} + 2(I_{yy} + J_{yy} - I_{zz} - J_{zz}) \sin \phi \cos \phi . PR = N_{Hydro} + N_{Rud} + N_s \quad \dots(2.3.4)$$

Dimana

m	= masa kapal
m_x	= massa pada <i>surge</i>
m_y	= massa pada <i>sway</i>
m_z	= massa pada <i>heave</i>
\dot{U}	= percepatan pada <i>surge</i>
ϕ	= sudut <i>roll</i>
V	= kecepatan pada <i>sway</i>
R	= kecepatan sudut <i>yaw</i>
X_0	= gaya angkat kapal
X_{Hydro}	= gaya hidrodinamik total <i>surge</i>
X_{Rud}	= gaya <i>rudder surge</i>
X_s	= gaya aerodinamik <i>surge</i>
\dot{V}	= percepatan pada <i>sway</i>
U	= kecepatan pada <i>surge</i>
P	= kecepatan sudut <i>roll</i>
Y_{Hydro}	= gaya hidrodinamik total <i>sway</i>
Y_{Rud}	= gaya <i>rudder sway</i>
Y_s	= gaya aerodinamik <i>sway</i>
I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}	= <i>rigid body mass moment of inertia</i>
J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}	= <i>added mass moment of inertia</i>
K_{Hydro}	= gaya hidrodinamik total <i>roll</i>
K_{Rud}	= gaya <i>rudder roll</i>
K_s	= gaya aerodinamik <i>roll</i>
g	= percepatan gravitasi

\overline{GM}	=berat <i>metacentric</i> kapal
N_{Hydro}	= gaya hidrodinamik total <i>yaw</i>
N	= gaya <i>rudder yaw</i>
N_s	= gaya aerodinamik <i>yaw</i>

2.4 Model Linier Kapal

Model dinamika yang dimaksud dalam bentuk *state space* atau persamaan keadaan. Persamaan keadaan secara umum berbentuk:

$$\dot{\underline{x}} = A\underline{x} + B\underline{u} \quad \dots(2.4.1)$$

$$y = C\underline{x} + D\underline{u} \quad \dots(2.4.2)$$

keterangan:

\underline{x} = *State Variable*

y = *Output Variable*

\underline{u} = *Control Variable*

A = *Dynamic matrix*

B = *Input matrix*

C = *Output Matrix*

D = *Feed Forward Matrix*

Kemudian akan dilakukan analisis nilai *eigen*

1. Nilai *Eigen*(s)

Nilai *eigen* merupakan suatu nilai karakteristik dari suatu matriks berukuran $n \times n$. rumus dari nilai *eigen* adalah:

$$|sI - A| = \det(sI - A) = 0$$

$$s = \sigma \pm j\omega$$

2. Fungsi Transfer

Fungsi *transfer* merupakan suatu sistem linier yang didefinisikan sebagai perbandingan transformasi *Laplace* sinyal output terhadap sinyal input dengan asumsi semua kondisi awal sama dengan nol. Berikut adalah cara membawa suatu persamaan ruang keadaan menjadi fungsi transfer

State space

$$\dot{x} = A\underline{x} + B\underline{u}$$

$$y = C\underline{x} + D\underline{u}$$

dengan menggunakan *Laplace* persamaan menjadi:

$$sX(s) = AX(s) + BU(s) \quad \dots(2.4.3)$$

$$Y(s) = CX(s) + DU(s) \quad \dots(2.4.4)$$

dengan demikian persamaan yang diperoleh

$$sX(s) - AX(s) = BU(s)$$

$$(sI - A)X(s) = BU(s)$$

$$X(s) = (sI - A)^{-1}BU(s)$$

$$Y(s) = C(sI - A)^{-1}BU(s) + DU(s)$$

$$Y(s) = (C(sI - A)^{-1}B + D)U(s),$$

sehingga diperoleh fungsi transfer

$$F_{yu} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{(C(sI - A)^{-1}B + D)U(s)}{U(s)} = \frac{C \operatorname{adj}(sI - A)B}{\det(sI - A)}$$

2.5 Tahapan desain kontrol

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai teori-teori yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini.

2.5.1 Kestabilan

Pengertian dari kestabilan suatu sistem.

Teorema 2.1. Diberikan persamaan differensial $\dot{x}=Ax$ dengan A matrik berukuran $n \times n$ dan mempunyai nilai karakteristik yang berbeda $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ ($k \leq n$).

- Titik asal $x=0$ adalah stabil asimtotik bila dan hanya bila $\text{Re}\lambda_i < 0$ untuk semua $i=1, \dots, k$.
- Titik asal $\bar{x}=0$ adalah stabil bila dan hanya bila $\text{Re}\lambda_i \leq 0$ untuk semua $i=1, \dots, k$ dan untuk semua λ_i dengan $\text{Re}\lambda_i = 0$ multisiplisitas aljabar sama dengan multisiplisitas geometrinya
- Titik asal $\bar{x}=0$ adalah tak stabil bila dan hanya bila $\text{Re}\lambda_i > 0$ untuk beberapa $i = 1, \dots, k$ atau ada λ_i dengan $\text{Re}\lambda_i = 0$ dan multisiplisitas aljabar lebih besar dari mutiplisitas geometrinya

2.5.2 Keteramatan dan keterkendalian

Pengertian keterkendalian suatu sistem.

Definisi 2.1 Sistem linier (2.4.1) (2.4.2) dikatakan terkendali bila untuk setiap keadaan sebarang $x(0)=x_0$ ada masukan $u(t)$ yang tidak dibatasi menstansfer keadaan $x=0$ kesebarang keadaan akhir $x(t_1)=x_1$ dengan waktu akhir t_1 hingga.

Teorema berikut menyatakan syarat cukup dan perlu sistem dikatakan terkendali:

Teorema 2.2 Syarat perlu dan cukup sistem (2.4.1) (2.4.2) terkendali adalah:

- $w(0,t_1)=\int_0^{t_1} e^{-A\tau} B B^T e^{-A^T\tau} d\tau$ non- singular
- Matriks: $M_c=(B \mid AB \mid A^2B \mid \dots \mid A^{n-1}B)$ mempunyai rank sama dengan n

Pengertian dari keteramatan sistem:

Definisi 2.2 Bila setiap keadaan awal $x(0)=x_0$ secara tunggal dapat diamati dari setiap pengukuran keluaran sistem (2.4.1) (2.4.2) dari waktu $t=0$ ke $t=t_1$, maka sistem dikatakan teramati.

Teorema 2.3 syarat perlu dan cukup sistem (2.3) adalah:

- Matriks $m(0,t) = \int_0^t e^{A\tau} C C^T C A^T \tau d\tau$ non singular
- Matriks keteramatan

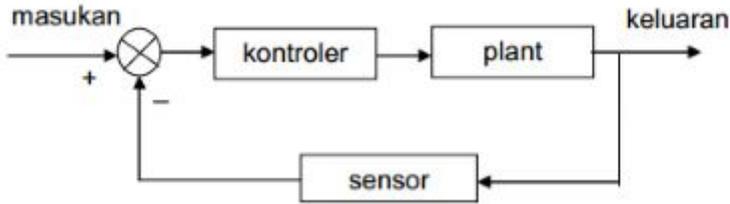
$$M_o = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{(n-1)} \end{pmatrix}$$

- Mempunyai rank sama dengan n . [6]

2.5.3 Kontrol PID

Kontrol *Proportional-Integral-Derivative* (PID) adalah algoritma kontrol yang sudah umum digunakan. Popularitas pengendali PID sering digunakan karena kinerja mereka yang kuat dalam berbagai kondisi operasi dan kesederhanaan fungsionalnya yang memungkinkan untuk dioperasikan secara sederhana secara langsung. [7]

Gagasan dasar di balik pengontrol PID adalah membaca sensor, kemudian menghitung *output actuator* yang diinginkan dengan menghitung respon proposional, *integral* dan *derivative* kemudian menjumlahkan ketiga komponen untuk menghitung output. Pengontrolan digunakan dalam sistem umpan balik tertutup



Gambar 2.3 Skema Blok Sistem Kontrol *Loop* Tertutup

Berdasarkan persamaan 2.5.1, variabel e menunjukkan kesalahan pelacakan, yang dikirim ke pengontrol PID, w adalah referensi variabel dan y dikendalikan (*output*) variabel. Sinyal kontrol u dari pengontrol ke sistem adalah sama dengan *gain* proposionalnya p kali besarnya kesalahan ditambah *gain* integral I kali integral dari kesalahan ditambah derivatif D kali kesalahan derivatif. Berikut bentuk model dari kontroler PID

