



TUGAS AKHIR - KM184801

**PERANCANGAN SISTEM STABILISASI *RUDDER ROLL*
PADA KAPAL PERANG KELAS SIGMA MENGGUNAKAN
METODE *FUZZY SLIDING MODE CONTROL (FSMC)***

ANANG SETYO NUGROHO
0611144000094

Dosen Pembimbing
Dr. Dra. Mardlijah, MT

Departemen Matematika
Fakultas Matematika, Komputasi, dan Sains Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR– SM141501

**PERANCANGAN SISTEM STABILISASI *RUDDER ROLL*
PADA KAPAL PERANG KELAS SIGMA
MENGUNAKAN METODE *FUZZY SLIDING MODE
CONTROL* (FSMC)**

**ANANG SETYO NUGROHO
NRP 0611144000094**

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

**DEPARTEMEN MATEMATIKA
Fakultas Matematika Komputasi dan Sains Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019**



FINAL PROJECT– SM141501

***DESIGN OF RUDDER ROLL STABILIZATION SYSTEM
ON SIGMA CLASS WARSHIP USING FUZZY SLIDING
MODE CONTROL METHOD***

**ANANG SETYO NUGROHO
NRP 0611144000094**

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

**DEPARTMENT OF MATHEMATIC
Faculty of Mathematics Computation and Data Science
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019**

LEMBAR PENGESAHAN

**PERANCANGAN SISTEM STABILISASI RUDER ROLL
PADA KAPAL PERANG KELAS SIGMA MENGGUNAKAN
METODE FUZZY SLIDING MODE CONTROL**

**DESIGN OF RUDDER ROLL STABILIZATION SYSTEM ON
SIGMA CLASS WARSHIP USING FUZZY SLIDING MODE
CONTROL METHOD**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Matematika pada
Bidang Studi Matematika Terapan

Program Studi S-1 Departemen Matematika
Fakultas Matematika, Komputasi, dan Sains Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

ANANG SETYO NUGROHO

NRP. 06111440000094

Menyetujui

Dosen Pembimbing,



Dr. Dra. Mardlijah, MT.

NIP: 19670114 199102 2 001

Mengetahui,

Kepala Departemen Matematika



Dr. Imam Mukhlash, S.Si., MT

NIP: 19700831 199403 1 003

Surabaya, Juli 2019

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**PERANCANGAN SISTEM STABILISASI *RUDDER ROLL*
PADA KAPAL PERANG KELAS SIGMA MENGGUNAKAN
METODE *FUZZY SLIDING MODE CONTROL (FSMC)***

Nama : Anang Setyo Nugroho
NRP : 0611144000094
Jurusan : Matematika FMKSD-ITS
Pembimbing : Dr. Dra. Mardlijah, MT

ABSTRAK

Dalam kapal perang, stabilitas yang baik adalah salah satu hal yang sangat penting dalam pengoperasian kapal perang di lautan. Sistem kemudi kapal sangat berpengaruh pada stabilitas kapal tersebut. Kemudi menggunakan *rudder* sangat berpengaruh terhadap stabilitas *rolling* kapal. Gerakan *roll* yang terlalu besar dapat menyebabkan kerugian dalam segi materi seperti penggunaan bahan bakar yang berlebih jika amplitudo *rolling* terlalu besar dan juga membahayakan awak kapal. *Rudder roll* adalah konsep *rudder* yang berfungsi untuk mengendalikan *heading* hingga gerakan *roll* berkurang. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem stabilisasi *rudder roll* pada kapal perang kelas SIGMA (*Ship Integrated Geometrical Modularity Approach*) dengan metode *Fuzzy Sliding Mode Control*. Perancangan sistem ini dilakukan secara simulasi menggunakan Matlab. Dalam penelitian ini gangguan gelombang diabaikan. Hasil simulasi dengan kendali FSMC mampu memperbaiki performansi stabilitas pada kapal perang Kelas SIGMA.

Kata Kunci : Kapal Perang Kelas SIGMA, Fuzzy Logic Control, Fuzzy Sliding Mode Control, Rudder Roll

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**DESIGN OF RUDDER ROLL STABILIZATION SYSTEM ON
SIGMA CLASS WARSHIP USING FUZZY SLIDING MODE
CONTROL METHOD**

Name : Anang Setyo Nugroho
NRP : 0611144000094
Department : Mathematics
Supervisor : Dr. Dra. Mardlijah, MT

ABSTRACT

In warships, good stability is one of the most important things in the operation of warships in the ocean. The ship's steering system is very influential on the stability of the ship. Steering using a rudder greatly affects the rolling stability of the ship. Roll movements that are too large can cause losses in terms of material such as excessive use of fuel if the rolling amplitude is too large and also endanger the crew. Rudder roll is a rudder concept that serves to control heading until the roll movement is reduced. This study aims to design a rudder roll stabilization system on SIGMA (Ship Integrated Geometrical Modularity Approach) warships with the Fuzzy Sliding Mode Control method. The design of this system is done in simulation using Matlab. In this study wave interference was ignored. The simulation results with FSMC controls are able to improve stability performance on SIGMA Class warships.

Keywords: SIGMA Class Warship, Fuzzy Logic Control, Fuzzy Sliding Mode Control, Rudder Roll.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'aalamiin, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan limpahan rahmat, taufik serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul

**“PERANCANGAN SISTEM STABILISASI RUDDER
ROLL PADA KAPAL PERANG KELAS SIGMA
MENGUNAKAN METODE *FUZZY SLIDING MODE
CONTROL (FSMC)*”**

sebagai salah satu syarat kelulusan Program Sarjana Jurusan Matematika FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan kepada:

1. Ketua Jurusan Matematika ITS yang telah memberikan dukungan dan motivasi selama perkuliahan hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Kaprodi S1 Jurusan Matematika dan sekretaris prodi S1 yang telah memberikan arahan akademik selama penulis kuliah di Jurusan Matematika FMIPA-ITS.
3. Ibu Dr. Dra. Mardlijah, MT sebagai dosen pembimbing yang telah memberikan motivasi dan pengarahan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
4. Bapak Subchan, Ph.D , Bapak Drs. Suharmadi, Dipl. Sc, M.Phil, Ibu Dra. Nur Asiyah, M.Si , Ibu Dian Setyawati, S.Si, M.Si selaku dosen penguji.
5. Ibu Endah Rokhmati M.P., Ph.D sebagai dosen wali yang telah memberikan arahan akademik selama penulis kuliah di Jurusan Matematika FMIPA-ITS.
6. Bapak dan Ibu dosen serta para staf Jurusan Matematika ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

7. Kedua orang tua saya, Bapak Nanang Mardiyanto dan Ibu Koesetyaning atas dukungan dan semangat yang telah diberikan.
8. Teman-teman saya Ivan, Yasir, Huda, Brian, Ari, Kresna, Wikjung, Itok, Indra dan semua teman-teman penghuni lab Pemodelan yang saya sayangi yang telah membantu dan memotivasi saya.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini masih mempunyai banyak kekurangan. Kritik dan saran dari berbagai pihak yang bersifat membangun juga sangat diharapkan sebagai bahan perbaikan di masa yang akan datang.

Surabaya, 13 Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

	Hal
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xix
DAFTAR NOTASI.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat.....	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Penelitian Terdahulu.....	7
2.2 Deskripsi Kapal.....	9
2.3 Model Dinamika Kapal.....	10
2.4 Pemodelan Dinamika <i>Rudder, Coupling Steering dan Rolling</i>	15
2.5 Sistem Pengedali	18
2.6 <i>Sliding Mode Control (SMC)</i>	19
2.6.1 Fungsi <i>Switching</i>	19
2.6.2 Permukaan <i>Sliding</i>	20
2.6.3 Kondisi <i>Sliding</i>	20
2.7 <i>Fuzzy Logic Control (FLC)</i>	22
2.7.1 Fungsi Keanggotaan (<i>Membership Function</i>) ..22	
2.7.2 Struktur Dasar Pengedali <i>Fuzzy</i>	24

	Hal
2.7.3 Aturan Dasar Logika <i>Fuzzy</i> Sistem Pengendali	25
2.8 <i>Fuzzy Sliding Mode Control</i> (FSMC).....	26
2.9 Spesifikasi Performansi Respon Waktu.....	29
BAB III METODE PENELITIAN	33
3.1 Tahap Penelitian.....	33
3.2 Diagram Alir Penelitian.....	34
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Pemodelan Dinamika Kapal dan <i>Rudder Roll</i>	37
4.1.1 Pemodelan Sistem Dinamika Kapal.....	37
4.1.2 Pemodelan Dinamika <i>Rudder</i> dan <i>Roll Damper</i>	39
4.2 Desai Kendali Sistem Stabilisasi Rudder Roll pada kapal dengan metode FSMC	39
4.3 Analisa hasil simulasi pada stabilisasi kapal perang ...	43
4.3.1 Simulasi kestabilan kapal perang tanpa kendali FSMC	44
4.3.2 Simulasi Kestabilan kapal perang dengan kendali FSMC	48
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	53
5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA.....	55
LAMPIRAN.....	57

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1 Kapal Perang KRI Diponegoro.....	10
Gambar 2.2 Gerak translasi pada kapal.....	11
Gambar 2.3 Gerak rotasi pada kapal.....	11
Gambar 2.4 Gerakan pada kapal.....	12
Gambar 2.5 Sistem kemudi <i>Van Amorengen</i>	16
Gambar 2.6 Filter $S(\mathbf{x}, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e$	20
Gambar 2.7 Kondisi <i>sliding</i>	21
Gambar 2.8 Fungsi keanggotaan segitiga.....	23
Gambar 2.9 Fungsi keanggotaan trapezium.....	24
Gambar 2.10 Struktur dasar <i>fuzzy logic control</i>	25
Gambar 2.11 Interpretasi grafis dari s_p dan d	28
Gambar 2.12 Spesifikasi Respon Transient.....	30
Gambar 4.1 Diagram blok <i>rudder</i>	39
Gambar 4.2 Plant loop terbuka.....	41
Gambar 4.3 Plan perhitungan s_p dan d	42
Gambar 4.4 Fungsi keanggotaan s_p	43
Gambar 4.5 Fungsi keanggotaan d	43
Gambar 4.6 Fungsi keanggotaan u	44
Gambar 4.7 Kecepatan Sudut heading kapal tanpa kendali FSMC.....	44
Gambar 4.8 Sudut <i>heading</i> kapal tanpa kendali FSMC ...	45
Gambar 4.9 Sudut <i>rolling</i> kapal tanpa kendali FSMC.....	45
Gambar 4.10 Kecepatan sudut <i>heading</i> kapal dengan kendali FSMC.....	48
Gambar 4.11 Sudut <i>heading</i> kapal dengan kendali FSMC.....	48
Gambar 4.12 <i>Rolling</i> kapal dengan kendali FSMC.....	49

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 2.1 Derajat kebebasan kapal	12
Tabel 2.2 Bentuk diagonal aturan <i>fuzzy</i> untuk FLC.....	26
Tabel 2.3 Aturan umum <i>fuzzy</i> untuk pengendali FSMC	29
Tabel 4.1 Spesifikasi kapal perang KRI Diponegoro.....	37
Tabel 4.2 Karakteristik Respon Sistem kecepatan sudut <i>heading</i> tanpa kendali FSMC.....	46
Tabel 4.3 Karakteristik Respon Sistem sudut <i>heading</i> tanpa kendali FSMC	46
Tabel 4.4 Karakteristik Respon Sistem <i>rolling</i> tanpa kendali FSMC	47
Tabel 4.5 Karakteristik Respon Sistem kecepatan sudut <i>heading</i> dengan kendali FSMC	50
Tabel 4.6 Karakteristik Respon Sistem sudut <i>heading</i> dengan kendali FSMC	50
Tabel 4.7 Karakteristik Respon <i>rolling</i> dengan kendali FSMC.....	51

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Pemodelan Dinamika Kapal	57
Lampiran B Pemodelan <i>Roll Damper</i>	61
Lampiran C Model Simulasi	63

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

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>sway</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

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang dari permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini, rumusan masalah yang muncul akibat latar belakang, batasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika penulisan yang diuraikan pada bagian akhir bab ini.

1.1 Latar Belakang

Kondisi geografis dan wilayah dalam suatu negara merupakan termasuk faktor penting dalam menentukan strategi pertahanan dan keamanan dalam negara tersebut. Secara geografis Indonesia membentang dari 6° LU sampai 11° LS dan 92° sampai 142° BT, terdiri dari pulau besar dan kecil yang jumlahnya kurang lebih 17.504 pulau. Tiga perempat wilayah Indonesia adalah laut (5.9 juta km²), dengan panjang garis pantai 95.161 km, terpanjang kedua setelah Kanada [1]. Dengan kondisi laut yang dimiliki Indonesia, kapal menjadi salah satu pilihan yang tepat untuk sistem pertahanan di Indonesia.

