

**PENERAPAN KENDALI LOGIKA *FUZZY*  
PADA SIRIP STABILISATOR  
DI KAPAL PENUMPANG MONOSTAB 45**

**SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

**SYAFRIYADI ADNAN  
NIM. 0001060386 - 63**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2007**

**PENERAPAN KENDALI LOGIKA *FUZZY*  
PADA SIRIP STABILISATOR  
DI KAPAL PENUMPANG MONOSTAB 45**

**SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

**SYAFRIYADI ADNAN**

**NIM. 0001060386 - 63**

Mengetahui dan Menyetujui,  
Dosen Pembimbing

**FITRIANA SUHARTATI, ST, MT**  
NIP. 132 206 527

**Ir. ERNI YUDANINGTYAS, MT**  
NIP. 131 879 035

**PENERAPAN KENDALI LOGIKA *FUZZY*  
PADA SIRIP STABILISATOR  
DI KAPAL PENUMPANG MONOSTAB 45**

Disusun oleh:

**SYAFRIYADI ADNAN  
NIM. 0001060386 - 63**

**SKRIPSI INI TELAH DIUJI DAN DINYATAKAN LULUS PADA  
TANGGAL 25 JANUARI 2007**

Dosen penguji

**Ir. CHAIRUZZAINI  
NIP. 130 682 589**

**Ir. PURWANTO, MT.  
NIP. 131 574 847**

**RUSMI AMBARWATI, ST, MT  
NIP. 132 258 188**

**Dipl-Ing.Ir. M. RUSLI  
NIP. 131 653 473**

**MENGETAHUI  
KETUA JURUSAN TEKNIK ELEKTRO**

**Ir. PURWANTO, MT.  
NIP. 131 574 847**

## PENGANTAR

Assalamu'alaikum wr. wb.,

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan pembuatan laporan skripsi ini dengan lancar dan baik.

Laporan skripsi ini merupakan salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang

Dengan segala upaya dan kemampuan, penulis telah berusaha untuk menyelesaikan laporan ini sesempurna mungkin. Namun penulis menyadari penulis hanya manusia biasa dan tidak ada karya yang sempurna, oleh karena itu saran dan kritik sangat penulis harapkan untuk penyempurnaan dan pengembangan laporan ini.

Akhir kata penulis berharap semoga laporan ini dapat bermanfaat sekaligus memberikan tambahan pengetahuan serta berguna bagi pembaca dan penulis sendiri.

*Billahittaufiqwalhidayah*

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Malang, Januari 2007

Penulis

## UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya skripsi dengan judul “ Penerapan Kendali Logika *Fuzzy* Pada Sirip Stabilisator Di Kapal Penumpang Monostab 45 ” ini, dengan tulus ikhlas dan kerendahan hati, ucapan terima kasih penulis persembahkan kepada :

- @ Allah SWT atas segala curahan rahmat, nikmat dan hidayah-Nya serta Nabi Muhammad SAW pembawa risalah kebenaran Islam, yang menjadi motivator untuk terus berjuang dalam hidup.
- @ Ibu Fitriana Suhartati, ST, MT serta ibu Ir. Erni Yudaningtyas, MT selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan pengarahan selama proses penyusunan sampai terwujudnya laporan ini.
- @ Bapak Ir. Purwanto MT dan Bapak Ir. Heri Purnomo selaku ketua dan sekretaris jurusan Teknik Elektro. Seluruh staf akademik dan non akademik yang telah banyak membantu dalam penulisan skripsi ini
- @ Kedua orang tuaku, Ayahanda M. Adnan Aziz, BA dan Ibunda Yisraida Nasution atas segala kerja keras, doa, kasih sayang dan pengorbanannya selama ini. Adekku Isra Afrizal dan Riski Ayunda, yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini dan dorongan semangatnya.
- @ Ita, untuk motivasi, pengertian, yang selalu sabar menemani selama ini, dan juga Nyak Iryani untuk doa dan nasehatnya.
- @ Mas Wien, Mas Totok, Mas Sondi, Mas Wahyu dll E'99 UB untuk bantuan sumber pustaka dan pertemanan sesama penghuni *Lucky Stone*
- @ Rio, Yono, Annas, Domi, dll, di WEB 2000, temen-temen seperjuangan asisten di Lab. Kontrol Fathan, Wijaya, Faiq, Arif, Yani atas kritik, saran dan motivasi untuk menyelesaikan skripsi ini
- @ <http://steven.wcanada.ca> untuk update yang selalu ditunggu dan smoga semakin maju “*turn the sereitei upside down*”
- @ Teman-teman sesama pengurus IPPMA Malang dan anggotanya untuk kekeluargaan dan persahabatan selama ini *Udep Saree, Matee Syahid*
- @ Serta semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu dan telah membantu terselesaikannya skripsi ini.

DAFTAR ISI

	Halaman
<b>PENGANTAR.....</b>	<b>i</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH.....</b>	<b>ii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR GRAFIK.....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>viii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
<b>BAB II DASAR TEORI.....</b>	<b>5</b>
2.1 Tinjauan Umum.....	5
2.2 Dinamika Kapal.....	5
2.3 Prinsip Kestabilan Kapal.....	7
2.4 Kapal Monostab 45.....	9
2.5 Sirip Stabilisator.....	10
2.6 Logika <i>Fuzzy</i> .....	14
2.6.1 Himpunan <i>Fuzzy</i> .....	14
2.6.2 <i>Membership Function</i> (Fungsi Keanggotaan).....	15
2.6.3 Operasi-Operasi Pada Himpunan <i>Fuzzy</i> .....	18
2.7 Penendali Logika <i>Fuzzy</i> .....	19
2.7.1 Umum.....	19
2.7.2 Fuzzifikasi.....	20
2.7.3 <i>Rule Evaluation</i> .....	21
2.7.4 Inference Engine.....	22

2.7.5 Defuzzifikasi .....	23
<b>BAB III METODOLOGI .....</b>	<b>27</b>
3.1 Pengambilan Data .....	27
3.2 Analisis Pengendalian Sirip Stabilisator .....	27
3.3 Perancangan Pengendali Logika <i>Fuzzy</i> .....	27
3.4 Pengujian dan Analisis Hasil Pengujian .....	28
3.5 Penarikan Kesimpulan dan Saran .....	28
<b>BAB IV PEMODELAN SISTEM .....</b>	<b>29</b>
4.1 Pendahuluan .....	29
4.2 Aktuator Hidrolik .....	31
4.3 Sirip Stabilisator .....	33
4.4 Model Dinamik Kapal Monostab 45 .....	34
4.5 Girooskop .....	36
4.6 Model Gangguan Ombak .....	38
<b>BAB V PENGENDALIAN LOGIKA <i>FUZZY</i> DAN SIMULASI SISTEM</b>	<b>40</b>
5.1 Perancangan Kendali Logika <i>Fuzzy</i> .....	40
5.2 Proses Fuzzifikasi .....	40
5.3 Inferensi .....	42
5.4 Proses Defuzzifikasi .....	44
5.5 Simulasi Model .....	44
5.6 Simulasi Pengendali Logika <i>Fuzzy</i> .....	45
<b>BAB VI PENUTUP .....</b>	<b>49</b>
6.1 Kesimpulan .....	49
6.2 Saran .....	49
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>51</b>
<b>LAMPIRAN 1 DATA PARAMETER SISTEM .....</b>	<b>52</b>
<b>LAMPIRAN 2 M-FILE UNTUK FIS EDITOR .....</b>	<b>53</b>
<b>LAMPIRAN 3 BLOK SIMULASI SIMULINK .....</b>	<b>55</b>
<b>LAMPIRAN 4 CONVERSION TABLE .....</b>	<b>56</b>

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	Dinamika goyang guling, anggukan dan gelengan..... 6
Gambar 2.2	Dinamika lemparan, empasan dan sentakan ..... 6
Gambar 2.3	Kestabilan kapal ..... 7
Gambar 2.4	Kapal Monostab 45..... 9
Gambar 2.5	Lokasi pemasangan sirip stabilisator ..... 11
Gambar 2.6	<i>Typical active fin stabilizer</i> ..... 11
Gambar 2.7	<i>Ilustrasi streamline</i> ..... 12
Gambar 2.8	Konsep hidrodinamika sirip stabilisator ..... 13
Gambar 2.9	<i>S-Function</i> ..... 16
Gambar 2.10	<i><math>\pi</math>-Function</i> ..... 17
Gambar 2.11	<i>T-Function</i> ..... 17
Gambar 2.12	Definisi himpunan <i>fuzzy</i> lambat, sedang, cepat..... 19
Gambar 2.13	Struktur dasar kontroler logika <i>fuzzy</i> ..... 19
Gambar 2.14	Sistem kontrol logika <i>fuzzy</i> secara umum..... 20
Gambar 2.15	Metode penalaran <i>fuzzy</i> MAX-MIN ..... 23
Gambar 2.16	Metode penalaran <i>fuzzy</i> MAX-DOT..... 23
Gambar 2.17	Proses defuzzifikasi dengan metode <i>centroid</i> ..... 25
Gambar 4.1	Blok diagram model..... 29
Gambar 4.2	Diagram fisik sistem sirip stabilisator ..... 30
Gambar 4.3	Aktuator hidrolik ..... 31
Gambar 4.4	Konstruksi giroskop..... 36
Gambar 4.5	Giroskop roll..... 37
Gambar 4.6	Diagram vektor torsi-momentum ..... 38
Gambar 4.7	Spektrum ombak dengan kecepatan angin berbeda..... 39
Gambar 5.1	FIS editor ..... 40
Gambar 5.2	<i>Membership function editor error</i> untuk 5 himpunan fuzzy ..... 41
Gambar 5.3	<i>Membership function editor delta error</i> untuk 5 himpunan fuzzy 41
Gambar 5.4	<i>Membership function editor output</i> untuk 5 himpunan fuzzy.... 42
Gambar 5.5	<i>Rule editor</i> untuk 5 himpunan <i>fuzzy</i> ..... 43