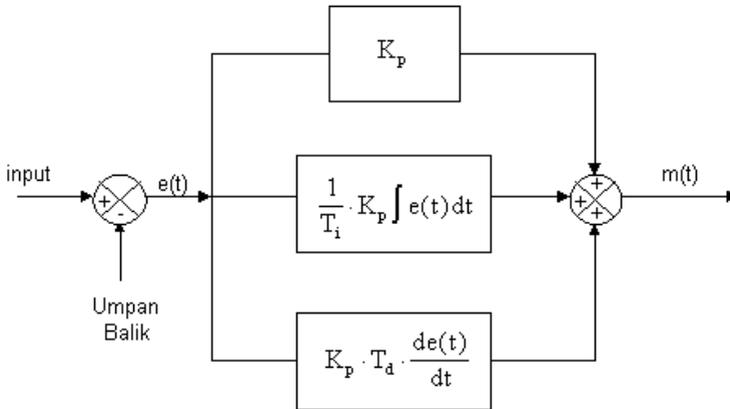
$$u(t) = Kp \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) * d\tau + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad \dots(2.5.1)$$

dimana $u(t)$ sinyal input, $e(t)$ sinyal *error* yang didefinisikan $e(t) = r(t) - y(t)$, dan $r(t)$ adalah sinyal input referensi.

dengan menggantikan *derivative* menggunakan sebuah metode *backward difference* dan Integral oleh menjumlahkan menggunakan *integrator regular* dari sebuah aproksimasi adalah

$$u_n = Kp \left(e_n + \frac{1}{T_i} \sum_{j=1}^n e_j T_s + T_d \frac{e_n - e_{n-1}}{T_s} \right) \quad \dots(2.5.2)$$

Berikut adalah gambar sistem kontrol PID



Gambar 2.4 Sistem Kontrol PID

- I. *Propositional gain*
Menambah kecepatan respon pada sistem kapal.
- II. *Integral gain*
Mengurangi *error steady-state* atau kesalahan tunak
- III. *Derivative gain*
Menyebabkan penurunan respon pada sistem kapal

Formula perpaduan *empirical* yang sangat berguna diusulkan oleh Ziegler dan Nichols sejak tahun 1992. Formula tuning diperoleh ketika plat model yang di berikan oleh *first-order* yang dapat diungkapkan dengan fungsi transfer sebagai berikut

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad \dots(2.5.3)$$

Dari fungsi *transfer* untuk mendapatkan nilai dari K_p , T_i dan T_d , maka langkah pertama adalah dengan menentukan nilai K_{cr}

dan P_{cr} (dimana P_{cr} adalah jarak puncak 2 gelombang yang saling berdekatan dan $K_{cr} = K$) melalui gambar plot dari fungsi *transfer*. Maka tuning dari formula Ziegler-Nichol adalah

Tabel 2.1 Formula Ziegler-Nichols tuning

Tipe Kontrol	Step Respon		
	Kp	Ti	Td
P	$0.5K_{cr}$		
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

2.5.4 Fuzzy Logic Kontrol

Suatu pengendali *fuzzy* tersusun dari empat buah komponen yang bekerjasama dan dapat diuraikan sebagai berikut

a. *Fuzzification Interface*

Fuzzification Interface diperlukan pada proses *fuzzifikasi* yaitu untuk mengubah masukan nilai *crisp* menjadi nilai *fuzzy*

b. *Knowledge Base*

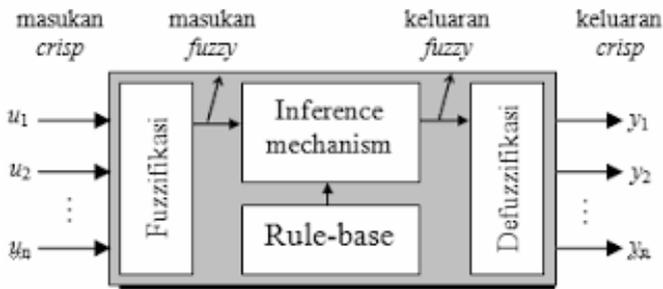
Knowledge Base berisi aturan *fuzzy* yang disebut *rule base* dari sekumpulan fungsi keanggotaan (*data base*)

c. *Interface Engine*

Interface Engine merupakan mekanisme atau prosedur, penalaran untuk mendapatkan *fuzzy output*

d. *Defuzzifikasi*

Defuzzifikasi diperlukan untuk mengubah *fuzzy output* ke nilai *crisp*.



Gambar 2.5 Struktur Dasar Fuzzy Logic Controller

2.5.5 Fuzzy PID

Fuzzy PID merupakan metode pengontrolan modern gabungan dari algoritma *Fuzzy* dan PID.

- Design Produk

Langkah langkah dalam mendesain Fuzzy PID adalah

1. Desain sebuah kontrol PID konvensional
2. Ganti dengan sebuah ekuivalen linier kontrol Fuzzy
3. Membuat kontrol Fuzzy non linier
4. Temukan desain kontrol Fuzzy

- Fuzzy P Kontrol

$$U(n) = f(GE * e(n)) * GU$$

$$f(GE * e(n)) = GE * e(n)$$

$$Kp = GE * GU$$

- Fuzzy Incremental Controller

$$U(n) = \sum_{j=1}^n [f(GE * e(n), GCE * \dot{e}(n)) * GCU * Ts] \dots (2.5.4)$$

- Fuzzy PD Kontrol

$$U(n) = f(GE * e(n), GCE * \dot{e}(n)) * GU$$

$$f(GE * e(n), GCE * \dot{e}(n)) = GE * e(n) + GCE * \dot{e}(n)$$

$$Kp = GE * GU$$

$$Td = \frac{GCE}{GE}$$

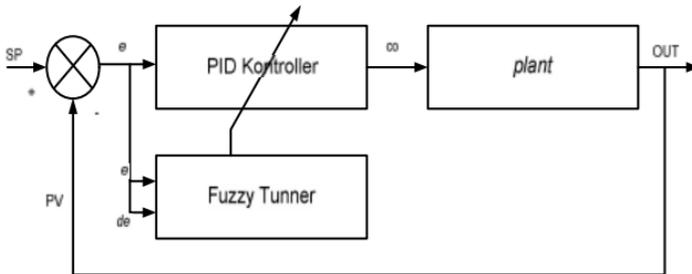
- Fuzzy PD + I Kontrol

$$\begin{aligned}
 U(n) &= \left[f(GE * e(n), GCE * \dot{e}(n)) + GIE \sum_{j=1}^n e(j)T_s \right] * GU \\
 &= GE * GU \left[e_n + \frac{GCE}{GE} * ce_n + \frac{GIE}{GE} ie_n \right] \quad \dots(2.5.5)
 \end{aligned}$$

Dengan mengasumsikan bahwa GE tidak nol, dengan persamaan 2.5.4 dan 2.5.5 maka didapat:

$$\begin{aligned}
 GE * GU &= Kp \\
 \frac{GCE}{GE} &= Td \\
 \frac{GIE}{GE} &= \frac{1}{Ti}
 \end{aligned}$$

Fuzzy PID adalah suatu metode pengontrolan modern gabungan dari algoritma Fuzzy dan PID, yang menawarkan keunggulan-keunggulan dibandingkan dengan metode pengontrolan konvensional semisal hanya menggunakan PID saja. Parameter-parameter PID yang berfungsi untuk menentukan sifat dari respon sistem, ditentukan oleh keluaran algoritma Fuzzy



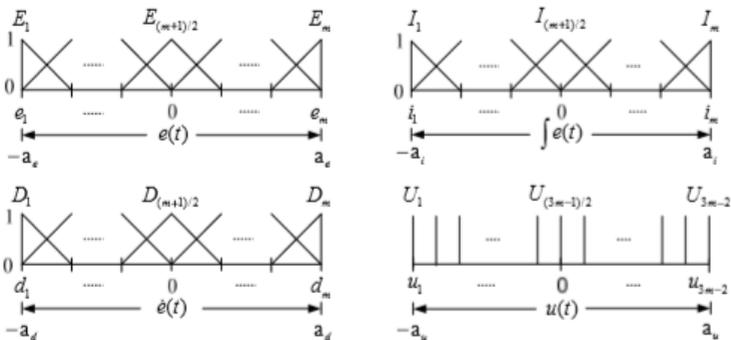
Gambar 2.6 Kendali PID yang diadaptasikan dengan Fuzzy

Kendali Fuzzy PID didesain masih ekuivalensi dengan kendali konvensional PID, dan diturunkan dari persamaanya.