Kapal menurut kamus besar bahasa Indonesia dapat diartikan sebagai kendaraan pengangkut penumpang dan barang di laut (sungai dan sebagainya) [2]. Kapal itu sendiri memiliki berbagai macam jenis menurut dari fungsinya. Salah satunya adalah Kapal perang. Kapal perang merupakan kapal yang digunakan oleh pihak militer untuk keperluan yang berkaitan dengan kemiliteran negara. Misalnya untuk melakukan patrol keamanan di perairan yang biasanya dilakukan di perbatasan wilayah , logistik, pengangkutan pasukan militer, dan keperluan lainnya [3].

Dalam kapal perang, kestabilan yang baik adalah salah satu hal yang sangat penting dalam pengoperasian kapal perang di lautan. Pengendalian kestabilan juga dibutuhkan dalam pergerakan kapal perang agar kapal tidak melakukan pergerakan yang tidak diperlukan yang menyebabkan kerugian. Sistem kemudi atau aktuator kapal perang terdiri atas sistem *ballast* dan *rudder*. Sistem *ballast* berfungsi untuk menyesuaikan tingkat kemiringan dan draft kapal. Sementara *rudder* berfungsi mengendalikan *heading* sedemikian hingga gerakan *roll* berkurang [4]. Besarnya Amplitudo yang besar dari gerakan *rolling* ini dapat menyebabkan kerugian materi seperti penggunaan bahan bakar yang berlebih jika amplitudo *rolling* terlalu besar. Dan kemungkinan terburuknya juga akan membahayakan keselamatan awak kapalnya. Pada tahap pertama, ketika *rudder* dikemudikan, umumnya *heels* kapal pada posisi arah ke dalam, karena momen *roll* bekerja pada *rudder*. Pada tahap berikutnya, *main heels* dapat berubah ke arah luar. Penggabungan antara *rudder* dan gerakan *roll* ini telah menjadi permasalahan yang menarik dari sudut pandang stabilisasi *roll* menggunakan *rudder*. Jika gerakan *rudder* dapat berpengaruh terhadap perubahan *roll* sesuai dengan *course deviation*, maka gerakan *roll* dapat direduksi beberapa derajat [5]. Stabilitas *rudder roll* dipengaruhi oleh beberapa variabel antara lain sudut *rudder*, nonlinieritas *steering machine*, dan gangguan berupa frekuensi dan amplitudo gelombang laut yang berubah-ubah [6]. Dalam sistem stabilisasi *rudder roll*, controller di desain untuk meningkatkan redaman, mengurangi amplitudo *roll*, dan mengontrol sudut *heading* [7]. Sistem kontrol *rudder roll* berkaitan dengan *steering* dan *rolling*. *Rolling* ini dipengaruhi oleh *sway* dan *yaw*.

Pada penelitian sebelumnya, perancangan sistem stabilisasi *rudder roll* telah dilakukan oleh Alfany H, et al [4]. Pada penelitian tersebut perancangan sistem stabilisasi *rudder roll* dilakukan pada kapal perang Kelas SIGMA KRI Diponegoro. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah menggunakan *Fuzzy Logic Control* atau kontrol logika fuzzy. Metode logika fuzzy yang digunakan adalah logika fuzzy sugeno-takagi. Selain *Fuzzy Logic Control* (FLC), terdapat metode kontrol lain yaitu *Sliding Mode Control* (SMC) yang cukup tangguh untuk menangani adanya ketidakpastian dalam sistem dan mampu bekerja pada sistem nonlinear. Namun metode ini juga memiliki kekurangan yaitu sering munculnya *Chattering* yang menyebabkan sistem menjadi tidak stabil [8]. Untuk mengurangi adanya *chattering* pada metode *Sliding Mode Control* (SMC) digunakan *Fuzzy Logic Control* (FLC) yang dikenal dengan metode *Fuzzy Sliding Mode Control* [9].

Berdasarkan keterangan-keterangan yang telah diuraikan diatas, maka peneliti tertarik untuk melakukan perancangan sistem stabilisasi *rudder roll* menggunakan metode *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC). Penggunaan metode *Fuzzy Sliding Mode Control* disini diharapkan mampu menghasilakan spesifikasi performansi yang lebih baik dibandingkan dengan spesifikasi performansi tanpa kendali FSMC, sehingga mendapatkan kontrol yang baik untuk pengendali sistem stabilisasi *rudder roll* pada kapal perang kelas SIGMA.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana penerapan *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC) pada perancangan sistem stabilisasi *rudder roll* pada kapal perang Kelas SIGMA?
2. Bagaimana Analisa performansi sistem stabilisasi *rudder roll* pada kapal perang Kelas SIGMA menggunakan *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC)?

1.3 Batasan Masalah

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini dibatasi pada:

1. Spesifikasi kapal yang digunakan adalah KRI Diponegoro
2. Simulasi menggunakan *software* Matlab
3. Model yang digunakan pada *maneuvering control* menggunakan model Nomoto orde dua.
4. Gangguan Gelombang laut diabaikan

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Menerapkan *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC) pada perancangan sistem stabilisasi *rudder roll* pada kapal perang kelas SIGMA.
2. Melakukan Analisa performansi sistem stabilisasi *rudder roll* pada kapal perang Kelas SIGMA menggunakan *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC).

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan gambaran bagaimana *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC) bekerja pada sistem stabilisasi *rudder roll* pada kapal perang kelas SIGMA
2. Sebagai sumbangan ide dan informasi khususnya bagi yang ingin melakukan penelitian sejenis.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memberikan gambaran mengenai keseluruhan isi tugas akhir ini, maka akan dikemukakan sistematika penulisan dalam tugas akhir ini sebagai berikut:

1. BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika penulisan hasil tugas akhir.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dibahas tentang teori-teori yang berkaitan dengan pengerjaan tugas akhir yang dilakukan, seperti model dinamika kapal, teori tentang pengendali FSMC.

3. BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini berisi mengenai tahapan-tahapan dalam proses menyelesaikan masalah dan mencapai tujuan tugas akhir.

4. BAB IV PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas tentang data hasil penelitian dari simulasi pengendali FSMC.

5. BAB V PENUTUP

Bab ini menjelaskan kesimpulan yang diperoleh dari pembahasan dan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dijelaskan mengenai beberapa penelitian terdahulu yang terkait dengan penulisan tugas akhir ini, deskripsi kapal perang KRI Diponegoro Kelas SIGMA, pemodelan dinamika kapal, dinamika *rudder*, *coupling steering* dan *rolling*, dan *Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)*.

2.1 Penelitian Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang terkait dengan penulisan tugas akhir ini, adalah sebagai berikut:

1. Hardiyanty, A., Aulia, S. A., & Masroeri, A. A. (2013) dalam penelitiannya yang berjudul "Perancangan Sistem Stabilisasi Rudder Roll pada Kapal Perang Kelas SIGMA dengan Kontrol Logika Fuzzy" merancang system stabilisasi kemudi *roll* pada kapal perang kelas SIGMA dengan menggunakan kontrol logika fuzzy. Perancangan sistem dilakukan dengan menggunakan spesifikasi Kapal PKR KRI Diponegoro Kelas SIGMA. Simulasi perancangan dilakukan menggunakan Simulink Matlab dan control logika *fuzzy* Sugeno-Takagi. Kesimpulan performansi sistem stabilisasi kemudi yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:
 - Stabilitas *rolling* dengan setpoint *heading* 20° dan 30° mampu menahan gangguan sebesar gelombang hingga *state* 7 dengan sudut *roll* maksimum sebesar 2.233° dan 3.95°
 - *Maximum overshoot* yang dihasilkan oleh sistem *close loop* dengan gangguan gelombang telah memenuhikriteria kestabilan sistem. *Maximum overshoot* sudut *heading* dengan *setpoint* 20° lebih kecil daripada *setpoint* 30° .
 - *Error steady state* sistem *close loop* dengan gangguan gelombang *state* 1 sampai 7 telah memenuhi kriteria

kestabilan sistem. *Error steady state* terkecil terdapat pada respon sistem *close loop* dengan gangguan gelombang laut *state enam setpoint heading 30°*.

- Respon uji *close loop* dengan gangguan gelombang menggunakan *setpoint heading 30°* lebih cepat daripada *setpoint 20°*. Hal tersebut disebabkan pergerakan kemudi sebesar 30° membutuhkan momen dan gaya yang besar sehingga respon sistem lebih cepat.
 - Perancangan sistem stabilisasi *rudder roll* menghasilkan performansi manuver sesuai dengan standar IMO dengan jarak *advanced diameter* sebesar 235 m atau 2.59 Lpp dan *tactical diameter* sebesar 235 m atau 2.59 Lpp.
2. Kresna Oktafianto dalam tesisnya yang berjudul “Desain dan Analisa Kendali Gerak *Autonomous Underwater Vehicle* menggunakan Metode *Fuzzy Sliding Mode Control*”, melakukan desain control dengan menggunakan metode *Sliding Mode Control (SMC)*. Hasil yang diperoleh, FSMC mampu memperbaiki *error steady state* dengan rata-rata 16.63% jika dibandingkan dengan SMC.
 3. Oktia Dwi Irna Aini dalam tugas akhirnya yang berjudul “Sistem Pengendali *Maneuver* Pada Kapal Perang Dengan Metode *Sliding Mode Control*”, melakukan perancangan sistem pengendali *maneuver* pada kapal perang KRI Diponegoro dengan menggunakan metode *Sliding Mode Control (SMC)*.
 4. Mardlijah, Wawan Ismanto, I Gst Ngr Rai Usadha dalam penelitiannya yang berjudul “Desain Kontrol Posisi Pada Panel Surya Dengan Menggunakan Metode *Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)*”, merancang desain kontrol posisi pada panel surya agar posisi panel surya selalu pada posisi tegak lurus dengan menggunakan metode *Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)*. Penelitian ini dilakukan dengan cara simulasi. Hasil simulasi dibandingkan dengan hasil dari sistem pengendali

Sliding Mode Control (SMC) dan *Fuzzy Logic Control (FLC)*.

Pada penelitian ini didapat kesimpulan sebagai berikut :

- Performansi sistem pengendali FSMC pada sistem panel surya memiliki beberapa kelebihan dibandingkan sistem pengendali SMC dan FLC, yaitu lebih *robust* terhadap berbagai gangguan baik eksternal maupun internal, lebih mudah dan sederhana dalam perancangannya, serta memiliki waktu respon lebih cepat.
- Masih terdapat beberapa kekurangan yaitu membutuhkan penalaan *gain* agar logika *fuzzy* dapat mencapai performansi yang baik serta dapat bekerja dengan baik serta adanya *overshoot* pada pengujian gangguan yang bersifat *eksternal*, walaupun *overshoot* yang ada masih dapat ditolerir.

2.2 Deskripsi Kapal

Dalam penelitian ini kapal yang digunakan adalah kapal perang KRI Diponegoro. KRI Diponegoro (365) merupakan kapal pertama dari korvet kelas SIGMA milik TNI Angkatan Laut. Kapal ini bertugas sebagai kapal patrol dengan kemampuan anti-kapal permukaan, anti-kapal selam dan anti-pesawat udara. [10]



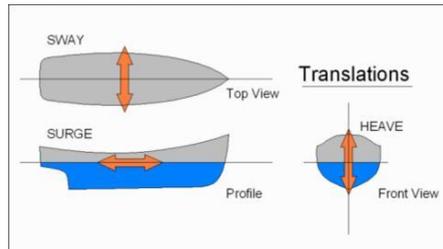
Gambar 2.1 Kapal Perang KRI Diponegoro

Kapal KRI kelas sigma ini memiliki spesifikasi panjang $\pm 90,71$ meter, lebar $\pm 13,02$ meter, dan tinggi $\pm 8,2$ meter, tiba di Indonesia pada 31 Agustus 2007 dan langsung bergabung di jajaran Komando Armada RI Kawasan Timur (Koarmatim) TNI AL. Kapal yang memiliki kecepatan jelajah 12/14-18/28 knot atau setara dengan 40 kilometer per jam itu, dilengkapi senjata anti serangan udara, anti kapal atas air, anti kapal selam dan perang elektronika. Stabilizer yang digunakan adalah *Passive Roll Stabilization Tank* atau *Active Fin Stabilizer*. Sistem kemudi kapal terdiri atas sistem ballast dan rudder. Rudder yang digunakan pada kapal perang KRI Diponegoro adalah tipe ROLL ROYCE. [4]

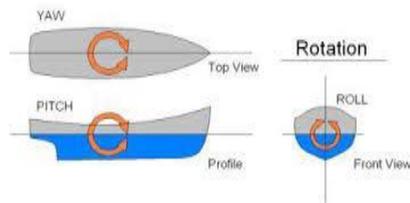
2.3 Model Dinamika Kapal

Pada umumnya gerakan yang dialami sebuah kapal ada dua macam, yaitu gerakan translasi dan rotasi. Gerakan translasi ini meliputi *surge*, *sway* dan *heave*. Sementara gerakan rotasi meliputi *roll*, *pitch* dan *yaw* [11]. Gerakan *surge* adalah gerakan maju, gerakan *sway* adalah gerakan ke samping, gerakan *heave* adalah gerakan ke atas. Gerakan *roll* adalah gerakan memutar ke bawah,

gerakan *pitch* adalah gerakan memutar ke depan, dan gerakan *yaw* adalah gerakan memutar ke bawah.