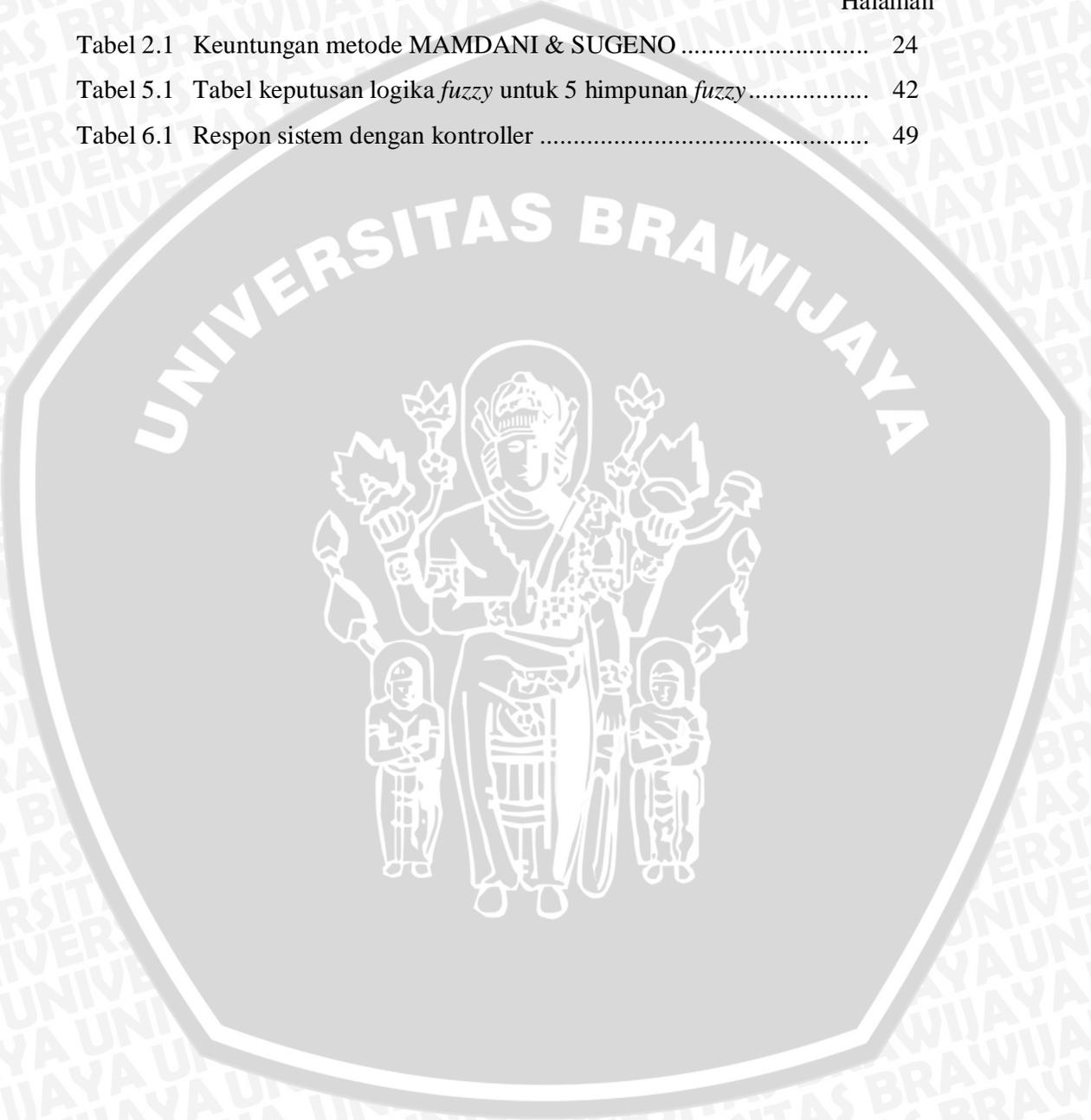
## DAFTAR GRAFIK

	Halaman
Grafik 5.1 Respon sistem tanpa kontroller .....	44
Grafik 5.2 Respon sistem dengan kontroller <i>fuzzy</i> tanpa gangguan.....	45
Grafik 5.3 Sinyal gangguan dengan kecepatan angin 15 knots .....	46
Grafik 5.4 Respon sistem dengan gangguan kecepatan angin 15 knots.....	46
Grafik 5.5 Sinyal gangguan dengan kecepatan angin 20 knots .....	47
Grafik 5.6 Respon sistem dengan gangguan kecepatan angin 20 knots.....	47
Grafik 5.7 Sinyal gangguan dengan kecepatan angin 30 knots .....	48
Grafik 5.8 Respon sistem dengan gangguan kecepatan angin 30 knots.....	48



## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Keuntungan metode MAMDANI & SUGENO .....	24
Tabel 5.1 Tabel keputusan logika <i>fuzzy</i> untuk 5 himpunan <i>fuzzy</i> .....	42
Tabel 6.1 Respon sistem dengan kontroller .....	49



## ABSTRAK

SYAFRIYADI ADNAN. NIM. 0001060386-63. Jurusan Teknik Elektro. Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Januari 2007. Judul :” **Penerapan Kendali Logika Fuzzy Pada Sirip Stabilisator Di Kapal Penumpang Monostab 45**”. Dosen Pembimbing: Fitriana Suhartati, ST, MT dan Ir. Erni Yudaningtyas, MT.

Kapal Monostab 45 adalah jenis kapal penumpang dengan panjang 47 meter, bobot  $\pm 150$  ton, dan kapasitas angkut 512 orang penumpang. Kapal yang dirancang oleh Rodriquez Cantieri Navali S.p.A., Messina, Italia ini sering digunakan untuk keperluan pelayaran jarak menengah, khususnya penyeberangan antar pulau.

Sebagai penggerak kapal digunakan sepasang *waterjet* sehingga kapal mampu berlayar dengan kecepatan jelajah 35 knot. Kecepatan 35 knot yang setara dengan  $64,865 \text{ km/jam}$  merupakan kecepatan jelajah yang cukup tinggi untuk jenis kapal laut. Untuk membantu mengurangi goyang guling dan memperbaiki kestabilan kapal maka dipasang dua sirip stabilisator yang identik pada bagian tengah lambung kapal.

Menurut Kawazoe yang dalam jurnalnya yang berjudul *Effect of Fin Area and Control Methods on Reduction of Roll Motion with Fin Stabilizers*, mengatakan bahwa kendali logika *fuzzy* akan bekerja dengan baik pada kondisi periode ombak yang panjang (*long periodic wave*). Hal ini yang menjadi dasar penyusunan skripsi ini dengan menggunakan kendali logika *fuzzy* pada sirip stabilisator untuk mengurangi efek goyang guling (*roll motion*) yang ditimbulkan oleh ombak laut. Sehingga diharapkan kapal dapat berlayar dengan gulingan yang tereduksi seminimal mungkin untuk meningkatkan kenyamanan penumpang serta demi keselamatan pelayaran.

Dari hasil simulasi pengendalian ini dengan menggunakan *software* MATLAB 7.1 diperoleh hasil yang cukup baik. Pada saat diberikan gangguan ombak dengan kecepatan angin 15 knots, 20 knots, dan 30 knots menghasilkan sudut guling yang dialami oleh kapal Monostab 45 mendekati nilai 0 radian.

Kata kunci : Kendali Logika *Fuzzy*, Sirip Stabilisator (*Fin Stabilizers*), Kapal Monostab 45, Goyang Guling (*Roll Motion*)

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kapal laut dibuat dengan tujuan untuk mengangkut penumpang, barang-barang maupun senjata melalui laut. Untuk mencapai hal tersebut sebuah kapal harus memiliki beberapa karakteristik dasar. Harus bisa mengapung dengan posisi stabil tegak lurus, berlayar dengan kecepatan yang tepat, mampu bergerak di laut dan dalam kondisi air terbatas, cukup kuat untuk menghadapi cuaca buruk serta hantaman ombak. (Bhattacharyya, 1978)

Diantara karakteristik dasar di atas kenyamanan merupakan salah satu hal yang sangat penting dalam berlayar. Padahal banyak faktor yang menyebabkan terganggunya kestabilan kapal, diantaranya adalah ombak, kecepatan angin, kecepatan jelajah kapal dan kondisi muatan kapal. Faktor-faktor tersebut merupakan gangguan (*disturbances*) sehingga menimbulkan efek ketidakpastian (*uncertainties*) dalam proses pemodelan yang mempengaruhi kinerja sistem kontrol yang didesain.

Salah satu upaya untuk meningkatkan kenyamanan kapal adalah dengan memakai sirip stabilisator untuk mengurangi goyang guling (*roll motion*). Sirip ini digerakkan oleh sebuah aktuator hidrolik dan dikendalikan secara otomatis oleh sebuah controller. Dalam penelitian sebelumnya telah digunakan controller PID dan metode  $H_{\infty}$  Robust. Namun menurut Kawazoe dalam jurnalnya bahwa performa controller di atas akan menurun dalam kondisi periode gelombang yang panjang. Untuk mengatasi hal tersebut dapat digunakan sistem kontrol logika *fuzzy*.

Sejak diperkenalkan oleh Prof. Lotfi Zadeh pada tahun 1965, teori logika *fuzzy* telah mengalami perkembangan yang pesat dan diaplikasikan dalam berbagai sistem kendali dibidang industri maupun peralatan rumah tangga. Dibandingkan dengan logika klasik, logika *fuzzy* lebih mudah karena cara pengambilan keputusan didasarkan pengambilan keputusan manusia dan bahasa alam. Pada dasarnya pengendalian logika *fuzzy* merupakan metodologi

pengendalian yang mensimulasikan cara berpikir manusia dengan melibatkan ketidakpastian yang terdapat pada sistem fisik.

Dalam skripsi ini diambil kapal Monostab 45 sebagai objek penelitian. Kapal ini didesain oleh Rodrigues Cantieri Navali S.p.A, Messina, Italia, merupakan kapal penumpang dengan kapasitas penumpang 512 orang. Kapal ini dilengkapi dengan sirip stabilisator yang berfungsi mengurangi goyang guling (*roll motion*) kapal akibat hantaman ombak laut. Sehingga diharapkan dapat meningkatkan kemampuan operasi kapal dan kenyamanan serta keamanan penumpang.

### 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan diangkat dan dicari solusinya dalam skripsi ini adalah sebagai berikut :

- 1) Bagaimana merancang dan menentukan model matematis dari sistem gerak guling (*roll motion*) kapal Monostab 45 dengan metode pengendali logika *fuzzy*.
- 2) Bagaimana performansi sirip stabilisator untuk mengurangi gerak guling (*roll motion*) pada kapal Monostab 45 dengan menggunakan kontrol logika *fuzzy*.

### 1.3 Batasan Masalah

Karena begitu luasnya objek kajian maka perlu dilakukan pembatasan masalah agar pembahasan lebih terfokus pada rumusan masalah. Adapun batasan masalah dengan skripsi ini adalah :

- a) Objek atau *plant* yang akan dikontrol adalah sistem kendali sirip stabilisator pada kapal Monostab 45 dengan asumsi ukuran panjang kapal 47 m dan bobot mati  $\pm 150$  ton yang berlayar dengan kecepatan 35 knot (64 km/jam).
- b) Pembahasan hanya mengenai penerapan sistem kontrol logika *fuzzy* pada sirip stabilisator di kapal penumpang Monostab 45.

- c) Kapal hanya mengalami efek gerak guling (*roll motion*), efek gerak yang lain diabaikan pengaruhnya terhadap dinamika gerak kapal.
- d) Kapal bergerak lurus dengan kecepatan konstan pada kelajuan nominalnya.
- e) Kapal diasumsikan sebagai benda kaku yang elastisitasnya dapat diabaikan.
- f) Sinyal uji yang diberikan sebagai *input* adalah sinyal tangga (*step*).
- g) Data-data sistem diperoleh berdasarkan data-data sekunder yang terdapat pada jurnal terkait dengan pokok bahasan dalam skripsi ini.
- h) Pemodelan komponen sistem kontrol yang terkait mengacu pada literatur yang membahas objek skripsi ini.
- i) Ketidakpastian yang terjadi diasumsikan berupa perubahan faktor kecepatan angin terhadap gangguan torsi ombak eksternal.
- j) Simulasi dilakukan dengan program MATLAB 7.1

#### 1.4 Tujuan

Tujuan dari skripsi ini adalah mensimulasikan penerapan sistem kontrol logika *fuzzy* pada sirip stabilisator kapal penumpang Monostab 45 untuk mengurangi efek goyang guling sehingga sistem secara keseluruhan memiliki dinamika respon sesuai dengan kriteria yang diinginkan.

#### 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang dipakai pada pembuatan tugas akhir ini adalah

##### **:Bab I PENDAHULUAN**

Bab ini berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika penulisan.

##### **Bab II DASAR TEORI**

Bab ini dijelaskan tentang tinjauan umum kapal Monostab 45, dinamika kapal dan kestabilannya, serta mengenai dasar-dasar teori sistem kontrol logika *fuzzy*.

### **Bab III METODOLOGI**

Bab ini berisi penjelasan mengenai metode yang digunakan dalam menyelesaikan permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir ini.

### **Bab IV PEMODELAN SISTEM**

Bab ini berisi pembahasan mengenai setiap komponen yang akan dibutuhkan dalam proses simulasi dan penurunan rumus sehingga diperoleh nilainya, serta blok diagram sistem

### **Bab V PENGEDALIAN LOGIKA FUZZY DAN SIMULASI SISTEM**

Bab ini berisi perancangan sistem kontrol logika *fuzzy* dan penerapannya pada *plant* serta simulasi sistem.

### **Bab VI PENUTUP**

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari keseluruhan penyusunan tugas akhir ini.



## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 Tinjauan Umum

Dalam bab ini akan dibahas tentang dinamika dan prinsip kestabilan kapal secara umum, spesifikasi monostab 45, proses reduksi gulingan menggunakan sirip stabilisator dan penggunaan controller *fuzzy*. Pada pembahasan pengendali logika *fuzzy* akan dibahas tentang struktur umum pengendali logika *fuzzy*, fuzzifikasi, *rule evaluation* dan defuzzifikasi.

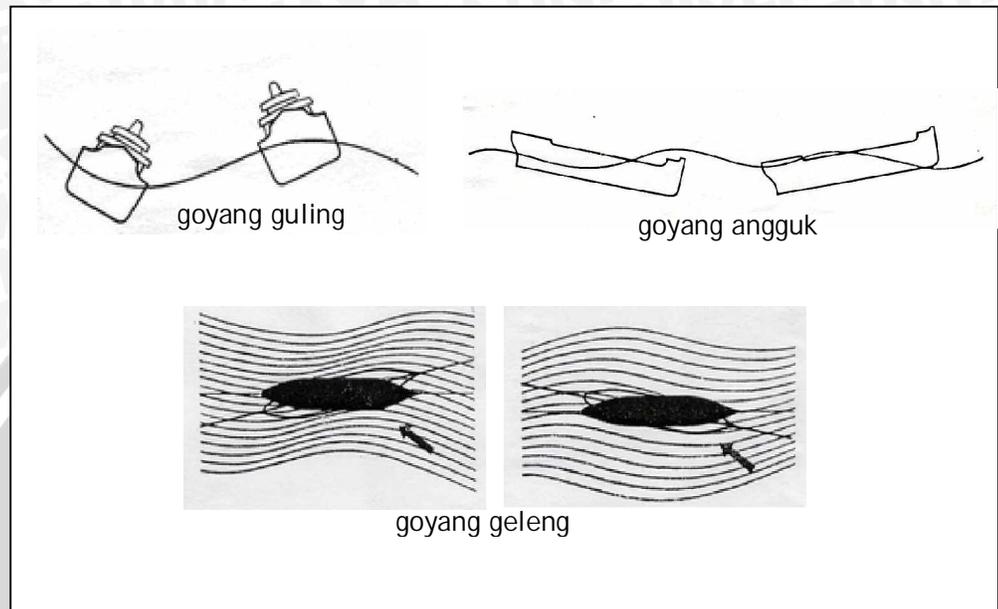
### 2.2 Dinamika Kapal

Kapal yang berlayar di tengah laut harus mampu melawan hambatan angin dan gelombang. Di laut terbuka dengan jalan angin yang tanpa halangan selebar 2000 kilometer atau lebih, suatu angin segar lambat laun akan membentuk gelombang setinggi tiga meter atau lebih. Pada saat badai, gelombang yang terjadi mampu mencapai ketinggian 15 meter atau lebih dengan kecepatan angin yang mencapai ratusan km/jam.

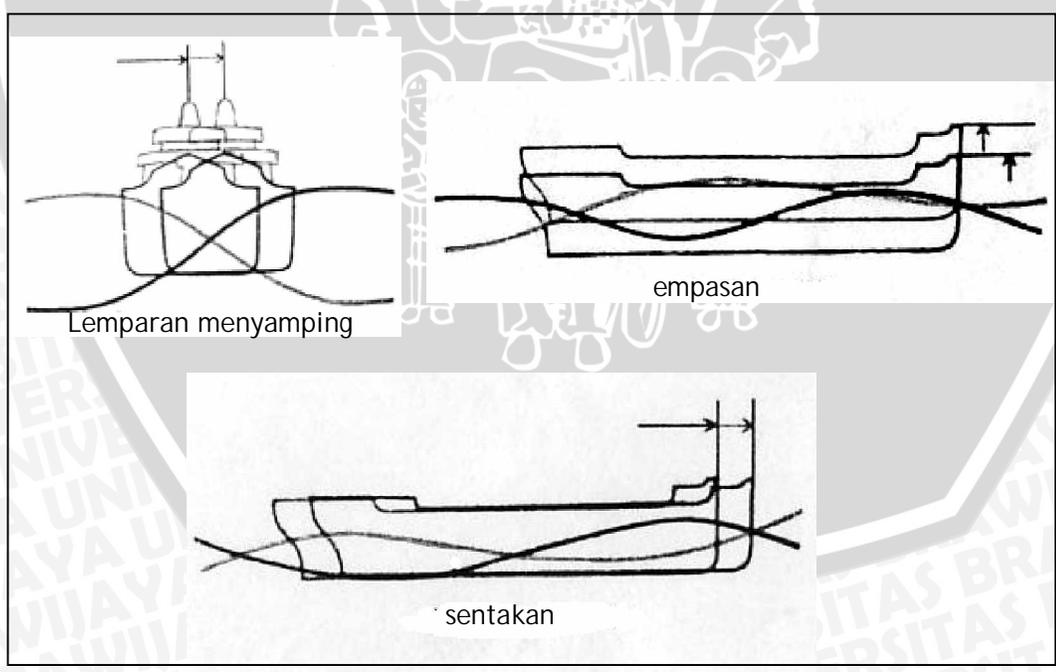
Faktor angin dan gelombang menimbulkan gerak dinamik pada kapal yang berlayar di tengah laut. Sebuah kapal mempunyai enam jenis gerak dinamika atau disebut juga derajat kebebasan (*degree of freedom*), yaitu:

1. Goyang guling: gerak ini terjadi jika ombak datang dari samping sehingga menyebabkan kapal berguling ke kanan dan kiri.
2. Goyang angguk: adalah gerak yang terjadi akibat serangan ombak yang menyebabkan haluan dan buritan bergantian menukik dan menengadah.
3. Goyang geleng: merupakan gerak kapal yang terjadi jika ombak datang agak menyerong dari haluan atau buritan sehingga mengubah arah kapal.
4. Lemparan menyamping: merupakan gerak melintang yang terjadi jika kapal bergeser dari satu sisi ke sisi yang lain akibat ombak yang berturutan
5. Empasan: ialah gerak vertikal kapal yang diakibatkan oleh gerak naik turun ombak

6. Sentakan: adalah gerak memanjang jika kapal terkena ombak yang berjalan searah panjang lambung sehingga laju kapal dipercepat atau diperlambat.



**Gambar 2.1** Dinamika goyang guling, anggukan dan gelengan  
 Sumber : Budi, 2003 : 5



**Gambar 2.2** Dinamika lembaran, empasan dan sentakan  
 Sumber : Budi, 2003 : 6

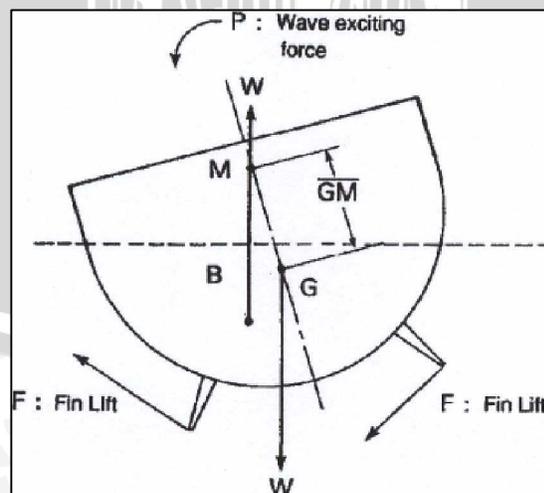
Dari semua gerak dinamik kapal ini, goyang guling merupakan dinamika kapal yang terkait langsung dengan kestabilan kapal.

Tiap kapal memiliki periode gulingnya sendiri, yakni waktu yang diperlukan kapal untuk berguling bebas dari kiri ke kanan dan kembali ke kedudukan semula. Periode goyang guling alamiah kapal ditentukan oleh bentuk lambung, lebar kapal, dan distribusi beratnya. Bila gelombangnya cukup beraturan, maka perubahan arah perjalanan atau kecepatan dapat menghentikan goyang guling ini. Goyang guling menjadi berbahaya jika periode gelombang ombak menyamai periode goyang guling alamiah kapal yang dikenal sebagai gejala sinkronisme. (Budi, 2003)

### 2.3 Prinsip Kestabilan Kapal

Kestabilan kapal didefinisikan sebagai kecenderungan suatu kapal yang sedang bergoyang ke kanan-kiri untuk selalu kembali ke kedudukan tegak. Unsur kestabilan ini sangat vital dalam perancangan kapal karena menentukan faktor keselamatan pelayaran. Ada dua gaya yang bekerja berlawanan arah yang mempengaruhi kestabilan kapal, yaitu:

- keseluruhan bobot kapal atau gaya berat vertikal ke bawah yang bekerja pada pusat gravitasi.
- gaya sangga air yang bekerja vertikal ke atas pada pusat keapungan.



**Gambar 2.3** Kestabilan kapal  
Sumber: Kawazoe, 1994 : 26

Pusat gravitasi merupakan titik dimana berat total kapal diasumsikan terkonsentrasi. Posisi pusat gravitasi  $G$  ditentukan oleh distribusi berat kapal.

Hukum Archimedes menjelaskan bahwa suatu benda yang sebagian atau seluruhnya terendam dalam cairan akan disangga oleh suatu gaya yang besarnya sama dengan berat cairan yang didesaknya. Berdasarkan hukum Archimedes ini maka pada lambung kapal yang terendam air akan bekerja gaya berarah ke atas yang menjaga kapal tetap terapung. Keseluruhan gaya yang bekerja dapat diasumsikan terkonsentrasi pada satu titik. Titik ini disebut pusat keapungan, dan lazim disimbolkan  $B$ .

Untuk kapal dalam keadaan tenang, posisi titik pusat gravitasi  $G$  berada di atas pusat keapungan  $B$  pada satu garis vertikal tepat di tengah kapal. Kedudukan titik-titik ini akan berubah jika badan kapal miring. Jika kapal miring ke sisi kanan, maka pusat keapungan akan bergeser ke kanan sehingga pusat gravitasi akan berada di sebelah kiri pusat keapungan. Gaya berat ke bawah bekerja bersama gaya keapungan ke atas akan memutar kapal kembali ke kedudukan semula.

Pierre Bouguer, seorang ahli matematika dan pendiri ilmu struktur kapal modern berkebangsaan Prancis di pertengahan abad ke-18, menemukan satu cara praktis untuk menilai kestabilan kapal. Konsep Bouguer didasarkan atas suatu titik yang disebut metasenter  $M$ , yaitu titik perpotongan antara garis tengah pembelah badan kapal dengan garis vertikal melalui pusat keapungan ketika posisi kapal miring. Jarak antara metasenter dan pusat gravitasi  $GM$  ini menentukan kestabilan kapal. Jika  $G$  berada di atas  $M$ , kapal mudah terbalik. Jika  $GM$  kecil, artinya  $G$  terlalu dekat  $M$  sedangkan  $G$  berada di bawah maka kapal dapat mengguling lalu kembali ke kedudukan tegak perlahan-lahan. Sedangkan jika  $G$  terlalu jauh di bawah  $M$ , maka kapal akan menjadi “kaku”, artinya akan kembali tegak dengan sentakan yang mungkin dapat merusak muatan dan melukai awak serta penumpang.  $GM$  yang aman bagi rata-rata kapal dengan muatan penuh kira-kira sebesar lima persen lebar kapal di tempat yang paling lebar. (Budi, 2003).

Ada tiga kondisi sebuah kapal dikatakan dalam posisi stabil yaitu (Hind, 1982 : 27) :

1. Titik pusat keapungan harus sama dengan berat kapal ( $W = B$ )
2. Titik B harus berada dalam satu garis vertikal dengan titik G
3. Titik G harus berada di bawah titik M

#### 2.4 Kapal Monostab 45

Kapal Monostab 45 adalah jenis kapal penumpang dengan panjang 47 meter, bobot  $\pm 150$  ton, dan kapasitas angkut 512 orang penumpang. Kapal yang dirancang oleh Rodriquez Cantieri Navali S.p.A., Messina, Italia ini sering digunakan untuk keperluan pelayaran jarak menengah, khususnya penyeberangan antar pulau.