Pertama untuk konvensional kendali PID, persamaan output $u(t)$ dalam domain waktu adalah

$$u(t) = Pe(t) + I \int e(t)dt + D \frac{de(t)}{dt} \quad \dots (2.5.6)$$

Dimana sistem kendali menyediakan syarat proposional, integral dan derivative. Outputnya $u(t)$ dan inputnya $e(t)$, $\int e(t)$ dan $\dot{e}(t)$ dapat diistilahkan sebagai variabel Fuzzy dalam desain *Fuzzy logic controllers* (FLC). Diasumsikan dengan diberikan range untuk operator $e(t)$, $\int e(t)$ dan $\dot{e}(t)$ adalah $OR_u = [-a_u, a_u]$, $OR_e = [-a_e, a_e]$, dan $OR_i = [-a_i, a_i]$ dan $OR_d = [-a_d, a_d]$. Hubungan tersebut akan ditunjukkan dalam Gambar 2.6 dengan pendefinisian 4 variabel Fuzzy



Gambar 2.7 Pendefinisian Kendali PID dan Fuzzy

Berdasarkan Gambar 2.7 dari himpunan-himpunan Fuzzy yang dilambangkan m adalah persamaan keadaan dan keadaan triangular untuk masing-masing input variabel Fuzzy $e(t)$, $\int e(t)$ dan $\dot{e}(t)$. Dengan kata lain, *output* dari variabel Fuzzy $u(t)$ adalah *fuzzified*.

2.6 Spesifikasi Performansi Sistem

Spesifikasi performansi sistem merupakan ciri-ciri khusus dari respon output sistem, biasanya juga disebut sebagai karakteristik system. Spesifikasi performansi atau karakteristik sistem dibedakan menjadi

2.6.1 Spesifikasi Performa Respon Waktu

Spesifikasi performansi respon waktu merupakan spesifikasi performansi respon sistem terhadap perubahan waktu. Spesifikasi performansi respon waktu dibedakan menjadi:

a. Spesifikasi Performa Respon *Transient*

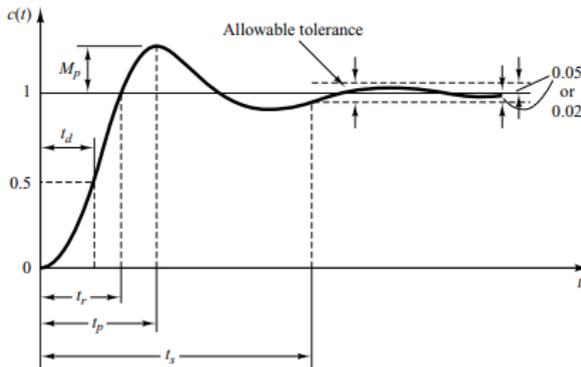
Respon *transient* merupakan respon sistem yang berlangsung dari keadaan awal sampai keadaan akhir, yang terdiri atas:

- a) Waktu tunda (*delay time*), t_d : waktu yang diperlukan untuk mencapai setengah harga akhir yang pertama kali.
- b) Waktu naik (*rise time*), t_r : waktu yang diperlukan respon untuk naik dari 10 sampai 90%, 5 sampai 95%, atau 0 sampai 100% dari harga akhirnya. Untuk setiap orde kedua redaman kurang, biasanya digunakan waktu naik 0-100%. Untuk sistem redaman lebih, biasanya digunakan waktu naik 10-90%.
- c) Waktu puncak (*peak time*), t_p : waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali.
- d) Lewatan maksimum (*maximum overshoot*), M_p : harga puncak maksimum dari kurva respon yang diukur dari satu. Jika harga keadaan tunak respon tidak sama dengan satu, maka biasa digunakan persen lewatan maksimum. Parameter ini didefinisikan sebagai:

$$\text{persen lewatan maksimum} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

Besarnya lewatan maksimum ini secara langsung menunjukkan kestabilan relatif sistem.

- e) Waktu penetapan (*settling time*), t_s : waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai dan menetap dalam daerah di sekitar harga akhir yang ukurannya ditentukan dengan persentase mutlak dari harga akhir (biasanya 2% atau 5%). Waktu penetapan ini dikaitkan dengan konstanta waktu terbesar dari sistem kontrol. Kriteria persentase kesalahan yang digunakan ditentukan dari sasaran desain sistem yang ditanyakan.



Gambar 2.8 Spesifikasi Respon *Transient*

Pada Gambar 2.8 menunjukkan unsur-unsur yang umumnya terdapat pada respon *transient* suatu sistem dari keadaan awal hingga keadaan akhir. Unsur-unsur suatu respon *transient* dapat digunakan untuk melihat kestabilan maupun performansi suatu sistem.

- f) *RMSE* (*Root Mean Squared Error*), *RMSE* digunakan untuk mengukur tingkat akurasi hasil perkiraan suatu model. [14]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2}$$

- b. Spesifikasi performansi respon pada keadaan tunak (*steady state*)

2.6.2 Spesifikasi Performansi Respon Frekuensi

Spesifikasi performansi respon frekuensi merupakan spesifikasi performansi respon sistem terhadap perubahan frekuensi. Untuk mendapatkan spesifikasi performansi respon frekuensi dari sistem, sinyal uji yang lazim digunakan adalah sinyal persegi atau sinyal *sinusoid*

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

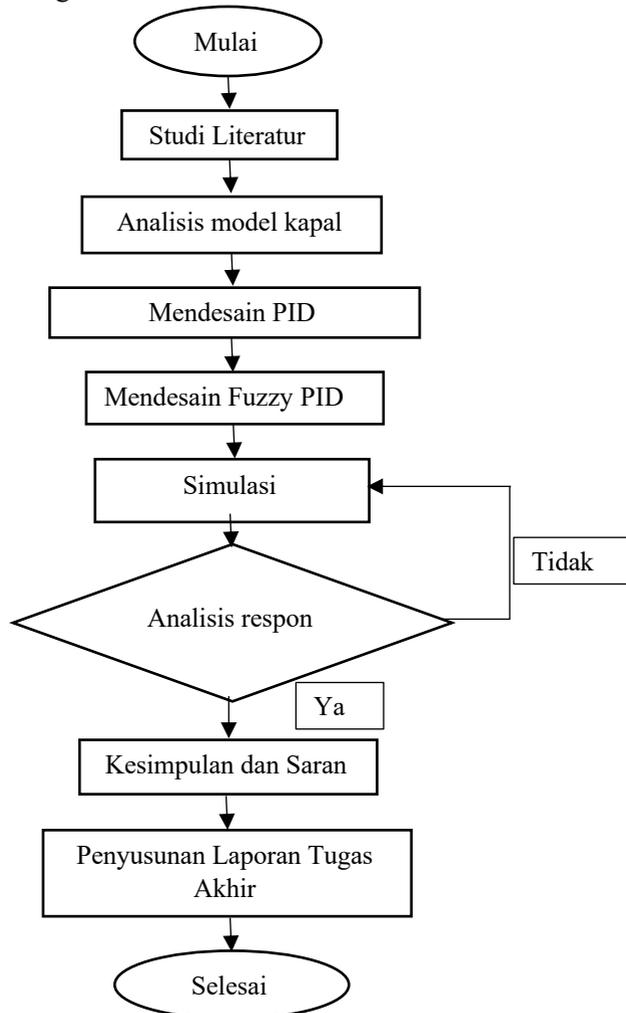
1. Studi Literatur
Pada tahap ini dilakukan identifikasi masalah mengenai gerak *roll* pada kapal *mono-hull* kecepatan tinggi menggunakan metode fuzzy PID dari jurnal, buku, penelitian tesis, dan media-media lain yang dapat menunjang penelitian.
2. Mengkaji Model
Pada tahap ini akan dilakukan kajian mengenai model matematika dari referensi dengan mempertimbangkan karakteristik model untuk dihubungkan dengan model matematika perancangan kontrol gerak *roll* pada kapal *mono-hull* kecepatan tinggi menggunakan metode fuzzy PID yang akan dibentuk.
3. Perancangan Kontrol
Pada tahap ini akan dilakukan perancangan kontrol gerak *roll* pada kapal *mono-hull* kecepatan tinggi menggunakan metode fuzzy PID menggunakan hukum-hukum fisika.
4. Membuat Algoritma Program
Pada tahap ini, akan dibuat algoritma program dari fuzzy PID untuk menyelesaikan model matematika gerak *roll* pada kapal *mono-hull* kecepatan tinggi.
5. Simulasi Program
Dengan menggunakan program yang telah dibuat akan dilakukan simulasi dengan menggunakan beberapa nilai parameter inputan.
6. Analisis Hasil dan Pembahasan
Dengan menggunakan hasil dari simulasi akan dilakukan analisis dan dibahas, untuk dicari solusi numerik terbaik

dari model matematika perancangan kontrol gerak *roll* pada kapal *mono-hull* kecepatan tinggi menggunakan metode fuzzy PID.