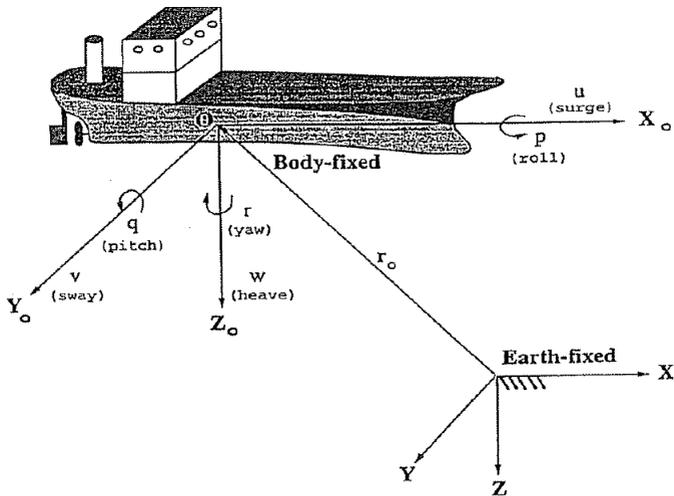


Gambar 2.2. Gerak translasi pada kapal[12]



Gambar 2.3. Gerak rotasi pada kapal[12]

Pada gambar 2.4. dapat dilihat keseluruhan 6 derajat kebebasan yang dialami kapal.



Gambar 2.4. Gerakan pada kapal[13].

Tabel 2.1. Derajat kebebasan kapal[13].

DOF		Force and Moment	Linier and angular vel.	Position and euler angles
1	Motion in the x-direction (surge)	X	u	X
2	Motion in the y-direction (sway)	Y	v	Y
3	Motion in the z-direction (heave)	Z	w	Z
4	Rotation about the x-axis (roll)	K	p	φ
5	Rotation about y-axis (pitch)	M	q	θ
6	Rotation about the z-axis (yaw)	N	r	ψ

Dalam mengendalikan *maneuver* kapal *rudder* merupakan aktuator yang digunakan pada kapal. *Rudder* mempunyai kemampuan

dalam menjaga arah sesuai dengan perintah dari sinyal kendali [fossen]. Kontrol objektif dari sinyal kendali haluan kapal adalah :

$$\psi \rightarrow \psi_d \quad (2.1)$$

dimana ψ merupakan sudut *yaw* atau haluan kapal yang sesungguhnya dan ψ_d adalah sudut *yaw* atau haluan kapal yang diinginkan. Dimana $\dot{\psi} = r$ dan r adalah kecepatan *yaw*. Sudut haluan, kecepatan haluan dan *rudder* adalah faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan kapal. Sehingga pada tugas akhir ini diterapkan model Nomoto orde satu. Pada model ini hanya mempertimbangkan satu derajat kebebasan system dinamik kapal, antara lain r (kecepatan *yaw*), dan satu *control input* δ (sudut kemudi).

Model *plant* dari dinamika kapal didapatkan dari pendekatan yang dilakukan oleh Nomoto (1957) sebagai bentuk matematis orde 1 [13]:

$$\frac{r}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1+T_3s)}{(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad (2.2)$$

dimana r adalah kecepatan yaw dan δ adalah sudut kemudi kapal.

Parameter-parameter dari fungsi transfer diatas diperoleh dari :

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

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

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

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

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

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}; N(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r \\ -N_v & mx_G u_0 - N_r \end{bmatrix};$$

$$b = \begin{bmatrix} Y_{\delta} \\ N_{\delta} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Parameter dalam penentuan gain kendali yang diturunkan Nomoto berdasarkan linierisasi dari model Davidson dan Schiff (1946), ddimanan bentuk persamaan gain kendali Nomoto adalah [13]:

$$K = \frac{n_{21}b_2 - n_{11}b_1}{\det(N)} \quad (2.8)$$

dengan

$$\det(N) = Y_v(N_r - mx_G u) - N_v(Y_r - mu) \quad (2.9)$$

$$\det(M) = (m - Y_{\dot{v}})(I_z - N_{\dot{r}}) - (mx_G - N_{\dot{v}})(mx_G - Y_{\dot{r}}) \quad (2.10)$$

Dimana $n_{11} = -Y_v$, $n_{21} = -N_v$

$$b_1 = \frac{(I_z - N_{\dot{r}})Y_{\delta} - (mx_G - Y_{\dot{r}})N_{\delta}}{\det(M)} \quad (2.11)$$

$$b_2 = \frac{(m - Y_{\dot{v}})N_{\delta} - (mx_G - N_{\dot{v}})Y_{\delta}}{\det(M)} \quad (2.12)$$

dimana:

m = massa kapal,

$Y_{\dot{v}}$ = turunan gaya arah *sway* terhadap \dot{v} ,

$N_{\dot{r}}$ = turunan gaya *yaw* terhadap \dot{r}

$N_{\dot{v}}$ = turunan momen *yaw* terhadap \dot{v}

$Y_{\dot{r}}$ = turunan gaya *syaw* terhadap \dot{r} ,

Y_v = turunan gaya *sway* terhadap v ,

N_v = turunan momen *yaw* terhadap v ,

I_z = momen inersia terhadap sumbu z

Koefisien hidrodinamika merupakan bentuk nondimensi yang dinyatakan sebagai fungsi dari rasio panjang terhadap lebar dari kapal, dengan dikalikan sebuah konstanta tertentu. Untuk memperoleh besaran gaya dikalikan dengan $\frac{1}{2} \rho U^2 L^2$ dan momen dikalikan dengan $\frac{1}{2} \rho U^2 L^3$ [12]. Dimana ρ = rapat massa air laut ($1,025 \text{ kg/m}^3$), L = panjang kapal, U = kecepatan servis kapal, B = lebar kapal, T = kedalaman kapal, C_B = koefisien blok. Sehingga diperoleh :

$$\frac{-Y'_v}{\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2} = 1 + 0.16 \frac{C_{BB}}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{L}\right)^2 \quad (2.13)$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2} = 0.67 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.0033 \left(\frac{B}{T}\right)^2 \quad (2.14)$$

$$\frac{-N'_v}{\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2} = 1.1 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.041 \left(\frac{B}{T}\right) \quad (2.15)$$

$$\frac{-N'_r}{\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2} = \frac{1}{12} + 0.017 \frac{C_{BB}}{T} - 0.33 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.16)$$

$$\frac{-Y'_v}{\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2} = 1 + 0.4 \frac{C_{BB}}{T} \quad (2.17)$$

$$\frac{-Y'_r}{\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2} = -\frac{1}{2} + 2.2 \left(\frac{B}{L}\right) - 0.08 \left(\frac{B}{T}\right) \quad (2.18)$$

$$\frac{-N'_v}{\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2} = \frac{1}{2} + 2.4 \left(\frac{T}{L}\right) \quad (2.19)$$

$$\frac{-N'_r}{\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2} = \frac{1}{4} + 0.039 \frac{B}{T} - 0.56 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.20)$$

Untuk gaya yang diakibatkan *rudder* dinyatakan pada Persamaan (2.21) dan momen yang diakibatkan *rudder* dinyatakan pada persamaan (2.22), persamaanya adalah sebagai berikut.

$$Y_\delta = \rho \frac{\pi A_\delta}{4 LT} \quad (2.21)$$

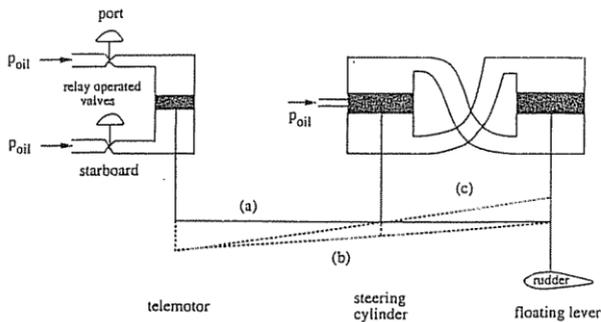
$$N_\delta = -\frac{1}{2} Y_\delta \quad (2.22)$$

2.4 Rudder, Coupling steering dan rolling

Rudder merupakan aktuator yang digunakan pada kapal dimanan pengoperasiannya sesuai dengan sinyal control yang diberikan. Fungsi dari *rudder* adalah untuk menjaga arah kapal sesuai dengan perintah sehingga pergerakan kapal sesuai dengan tujuan yang diinginkan. Salah satu tipe *rudder* yang

digunakan pada kapal perang kelas SIGMA adalah tipe Van Amorengen. Spesifikasi dari tipe ini adalah -35° sampai 35° dan laju kerja *rudder* $2,3^{\circ} - 7^{\circ}/s$. Hal tersebut disyaratkan bahwa *rudder* dapat digerakkan 35° dari *port* menuju 35° ke *starboard* dalam waktu tidak lebih dari 30detik [13].

Pada gambar (2.5) dijelaskan mengenai pengoperasian *rudder* Van Amorengen. Pada posisi (a) akan memberikan pengaruh pada port (b). Hal ini dikarenakan adanya perubahan tekanan pada port yang lebih tinggi sehingga menyebabkan bukaan *valve* pada port (b), sehingga menyebabkan *valve* silinder *steering* terbuka, konsekuensunya posisi menjadi (c) dan ini menyebabkan terjadi bukaan *valve* pada *starboard*, demikian juga sebaliknya apabila tekanan pada *starboard* lebih tinggi.



Gambar 2.5 Sistem Kemudi Van Amorengen [13]

Sistem stabilisasi *roll* modern seperti fins, *anti-roll tanks* dan *high frequency rudder action* digunakan secara individual atau kombinasi pada sebagian besar angkutan laut. Pada beberapa sistem, gerakan *low frequency rudder* digunakan secara khusus untuk mengendalikan *heading*. Sementara

antiroll tanks mahal dan sangat membutuhkan ruang tertentu, maka perpaduan *fins* dan *rudder* menjadi alternatif menarik untuk *roll damping*. Meskipun, gerakan *fin* yang sama dengan gerakan *high frequency rudder* mengganggu sistem kontrol *heading*. Untuk mengurangi interaksi tersebut, Van Amerongen dan Van Cappele telah mengemukakan pemodelan linier eksplisit yang mendeskripsikan *coupling* antara *fin* dan sudut *rudder* menjadi persamaan kecepatan linier dan angular dalam gerakan *sway* dan *yaw* [13]. Untuk menyederhanakan, dibuat asumsi bahwa kedua *fin* dan dikontrolkan secara independen, sehingga pemodelan dapat dituliskan dengan

$$M\dot{v} + Nv + G\eta = Bu \quad (2.23)$$

Dimana $v = [v, p, r]^T$ dan $\eta = [y, \phi, \psi]^T$ adalah keadaan dan $u = [\alpha, \delta]^T$ adalah vector kontrol. Persamaan matrik terkait persamaan tersebut antara lain [13]:

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -mz_G - Y_{\dot{p}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ -mz_G - K_{\dot{v}} & I_x - K_{\dot{p}} & mx_G - K_{\dot{r}} \\ mx_G - N_{\dot{v}} & mx_G - N_{\dot{p}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$N = \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & mu_0 - Y_r \\ -K_v & -N_p & -mz_G u_0 - K_r \\ -N_v & -N_p & mx_G u_0 - N_r \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & WGM_T & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$B = \begin{bmatrix} Y_\alpha & Y_\delta \\ K_\alpha & N_\delta \\ N_\alpha & N_\delta \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Dengan menggunakan Transformasi Laplace, diperoleh fungsi transfer sebagai berikut:

$$\phi(s) = \omega_n^2 \frac{K_\delta \delta(s) + K_\alpha \alpha(s) - K_r r(s)}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.28)$$

ζ dan ω_n adalah rasio redaman relatif dan frekuensi natural sistem kontrol yang dapat dirancang sebagai kontrol heading dan roll damping [13].

2.5 Sistem pengendali

Sistem pengendalian adalah komponen yang dibuat sedemikian sehingga berfungsi untuk mengendalikan sebuah sistem dengan dilakukan pengendalian pada beberapa easaran sehingga berada pada suatu range tertentu.

Berikut merupakan istilah dan elem dalam system pengendalian [12]:

1. *Reference input*: masukan system yang merupakan nilai output yang diinginkan.
2. *Plant*: objek yang dikendalikan
3. *Control input*: pengatur dari parameter-parameter pada system yang akan dikontrol yang dapat disesuaikan secara dinamis
4. *Disturbance*: suatu sinyal yang cenderung mempunyai pengaruh yang merugikan pada harga keluaran system
5. *Set point*: besar output/*process variable* yang dikehendaki
6. *Error*: selisih antara set point dikurangi dengan *measured variable*. Error dapat bernilai positif dan juga dapat bernilai positif.

Teori pengendalian berkembang dari waktu ke waktu menjadi banyak metode. Beberapa diantaranya adalah *Sliding Mode Control (SMC)*, *Fuzzy Logic Control (FLC)*, *Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)*, *Propotional controller*, *Integral controller*, *Derivative controller*, *Propotional Integral Derivatice controller (PID)* dan lain-lain. Pada tugas akhir ini, metode yang digunakan sebagai sistem pengendali stabilisasi Rudder Roll pada kapal

perang ini adalah menggunakan metode *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC).