Sebagai penggerak kapal digunakan sepasang *waterjet*. Dengan sepasang penggerak *waterjet* ini, kapal mampu berlayar dengan kecepatan jelajah 35 knot. Kecepatan jelajah 35 knot ini merupakan titik operasi kapal dimana sebagian besar pelayaran pada keadaan normal dilakukan dalam kecepatan ini. Kecepatan 35 knot yang setara dengan  $64,827 \text{ km/jam}$  atau  $18 \text{ m/s}$  merupakan kecepatan jelajah yang cukup tinggi untuk jenis kapal laut. Dengan mempertimbangkan kondisi laut yang tak tentu dan pelayaran berkecepatan tinggi maka kapal akan menghadapi dinamika gerak guncangan dan gulingan yang signifikan.

Catatan :  $1 \text{ knot} = 1,688 \text{ ft/s} = 0,3048 \text{ m/s} = 1,097 \text{ km/h}$  (Bhattacharyya, 1978:482)



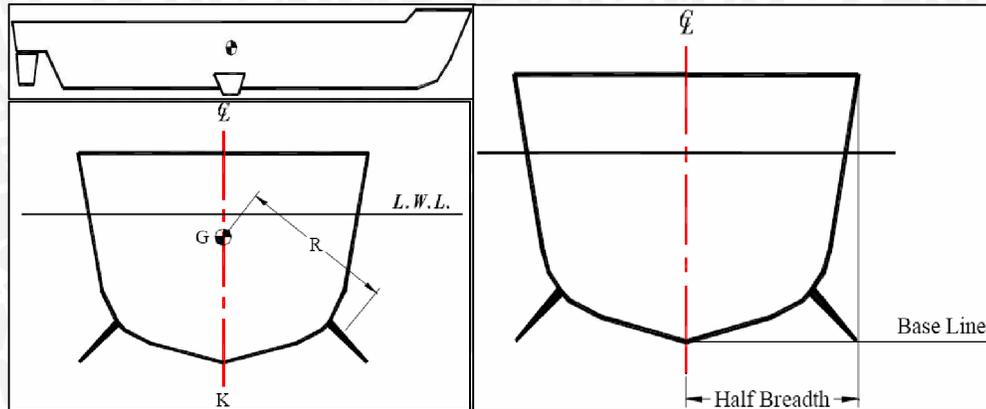
**Gambar 2.4** Kapal Monostab 45  
Sumber: Pacinotti

Bentuk lambung kapal Monostab 45 telah dirancang sedemikian rupa untuk mendapatkan kestabilan yang baik. Untuk membantu mengurangi goyang guling dan memperbaiki kestabilan kapal maka dipasang dua sirip stabilisator di lambung pada bagian tengah kapal. Kestabilan kapal berkaitan langsung dengan keselamatan pelayaran dan kenyamanan penumpang serta perhitungan ekonomis dari segi konsumsi bahan bakar.

## 2.5 Sirip Stabilisator

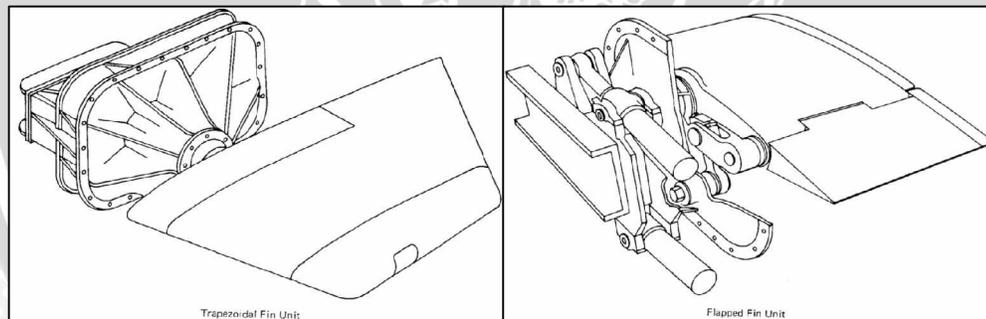
Untuk mereduksi gulingan dan meningkatkan kenyamanan dan keamanan pelayaran, kapal-kapal modern telah dilengkapi dengan berbagai peralatan anti guling. Beberapa peralatan anti guling yang lazim digunakan adalah *bilge keel*, *gyroscopic stabilizer*, *movement of weight*, *rudder action*, *jet flaps*, *passive/active roll tank*, dan *fin stabilizer* (sirip stabilisator). Masing-masing peralatan anti gulingan ini memiliki kinerja dan karakter tersendiri yang bersifat spesifik. Dan beberapa diantaranya sudah tidak digunakan lagi sekarang ini karena pertimbangan ekonomis. (Bhattacharyya, 1978 : 280)

Sistem sirip stabilisator mampu mengurangi efek gulingan kapal secara efektif ketika kapal berlayar di laut bebas. Teknologi ini ditemukan di tahun 1922 oleh Dr. Shintaro Motora dan telah diterapkan secara praktis di berbagai kapal modern saat ini. Di Jepang, tipe *fixed fin stabilizer* digunakan untuk kepentingan angkatan laut. Sirip stabilisator ini dipasang di kapal patroli dan kapal induk untuk menjaga keseimbangan kapal sehingga helikopter dapat mendarat di dan lepas landas dari kapal dengan aman. Pada perkembangan selanjutnya teknologi *retractable fin stabilizer* diadopsi untuk diterapkan pada kapal feri dengan tujuan untuk memperbaiki kenyamanan penumpang dan meningkatkan faktor keamanan pelayaran. (Kawazoe, 1994 : 25)



**Gambar 2.5** Lokasi pemasangan sirip stabilisator  
 Sumber: KROSYS Technical Manual For Fin Stabilization System : 12

Sirip stabilisator dipasang pada kedua sisi kapal di lambung seperti terlihat dalam Gambar 2.5. Kedua sirip bekerja dalam arah saling bertentangan. Jika kapal berguling, maka giroskop yang peka bereaksi terhadap sudut dan kecepatan guling. Sinyal ini kemudian diumpankan ke pengendali yang akan memberikan aksi kontrol sebagai upaya koreksi.



**Gambar 2.6** Typical active fin stabilizer  
 Sumber: Bhattacharyya, 1978 : 293

Sirip stabilisator bekerja berdasarkan prinsip perbedaan tekanan antara kedua permukaan sirip yang membangkitkan gaya angkat. Adanya perbedaan tekanan dijelaskan oleh sebuah prinsip yang diajukan oleh ahli matematika Swiss bernama Daniel Bernoulli. Bernoulli menemukan hubungan antara tekanan zat alir yang bergerak dengan kecepatannya, yang dikenal dengan hukum Bernoulli (Technical Manual For Fin Stabilization System : 13). Secara matematis hukum Bernoulli dinyatakan dengan persamaan:

$$P_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = P_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 \quad (2-1)$$

dengan

$P_1$  : tekanan di titik 1 ( $\text{N/m}^2$ )

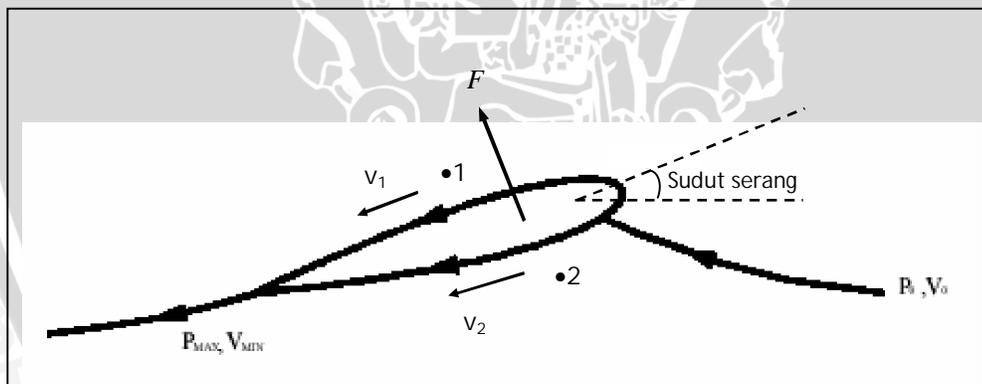
$v_1$  : kecepatan aliran air di titik 1 ( $\text{m/s}^2$ )

$P_2$  : tekanan di titik 2 ( $\text{N/m}^2$ )

$v_2$  : kecepatan aliran air di titik 2 ( $\text{m/s}^2$ )

$\rho$  : massa jenis air ( $\text{kg/m}^3$ )

Berdasarkan analisis di terowongan angin diketahui garis *streamline* lebih rapat di bagian atas sirip (titik 1) dibandingkan dengan *streamline* pada bagian bawah sirip (titik 2). Hal ini menandakan aliran air  $v_1$  yang lebih cepat pada permukaan atas. Karena  $v_1 > v_2$ , berdasarkan hukum Bernoulli didapatkan bahwa tekanan di titik 1 kurang dari tekanan di titik 2. Adanya perbedaan tekanan ini menimbulkan gaya angkat  $F$  yang berarah ke atas.

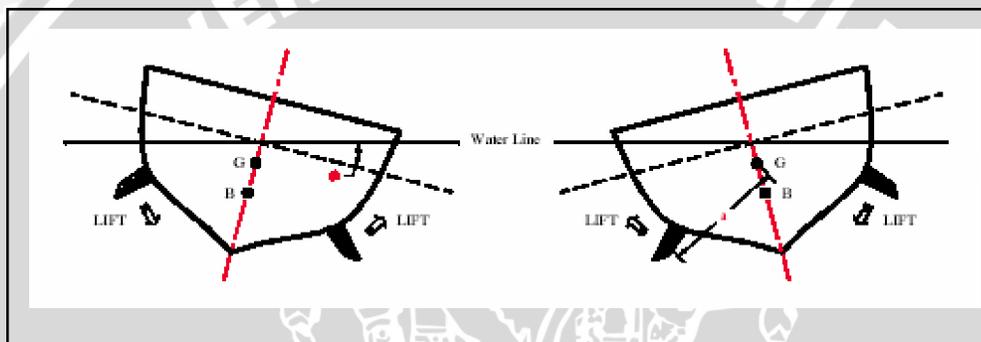


**Gambar 2.7** Ilustrasi *streamline*

Sumber: KROSYS Technical Manual For Fin Stabilization System : 13

Besar gaya angkat  $F$  yang dibangkitkan sesuai dengan besar sudut serang, yaitu sudut antara sirip dengan aliran air yang datang. Selain faktor sudut serang, gaya angkat yang dihasilkan ditentukan pula oleh faktor-faktor luas sirip stabilisator, kelengkungan sirip, kecepatan gerak aliran air, dan massa jenis air laut  $\rho$ .

Jika kapal mengguling ke kanan, maka tepi depan sirip di sisi kanan miring ke atas. Tekanan air yang melaluinya menghasilkan gaya angkat berarah ke atas sehingga kecenderungan kapal untuk terus berguling ke kananpun tercegah. Bersamaan dengan itu, sirip di kiri merunduk sehingga air yang melaluinya menghasilkan tekanan ke bawah. Demikian pula sebaliknya. Akibat kedua gaya di masing-masing sirip menimbulkan efek penegakan kembali badan kapal yang kuat dan cepat. Sistem ini mampu bekerja dengan cepat dan tepat sehingga goyang guling biasan`ya telah teredam sebelum sempat berkembang.