7. Penarikan Kesimpulan dan Pemberian Saran
Pada tahap ini, akan dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan hasil akhir yang telah didapat serta pemberian saran untuk penelitian selanjutnya.
8. Penyusunan Laporan hasil Penelitian
Pada tahap ini dilakukan penyusunan hasil penelitian berdasarkan hasil analisis dan penelitian yang telah dilakukan.

3.2 Diagram Alur Penelitian

Secara umum tahapan-tahapan yang dilakukan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini sesuai dengan diagram alur yang ditunjukkan sebagai berikut



Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengumpulan Data

Dari permasalahan yang dibahas dalam pengerjaan tugas akhir ini ada beberapa data dari kapal *mono-hull* berupa matrik *state space*.

4.1.1 State Space

Terdapat 3 sumbu utama dalam kapal yaitu lateral, *longitudinal* dan vertikal. Dalam setiap gerak memiliki data *state space* yang berbeda, adapun *state space* dari gerak kapal adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.021 & 0.119 & 0.086 & 0.169 & 0.1344 \\ -0.022 & -0.270 & 1.930 & -0.038 & 0.0145 \\ 0.024 & 0.004 & 0.068 & 0.050 & -0.119 \\ 0.007 & 0.066 & -0.400 & -0.009 & -0.078 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & -0.001 & 0.000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ p \\ r \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.023 & -0.038 \\ -0.382 & 0.013 \\ 0.024 & -0.009 \\ 0.076 & -0.016 \\ 0.000 & 0.000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_r \\ \delta_b \end{bmatrix}$$

dengan

u = Surge velocity

v = Sway velocity

p = Roll angular velocity

r = Yaw angular velocity

ϕ = Roll Angle

4.1.2 Model Linier Kapal

Dari persamaan (2.3.1) sampai (2.3.4) akan dilinearakan sehingga diperoleh matriks sebagai berikut:

$$\dot{x} = A\underline{x} + B\underline{u}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.021 & 0.119 & 0.086 & 0.169 & 0.1344 \\ -0.022 & -0.270 & 1.930 & -0.038 & 0.0145 \\ 0.024 & 0.004 & 0.068 & 0.050 & -0.119 \\ 0.007 & 0.066 & -0.400 & -0.009 & -0.078 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & -0.001 & 0.000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ p \\ r \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.023 & -0.038 \\ -0.382 & 0.013 \\ 0.024 & -0.009 \\ 0.076 & -0.016 \\ 0.000 & 0.000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_r \\ \delta_b \end{bmatrix}$$

$$y = C\underline{x} + D\underline{u}$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} x$$

dengan

\underline{x} = State Vector

\underline{u} = Control Signal

y = Output

δ_r = Rudder

δ_b = sail deflection

dan sudut yang diamati adalah *roll angle* dikendalikan oleh deflektor dan rudder

4.1.3 Kestabilan Sistem

Kestabilan sistem diuji dengan mencari nilai eigennya, dengan persamaan karakteristik $|A - \lambda I| = 0$

$$A = \begin{bmatrix} -0.021 & 0.119 & 0.086 & 0.169 & 0.1344 \\ -0.022 & -0.270 & 1.930 & -0.038 & 0.0145 \\ 0.024 & 0.004 & 0.068 & 0.050 & -0.119 \\ 0.007 & 0.066 & -0.400 & -0.009 & -0.078 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & -0.001 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$\lambda I = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}$$

Berdasarkan sistem tersebut, didapat nilai eigennya adalah:

$$\lambda_1 = -0.0059 + 0.3298i$$

$$\lambda_2 = -0.0059 - 0.3298i$$

$$\lambda_3 = -0.2140 + 0.0000i$$

$$\lambda_4 = -0.0031 + 0.0385i$$

$$\lambda_5 = -0.0031 - 0.0385i$$

Dari uji kestabilan sistem diatas menunjukkan bagian *real* dari nilai *eigen* semua bernilai negatif dengan demikian sistem dikatakan stabil.

4.1.4 PID Control System

Model matematika yang mendeskripsikan dari PID *gain* adalah:

$$u(t) = Kp \left[e(t) + \frac{1}{Ti} \int_0^t e(\tau) d\tau + Td \frac{de(t)}{dt} \right] \dots (4.1.1)$$

dimana:

$u(t) = \text{Input signal}$

$e(t) = \text{Error signal}$

dengan $e(t) = r(t) - y(t)$

$r(t) = \text{reference input signal}$, dalam kasus ini *reference input signal* adalah 30 (*degree*).

4.2 Fungsi Transfer

Berdasarkan matriks yang terdapat pada sub bab 4.1.2 akan dimasukkan ke dalam program dengan

$$A = \begin{bmatrix} -0.021 & 0.119 & 0.086 & 0.169 & 0.1344 \\ -0.022 & -0.270 & 1.930 & -0.038 & 0.0145 \\ 0.024 & 0.004 & 0.068 & 0.050 & -0.119 \\ 0.007 & 0.066 & -0.400 & -0.009 & -0.078 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & -0.001 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.023 & -0.038 \\ -0.382 & 0.013 \\ 0.024 & -0.009 \\ 0.076 & -0.016 \\ 0.000 & 0.000 \end{bmatrix}$$

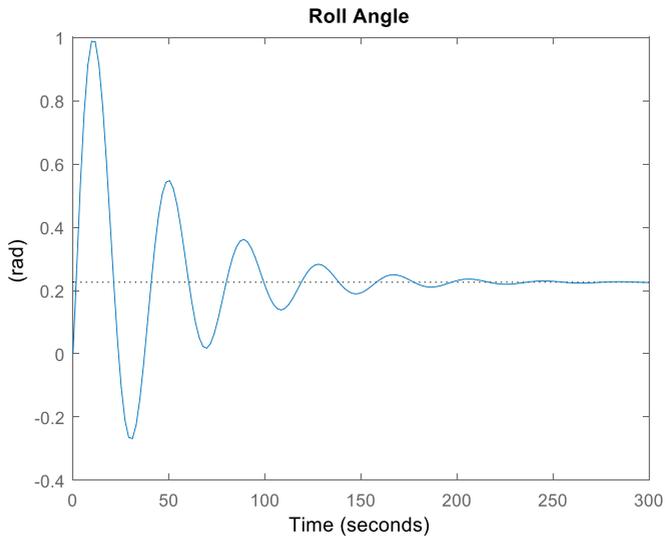
$$C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ dan } D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Sehingga didapat

$$G(s) = \frac{-0.0239s^3 - 0.0105s^2 + 0.0011s + 0.0001}{s^5 + 0.2320s^4 + 0.1142s^3 + 0.0243s^2 + 0.0003s + 0.00001}$$

$$k = 2.7533$$

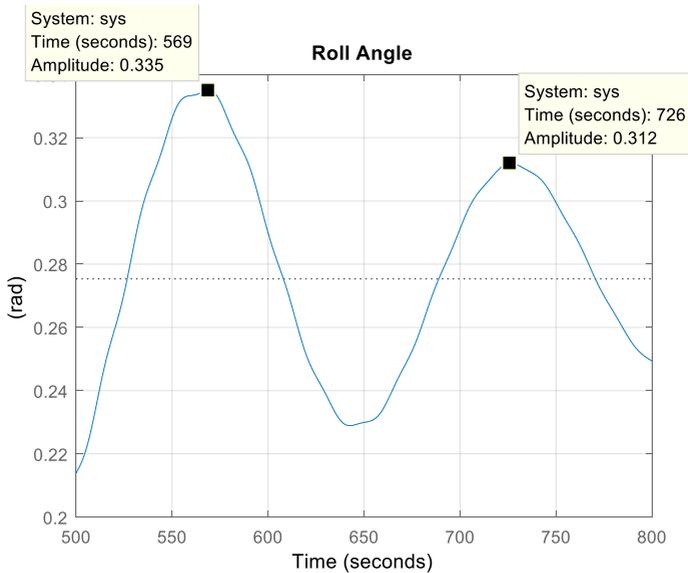
Berdasarkan hasil dari fungsi *transfer*, didapat plotingan gambar seperti berikut