2.6 Sliding Mode Control (SMC)

Sliding Mode Control merupakan pendekatan *robust control* yang penting, karena SMC adalah metode pengendalian yang bekerja secara *robust*, baik untuk sistem linier maupun nonlinier, yang memiliki ketidakpastian model ataupun parameter. Untuk menjaga agar sistem tetap terkendali, SMC memanfaatkan metode kestabilan Lyapunov [14].

2.6.1 Fungsi Switching

Pandang suatu sistem dinamis:

$$x^{(n)}(t) = f(\mathbf{x}, t) + b(\mathbf{x}, t) \cdot u + \tilde{d}(t) \quad (2.29)$$

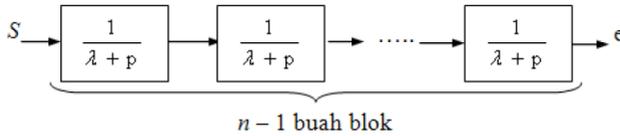
dimana u control input, $\mathbf{x} = [x \dot{x} \dots x^{(n-1)}]^T$ merupakan vector keadaan, $f(\mathbf{x}, t)$ dan $b(\mathbf{x}, t)$ berupa fungsi terbatas, $\tilde{d}(t)$ gangguan eksternal. Jika \mathbf{x}_d adalah \mathbf{x} yang diinginkan, maka *tracking error*-nya dapat dinyatakan dengan:

$$e(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_d(t) = [e \dot{e} \dots e^{(n-1)}]^T \quad (2.30)$$

Permukaan $S(\mathbf{x}, t)$ di dalam ruang keadaan \mathbb{R}^n yang disebut juga fungsi *switching* menurut [9] memenuhi persamaan:

$$S(\mathbf{x}, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e = \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n-1}{k} \lambda^k e^{(n-1-k)} \quad (2.31)$$

dengan λ suatu konstanta positif. Fungsi *switching* ini digunakan untuk menentukan besarnya nilai u agar memenuhi kondisi *sliding*. Persamaan (2.31) dapat dianggap sebagai input dan *tracking error* e sebagai keluaran [9], dimana $p = (d/dt)$ adalah operator Laplace seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Filter $S(\mathbf{x}, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e$ (Tien, 2002)

2.6.2 Permukaan *Sliding*

Fungsi *switching* disebut dengan permukaan *sliding* (*sliding surface*) jika memenuhi :

$$S(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (2.32)$$

dengan λ suatu konstanta positif yang dipilih agar persamaan (2.32) menjadi permukaan yang stabil. Garis ini merupakan komponen penting dari SMC sebagai tempat trayektori keadaan meluncur dari kondisi awal (*initial condition*) menuju keadaan yang diinginkan (*reference point*). Untuk sistem berorde-1 ($n = 1$), permukaan *sliding* dapat ditulis:

$$S(\mathbf{x}, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{1-1} e$$

$$= e \quad (2.33)$$

atau

$$S(\mathbf{x}, t) = e = 0 \quad (2.34)$$

Persamaan (2.34) menunjukkan suatu garis lurus pada bidang $e\dot{e}$. Permukaan *sliding* ini membagi bidang menjadi dua bagian, yaitu $S > 0$ dan $S < 0$. Agar trayektori keadaan dapat meluncur, maka sistem harus berada dalam kondisi *sliding*. Dengan demikian, besar nilai *control input* bergantung pada nilai $S(\mathbf{x}, t)$.

2.6.3 Kondisi *Sliding*

Perancangan *control law* pada SMC dilakukan sedemikian hingga $e(t)$ bergerak menuju permukaan *sliding* dan meluncur pada permukaan tersebut untuk semua $t \geq 0$. Untuk memperoleh

control law digunakan suatu fungsi yang mirip fungsi Lyapunov dimana fungsi yang dikonstruksi merupakan fungsi definit positif, yaitu:

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (2.35)$$

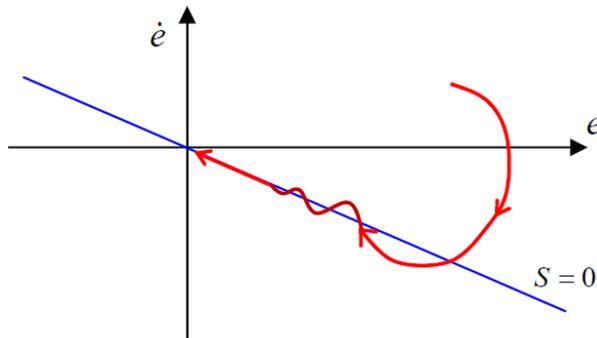
dengan $V(0) = 0$ dan $V > 0$ untuk $S \neq 0$. Kondisi yang memenuhi syarat kestabilan sistem merupakan turunan dari persamaan (2.35) yang bersifat definit negative, yaitu:

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (S^2) \leq -\eta |S| \quad (2.36)$$

Pertidaksamaan (2.36) disebut kondisi *sliding* atau juga disebut kondisi *reaching*. Kondisi tersebut dapat ditulis dalam beberapa bentuk seperti pada pertidaksamaan (2.37).

$$S\dot{S} < 0 \text{ atau } \dot{S} \cdot \text{sgn}(S) \leq -\eta \quad (2.37)$$

dengan suatu η konstanta positif. Gambar 2.7 menginterpretasikan gambar untuk kondisi *sliding* dari metode pengendalian SMC, dimana trayektori keadaan bergerak meluncur pada garis lurus $S = 0$ yang merupakan permukaan *sliding*. *Sliding mode* berarti bahwa sekali trayektori keadaan e mencapai permukaan *sliding*, maka trayektori sistem akan bertahan di sana sambil meluncur ke titik asal bidang $e\dot{e}$, secara independent dengan semua ketidakpastian.



Gambar 2.7 Kondisi *sliding*

Setelah diperoleh permukaan *sliding* dan kondisi *sliding* berikutnya didesain *control law u* sedemikian hingga e dan \dot{e} ke nol. Pada penelitian ini digunakan *Fuzzy Sliding Mode Control* sehingga proses untuk mendapatkan *control law u* dilakukan dengan menggunakan *Fuzzy Logic*. Sebelum itu akan dibahas *Fuzzy Logic Control* pada sub bab selanjutnya.

2.7 Fuzzy Logic Control (FLC)

Fuzzy Logic Control (FLC) merupakan penerapan teori himpunan *fuzzy* pada bidang pengendalian sistem. Teori himpunan *fuzzy* pertama kali dikenalkan oleh Zadeh (1965) dan Goguen (1967-1969) dengan menunjukkan cara untuk memperluas konsep klasik dan pernyataan yang mencakup *kefuzzzyan*. Pengendali *fuzzy* (*fuzzy controller*) umumnya bekerja secara *heuristic* (*trial and error*) dan berdasarkan pengalaman manusia [8].

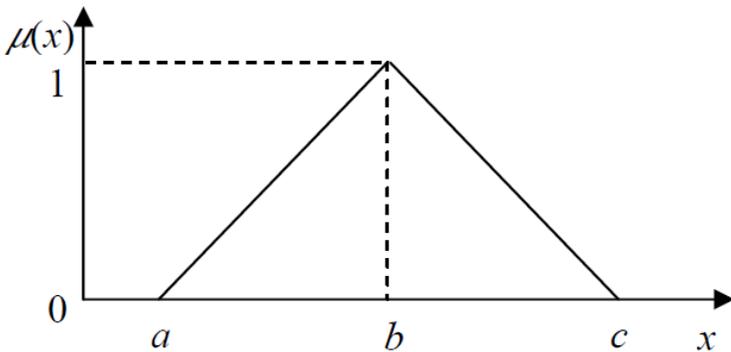
2.7.1 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*)

Fungsi keanggotaan adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik input data ke dalam nilai keanggotaannya (sering disebut derajat keanggotaan) yang memiliki nilai pada interval 0 sampai 1 [14]. Beberapa fungsi keanggotaan yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah:

- Fungsi keanggotaan segitiga
Fungsi ini diidentifikasi dengan tiga buah parameter. Rumus fungsi keanggotaan :

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{jika } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{jika } a \leq x \leq b \\ \frac{x-c}{b-c}, & \text{jika } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{jika } x \geq c \end{cases} \quad (2.38)$$

Fungsi keanggotaan segitiga pada persamaan (2.38) diatas dapat ditunjukkan oleh Gambar 2.8

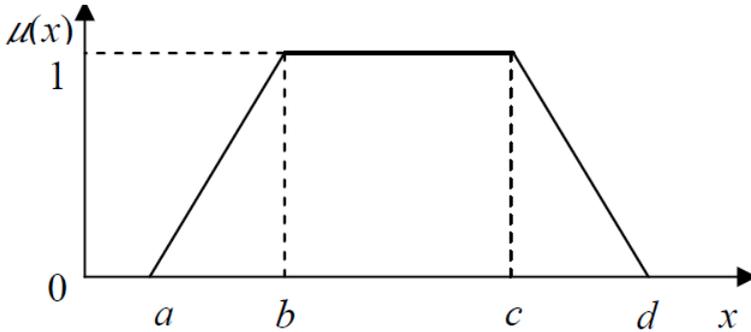


Gambar 2.8 Fungsi keanggotaan segitiga

- Fungsi keanggotaan trapezium
Fungsi ini diidentifikasi oleh empat parameter dirumuskan dengan fungsi:

$$(x) = \begin{cases} 0, & \text{jika } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{jika } a \leq x \leq b \\ 1, & \text{jika } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & \text{jika } c \leq x \leq d \\ 0, & \text{jika } x \geq d \end{cases} \quad (2.39)$$

Fungsi keanggotaan trapezium pada persamaan (2.39) ditunjukkan oleh gambar 2.9



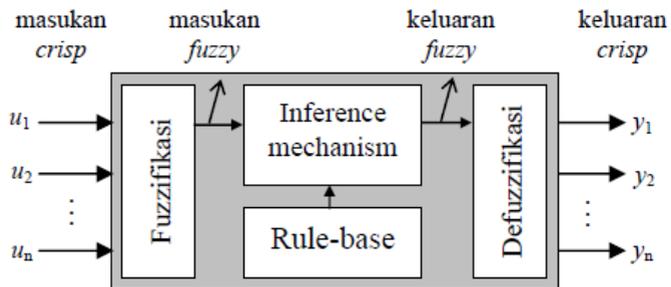
Gambar 2.9 Fungsi keanggotaan trapezium

2.7.2 Struktur Dasar Pengendali *Fuzzy*

Suatu pengendali fuzzy (*fuzzy logic controller*) tersusun dari empat buah komponen yang bekerja bersamaan dan dapat diuraikan sebagai [16] :

- *Fuzzification Interface*
Fuzzification Interface diperlukan pada proses defuzzifikasi yaitu mengubah masukan nilai *crisp* menjadi nilai *fuzzy*.
- *Knowledge base*
Knowledge base berisi sekumpulan aturan-aturan *fuzzy* yang disebut *rule base* dari sekumpulan fungsi keanggotaan (*data base*)
- *Inference Engine*
Inference Engine merupakan mekanisme atau prosedur, penalaran untuk mendapatkan *fuzzy* output.
- *Defuzzifikasi*
Mengubah *fuzzy* output ke nilai *crisp*.