**Gambar 2.8** Konsep hidrodinamika sirip stabilisator  
Sumber : KROSYS Specification for Fin Stabilization System : 3

Sirip stabilisator beroperasi dengan tingkat keandalan yang baik dalam segala kondisi laut dan cuaca dengan reduksi sudut guling mencapai 90%. Tingkat reduksi gulingan yang baik dicapai selama berlayar dengan pengaturan sudut serang sirip stabilisator. Selain memiliki kinerja reduksi gulingan yang baik, sirip stabilisator memiliki kelebihan dalam hal kemampuan operasi yang baik dan jangkauan periode efektif yang lebih luas. (Budi, 2003 : 13)

Aspek samping penggunaan sirip stabilisator adalah peningkatan biaya, baik biaya instalasi, biaya operasi dan biaya perawatan. Sirip ini juga tidak memberikan hasil yang efektif ketika kapal diam/berhenti. Namun mengingat keefektifan reduksi gulingannya, sirip stabilisator masih merupakan pilihan yang paling tepat dan digunakan secara luas.

## 2.6 Logika Fuzzy

*Fuzzy set* pertama kali diperkenalkan oleh Prof. Lotfi Zadeh, 1965, dalam *papernya* yang monumental. Dalam *paper* tersebut dipaparkan ide dasar *fuzzy set* yang meliputi *inclusion*, *union*, *intersection*, *complement*, *relation*, dan *convexity*. Ide tersebut terus dimatangkan oleh Zadeh dalam beberapa *papernya* (Kuswadi, 2000)

Pelopop aplikasi *fuzzy set* dalam bidang kontrol, yang merupakan aplikasi pertama dan utama dari *fuzzy set* adalah Prof. Ebrahim Mamdani dan kawan-kawan dari *Queen Mary College London* (Kuswadi, 2000). Logika *fuzzy* dikatakan sebagai logika baru yang lama, sebab ilmu tentang logika *fuzzy* yang modern dan metadis baru ditemukan beberapa tahun yang lalu, padahal sebenarnya konsep tentang logika *fuzzy* itu sendiri ada pada diri kita sejak lama (Kusumadewi, 2002).

Ciri utama dari logika *fuzzy* adalah adanya peluang untuk memanfaatkan toleransi ketidakpastian (*inexactness*) dan ketidaktepatan (*imprecision*). Perbedaan antara logika *fuzzy* dengan logika klasik adalah pada manipulasi simbolik dan numerik. Logika *fuzzy* dalam hal ini dapat menangani baik manipulasi simbolik maupun manipulasi numerik. Sedangkan logika klasik hanya dapat menangani manipulasi simbolik.

Sistem *fuzzy* adalah sistem yang didasarkan atas pengetahuan atau sistem yang didasarkan atas kaidah-kaidah ataupun aturan-aturan. Inti sistem *fuzzy* adalah basis pengetahuan yang terdiri atas aturan-aturan yang dituliskan sebagai kumpulan pernyataan-pernyataan anteseden-konsekuen.

### 2.6.1 Himpunan Fuzzy

Suatu himpunan *fuzzy* (*fuzzy set*)  $A$  dalam semesta pembicaraan (*universe of discourse*)  $U$  dinyatakan dengan fungsi keanggotaan (*membership function*)  $\mu_A$ , yang harganya berada dalam interval  $[0,1]$ . Secara matematis hal ini dinyatakan dengan :

$$\mu_A : U \rightarrow [0,1] \quad (2.2)$$

Himpunan *fuzzy*  $A$  dalam semesta pembicaraan  $U$  biasa dinyatakan sebagai sekumpulan pasangan elemen  $u$  ( $u$  anggota  $U$ ) dan besarnya derajat keanggotaan (*grade of membership*) elemen tersebut,  $\mu_A$ , sebagai berikut :

$$A = \{(u, \mu_A(u) / u \in U)\} \quad (2.3)$$

Tanda ‘/’ digunakan untuk menghubungkan sebuah elemen dengan derajat keanggotaannya. Jika  $U$  adalah diskrit, maka  $A$  bisa dinyatakan dengan:

$$A = \mu_A(u_1) / u_1 + \dots + \mu_A(u_n) / u_n \quad (2.4)$$

atau

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_A(u_i) / u_i \quad (2.5)$$

Dan jika  $U$  adalah kontinyu, maka himpunan *fuzzy* bisa dinyatakan dengan :

$$A = \int_U \mu_A(u) / u \quad (2.6)$$

Tanda ‘+’, ‘ $\Sigma$ ’, dan ‘ $\int$ ’ menyatakan operator *union* (gabungan). (Kuswadi, 2000).

### 2.6.2 Membership Function

Setiap elemen yang terhimpun dalam semesta pembicaraan (*universe of discourse*) merupakan anggota dari himpunan *fuzzy* yang dibagi menjadi beberapa derajat. Derajat dari fungsi keanggotaan masing-masing menunjukkan suatu himpunan *fuzzy* (Jantzen, 1998).

Pada representasi linier, permukaan digambarkan sebagai suatu garis lurus. Bentuk ini paling sederhana dan menjadi pilihan yang baik untuk mendekati suatu konsep yang kurang jelas (Kusumadewi, 2002).

Pada himpunan *fuzzy*, semua informasi terkandung dalam fungsi keanggotaannya. Oleh karena itu penting untuk mengetahui bagian-bagian pada sebuah fungsi keanggotaan *fuzzy*.

Ada beberapa fungsi keanggotaan dalam logika *fuzzy*. Adapun yang sering digunakan adalah bentuk fungsi-S, fungsi- $\pi$ , fungsi T (triangular). Contoh

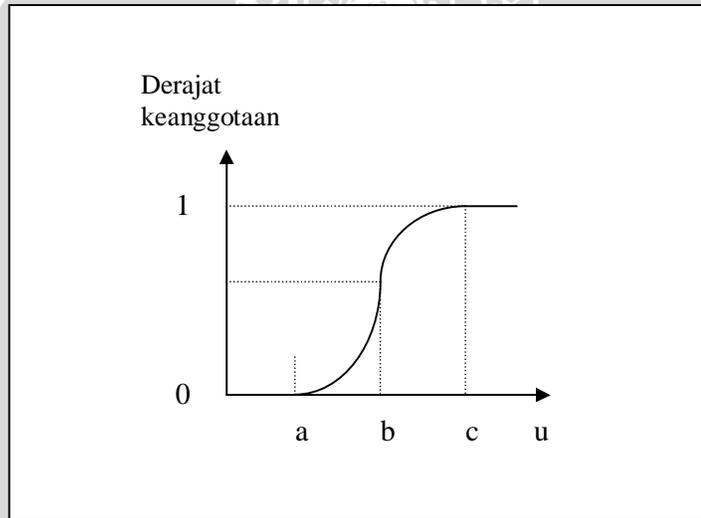
berikut ini adalah tiga macam keanggotaan yang dinyatakan dengan fungsi keanggotaan S,  $\pi$  dan T (triangular).

a. **S-Function**

Definisi S-function adalah sebagai berikut :

$$S(u,a,b,c) = \begin{cases} 0 & u < a \\ 2\left(\frac{u-a}{c-a}\right) & a \leq u \leq b \\ 1 - 2\left(\frac{u-a}{c-a}\right) & b \leq u \leq c \\ 1 & u > c \end{cases} \quad (2.7)$$

Bentuk diagramatik S-function ditunjukkan dalam gambar 2.9



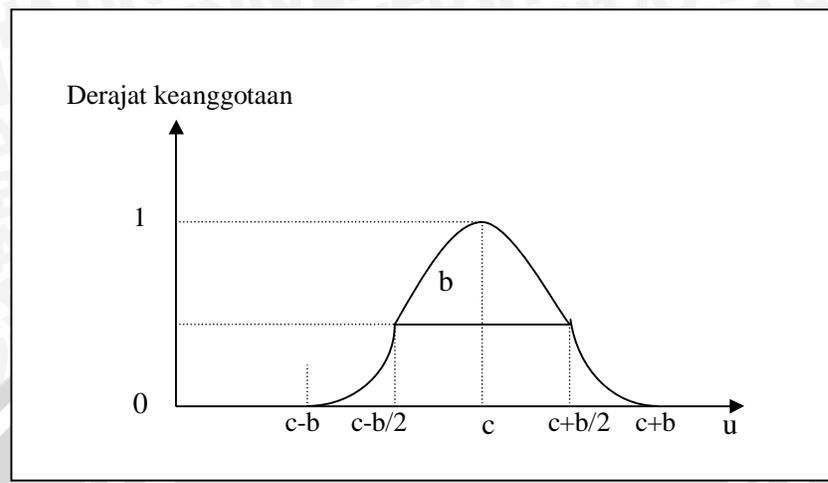
Gambar 2.9. S-Function  
Sumber: Kuswadi, 2000:29

b.  **$\pi$ -Function**

Definisi  $\pi$ -function adalah sebagai berikut :

$$\pi(u;b,c) = \begin{cases} S(u; c-b, c-\frac{b}{2}, c) & u \leq c \\ 1 - S(u; c, c+\frac{b}{2}, c+b) & u \geq c \end{cases} \quad (2.8)$$

Bentuk diagramatik  $\pi$ -function ditunjukkan dalam gambar 2.10



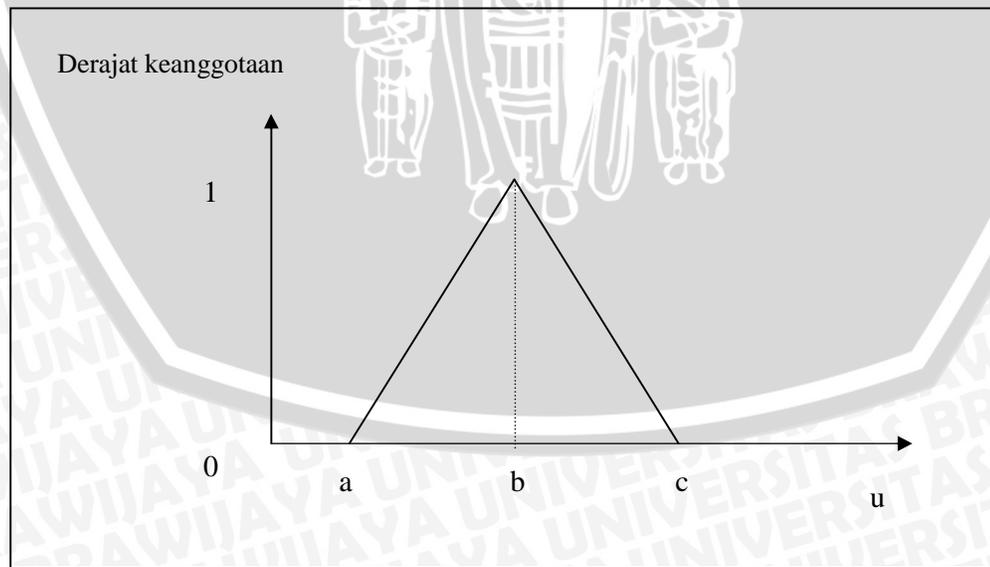
Gambar 2.10  $\pi$ -Function  
 Sumber: Kuswadi, 2000:29

c. **Triangular-Function.**

Triangular-function didefinisikan sebagai berikut :

$$T(u; a, b, c) = \begin{cases} 0 & u < a \\ \frac{u-a}{b-a} & a \leq u \leq b \\ \frac{c-u}{c-b} & b \leq u \leq c \\ 0 & u > c \end{cases} \quad (2.9)$$

Bentuk diagramatik Triangular-function ditunjukkan dalam gambar 2.11



Gambar 2.11 T-Function  
 Sumber: Kuswadi, 2000:30

### 2.6.3 Operasi – Operasi pada Himpunan *Fuzzy*

Seperti halnya himpunan konvensional, ada beberapa operasi yang didefinisikan secara khusus untuk mengkombinasi dan memodifikasi himpunan *fuzzy* (Kusumadewi, 2002). Operasi dasar himpunan *fuzzy* untuk himpunan *fuzzy* A dan B pada semesta pembicaraan U antara lain:

1. *Equality*

$$\mu_A(u) = \mu_A(u), u \in U \quad (2.10)$$

2. *Union*

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\}, u \in U \quad (2.11)$$

3. *Intersection*

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\}, u \in U \quad (2.12)$$

4. *Complement*

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u), u \in U \quad (2.13)$$

#### *Variabel Linguistik (Linguistic Variable)*

Suatu himpunan *fuzzy* bisa didefinisikan berdasarkan variabel linguistik tertentu. (Kuswadi, 2000). Suatu contoh variabel linguistik misalnya *kecepatan*, maka himpunan *term* (*kecepatan*) yang mungkin misalnya:

*kecepatan* = {lambat, sedang, cepat}

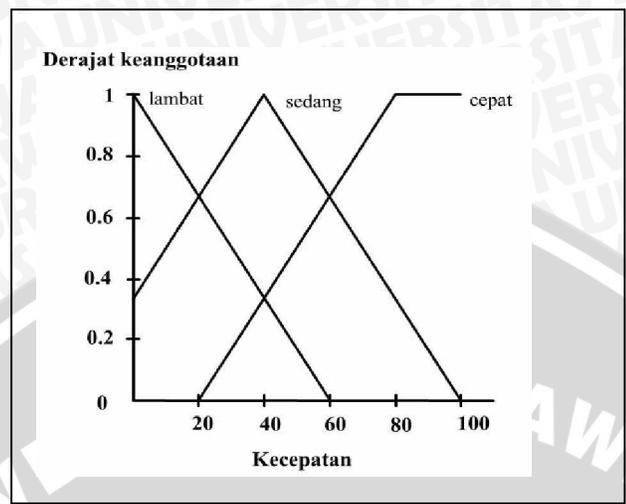
*Lambat, sedang, cepat* adalah harga linguistik (*linguistic value*) dari variabel linguistik *kecepatan*, dan masing-masing didefinisikan dalam suatu himpunan *fuzzy*. Sekumpulan *term* disebut *linguistic qualifiers*.

Sebagai contoh, misalnya untuk  $U = \{0, 20, 40, 60, 80, 100\}$  dan variabel linguistik *kecepatan*, *linguistic qualifier lambat, sedang, dan cepat* didefinisikan sebagai berikut (Kuswadi, 2000):

$$A = \text{lambat} = 1/0 + 0,7/20 + 0,3/40$$

$$B = \text{sedang} = 0,3/0 + 0,7/20 + 1/40 + 0,7/60 + 0,3/80$$

$$C = \text{cepat} = 0,3/40 + 0,7/60 + 1/80 + 1/100$$

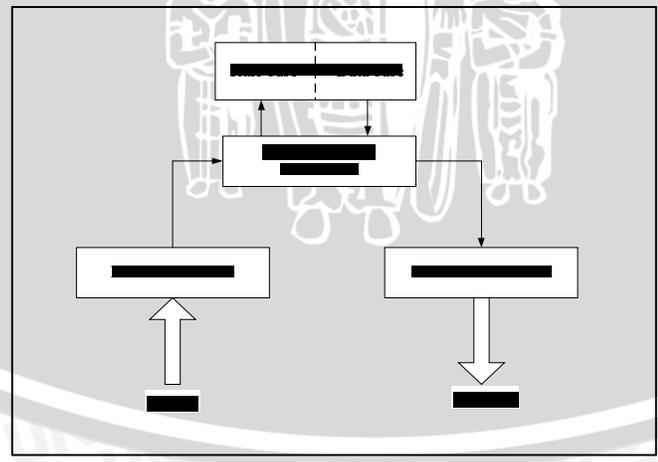


Gambar 2.12 Definisi himpunan fuzzy lambat, sedang, cepat  
 Sumber: Kuswadi, 2000: 32

## 2.7 Pengendali Logika Fuzzy

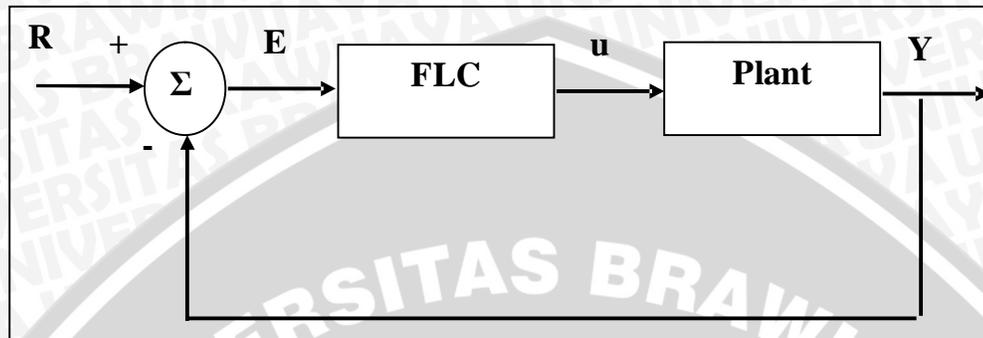
### 2.7.1 Umum

Komponen utama dalam penyusunan pengendali logika fuzzy ini meliputi unit untuk fuzzifikasi, unit penalaran fuzzy, rule base, dan unit defuzzifikasi. Secara blok diagram kontroler fuzzy tersebut terlihat pada gambar 2.13



Gambar 2.13 Struktur dasar kontroler logika fuzzy  
 Sumber : Yan ,1994 : 47

Secara umum sistem kontrol loop tertutup yang menggunakan *fuzzy logic controller* adalah sebagai berikut :



**Gambar 2.14** Sistem kontrol logika *fuzzy* secara umum  
Sumber: Yan, 1994 : 46

Dengan  $R$  adalah *set point* sistem,  $E$  adalah *error* yang digunakan sebagai masukan FLC,  $u$  adalah keluaran FLC yang juga merupakan aksi kontrol terhadap *plant*, dan  $Y$  adalah keluaran *plant* (Yan, 1994).

Komponen utama penyusun *fuzzy logic controller* (FLC) adalah unit fuzzifikasi, unit penalaran *fuzzy* (*fuzzy logic reasoning*), basis pengetahuan (*knowledge base*) dan unit defuzzifikasi (Yan, 1994).

Basis pengetahuannya terdiri dari dua jenis informasi (Yan, 1994):

1. Basis data, yang mendefinisikan parameter *fuzzy* sebagai bagian dari himpunan *fuzzy* dengan menentukan batas-batas fungsi keanggotaan pada semesta pembicaraan untuk tiap-tiap variabel.
2. Basis aturan, yang memetakan nilai masukan *fuzzy* menjadi nilai keluaran *fuzzy*.

### 2.7.2 Fuzzifikasi

Proses fuzzifikasi merupakan proses untuk mengubah variabel non *fuzzy* (variabel non numerik) menjadi variabel *fuzzy* (variabel linguistik). Nilai masukan-masukan yang masih dalam bentuk variabel numerik yang telah dikuantisasi sebelum diolah oleh pengendali logika *fuzzy* harus diubah dahulu ke dalam variabel *fuzzy*. Melalui fungsi keanggotaan yang telah disusun maka nilai-

nilai masukan tersebut menjadi informasi *fuzzy* yang berguna untuk proses pengolahan secara *fuzzy* pula (Kuswadi, 2000)

Dalam pengendalian proses *input* data adalah data *crisp*. Fungsi keanggotaan ini biasanya disebut dengan fungsi keanggotaan *input*.

Dengan kata lain fuzzifikasi merupakan pemetaan titik-titik numerik (*crisp points*)  $x = (x^1, \dots, x^n) \in U$  ke himpunan *fuzzy* A di U. U adalah semesta pembicaraan. Paling tidak ada dua kemungkinan pemetaan, yaitu (Kuswadi, 2000):

1. Fuzzifikasi singleton: A adalah *fuzzy* singleton dengan *support*  $\underline{x}$ , artinya,  $\mu_A(\underline{x}') = 1$  untuk  $\underline{x}' = \underline{x}$  dan  $\mu_A(\underline{x}') = 0$  untuk  $\underline{x}' \in U$  yang lain dengan  $\underline{x}' \neq \underline{x}$ .
2. Fuzzifikasi non singleton:  $\mu_A(\underline{x}') = 1$  dan  $\mu_A(\underline{x}')$  menurun dari 1 sebagaimana  $\underline{x}'$  bergerak menjauh  $\underline{x}$ .

### 2.7.3 Rule evaluation

Pada *rule evaluation* prosesor *fuzzy* menggunakan aturan linguistik untuk menentukan aksi kontrol yang harus dilakukan dalam merespon nilai *input* yang diberikan. Dalam *rule evaluation* ini, *rule base* yang telah dibuat sangat menentukan handal dan tidaknya *fuzzy* kontroler yang dirancang. Pada umumnya, aturan-aturan *fuzzy* dinyatakan dalam bentuk 'IF-THEN' yang merupakan inti dari relasi *fuzzy*.

#### Kaidah Fuzzy Jika-Maka (Fuzzy Rules)

Ada dua jenis proposisi *fuzzy*, yaitu (Kusumadewi, 2002):

1. *Conditional fuzzy proposition*

Jenis ini ditandai dengan penggunaan pernyataan IF. Secara umum:

IF x is A THEN y is B Dengan x dan y adalah skalar, dan A dan B adalah variabel linguistik. Proposisi yang mengikuti IF disebut anteseden, sedangkan proposisi yang mengikuti THEN disebut konsekuen. Proposisi ini dapat diperluas dengan menggunakan penghubung *fuzzy*, seperti:

IF  $(x_1 \text{ is } A_1) \bullet (x_2 \text{ is } A_2) \bullet (x_3 \text{ is } A_3) \bullet \dots \bullet (x_n \text{ is } A_n)$  THEN  $y \text{ is } B$  dengan  $\bullet$  adalah operator (misal OR atau AND)

2. *Unconditional fuzzy proposition*

Jenis ini ditandai dengan tidak digunakannya pernyataan IF. Secara umum  $x \text{ is } A$  dengan skalar, dan  $A$  adalah variabel linguistik.

Proposisi yang tak terkondisi selalu diaplikasikan dengan model AND, tergantung pada bagaimana proposisi tersebut diaplikasikan, bisa membatasi daerah *output*, bisa juga mendefinisikan daerah solusi (jika tidak ada aturan terkondisi yang dieksekusi).

**2.7.4 Inference Engine**

Metode-metode penalaran untuk memperoleh keputusan *fuzzy* ada dua, yaitu :

- a. Metode nilai point MAX-MIN
- b. Metode nilai point MAX-DOT

Diasumsikan terdapat dua basis kaidah atur untuk *fuzzy*, yaitu :

Kaidah atur 1 : *If*  $x$  adalah  $A_1$  AND  $y$  adalah  $B_1$  *Then*  $z$  adalah  $C_1$

Kaidah atur 2 : *If*  $x$  adalah  $A_2$  AND  $y$  adalah  $B_2$  *Then*  $z$  adalah  $C_2$

Jika kaidah atur ke- $i$  dinyatakan dengan  $\alpha_i$  maka dua kaidah atur di atas dapat dinyatakan kembali sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0) \\ \alpha_2 &= \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0) \end{aligned} \tag{2.14}$$

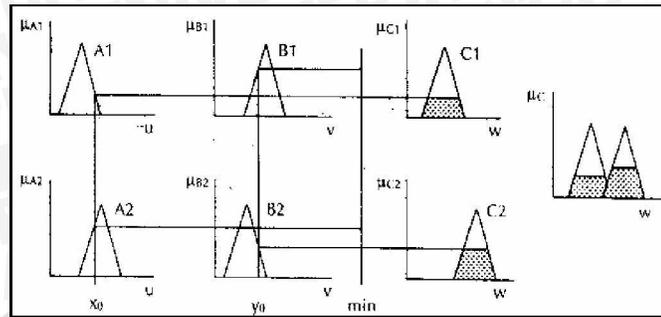
dengan  $x_0$  dan  $y_0$  menyatakan masukan *crisp*.