Gambar 4.1 Fungsi *Transfer* tanpa Kontrol

<i>Delay Time</i> (T_d)	= 4.84 s
<i>Rise Time</i> (T_r)	= 1.32 s
<i>Peak Time</i> (T_p)	= 9.68 s
<i>Settling Time</i> (T_s)	= 187 s

Berdasarkan Gambar 4.1, maka untuk menentukan nilai K_{cr} dan P_{cr} akan ditarik garis diantara dua puncak gelombang yang identik.



Gambar 4.2 Plot Fungsi *Transfer*

Berdasarkan Gambar 4.2 dengan menggunakan metode Ziegler Nichol maka diperoleh nilai berikut,

$$K_{cr} = K = 2.7533$$

$$P_{cr} = 726 - 569 = 157$$

sehingga langkah selanjutnya bisa dilakukan desain kendali PID

4.3 PID gain

Berdasarkan step Ziegler-Nichol maka diperoleh tabel step respon sebagai berikut

Tabel 4.1 Step PID

Tipe Kontrol	Step Respon		
	Kp	Ti	Td
P	1.37665		
PI	1.238985	0.00718	
PID	1.65138	0.01196	20.875

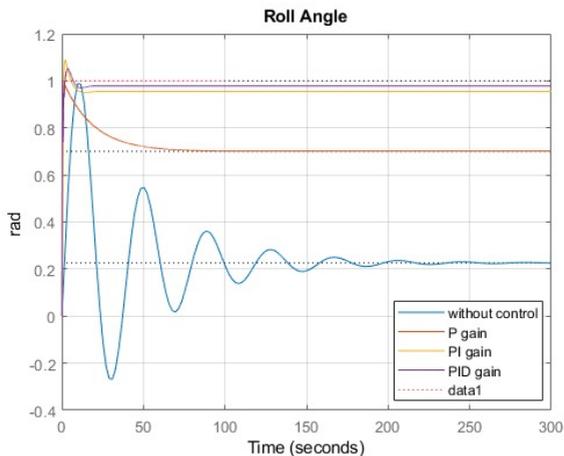
dengan fungsi transfer sebagai berikut

$$Gp(s) = \frac{30.29 s^2 + 642.1 s + 859.6}{s^4 + 30.53 s^3 + 279.8 s^2 + 887.9 s + 1075}$$

$$Gpi(s) = \frac{27.23 s^3 + 604.6 s^2 + 1351 s + 773.7}{0.99 s^5 + 30.5 s^4 + 276.5 s^3 + 850.1 s^2 + 1565 s + 773.7}$$

$$Gpid(s) = \frac{3.598 s^4 + 98.63 s^3 + 612.3 s^2 + 1405 s + 1032}{0.009 s^6 + 0.8748 s^5 + 24.16 s^4 + 250.5 s^3 + 761.7 s^2 + 1534 s + 1032}$$

Hasil simulasi dari ketiganya ketika dipengaruhi kontrol *propotional gain*, *propotional-integral gain*, *propotional-integral-derivatif gain* adalah:

**Gambar 4.3** Plot gabungan P, PI, PID

Analisis:

1. Jika hanya diberikan kontrol *proporsional* maka responya menuju stabil cepat, karena berfungsi mempercepat respon.
2. Jika diberikan kontrol *proporsional-integral* dalam waktu ke 4 sampai 5 detik akan menuju stabil. Namun *error steady state* akan berkurang.
3. Jika diberikan kontrol *proporsional, integral dan derivatif gain* maka hasil dari step respon akan lebih cepat dari pada hanya menggunakan kontrol *Proporsional- integral gain* saja.

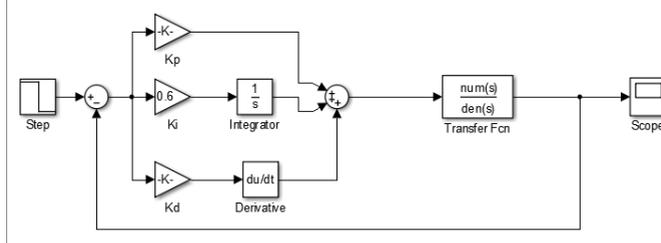
Oleh karena itu, berdasarkan analisis diatas akan didapat bahwa performa terbaik dari kapal adalah menggunakan kontrol PID

4.4 Penerapan Fuzzy-PID pada system

Pada penerapan kontrol Fuzzy-PID ke dalam suatu *system* akan dilihat dan dianalisis performa PID dan Fuzzy-PID berdasarkan *error* kapal yang sesuai.

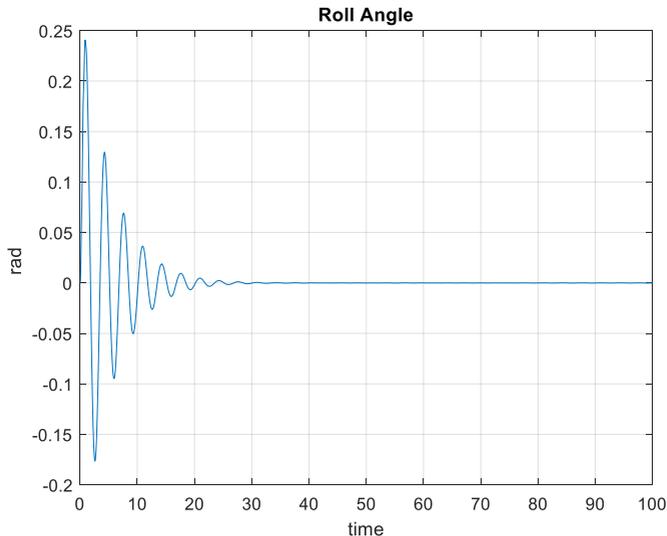
4.4.1 Kontrol PID

Dalam menganalisis ketika menggunakan PID menggunakan input 30^0



Gambar 4.4 Desain Simulink untuk PID

Gambar 4.4 merupakan gambar simulink kontrol PID, terjadi *feedback* yang akan memproses nilai *error* dengan *reference* lalu pada subsistem kendali akan diproses dengan kendali PID.



Gambar 4.5 Hasil Simulasi PID

Analisis dari kontrol PID

Berdasarkan gambar 4.5 diperoleh performansi sebagai berikut:

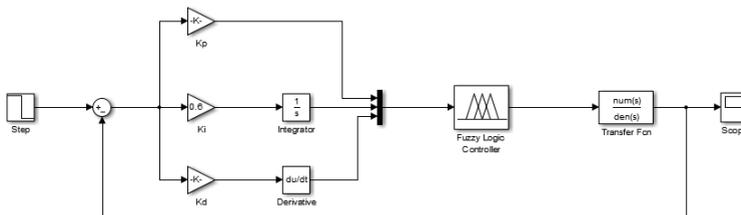
<i>Delay Time</i> (T_d)	= 0.037 s
<i>Rise Time</i> (T_r)	= 0.07 s
<i>Peak Time</i> (T_p)	= 0.88 s
<i>Settling Time</i> (T_s)	= 35 s

Dalam keadaan stabil saat kapal sedang melakukan gerak *roll* untuk mencapai posisi 0 *degree* dari posisi semula (posisi *input* yaitu 30 *degree*) membutuhkan waktu pada detik ke 35, artinya *settling time* pada detik ke 35. Disini kapal akan sangat

terasa guncangnya dan berbahaya karena kapal akan memiliki *amplitude* yang tinggi dan mencapai 0.25, disini terlihat bahwa kontrol PID belum sempurna, bisa saja kita mendapatkan *error* yang kita mau dengan hanya menggunakan PID, namun harus memperhitungkan PID secara manual lagi. Dengan demikian akan di desain kendali Fuzzy PID sehingga untuk mendapatkan *error* yang kita inginkan tidak perlu menghitung manual dari awal lagi.