Komponen-komponen tersebut dapat dinyatakan dengan Gambar 2.10



Gambar 2.10 Struktur dasar *fuzzy logic controller*

2.7.3 Aturan Dasar Logika *Fuzzy* Sebagai Sistem Pengendali

Bentuk umum aturan linguistik *fuzzy* dinyatakan dengan “jika-maka” yang merupakan inti dari relasi *fuzzy* sebagai berikut :

Jika “premis” **maka** “konsekuen”

FLC untuk sistem nonlinier FLC untuk sistem nonlinear tingkat dua dirancang dengan menggunakan bidang fase yang ditentukan oleh error e dan perubahan error \dot{e} . Aturan fuzzy dari FLC menghasilkan nilai fuzzy dari input u untuk setiap pasang nilai fuzzy dari error dan perubahannya, atau dengan kata lain, untuk setiap vector keadaan fuzzy. Pendekatan *heuristic* yang biasa digunakan untuk merancang aturan fuzzy ini dilakukan dengan mempartisi bidang fase menjadi dua bidang. Hal ini menyebabkan FLC disebut mempunyai bentuk diagonal. Bentuk umum dari aturan fuzzy untuk suatu FLC pada bentuk diagonalnya dapat dilihat pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Bentuk diagonal aturan *fuzzy* untuk FLC

		e						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
$\frac{de}{dt}$	PB	Z	NS	NS	NM	NM	NB	NB
	PM	PS	Z	NS	NS	NM	NM	NB
	PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
	Z	PM	PS	PS	Z	NS	NS	NM
	NS	PM	PM	PS	PS	Z	NS	NS
	NM	PB	PM	PM	PS	PS	Z	NS
	NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	Z

P – positive

N – negative

Z – Zero

S – small

M – medium

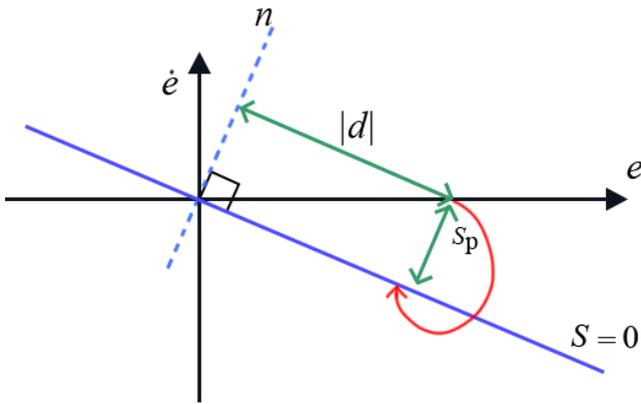
B – big

2.8 Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)

Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC) atau *Sliding Mode Fuzzy Logic Control (SMFLC)* merupakan modifikasi yang dilakukan pada *Sliding Mode Control (SMC)* dengan

menggunakan *Fuzzy Logic Control (FLC)*. Modifikasi ini dilakukan untuk memperbaiki performansi sistem *Sliding Mode Control (SMC)*[9]. Fungsi dari kontrol fuzzy yaitu untuk mengurangi adanya chattering pada respon yang dihasilkan[8]. Perancangan pengendali FSMC bekerja sebagaimana SMC, yaitu menggunakan sebuah permukaan *sliding*. Namun langkah-langkah dalam merancang pengendali FSMC lebih sederhana daripada merancang pengendali SMC, terutama dalam hal menentukan besarnya *control input u*. Karena pada FSMC, besarnya *u* diperoleh dari aturan fuzzy dengan bentuk R_c^i : **jika** $s = LS_i$ **dan** $d = LD_i$ **maka** $u = LU_i$ (2.40)

Dimana s adalah jarak antara vector keadaan dan permukaan *sliding*, dan d adalah jarak antara vector keadaan dan vector normal ke permukaan *sliding* dimana vector normal melalui titik asal dari ruang keadaa. $LS_i \in \mathbf{TS}$ dan $LD_i \in \mathbf{TD}$ masing-masing adalah nilai *fuzzy* dari variabel keadaan *fuzzy* s dan d pada daerah *fuzzy* ke- i dari ruang keadaan *fuzzy*. LU_i adalah vector masukan *fuzzy* yang berkorespondensi pada daetah *fuzzy* ke- i dari ruang keadaan *fuzzy*. \mathbf{TS}, \mathbf{TD} dan \mathbf{TU} adalah himpunan dari s, d dan u yang mencakup range dari nilai *fuzzy* s, d dan u .



Gambar 2.11 Interpretasi grafis dari s_p dan d

Pada gambar 2.11 diatas menunjukkan interpretasi grafis dari s dan d pada bidang $e\dot{e}$, dimana s_p menunjukkan jarak antara titik keadaan dan permukaan *sliding*, d menunjukkan jarak antara titik keadaan dan garis normal dari permukaan *sliding* yang melalui titik asal bidang $e\dot{e}$. Dengan demikian s_p dan d dinyatakan dengan persamaan:

$$s_p = \frac{|e|}{\sqrt{1+\lambda^2}} \quad (2.41)$$

$$d = \sqrt{|e|^2 - s_p^2} \quad (2.42)$$

Dengan aturan *fuzzy* untuk FSMC seperti persamaan (2.40) dapat dinyatakan oleh Tabel 2.3

Tabel 2.3 Aturan umum fuzzy untuk pengendali FSMC

		S_p						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
d	B	PB	PB	PB	PB	NB	NB	NB
	M	PB	PB	PB	PM	NB	NB	NB
	S	PB	PB	PM	PS	NM	NB	NB
	Z	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB

Dari table 2.3 dapat diambil beberapa contoh mengenai aturan *fuzzy* untuk FSMC, antara lain:

Jika s_p adalah *positive medium* (PM) dan d adalah *small* (S), maka u adalah *negative big* (NB)

Jika s_p adalah *negative big* (NB) dan d adalah *zero* (Z), maka u adalah *positive big* (PB).

2.9 Spesifikasi Performansi Respon Waktu

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

a. Spesifikasi performansi respon *transient*

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

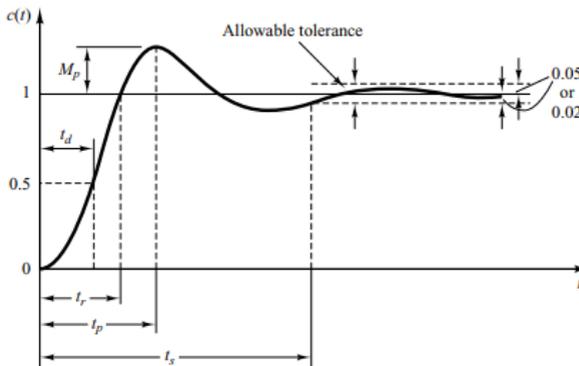
- Waktu tunda (*delay time*), t_d : waktu yang diperlukan untuk mencapai setengah harga akhir yang pertama kali.
- Waktu naik (*rise time*), t_r : waktu yang diperlukan respon untuk naik dari 10 sampai 90%, 5 sampai 95%, atau 0 sampai 100% dari harga akhirnya. Untuk setiap orde kedua redaman kurang, 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 akan digunakan ditentukan dari sasaran desain sistem yang ditanyakan.



Gambar 2. 12 Spesifikasi Respon Transient

- f) Pada gambar Gambar 2.12 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.

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan tahapan-tahapan yang dilakukan dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini. Pada bab ini juga terdapat diagram alir penelitian agar langkah-langkah pengerjaan dapat lebih mudah dipahami.

3.1. Tahap Penelitian

Tahap-tahap penelitian yang dilakukan pada pengerjaan tugas akhir adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap studi literatur ini meliputi pengumpulan informasi tentang beberapa teori yang menunjang penyelesaian pengerjaan tugas akhir ini. Seperti model dinamika *maneuvering* kapal, model dinamika *rudder*, *coupling steering* dan *rolling*, konsep dasar *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSCM).

2. Pengkajian Model dan Paramater

Pada tahap ini dilakukan pengkajian parameter kapal yang digunakan sebagai data masukan pada pemodelan sistem stabilisasi rudder roll pada kapal perang. Data tersebut berupa spesifikasi fisik yang dimiliki kapal, yaitu Panjang (L), lebar (B), kedalaman (D) dan koefisien blok (CB) dari kapal.

3. Perancangan sistem pengendali

Tahap perancangan pengendali sistem stabilisasi rudder roll dirancang dengan menggunakan metode *fuzzy sliding mode control* (FSMC). Pemodelan sistem stabilisasi rudder roll kapal yang sudah didapatkan dimasukkan dalam sistem pengendali SMC, lalu menentukan fungsi keanggotaan himpunan *fuzzy* dari SMC, membuat aturan *fuzzy* untuk menentukan kontrol *input* dari rancangan SMC sebelumnya.

4. Simulasi

Pada tahap ini dilakukan simulasi menggunakan *software* MATLAB untuk mengetahui hasil performansi sistem stabilisasi rudder roll dengan pengendali FSMC.

5. Analisa hasil simulasi

Pada tahap ini dilakukan analisa hasil dari simulasi yang telah dilakukan. Analisa dilakukan sebagai dasar untuk menyimpulkan hasil penelitian.

6. Penarikan kesimpulan

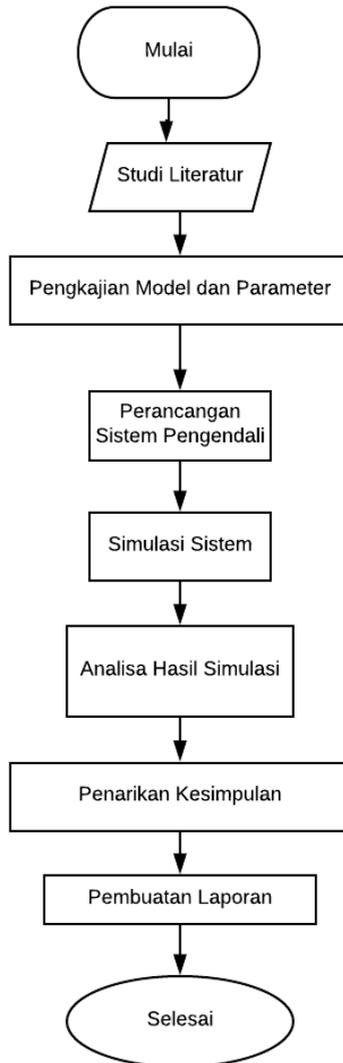
Pada tahap ini dilakukan penarikan kesimpulan dari hasil simulasi yang telah dilakukan sebelumnya.

7. Penyusunan laporan akhir

Pada tahap akhir ini dilakukan penyusunan laporan akhir yang berisi tentang desain kendali, hasil simulasi, kesimpulan dan saran.

3.2. Diagram Alir Penelitian

Secara garis besar tahapan-tahapan dalam mengerjakan tugas akhir ini dapat dilihat pada *flow chart*



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab sebelumnya telah dijelaskan langkah-langkah analisis pengendali, pada bab ini dibahas mengenai penyelesaian analisis dari sistem kendali stabilitas *rudder roll* pada kapal perang menggunakan *Fuzzy Sliding Mode Control*. Selanjutnya sistem pengendali tersebut disimulasikan dengan menggunakan *software* MATLAB.

4.1 Pemodelan Dinamika Kapal dan *Rudder Roll*.

Pemodelan sistem dinamika kapal dan *rudder roll* dilakukan untuk mendapatkan fungsi transfer komponen sistem control yang terdiri dari pemodelan dinamika kapal, *rudder* dan *roll damper*.

4.1.1. Pemodelan Sistem Dinamika Kapal

Kapal perang KRI Diponegoro mempunyai spesifikasi Panjang (L), lebar (B), kedalaman (T), koefisien blok (C_b), kecepatan servis (U), *center of gravity* (dalam sumbu X kapal / X_g), dan massa (M). Berikut spesifikasi kapal perang KRI Diponegoro[18].

Tabel 4.1 Spesifikasi kapal perang KRI Diponegoro

	Besar	Satuan
Panjang	90.71	Meter
Lebar	13.02	Meter
Kedalaman	3.75	Meter
Koefisien Blok	0.41	-
Kecepatan Servis	14.4	m/s
Pusat Gravitasi	2.25	Meter
Massa	1818	Ton
Tinggi Kapal	3.75	Meter
Luas Rudder	3.14	m^2

Dari data spesifikasi yang ditunjukkan pada Tabel (4.1) diatas dapat disubstitusikan pada persamaan (2.12) sampai dengan Persamaan (2.28) sehingga didapatkan koefisien hidrodinamika kapal perang sebagai berikut

$$\begin{array}{lll} Y'_v = -0.00603 & Y'_r = -0.000303 & N'_v = -0.000083 \\ N'_r = -0.000323 & Y'_v = -0.008423 & Y'_r = 0.00288 \\ N'_v = -0.00322 & N'_r = -0.00164 & I'_z = 0.000889 \end{array}$$

Perhitungan dari koefisien hidrodinamika diatas terdapat pada lampiran. Setelah itu koefisien hidrodinamika yang didapatkan dimasukkan ke dalam elemen matriks pada Persamaan (2.7) sehingga didapatkan:

$$\begin{array}{l} M' = \begin{bmatrix} 0.00603 & 0.000303 \\ 0.0000835 & 0.002212 \end{bmatrix} \\ N' = \begin{bmatrix} 0.008423 & -0.00288 \\ 0.00322 & 0.00164 \end{bmatrix} \end{array}$$

sehingga,

$$\begin{array}{l} M = \begin{bmatrix} 0.00264 & 0.012 \\ 0.0000365 & 0.0481 \end{bmatrix} \\ N = \begin{bmatrix} 0.000585 & -0.01816 \\ 0.000223 & 0.0103 \end{bmatrix} \end{array}$$

Dari matriks diatas tersebut didapatkan

$$\det(M) = 0.0001366$$

$$\det(N) = 0.00009397$$

$$T_1 T_2 = 12.5385$$

$$T_1 + T_2 = 5.28665$$

$$K_R = 375.7262$$

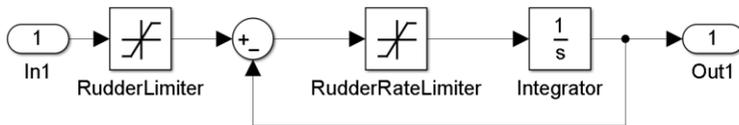
$$K_R T_3 = 987.4$$

Dari hasil perhitungan diatas dapat dimasukkan pada persamaan (2.2), maka didapatkan fungsi transfer dari kapal perang adalah

$$\frac{r}{\delta_R}(s) = \frac{375.7262+987.4s}{12.5385s^2+5.2865s+1} \quad (4.1)$$

4.1.2. Pemodelan Dinamika Rudder dan Roll Damper

Rudder pada kapal berfungsi sebagai penggerak pada sistem kontrol. Pada kapal perang kelas SIGMA, *rudder* yang terpasang adalah tipe ROLL ROYCE *Actuator* RA 642 yang memiliki spesifikasi kemampuan kerja antara -35° sampai 35° . Pemodelan dinamika *rudder* dan laju *limiter rudder* berada pada range $\delta_{max} = 35^\circ$ dan $2,3^\circ/s \leq \delta_{max} < 7^\circ/s$.