- a. Metode penalaran MAX-MIN

Pada metode penalaran MAX-MIN fungsi keanggotaan konsekuen  $C$  dinyatakan dengan :

$$\mu_c(w) = (\alpha_1 \wedge \mu_{c_1}(w)) \vee (\alpha_2 \wedge \mu_{c_2}(w)) \tag{2.15}$$

metode penalaran MAX-MIN diperlihatkan dalam Gambar 2.15



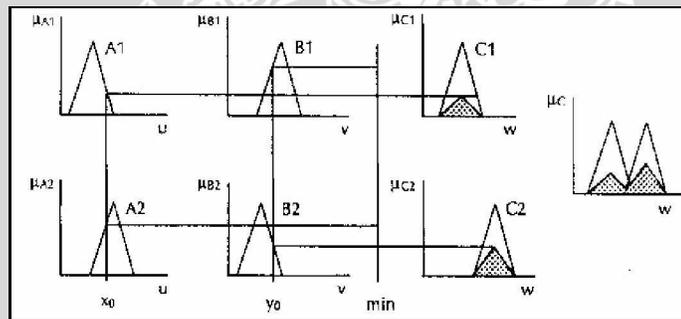
Gambar 2.15 Metode penalaran fuzzy MAX-MIN  
 Sumber: Yan., 1994 : 55

b. Metode penalaran MAX-DOT

Pada metode penalaran MAX-DOT fungsi keanggotaan konsekuen C dinyatakan pada persamaan 2.10.

$$\mu_c(w) = (\alpha_1 \cdot \mu_{c1}(w)) \vee (\alpha_2 \cdot \mu_{c2}(w)) \quad (2.16)$$

metode penalaran MAX-DOT diperlihatkan dalam Gambar 2.16



Gambar 2.16 Metode penalaran fuzzy MAX-DOT  
 Sumber: Yan., 1994 : 55

2.7.5 Defuzzifikasi

Penalaran fuzzy yang telah dipelajari terdahulu adalah metode penalaran MAMDANI. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975. Pada metode MAMDANI, baik input maupun output sistem berupa himpunan fuzzy.

Penalaran fuzzy lainnya adalah dengan metode SUGENO. Metode ini hampir sama dengan penalaran MAMDANI, hanya saja output sistem tidak

berupa himpunan *fuzzy* melainkan berupa konstanta atau persamaan linear. Metode ini diperkenalkan oleh Takagi-Sugeno Kang pada tahun 1985.

**Tabel 2.1** Keuntungan metode MAMDANI & SUGENO

MAMDANI	SUGENO
Lebih intuitif	Komputasinya lebih efisien
Lebih banyak diterima oleh banyak pihak	Bekerja paling baik untuk teknik-teknik linear (kontrol PID, dll)
Lebih cocok apabila input diterima dari manusia (bukan mesin)	Bekerja paling baik untuk teknik optimasi dan adaptif
	Menjamin kontinuitas permukaan output
	Lebih cocok untuk analisis secara matematis

Sumber : Kusumadewi, 2003 : 99

Secara umum di dalam logika *fuzzy* ada 5 langkah dalam melakukan penalaran, yaitu (Kusumadewi, 2003 : 100) :

1. Memasukkan input *fuzzy*
2. Mengaplikasikan operator *fuzzy*
3. Mengaplikasikan metode implikasi
4. Komposisi semua output
5. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan proses pemetaan himpunan *fuzzy* ke himpunan *crisp*. Proses ini merupakan kebalikan dari proses fuzzifikasi berfungsi untuk mengubah keluaran linguistik ke dalam keluaran *crisp*.

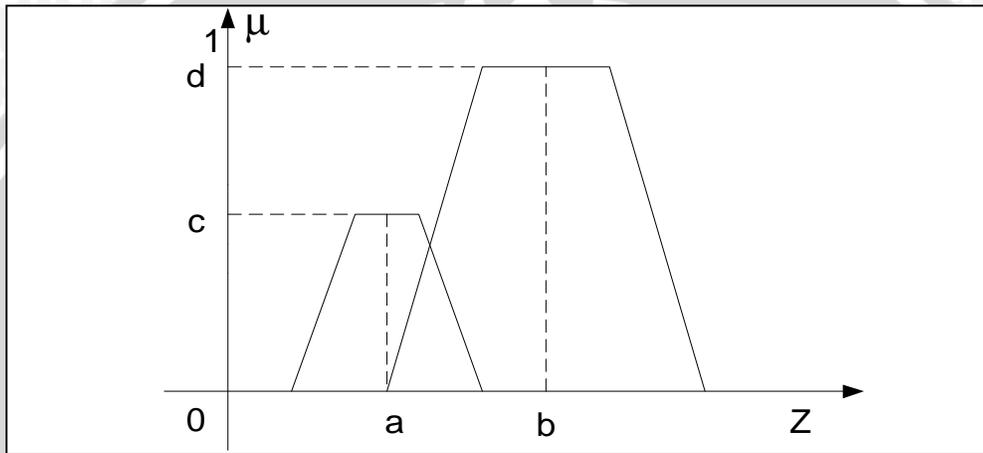
*Input* dari proses defuzzifikasi adalah suatu himpunan *fuzzy* yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan *fuzzy*, sedangkan *output* yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada domain himpunan *fuzzy* tersebut. Sehingga jika diberikan suatu himpunan *fuzzy* dalam range tertentu, maka harus dapat diambil suatu nilai *crisp* tertentu sebagai *output* (Kusumadewi, 2003 : 97)

Ada beberapa metode defuzzifikasi pada komposisi aturan MAMDANI, antara lain (Kusumadewi, 2003 : 97) :

a. Metode *Centroid (Composite Moment)*

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil titik pusat daerah *fuzzy*. Secara umum dirumuskan :

$$z = \frac{\int z\mu(z)dz}{\int \mu(z)dz} \quad \text{atau} \quad z = \frac{\sum_{j=1}^n z_j \mu(z_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(z_j)}$$



Gambar 2.17 Proses defuzzifikasi dengan metode *centroid*  
 Sumber: Ross. Timothy J, 1997:137

Gambar 2.17 memperlihatkan metode *centroid* bekerja. Ada 2 keuntungan menggunakan metode *centroid* yaitu :

- @ Nilai defuzzifikasi akan bergerak secara halus sehingga perubahan dari suatu topologi himpunan *fuzzy* ke topologi berikutnya juga akan berjalan dengan halus

- @ Mudah dihitung

b. Metode *Bisektor*

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai pada domain *fuzzy* yang memiliki nilai keanggotaan separuh dari jumlah total nilai keanggotaan pada daerah *fuzzy*. Secara umum dituliskan :

$$z_p \text{ sedemikian sehingga } \int_{R1}^p \mu(z)dz = \int_p^{Rn} \mu(z)dz$$

c. Metode *Mean of Maximum* (MOM)

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai rata-rata domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum

d. Metode *Largest of Maximum* (LOM)

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai terbesar dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum

e. Metode *Smallest of Maximum* (SOM)

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai terkecil dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum



### BAB III METODOLOGI

Untuk menyelesaikan permasalahan yang diangkat dalam skripsi ini dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

#### 3.1 Pengambilan Data

Data yang digunakan dalam penulisan skripsi ini merupakan data sekunder yang bersumber dari jurnal ilmiah dan data spesifikasi teknis. Adapun data dan parameter yang perlu diketahui untuk membangun model sistem adalah sebagai berikut:

- @ Parameter kapal yang meliputi : berat kapal, panjang kapal, tinggi lintang metasentrik kapal, dan momen inersia kapal
- @ Parameter model giroskop yaitu *gain* dari giroskop
- @ Parameter model sirip stabilisator yaitu *gain* dari sirip stabilisator

#### 3.2 Analisis Pengendalian Sirip Stabilisator

- @ Membuat diagram blok dari skema pengendalian sirip stabilisator pada kapal Monostab 45
- @ Membuat fungsi alih sistem dari diagram blok pengendalian sirip stabilisator pada kapal Monostab 45

#### 3.3 Perancangan Pengendali Logika Fuzzy

Langkah-langkah perancangan pengendali logika *fuzzy* untuk mengendalikan sirip stabilisator pada kapal monostab 45 dapat dibagi dalam 4 tahap yakni:

- @ Menentukan variabel masukan dan variabel keluaran.
- @ Menentukan jenis fungsi keanggotaan masukan dan keluaran dan pembagian himpunan keanggotaan *fuzzy*.
- @ Mengaplikasikan aturan pada masukan *fuzzy* dan mengevaluasi tiap aturan.
- @ Defuzzifikasi.

### 3.4 Pengujian dan Analisis Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan dengan cara simulasi menggunakan *software* MATLAB 7.1. Simulasi dilakukan untuk mengamati respon dari sistem secara keseluruhan dan pengaruh dari pemberian gangguan serta melakukan analisis berdasarkan hasil yang diperoleh.

### 3.5 Penarikan Kesimpulan dan Saran

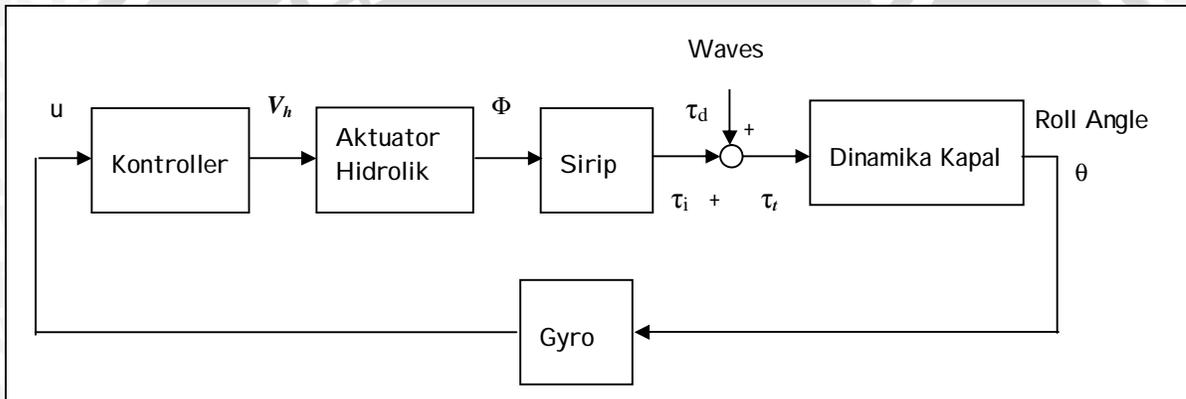
Dari analisis hasil uji simulasi didapatkan kesimpulan-kesimpulan sebagai hasil dari penelitian. Penyertaan saran ditambahkan untuk memberikan rujukan bagi yang berminat untuk melakukan penelitian dan pengembangan lebih lanjut.



## BAB IV PEMODELAN SISTEM

### 4.1 Pendahuluan

Sistem kendali sirip stabilisator terdiri atas beberapa komponen, yaitu pengendali, aktuator hidrolik, sirip stabilisator, model dinamika kapal, dan giroskop sebagai elemen pengukuran. Masing-masing bagian seperti terlihat dalam Gambar 4.1 memiliki fungsi dan peranan tersendiri.