4.4.2 Desain Kontrol Fuzzy PID

Dengan menggunakan tiga *input* maka desain kontrol dari Fuzzy PID sebagai berikut



Gambar 4.6 Gambar Simulink Fuzzy PID

Merujuk pada Gambar 4.6 terlihat bahwa *input* fuzzy ada 3, yaitu K_p , K_i , dan K_d , dengan nilai *error* yang berbeda maka akan di desain Fuzzy sebagai berikut :

1. *Fuzzification Interface*

Pada proses ini adalah menentukan input dari Fuzzy. Di penelitian tugas akhir ini input yang digunakan adalah e (*error*), P, I, dan D. Dimana anggota e (*error*) adalah $[-0.8 \ 0.8]$, anggota P adalah $[-0.8 \ 0.8]$ anggota I adalah $[-0.3 \ 0.3]$ dan anggota D adalah $[-1 \ 1]$

2. Knowledge Base

Knowledge Base berisi aturan *fuzzy* yang disebut *rule base* dari sekumpulan fungsi keanggotaan (*data base*). Pada penelitian tugas Akhir ini untuk *rule* yang digunakan dalam desain Fuzzy adalah

Tabel 4.2 *Rule* untuk Kp

Error	Error rate						
	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PL	PM	PM	PS	ZE
NM	PL	PL	PL	PM	PM	PS	ZE
NS	PL	PL	PM	ZE	PS	ZE	PS
ZE	PM	PS	PS	NS	ZE	NS	NS
PS	PS	ZE	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	ZE	ZE	NS	NM	NM	NM	NL
PL	ZE	NS	NM	NM	NL	NL	NL

Tabel 4.3 *Rule* untuk Ki

Error	Error rate						
	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NM	NM	NS	ZE	ZE
NM	NL	NM	NM	NS	NS	ZE	ZE
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NS	ZE	ZE	PS	PS	PM
PS	NS	ZE	ZE	PS	PS	PM	PM
PM	ZE	ZE	PS	PM	PM	PM	PL
PL	ZE	ZE	PM	PM	PL	PL	PL

Tabel 4.4 *Rule* untuk Kd

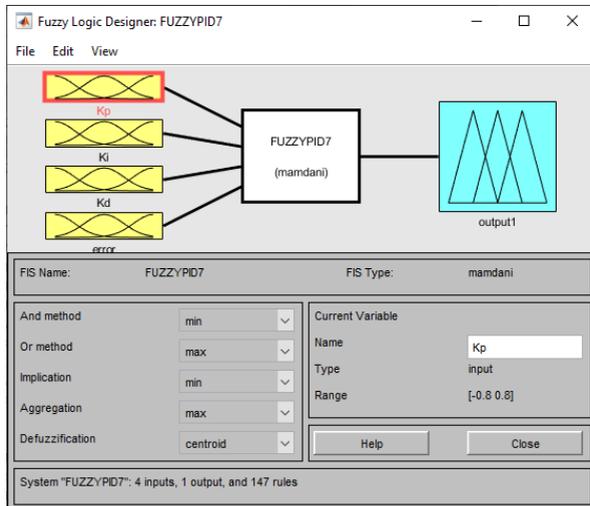
Error	Error rate						
	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	PS	NS	NM	NL	NM	NM	PS
NM	PS	NS	NS	NM	NS	NM	ZE
NS	ZE	NS	ZE	NS	NS	NS	ZE
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	ZE	PS	PS	PS	ZE	PS	PM
PM	ZE	PS	PS	PM	PS	PS	PL
PL	ZE	PS	PM	PL	PS	PM	PL

dengan:

- NL : *Negative Large*
- NM : *Negative Medium*
- NS : *Negative Small*
- ZE : *Zero*
- PL : *Positif Large*
- PM : *Positif Medium*
- PS : *Positif Small*

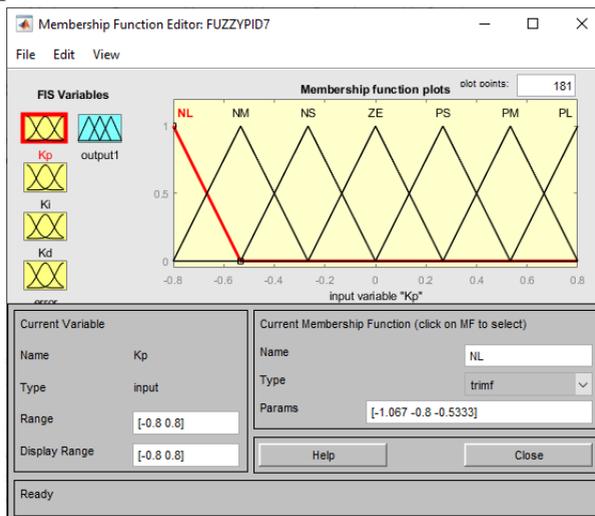
3. *Interface Engine*

Interface Engine merupakan mekanisme atau prosedur, penalaran untuk mendapatkan *fuzzy* output. Dalam penelitian tugas akhir ini fuzzy yang digunakan adalah fuzzy mamdani. Dengan desain fuzzy seperti dibawah ini:

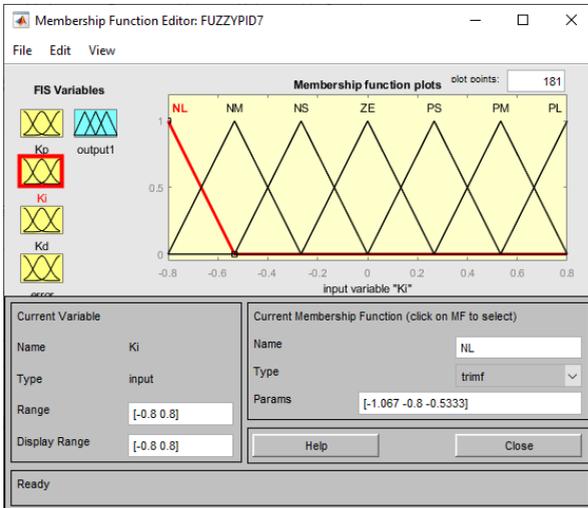


Gambar 4.7 Gambar *Input dan Output*

Gambar 4.7 merupakan gambar fuzzy Mamdani yang digunakan dalam perancangan sistem kontrol penelitian ini.

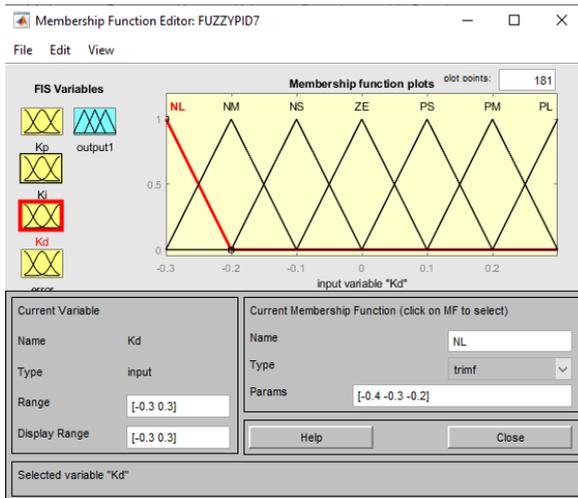


Gambar 4.8 Anggota dari Kp

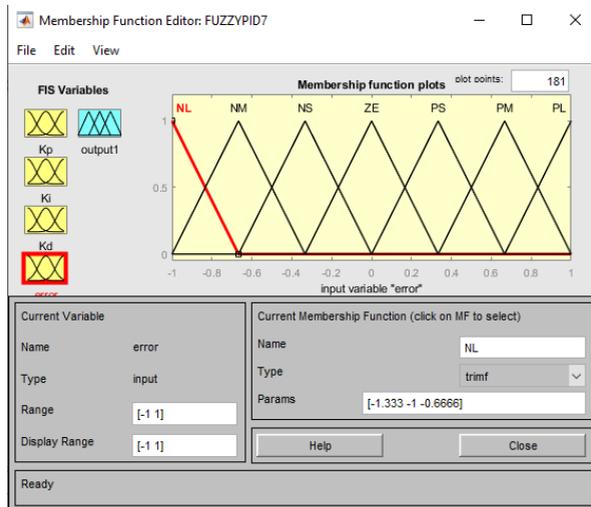


Gambar 4.9 Anggota dari Ki

Berdasarkan Gambar 4.8 dan Gambar 4.9, mendefinisikan anggota dari Kp dan Ki dengan anggota *error* antara -0.8 sampai dengan 0.8.