Gambar 4.1 Diagram blok *rudder*

Pemodelan *roll damper* mendiskripsikan *coupling* antara *fin* dan sudut *rudder* menjadi persamaan kecepatan linier dan angular dalam gerakan *sway* dan *yaw*. Berdasarkan perhitungan sesuai dengan spesifikasi kapal diperoleh parameter matrik sesuai dengan persamaan 2.23. Dengan menggunakan transformasi Laplace, diperoleh fungsi transfer sebagai berikut:

$$\phi(s) = \frac{-0,007\delta(s)+0,003\alpha(s)-0,08r(s)}{0,001s^2+0,00006s+2,94} \quad (4.2)$$

4.2 Desain Kendali Sistem Stabilisasi Rudder Roll pada Kapal dengan Metode FSMC

Dalam sistem kendali, *state space* merupakan metode analisis untuk sebuah sistem kendali yang kompleks [12]. Dari fungsi transfer (4.1), selanjutnya diubah dalam bentuk *state space* dengan menggunakan *software Matlab*, sehingga persamaan (4.1) menjadi:

$$[\dot{x}] = \begin{bmatrix} -0,4216 & -0,0798 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} [x] + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

dimana

$$[x] = \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix}, u = \delta$$

Sehingga menjadi:

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,4216 & -0,0798 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (4.3)$$

dari persamaan (4.2) didapat:

$$\dot{r} = -0,4216r - 0,0798\psi + \delta \quad (4.4)$$

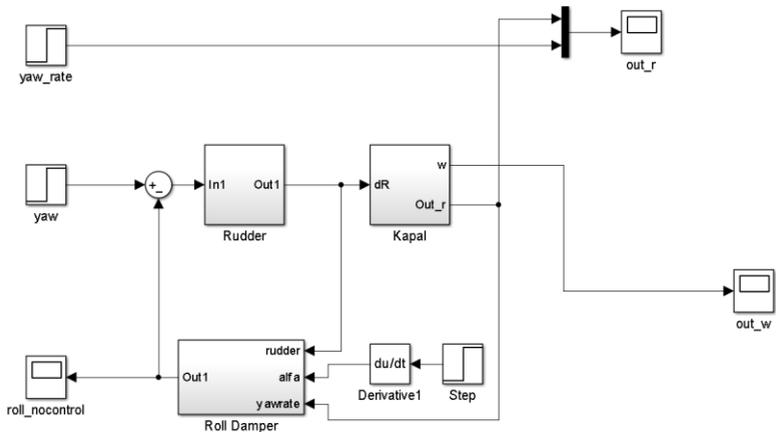
Pada tugas akhir ini menggunakan metode FSMC agar kapal dapat stabil pada sudut haluan yang diinginkan (ψ_d). Untuk mendesain pengendalian menggunakan metode FSMC pertama kali adalah dengan menentukan *tracking error* dari sudut haluan, maka *tracking error*-nya dapat dinyatakan oleh:

$$e = \psi - \psi_d \quad (4.5)$$

Karena $\psi_d = 0$, sehingga Persamaan (4.6) menjadi:

$$e = \psi \quad (4.6)$$

Kontrol input pada FSMC diperoleh dari variable SMC yaitu S_p dan d . Variabel S_p dan d ini nantinya merupakan input dalam *fuzzy* pada perancangan kendali FSMC. Perancangan sebuah fungsi keanggotaan S_p dan d FSMC diperoleh dengan menentukan interval keanggotaan e , yaitu dengan mengamati *loop* terbuka dinamika manuver kapal sebagai berikut, (Gambar 4.2).



Gambar 4.2 Plant loop terbuka

Pada loop terbuka menghasilkan sudut yang tidak dikontrol. Nilai error sudut heading didapat dari loop terbuka tersebut adalah:

$$e = [-12.74, 12.74]$$

Setelah diperoleh interval e maka selanjutnya mencari nilai maksimum dari S_p dan d . Pada persamaan (2.33) kondisi *sliding* dituliskan sebagai berikut:

$$S(\mathbf{x}, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e \quad (4.7)$$

dengan $n = 1$, maka persamaan menjadi

$$S(\mathbf{x}, t) = e \quad (4.8)$$

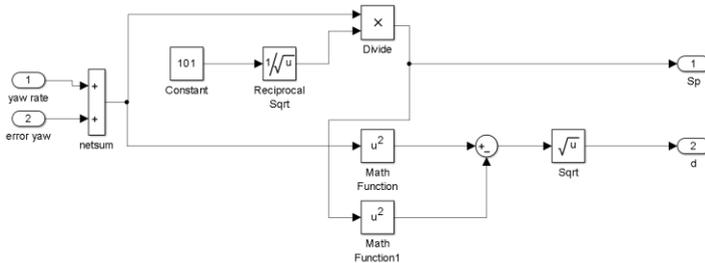
sehingga nilai maksimum S_p dan d dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} S_p &= \frac{|e|}{\sqrt{(1 + \lambda^2)}} = \frac{|12,74|}{\sqrt{1 + 10^2}} \\ &= 1,27 \end{aligned}$$

$$d = \sqrt{|e|^2 - s_p^2} = \sqrt{|12,74|^2 - 1,27^2}$$

$$= 12,68$$

Desain Simulink untuk menentukan nilai S_p dan d dapat ditunjukkan pada gambar 4.3



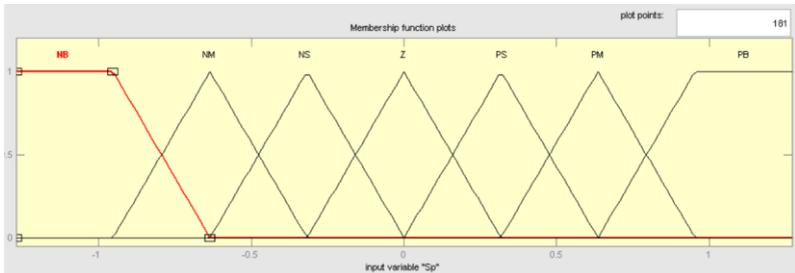
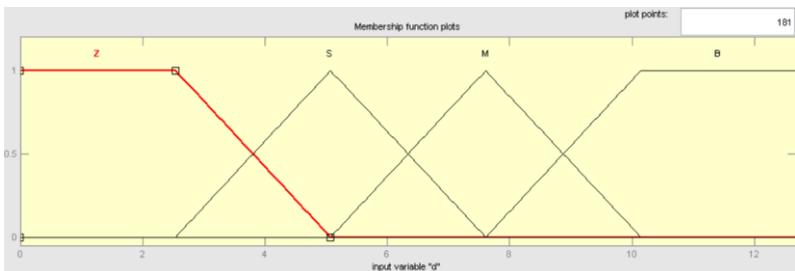
Gambar 4.3: Plan perhitungan S_p dan d .

Selanjutnya nilai S_p dan d menjadi inputan fuzzy pada kendali FSMC ini. Oleh karena itu dilakukan pembesaran sehingga didapat interval berupa keanggotaan S_p dan d sebagai berikut :

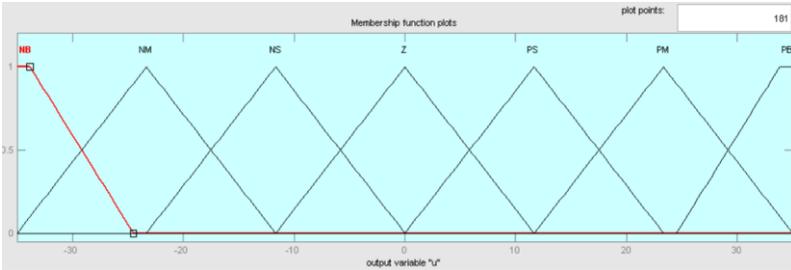
$$S_p \in [-1.27, 1.27]$$

$$d \in [0, 12.68]$$

Sehingga didapat desain kendali FSMC dengan fungsi keanggotaan S_p dan d yang dapat ditunjukkan pada gambar 4.4 dan 4.5

Gambar 4.4. Fungsi keanggotaan S_p Gambar 4.5. Fungsi keanggotaan d

Karena pada kapal perang kelas SIGMA, *rudder* yang terpasang adalah tipe ROLL ROYCE *Actuator* RA 642 yang memiliki spesifikasi kemampuan kerja antara -35° sampai 35° maka juga dapat ditentukan desain fungsi keanggotaan yang menjadi output dari kendali FSMC yaitu pada gambar 4.6.



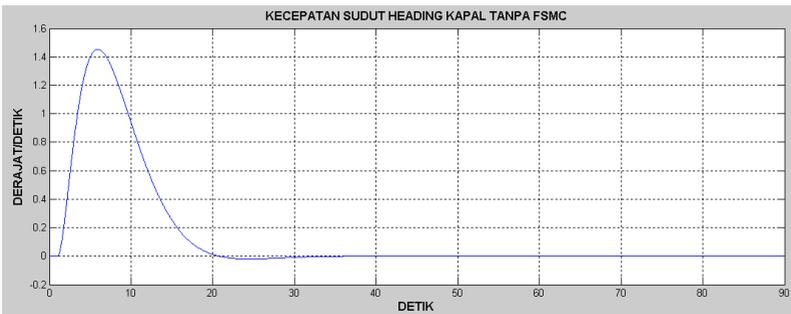
Gambar 4.6. Fungsi keanggotaan u

4.3 Analisa hasil simulasi pada Stabilitas Kapal Perang

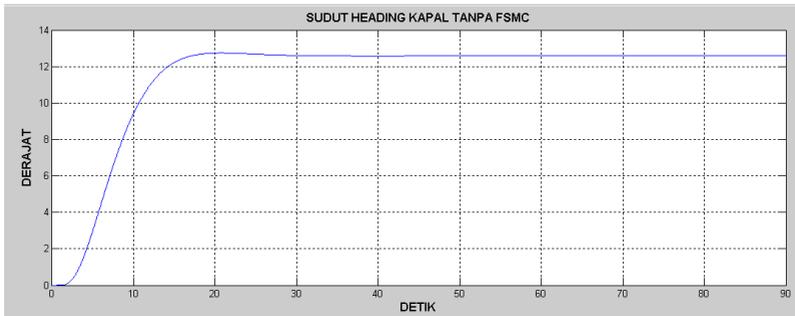
Dari hasil desain kendali FSMC pada sub-bab 4.2 diatas, disimulasikan pada sub-bab ini menggunakan *software* MATLAB. Pada tugas akhir ini bertujuan untuk mengendalikan kapal agar kapal tetap pada posisi setimbang. Pada simulasi ini diberikan $\psi_a = 0$.

4.3.1 Simulasi kestabilan kapal perang tanpa kendali FSMC

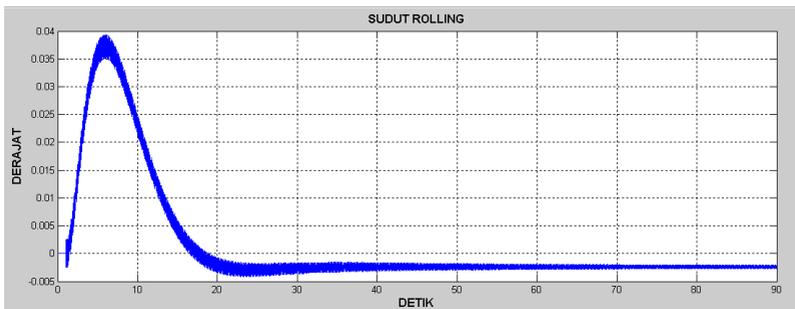
Pada kondisi ini kapal dijalankan tanpa menggunakan kendali FSMC. Hasil simulasi kestabilan kapal perang tanpa menggunakan kendali FSMC dapat dilihat pada gambar 4.7. sampai 4.9.



Gambar 4.7 Kecepatan sudut *heading* kapal tanpa kendali FSMC



Gambar 4.8 Sudut *heading* kapal tanpa kendali FSMC



Gambar 4.9 Sudut *rolling* kapal tanpa kendali FSMC

Hasil simulasi tanpa kendali FSMC, berdasarkan Gambar 4.7 menunjukkan bahwa kecepatan sudut *heading* kapal bergerak mendekati 0 pada detik ke 33,5 , yang berarti bahwa kapal tidak melakukan gerakan *yaw* lagi. Berdasarkan Gambar 4.8, sudut *heading* kapal bergerak dan mulai stabil pada detik ke 33,5 pada sudut $12,6^0$. Pada Gambar 4.9 sudut *rolling* kapal mengalami osilasi, kemudian berangsur-angsur mendekati sudut 0.002^0 pada detik ke 60. Nilai positif pada kecepatan sudut *heading*, sudut

heading dan sudut *rolling* , menandakan bahwa kapal bergerak kearah kanan. Sedangkan nilai negatif pada kecepatan sudut *heading*, sudut *heading* dan sudut *rolling*, menandakan bahwa kapal bergerak ke arah kiri. Berikut adalah karakteristik respon transien yang didapatkan :

Tabel 4.2 Karakteristik Respon Sistem Kecepatan sudut *heading* tanpa kendali FSMC

No.	Respon Sistem	Hasil Tanpa FSMC
1	<i>Settling Time</i> (t_s)	33,5 detik
2	<i>Maximum Overshoot</i> (M_p)	1.452 ⁰
3	<i>Peak Time</i> (t_p)	5.93 detik

Waktu yang diperlukan sistem untuk menuju dan menetap dalam daerah sekitar titik kestabilan adalah sebesar 33,5 detik, sehingga *Settling Time* (t_s) pada respon sistem yang dihasilkan 33,5 detik. Pada gambar 4.7 respon sistem menunjukkan titik maksimum sebesar 1.452⁰ sehingga *Maximum Overshoot* (M_p) dari sistem didapat sebesar 1.452⁰. Lalu waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai titik puncak pertama kali adalah 5.93 detik, sehingga *Peak Time* (t_p) dari sistem sebesar 5.93 detik.