Gambar 4.10 Anggota dari Kd

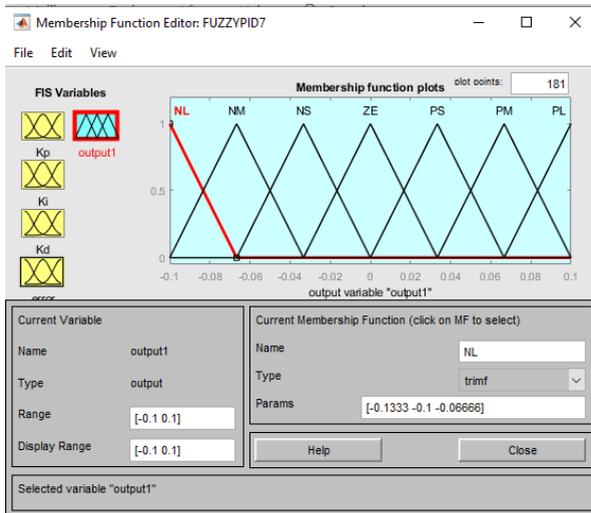


Gambar 4.11 Anggota *input error* yang diinginkan

Berdasarkan Gambar 4.10 dan Gambar 4.11, mendefinisikan anggota dari Kd dan *input error* sistem dengan masing masing anggota untuk Kd -0.3 sampai 0.3 serta untuk *input error* sistemnya -1 sampai dengan 1.

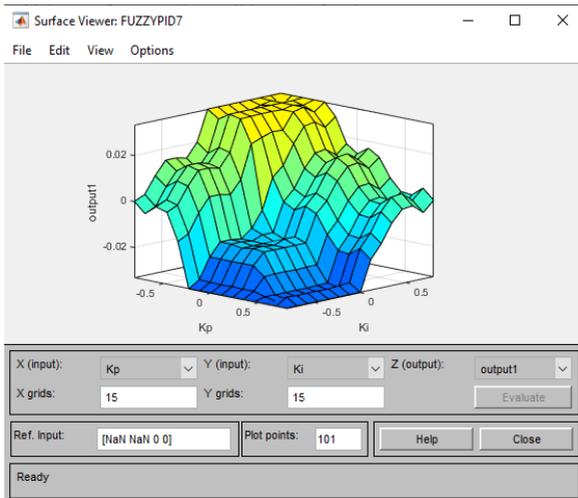
4. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi diperlukan untuk mengubah *fuzzy* output ke nilai *crisp*.



Gambar 4.12 Anggota *output error* yang diinginkan

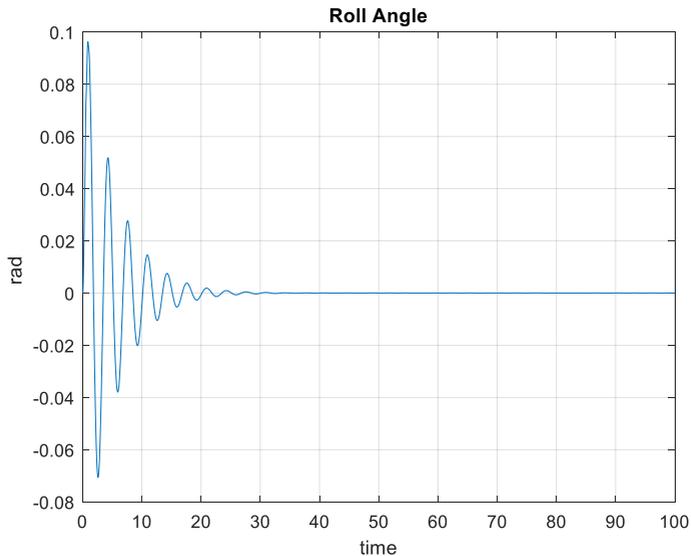
Pada Gambar 4.12 mendefinisikan *output* yang diinginkan dari sistem. Pada sistem ini *output error* yang diinginkan tidak lebih dari -0.1 sampai 0.1



Gambar 4.13 Gambar *surface* Fuzzy

Pada Gambar 4.13 adalah bentuk *surface* dari Fuzzy dengan *rule* seperti yang tertulis di Tabel 4.3, Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

4.4.3 Analisis dari Fuzzy PID



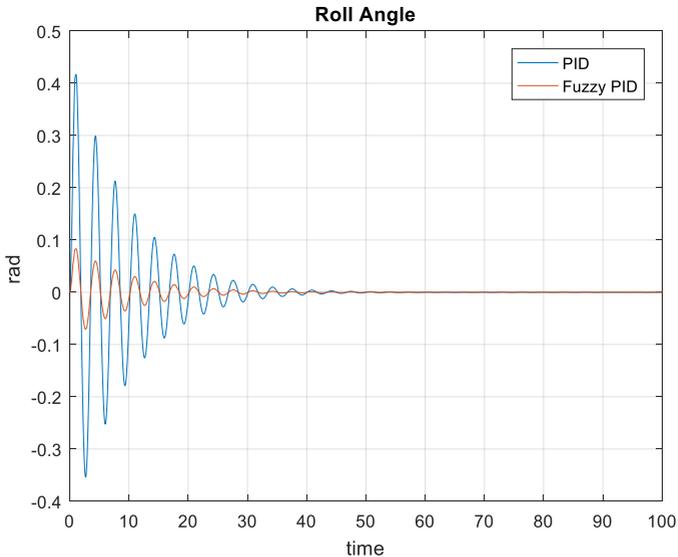
Gambar 4.14 Gambar Kendali Fuzzy PID

Berdasarkan Gambar 4.14 didapat performansi sistem sebagai berikut :

<i>Delay Time</i> (T_d)	= 0.0322 s
<i>Rise Time</i> (T_r)	= 0.0644 s
<i>Peak Time</i> (T_p)	= 0.08 s
<i>Settling Time</i> (T_s)	= 30 s

Dengan *error* yang diharapkan tidak lebih dari -0.1 sampai dengan 0.1, maka ketika kapal menuju keadaan stabil, *error* yang

di dapat ketika menggunakan kontrol fuzzy PID tidak lebih dari 0.1. *Settling time* akan lebih lama yaitu pada detik ke 30, namun performa dari kapal akan lebih halus dan baik bisa terlihat dari tinggi amplitudo pada gelombang kapalnya.



Gambar 4.15. Plot gabungan PID dan Fuzzy PID

Bedasarkan Gambar 4.15 dapat dilihat perbedaan antara kontrol PID dan Fuzzy PID. Jika hanya menggunakan PID, sistem akan cepat menuju *reference* namun *amplitude* yang dihasilkan tinggi, sehingga *error* yang dihasilkan juga tinggi, jika menggunakan Fuzzy PID membutuhkan waktu yang lama menuju *reference* namun *amplitude* berkurang sehingga *error* akan semakin kecil, dengan demikian performa dari kontrol Fuzzy PID lebih baik dibandingkan PID.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari pembahasan pada bab sebelumnya serta saran untuk pengembangan penelitian ini.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengolahan data dan pembahasan pada bab sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa

1. Dalam suatu sistem kapal, jika salah satu *gain proposional* atau *integral* bernilai nol, maka sistem kapal tidak akan stabil dan terjadi osilasi yang terus menerus.
2. Diantara penggunaan sistem kontrol *Proposional-Integral gain* dan *Proposional-Integral-Derivatif gain* akan memberikan performa yang hampir sama, sehingga dapat dikatakan bahwa sebenarnya desain kontrol menggunakan metode Proposional dan Integral sudah cukup. Namun, *Proposional-Integral-Derivatif gain* akan memberikan performa yang sedikit lebih baik dengan mengurangi tinggi gelombang dan mempercepat waktu *settling time*, sehingga gerak kapal juga akan terasa lebih nyaman.
3. Jika menggunakan kontrol PID, apabila terjadi perubahan *error* di dalam sistem, maka kita harus mendesain PID secara manual dari awal.
4. Fuzzy PID dapat mengontrol *error* sesuai yang diharapkan dengan cara membuat *range error*.
5. Dengan menggunakan Fuzzy PID performa kapal jauh lebih baik, kapal menuju *peak time* pada detik ke 0.08 dan *settling time* pada detik ke 30, dengan amplitudo tertinggi