Tabel 4.3 Karakteristik Respon Sistem sudut *heading* tanpa kendali FSMC

No.	Respon Sistem	Hasil Tanpa FSMC
1	<i>Delay Time</i> (t_d)	7,3 detik
2	<i>Rise Time</i> (t_r)	17,1 detik
3	<i>Settling Time</i> (t_s)	33,5detik
4	<i>Maximum Overshoot</i> (M_p)	0,16 ⁰
5	<i>Peak Time</i> (t_p)	20,6 detik

Pada gambar 4.8. menunjukkan waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai setengah dari harga akhir yaitu sebesar 7,3 detik, sehingga *Delay Time* (t_d) dari respon sistem sebesar 7,3 detik. Lalu waktu yang dibutuhkan respon sistem untuk mencapai harga akhir yang pertama kali adalah 17,1 detik, sehingga *Rise Time* (t_r) dari respon sistem sebesar 17,1 detik. Waktu yang diperlukan sistem untuk menuju dan menetap dalam daerah sekitar titik kestabilan adalah sebesar 33,5 detik, sehingga *Settling Time* (t_s) pada respon sistem yang dihasilkan 33,5 detik. Pada gambar 4.8 respon sistem menunjukkan titik puncak setelah melewati titik kestabilan pada $12,76^0$ sehingga *Maximum Overshoot* (M_p) dari sistem didapat sebesar $0,16^0$. Lalu waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai titik puncak setelah melewati titik kestabilan adalah 20,6 detik, sehingga *Peak Time* (t_p) dari sistem sebesar 20,6 detik.

Tabel 4.4 Karakteristik Respon Sistem sudut *rolling* tanpa kendali FSMC

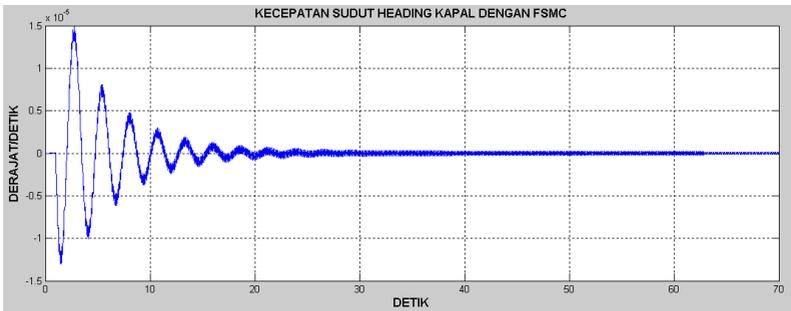
No.	Respon Sistem	Hasil Tanpa FSMC
1	<i>Settling Time</i> (t_s)	60detik
2	<i>Maximum Overshoot</i> (M_p)	$0,00212^0$
3	<i>Peak Time</i> (t_p)	23,2 detik

Waktu yang diperlukan sistem untuk menuju dan menetap dalam daerah sekitar titik kestabilan adalah sebesar 60 detik, sehingga *Settling Time* (t_s) pada respon sistem yang dihasilkan 60 detik. Pada gambar 4.9 respon sistem menunjukkan titik puncak setelah melewati titik kestabilan pada $-0,00412^0$ sehingga *Maximum Overshoot* (M_p) dari sistem didapat sebesar $0,00212^0$. Lalu waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai titik puncak

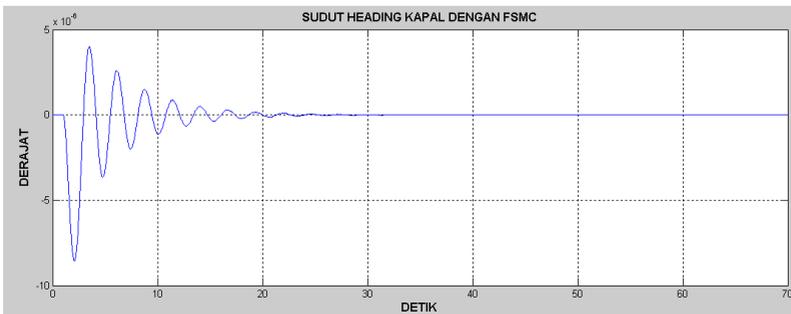
setelah melewati titik kestabilan adalah 23.2 detik, sehingga *Peak Time* (t_p) dari sistem sebesar 23.2 detik.

4.3.2 Simulasi kestabilan kapal perang dengan kendali FSMC

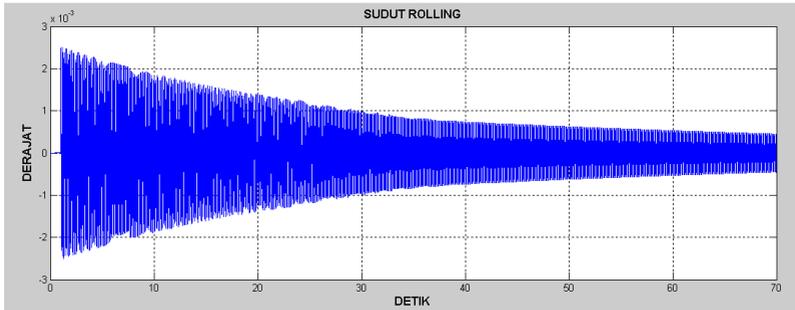
Pada kondisi ini kapal dijalankan tanpa menggunakan kendali FSMC. Hasil simulasi kestabilan kapal perang tanpa menggunakan kendali FSMC dapat dilihat pada gambar 4.10 sampai 4.12.



Gambar 4.10 Kecepatan sudut *heading* kapal dengan kendali FSMC



Gambar 4.11 Sudut *heading* kapal dengan kendali FSMC



Gambar 4.12 *rolling* kapal dengan kendali FSMC

Hasil simulasi dengan menggunakan kendali FSMC, berdasarkan Gambar 4.10 menunjukkan bahwa kecepatan sudut *heading* kapal mengalami osilasi dan bergerak mendekati 0 pada detik ke 30, yang berarti bahwa kapal tidak melakukan gerakan *yaw* lagi. Berdasarkan Gambar 4.11, sudut *heading* kapal bergerak dan mulai stabil pada detik ke 30 pada sudut 0° , dimana itu merupakan titik setimbang kapal. Pada Gambar 4.12 sudut *rolling* kapal mengalami osilasi, kemudian berangsur-angsur stabil mendekati 0° . Pada hasil simulasi, *rolling* kapal masih mengalami osilasi namun dengan nilai derajat yang sangat kecil, antara $0,0005^{\circ}$ dan $-0,0005^{\circ}$. Nilai positif pada kecepatan sudut *heading*, sudut *heading* dan sudut *rolling*, menandakan bahwa kapal bergerak ke arah kanan. Sedangkan nilai negatif pada kecepatan sudut *heading*, sudut *heading* dan sudut *rolling*, menandakan bahwa kapal bergerak ke arah kiri. Berikut adalah karakteristik respon transien yang didapatkan :

Tabel 4.5 Karakteristik Respon Sistem Kecepatan sudut heading dengan kendali FSMC

No.	Respon Sistem	Hasil Dengan FSMC
1	<i>Settling Time</i> (t_s)	30 detik
2	<i>Maximum Overshoot</i> (M_p)	0,0000148 ⁰
3	<i>Peak Time</i> (t_p)	2,76 detik

Waktu yang diperlukan sistem untuk menuju dan menetap dalam daerah sekitar titik kestabilan adalah sebesar 30 detik, sehingga *Settling Time* (t_s) pada respon sistem yang dihasilkan 30 detik. Pada gambar 4.10. respon sistem menunjukkan titik puncak setelah melewati titik kestabilan pada $-0,0000148^0$ sehingga *Maximum Overshoot* (M_p) dari sistem didapat sebesar 0,0000148⁰. Lalu waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai titik puncak setelah melewati titik kestabilan adalah 2,76 detik, sehingga *Peak Time* (t_p) dari sistem sebesar 2,76 detik.

Tabel 4.6 Karakteristik Respon Sistem sudut heading dengan kendali FSMC

No.	Respon Sistem	Hasil Dengan FSMC
1	<i>Settling Time</i> (t_s)	30 detik
2	<i>Maximum Overshoot</i> (M_p)	0,00000856 ⁰
3	<i>Peak Time</i> (t_p)	2 detik

Waktu yang diperlukan sistem untuk menuju dan menetap dalam daerah sekitar titik kestabilan adalah sebesar 30 detik, sehingga *Settling Time* (t_s) pada respon sistem yang dihasilkan 30 detik. Pada gambar 4.11. respon sistem menunjukkan titik puncak setelah melewati titik kestabilan pada $-0,00000856^0$ sehingga *Maximum Overshoot* (M_p) dari sistem didapat sebesar

0,00000856⁰. Lalu waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai titik puncak setelah melewati titik kestabilan adalah 2 detik, sehingga *Peak Time* (t_p) dari sistem sebesar 2 detik.

Tabel 4.7 Karakteristik Respon Sistem *Rolling* dengan kendali FSMC

No.	Respon Sistem	Hasil Dengan FSMC
1	<i>Settling Time</i> (t_s)	30 detik
2	<i>Maximum Overshoot</i> (M_p)	2,5 ⁰
3	<i>Peak Time</i> (t_p)	1 detik

Waktu yang diperlukan sistem untuk menuju dan menetap dalam daerah sekitar titik kestabilan adalah sebesar 30 detik, sehingga *Settling Time* (t_s) pada respon sistem yang dihasilkan 30 detik. Pada gambar 4.12. respon sistem menunjukkan titik puncak setelah melewati titik kestabilan pada 2,5⁰ sehingga *Maximum Overshoot* (M_p) dari sistem didapat sebesar 2,5⁰. Lalu waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai titik puncak setelah melewati titik kestabilan adalah 1 detik, sehingga *Peak Time* (t_p) dari sistem sebesar 1 detik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini disimpulkan hasil analisa pengendali dengan metode *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC) pada sistem stabilisasi *rudder roll* pada kapal perang Kelas SIGMA yang disimulasikan dengan menggunakan *software* MATLAB. Selain itu diberikan saran atau rekomendasi untuk penelitian Tugas Akhir berikutnya.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan pada babsebelumnya, kesimpulan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pengendali FSMC dapat diterapkan pada sistem stabilisasi *rudder roll* pada kapal perang kelas SIGMA dengan cara mencari *tracking error*-nya, emnghitung S_p dan d dari *error* yang didapat dan menentukan fungsi keanggotaan pada S_p dan d yang menjadi masukan *Fuzzy* pada FSMC ini.
2. Hasil simulasi dengan kendali FSMC mampu memperbaiki performansi stabilitas pada kapal perang Kelas SIGMA. Pada simulasi sistem dengan menggunakan kendali FSMC, kecepatan sudut lebih cepat 8 detik menuju sudut 0^0 , sudut heading lebih cepat 3,5 detik menuju kestabilan dan juga menstabilkan sudut *heading* kapal ke titik setimbang yaitu 0^0 . Dan untuk sudut *rolling* kendali FSMC mampu memperbaiki sudut *rolling* kapal mendekati titik setimbang 0^0 .

5.2 Saran

Saran yang penulis berikan untuk penelitian Tugas Akhir berikutnya adalah:

1. Pada tugas akhir ini penulis tidak menggunakan gangguan eksternal berupa gelombang laut ataupun gangguan eksternal lainnya, sehingga untuk penelitian selanjutnya bisa ditambahkan gangguan eksternal berupa gangguan laut pada sistem stabilisasi *rudder roll* atau pun berupa gangguan arus dan angin.
2. Pada tugas akhir ini tidak dilakukan optimasi fungsi keanggotaan pada kontrol FSMC yang digunakan pada kendali sistem stabilisasi *rudder roll* , sehingga untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan optimasi pada fungsi keanggotaan yang digunakan agar mendapat hasil yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lasabuda, R. (2013). **Pembangunan wilayah pesisir dan lautan dalam perspektif Negara Kepulauan Republik Indonesia**, *Jurnal Ilmiah Platax*
- [2] <https://kbbi.web.id/kapal>. Diakses pada 8/23/2018.
- [3] <http://www.seputarkapal.com/2016/06/jenis-model-kapal-laut.html>. Diakses pada 8/23/2108
- [4] Hardiyanty, A., Aulia, S. A., & Masroeri, A. A. (2013). **Perancangan Sistem Stabilisasi Rudder Roll pada Kapal Perang Kelas SIGMA dengan Kontrol Logika Fuzzy**, *Jurnal Teknik POMITS*.
- [5] Oda, H., Otsu, K., & Hotta, T. (1996). *Statistical Analysis and Design of a Rudder Roll Stabilization System. Control Engineering Practice*
- [6] Amorengen, J. Van, Klught, P.G.M. Van Der, Lemkes, H.R. Van Nauta. 1990. *Rudder roll stabilization for Ships, Automatica, Vol.26, No.4*
- [7] Alarçin, F., & Gulez, K. (2007). *Rudder Roll Stabilization for Fishing Vessel Using Neural Network Approach, Ocean Engineering*.
- [8] Oktafianto, K. (2015). **Desain dan Analisa Kendali Gerak Autonomous Underwater Vehicle Menggunakan Metode Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)**. *Tesis Jurusan Matematika FMIPA ITS, Surabaya*.
- [9] Mardlijah, Ismanto, W., Ngr, I. G., & Usadha, R. (2009). **Desain Kontrol Posisi Pada Panel Surya Dengan Menggunakan Metode Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)**. *Limits. J. Math. and Its Appl.*, Vol. 6, No.1, May 2009, 35-50

- [10] <https://koarmatim.tnial.mil.id/konten/kri-diponegoro-365/>. Diakses pada 8/31/2018
- [11] Riyanto, B, A. (2017). **Kendali Sudut Pada Gerak Kapal Untuk Pelacakan Lintasan Dubins Menggunakan Metode Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC)**. Tugas Akhir Departemen Matematika FMKSD ITS, Surabaya.
- [12] Aini, O. D. I. (2016). **Sistem Pengendali Maneuver Pada Kapal Perang Dengan Metode Sliding Mode Control**. Tugas Akhir Departemen Matematika FMKSD ITS, Surabaya.
- [13] Fossen, Thor. I. 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicle*.
- [14] Rizan, I, R. (2008). **Analisis dan Perancangan Sistem Pengendali Pada Inverted Pendulum Menggunakan Metode Fuzzy Sliding Mode Control**. Tugas Akhir Departemen Matematika FMKSD ITS, Surabaya.
- [15] Tien, N.T. 2002. *Sliding Control. Applied Nonlinear Control*.
- [16] Zimmermann, H. J. 1996, *Fuzzy Set Theory and Its Applications Third Edition*, Kluwer Academics Pubblisera, Boston.
- [17] Palm, R., Driankov, D., dan Hellendoorn, H. 1997. *Model Based Fuzzy Control: Fuzzy Gain Scheduller and Sliding Mode Fuzzy Controllers*, Berlin: Springer-Verlag
- [18] Majid, T. (2015). **Analisis Performansi Auto Maneuver pada Beberapa Tipe Kapal di Perairan Lepas**. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 7 No.2 pp 79-88

LAMPIRAN A PEMODELAN DINAMIKA KAPAL

Dinamika kapal dimodelkan berdasarkan spesifikasi kapal. Kapal yang digunakan adalah kapal perang kelas SIGMA KRI Diponegoro. Berikut spesifikasi umum dari KRI Diponegoro:

Panjang (LOA)	: 90.71 m
Lebar (B)	: 12.02 m
Massa kapal (M)	: 1818 ton
Kedalaman kapal (T)	: 3.75 m
Kecepatan laju kapal (U)	: 14.4 m/s
<i>Coefisien Blok</i>	: 0.41 m
Pusat massa kapal	: 2.25 m
<i>Massa jenis air laut</i>	: 1014 kg/m ³

Pemodelan dilakukan berdasarkan model matematik yang diturunkan Nomoto:

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

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

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

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

$$\frac{-Y'_v}{\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2} = 1 + 0.4 \frac{C_{BB}}{T}$$

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

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

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

Perhitungan pemodelan dinamika kapal perang :

Diperoleh nilai:

Y'_v	Y'_r	N'_v
-0.00603	-0.000303	-0.000083
N'_r	Y'_v	Y'_r
-0.000323	-0.008423	0.00288
N'_v	N'_r	I'_z
-0.00322	-0.00164	0.000889

Dibentuk menjadi matrik sebagai berikut:

$$M' = \begin{bmatrix} m' - Y'_v & m'x_G - Y'_r \\ m'x_G - N'_v & I'_z - N'_r \end{bmatrix}$$

$$M' = \begin{bmatrix} 0.00603 & 0.000303 \\ 0.0000835 & 0.002212 \end{bmatrix}$$

$$N' = \begin{bmatrix} -Y'_v & m'u - Y'_r \\ -N'_v & m'x_G u' - N'_r \end{bmatrix}$$

$$N' = \begin{bmatrix} 0.008423 & -0.00288 \\ 0.00322 & 0.00164 \end{bmatrix}$$

Matrik di atas dilinierisasi menjadi

$$M = \begin{bmatrix} m'_{11} \times L/U^2 & m'_{12} \times L/U^2 \\ m'_{21} \times L/U^2 & m'_{22} \times L/U^2 \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 0.00264 & 0.012 \\ 0.0000365 & 0.0481 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} n'_{11}/U^2 & n'_{12}L/U^2 \\ n'_{21}/U^2 & n'_{22}L/U^2 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} 0.000585 & -0.01816 \\ 0.000223 & 0.0103 \end{bmatrix}$$

$$\det(M) = 0.0001366$$

$$\det(N) = 0.00009397$$

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

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

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

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

$$T_1 T_2 = 12.5385$$

$$T_1 + T_2 = 5.28665$$

$$K_R = 375.7262$$

$$K_R T_3 = 987.4$$

$$\frac{r}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1 + T_3 s)}{s(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}$$

Maka, pemodelan dinamika kapal menjadi:

$$\frac{r}{\delta_R}(s) = \frac{375.7262 + 987.4s}{12.5385s^2 + 5.2865s + 1}$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN B PEMODELAN ROLL DAMPER

$$M\dot{v} + Nv + G\eta = Bu$$

Dimana $v = [v, p, r]^T$ dan $\eta = [y, \phi, \psi]^T$ adalah keadaan dan $u = [\alpha, \delta]^T$ adalah vector kontrol.

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -mz_G - Y_{\dot{p}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ -mz_G - K_{\dot{v}} & I_x - K_{\dot{p}} & mx_G - K_{\dot{r}} \\ mx_G - N_{\dot{v}} & mx_G - N_{\dot{p}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & mu_0 - Y_r \\ -K_v & -N_p & -mz_G u_0 - K_r \\ -N_v & -N_p & mx_G u_0 - N_r \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & WGM_T & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} Y_{\alpha} & Y_{\delta} \\ K_{\alpha} & N_{\delta} \\ N_{\alpha} & N_{\delta} \end{bmatrix}$$

$Y'_{\dot{v}}$	$Y'_{\dot{r}}$	$N'_{\dot{v}}$	$N'_{\dot{r}}$
-0.00603	-0.000303	-0.000083	-0.000323
Y'_v	Y'_r	N'_v	N'_r
-0.008423	0.00288	-0.00322	-0.00164
Y'_{δ}	N'_{δ}	$I'z$	$I'r$
12.566	-6.283	0.000889	0.000889
K'_{δ}	Y'_p	K'_p	N'_p
-0.02375	0.000062	0.000062	0.000062

K'_α	Y'_α	N'_α	K'_β
0.001	0.001	0.001	0.000006
Y'_β	N'_β	K'_ν	K'_ν
0.00006	0.00006	0.00006	0.00006

$$M = \begin{bmatrix} 1818.007 & 9544.49 & 9544.5 \\ 0.000028 & 0.00098 & 0.000028 \\ 9544.50 & 9544.49 & 274037.2 \end{bmatrix}$$

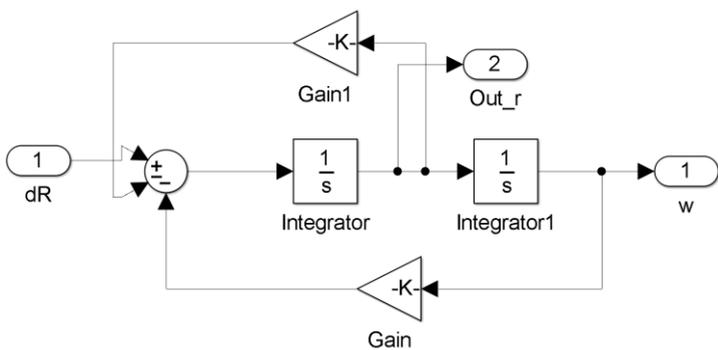
$$M = \begin{bmatrix} 0.0102 & 0.000062 & 26179.203 \\ 0.000062 & 0.000062 & 0.000433 \\ 0.00321 & 0.000062 & 1374440.802 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.94 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

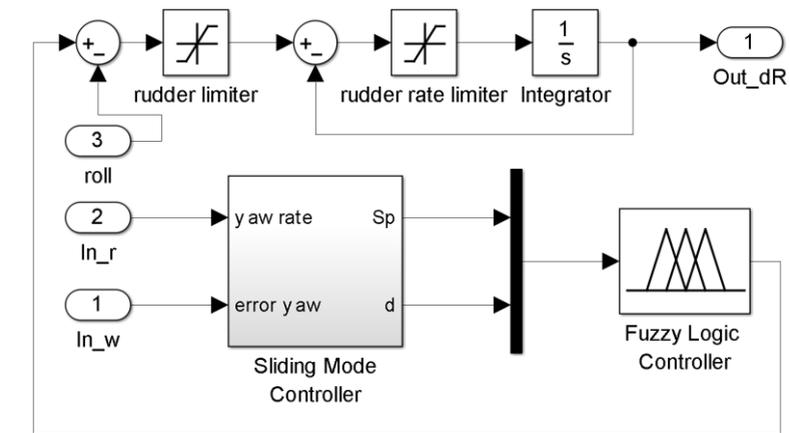
$$B = \begin{bmatrix} Y_\alpha & Y_\delta \\ K_\alpha & N_\delta \\ N_\alpha & N_\delta \end{bmatrix}$$

$$\phi(s) = \frac{-0,007\delta(s)+0,003\alpha(s)-0,08r(s)}{0,001s^2+0,00006s+2,94}$$

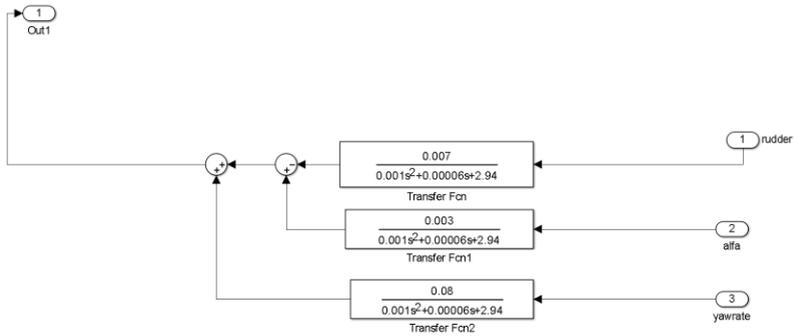
LAMPIRAN C MODEL SIMULASI



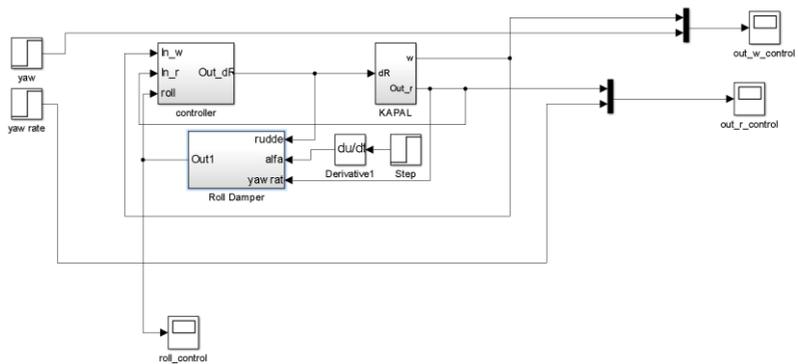
Plan dinamika kapal perang KRI Diponegoro



Kontroller FSMC



Model Roll Damper



Sistem pengendali FSMC pada kapal perang KRI Diponegoro

BIODATA PENULIS



Penulis biasa dipanggil Anang Setyo Nugroho. Ia dilahirkan di Surabaya pada tanggal 13 Juli 1996 sebagai anak pertama dari dua bersaudara. Pendidikan formal yang pernah penulis tempuh antara lain SDN Kalirungkut 1 Surabaya, SMPN 35 Surabaya, dan SMAN 2 Surabaya. Setelah lulus SMA, penulis melanjutkan S1 Matematika di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2014. Di jurusan Matematika ITS penulis mengambil Bidang Minat Matematika Terapan. Apabila ingin memberikan saran, kritik dan pertanyaan mengenai Tugas Akhir ini, dapat disampaikan melalui *e-mail* anangsetyon.asn@gmail.com