0.098, dengan demikian performa kapal akan jauh lebih halus dari pada hanya menggunakan PID saja

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu mempertimbangkan variabel-variabel lain sehingga akan mendapatkan performa yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Katrina. (2013). *System identification and the modeling of sailing yachts*. Doctoral dissertation, University of Kansas.
- [2] Subiono. (2016). **Sistem Linier dan Kontrol Optimal**. Surabaya: Jurusan Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [3] L.A. Alsafadi, N.A. Chuling, I.V. Mironova. (2018). *Synthesis of Fuzzy Controller Based on Simple PID Controller*. *Jurnal homepage: www.elsevier.com*
- [4] M. A. Hurban. (2012). *Adaptive Speed Controller for the Seafox Autonomous Surface vessel*. *Callhoun*, pp. 28-32.
- [5] K. D. Do dan J. Pan. (2009). *Modelling of ocean Vessels*. Control of ships and underwater Vehicles. London: Springer-Verlag, pp. 39-53.
- [6] K. D. Do dan J. Pan. (2009). *Three Degrees of Freedom Horizontal Model*. Control of ships and underwater Vehicles. London: Springer-Verlag, pp. 54-56.
- [7] B. Singh dan K Vijay. (2015). *Design and Simulation of Autotuning of PID controller using MRAC for Coupled Tanks Systems*. *International Journal of Science and Research*
- [8] L. Cedro dan K. Wiczorkowski. (2019). *Optimizing PID controller gains to model the performance of a quadcopter*. *Jurnal homepage: www.elsevier.com*
- [9] L. Dengcheng dan D.Yong. (2009). *Analytic method for ship non linier rolling in calm water*. *Journal of Ships Mechannics*, pp. 41-46

- [10] Y. Wanglin, X. Haitong dan Y. Songlin. (2014). *Experimental analysis of roll motion model of unmanned planning boat*. Ship Science and Technology.
- [11] BPS. (2017). **Statistik Transportasi Laut**. Jakarta: Publikasi Statistik Transportasi Laut 2017.
- [12] K. Oktavianto, T. Herlambang, dan H. Nurhadi. (2015). *Design of Autonomous Underwater Vehicle motion control using Sliding Mode Control method*. In *2015 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA)* (pp. 162-166). IEEE.
- [13] R. Kurniawan. (2014). **Perancangan Kontroler PID dan Sliding Mode Control untuk Kestabilan Hover pada UAV Trirotor**. *Jurnal Ecotipe, Vol.1, no 1*.
- [14] M.A. Farabi. (2018). *Perbandingan PID Model Reference Adaptive Control dengan L1 Adaptive Control untuk Kemudi Kapal Tanpa Awak dalam Navigasi Waypoint*. Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

LAMPIRAN

Lampiran A. Step Respon PID

```

function [Gc, Kp, Ti, Td, H]= ziegler(key,vars)
Ti =[];
Td=[];
H = 1;
if length(vars)==4,
    K = vars(1);
    L= vars(2);
    T = vars(3);
    N = vars(4);
    a = K*L/T;
    if key == 1, Kp = 1/a;
    elseif key == 2, Kp = 0.9/a; Ti = 3.33*L;
    elseif key == 3 || key == 4, Kp = 1.2/a;
Ti=2*L; Td=L/2;
    end
elseif length (vars)==3,
    K= vars(1); Tc=vars(2); N=vars(3);
    if key ==1; Kp = 0.5*K;
    elseif key == 2, Kp =0.4*K; Ti=0.8*Tc;
    elseif key == 3 || key==4, Kp=0.6*K; Ti =
0.5*Tc; Td = 0.12*Tc;
    end
elseif length(vars) == 5
    K = vars(1); Tc= vars(2); rb = vars(3);
N=vars(5);
    pb = pi*vars(4)/180;Kp=K*rb*cos(pb);
    if key == 2, Ti=-Tc/(2*pi*tan(pb));
    elseif key== 3 || key==4, Ti=
Tc*(1+sin(pb))/(pi*cos(pb));Td=Ti/4;
    end
end
[Gc, H] = writepid(Kp,Ti,Td,N,key);

```

Lampiran B. Step Respon PID

```

function [Gc, H]= writepid(Kp,Ti,Td,N,key)
switch key
case 1, Gc = Kp; H=1;
case 2, Gc = tf(Kp*[Ti,1],[Ti,0]); H=1;
case 3, nn = [Kp*Ti*Td*(N+1)/N,
Kp*(Ti+Td/N),Kp];
        dd = Ti*[Td/N,1,0];
        Gc= tf(nn,dd);
        H=1;
case 4, d0=sqrt(Ti*(Ti-4*Td)); Ti0 = Ti;
        Kp=0.5*(Ti+d0)*Kp/Ti;
        Ti = 0.5*(Ti+d0);
        Td = Ti0-Ti;
        Gc = tf(Kp*[Ti,1],[Ti,0]);
        nH= [(1+Kp/N)*Ti*Td, Kp*(Ti+Td/N), Kp];
        H = tf(nH, Kp*conv([Ti,1],[Td/N, 1]));
case 5, Gc= tf(Kp*[Td*(N+1)/N,1],[Td/N,1]); H
= 1;
end

```

Lampiran C. Zieger-Nicols

```

L = 0.3;
T = 1.5-L;
s = tf('s');
G =
(30.9020*(s^2)+655.08605*s+877.0197)/(s^4+30.52
93*(s^3)+249.4788*(s^2)+245.7763*s+214.9043);
step(G);
grid
k = dcgain(G);
[Gc1, Kp1] = ziegler(1, [k, L, T, 10]);
[Gc2, Kp2, Ti2]=ziegler(2, [k, L, T, 10]);
[Gc3, Kp3, Ti3, Td3]=ziegler(3, [k, L, T, 10]);

figure (2)
G_c1 = feedback(G*Gc1,1)
G_c2 = feedback(G*Gc2,1)
G_c3 = feedback(G*Gc3,1)
step(G, G_c1, G_c2, G_c3)
legend('without kontrol', 'P gain', 'PI
gain', 'PID gain')
line([0,100],[1,1], 'Color', 'red', 'Linestyle',
':')
ylabel('\gamma (Degree)');
title('Pitch Angle');
ylim([0 1.5])
grid on

```

Lampiran D. Mencari Fungsi *Transfer*

```
A = [-0.021 0.119 0.086 0.169 0.1344; 0.022 -  
0.270 1.930 -0.038 0.0145; ...  
      0.042 0.004 0.068 0.050 -0.119; 0.007 0.066  
-0.400 -0.009 -0.078; ...  
      0 0 1 -0.001 0];  
B = -[0.023 -0.038; -0.382 0.013; 0.024 -0.009;  
0.076 -0.016;0.000 0.000];  
C = [0 0 0 0 1];  
D = [0 0];  
G = ss(A,B,C,D);  
[num,den] = ss2tf(A,B,C,D,1)  
k = dcgain(num,den)
```

Lampiran E. Plot Fungsi Transfer

```
s = tf('s')
G = (-0.0239*(s^3) -
0.0105*(s^2)+0.0011*(s)+0.00001) / ((s^5)+0.232*(
s^4)+0.1142*(s^3)+0.0243*(s^2)+0.0003*(s)+0.000
01);
step(G);
```


BIODATA PENULIS



Penulis biasa dipanggil Muhammad Nafi'ul Alam. Ia dilahirkan di Trenggalek pada tanggal 03 Februari 1996 sebagai anak pertama dari 4 bersaudara. Pendidikan formal yang pernah penulis tempuh antara lain SDN 1 Ngetal, SMPN 1 Trenggalek, dan SMAN 1 Trenggalek. Setelah lulus SMA, penulis melanjutkan S1 Matematika di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2014. Di jurusan Matematika ITS penulis mengambil bidang studi Pemodelan dan Simulasi Sistem. Apabila ingin memberikan saran, kritik dan pertanyaan mengenai Tugas Akhir ini, dapat disampaikan melalui *e-mail* fiulalam@gmail.com