Gambar 4.1 Blok diagram model

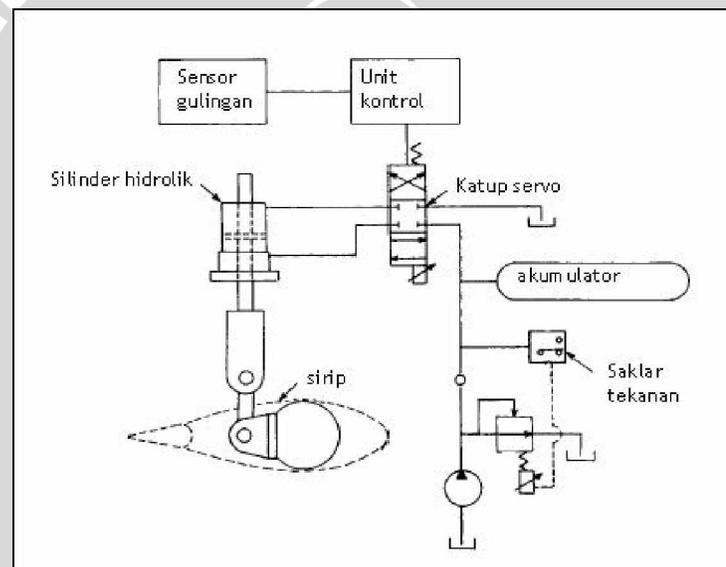
Sumber: Fortuna, 1996 : 20

Pengendali berfungsi untuk mengatur pergerakan sirip stabilisator sehingga akan menghasilkan sudut serang (*angle of attack*) yang bersesuaian untuk mempertahankan nilai sudut *roll* aktual kapal mendekati nilai nol. Dalam skripsi ini akan dirancang dan disimulasikan penerapan dengan menggunakan pengendali *fuzzy*.

Komponen penting sistem kontrol lainnya adalah aktuator hidrolik. Ada beberapa jenis aktuator, yakni aktuator pneumatik, aktuator hidrolik, dan aktuator elektris seperti motor listrik. Aktuator hidrolik dipilih sebagai penggerak sirip stabilisator karena karakteristiknya yang mampu memberikan daya yang besar dengan tingkat kepresisian yang cukup baik. (Ogata, 1997)

Model dinamika kapal perlu diturunkan sebelum melakukan simulasi. Model ini merupakan representasi sederhana dari dinamika riil kapal yang sebenarnya sangatlah kompleks. Sedangkan ombak sebagai faktor eksternal yang mempengaruhi keluaran sistem akan dimodelkan sebagai fungsi gangguan dengan sinyal acak. Proses serupa dilakukan untuk mendapatkan model matematik giroskop sebagai elemen pengukuran dan model sirip stabilisator.

Setelah proses pemodelan secara lengkap selesai dilakukan maka simulasi model terhadap masukan tertentu dapat dilakukan. Dari hasil simulasi yang diperoleh akan dilakukan uji dan analisa kinerja sistem secara keseluruhan terhadap spesifikasi rancangan.

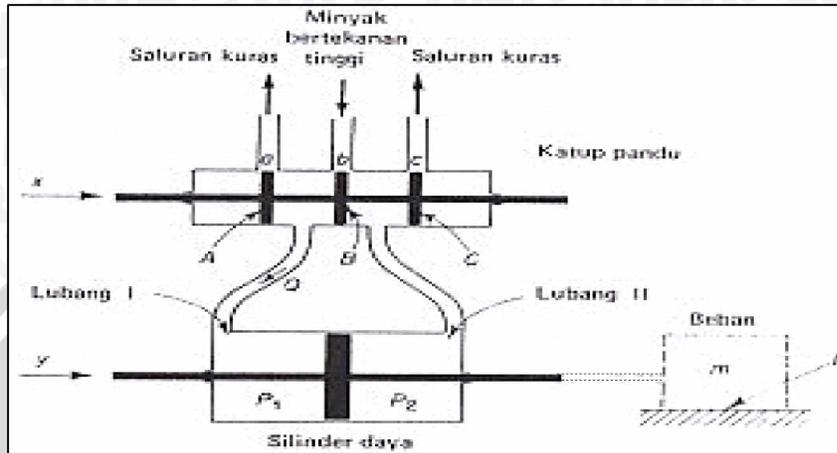


**Gambar 4.2** Diagram fisik sistem sirip stabilisator  
Sumber: Kawazoe, 1994 : 26

#### 4.2 Aktuator Hidrolik

Aktuator hidrolik memiliki beberapa karakteristik penting, antara lain sebagai berikut : (Ogata, 1997)

- @ mampu menghasilkan gaya yang besar pada tekanan yang besar
- @ mempunyai berat dan ukuran fisik yang relatif kecil
- @ kecepatan respon yang tinggi
- @ dapat beroperasi baik secara kontinu maupun diskrit



**Gambar 4.3** Aktuator hidrolis  
 Sumber : Ogata, 1997 : 157

Gambar di atas adalah diagram skematik aktuator hidrolis. Diasumsikan fluida (minyak) bertekanan tinggi dan konstan masuk melalui saluran b dengan kompresibilitas fluida yang dapat diabaikan. Sedangkan fluida bertekanan rendah akan keluar melalui saluran a dan c (saluran kuras), yang selanjutnya akan dinaikkan tekanannya dan disirkulasikan kembali.

Apabila piston digerakkan ke kanan maka lubang I akan berhubungan dengan saluran satu (b), dan lubang II akan berhubungan dengan saluran kuras (c), sehingga fluida bertekanan tinggi akan masuk ke dalam ruang di sebelah kiri torak daya dan fluida bertekanan lebih rendah di sebelah kanan torak daya akan keluar kembali untuk disirkulasi lagi. Karena perbedaan tekanan ini dengan  $P_1 > P_2$ , akan menyebabkan torak daya bergerak ke kanan. Demikian pula sebaliknya, ketika piston digerakkan ke kiri maka torak daya akan bergerak ke kiri, karena  $P_2 > P_1$ .

Apabila didefinisikan variabel-variabel :

- $Q$  = laju aliran minyak ke silinder daya (kg/detik)
- $\Delta P$  = perbedaan tekanan antara piston daya ( $N/m^2$ )
- $x$  = pergeseran kecil dari katup pandu (m)

maka dapat dituliskan hubungan antara ketiga variabel berupa persamaan non-linear sebagai berikut :

$$Q = f(x, \Delta P) \tag{4.1}$$

linearisasi persamaan non-linear di atas di titik  $\bar{Q}, \bar{x}, \bar{\Delta P}$  , diperoleh :

$$Q - \bar{Q} = \frac{\partial f}{\partial x}(x - \bar{x}) + \frac{\partial f}{\partial \Delta P}(\Delta P - \bar{\Delta P}) \tag{4.2}$$

dalam hal ini turunan parsial dihitung pada  $x = \bar{x}, \Delta P = \bar{\Delta P}$  dan  $\bar{Q} = f(\bar{x}, \bar{\Delta P})$

$$K_1 = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}, \Delta P=\bar{\Delta P}} > 0 \tag{4.3}$$

$$K_2 = - \left. \frac{\partial f}{\partial \Delta P} \right|_{x=\bar{x}, \Delta P=\bar{\Delta P}} > 0$$

Apabila diasumsikan bahwa titik operasionalnya adalah  $\bar{Q} = 0, \bar{x} = 0, \bar{\Delta P} = 0$ , maka persamaan 4.2 dapat ditulis :

$$Q = K_1 x - K_2 \Delta P \tag{4.4}$$

Selanjutnya apabila laju aliran minyak Q (kg/sec) dikalikan dengan waktu dt (detik) sama dengan perpindahan kecil dy (m) dari torak daya dikalikan dengan luas penampang torak daya A (m<sup>2</sup>) dikalikan dengan massa jenis fluida ρ (kg/m<sup>3</sup>), yang dapat dituliskan sebagai berikut (Ogata, 1997) :

$$A \rho dy = Q dt \tag{4.5}$$

sehingga persamaan 4.4 dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta P = \frac{1}{K_2} \left( K_1 x - A \rho \frac{dy}{dt} \right) \tag{4.6}$$

Gaya yang dibangkitkan oleh torak daya = AΔP

$$= \frac{A}{K_2} \left( K_1 x - A \rho \frac{dy}{dt} \right) \tag{4.7}$$

Apabila gaya ini bekerja pada massa dengan gesekan tidak diabaikan maka akan berlaku hubungan :

$$m\ddot{y} + b\dot{y} = \frac{A}{K_2} (K_1 x - A \rho \dot{y}) \tag{4.8}$$

atau

$$m\ddot{y} + \left(b + \frac{A^2\rho}{K_2}\right)\dot{y} = \frac{AK_1}{K_2}x \quad (4.9)$$

dengan  $m$  adalah massa (kg) dan  $b$  adalah koefisien gesekan (N sec/m).

Selanjutnya apabila persamaan 4.9 di transformasi Laplace diperoleh :

$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{X(s)} &= \frac{1}{s \left[ \left( \frac{mK_2}{AK_1} \right) s + \frac{bK_2 + A\rho}{AK_1} \right]} \\ &= \frac{K}{s(Ts+1)} \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\text{dengan } K = \frac{1}{\frac{bK_2 + A\rho}{AK_1} + \frac{A\rho}{K_1}} \quad \text{dan} \quad T = \frac{mK_2}{bK_2 + A^2\rho} \quad (4.11)$$

Aktuator elektro-hidrolik dapat didekati dengan fungsi alih orde pertama. Dalam skripsi ini aktuator elektro-hidrolik yang digunakan memiliki fungsi alih orde satu. Fungsi alih aktuator elektro-hidrolik menghubungkan tegangan masukan ke aktuator  $V_h$  dengan sudut serang stabilisator  $\Phi$  diberikan dalam persamaan (Fortuna, 1996 : 20) :

$$\frac{\Phi(s)}{V_h(s)} = \frac{0,33}{s+1,57} \quad (4.12)$$

#### 4.3 Sirip Stabilisator

Dalam Gambar 4.1 sirip stabilisator digambarkan sebagai elemen non-linier dengan saturasi. Hal ini menunjukkan bahwa untuk sinyal masukan yang kecil, keluaran sirip stabilisator sebanding dengan masukan. Untuk sinyal masukan yang besar, membesarnya keluaran tidak sebanding dengan masukan, dan akhirnya untuk sinyal masukan yang sangat besar, keluarannya adalah konstan.

Input sirip stabilisator merupakan sudut serang  $\Phi$  (radian), yang merupakan aktuator hidrolik. Output sirip stabilisator merupakan torsi yang bersesuaian  $\tau_i$  (N.m) yang selanjutnya bersama-sama dengan torsi gangguan

ombak  $\tau_d$  (N.m) merupakan input bagi model dinamika kapal. Sudut serang  $\Phi$  harus dibatasi untuk mencegah terjadinya saturasi.

Dalam literatur disebutkan bahwa variasi sudut serang sirip stabilisator bekerja linier dalam rentang antara  $-18^\circ$  sampai  $+18^\circ$ . (Fortuna, 1996 : 20). Dengan asumsi bahwa sirip stabilisator bekerja dalam daerah liniernya, maka untuk setiap sudut serang stabilisator yang ditentukan  $\Phi$  akan membangkitkan torsi masukan  $\tau_i$  dengan hubungan:

$$\tau_i = K_p \Phi \quad (4.13)$$

$$K_p = 2,3356 \cdot 10^5 \text{ Nm/rad}$$

dengan  $K_p$  adalah faktor penguatan sirip stabilisator. (Fortuna, 1996 : 27)

#### 4.4 Model Dinamik Kapal Monostab 45

Dari penelitian yang telah dilakukan tentang gerak gulingan kapal di laut didapat bahwa fungsi alih antara torsi terhadap gelombang dan gulingan dapat didekati dengan bentuk umum model matematik linier orde dua. (Bhattacharyya, 1978). Asumsi dan penyederhanaan pemodelan dinamika kapal dilakukan untuk mendapatkan gambaran sederhana tentang dinamika kapal tanpa menghilangkan sifat-sifat khusus dan karakteristik dari kapal.

Dalam skripsi ini, dinamika kapal dinyatakan dengan fungsi alih:

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{\tau_t(s)} = \frac{K_{ns} \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (4-14)$$

dengan:

$\theta(s)$  : sudut guling kapal (radian)

$\tau_t(s)$  : torsi total, terdiri dari torsi masukan  $\tau_i$  dan torsi gangguan ombak  $\tau_d$  (Nm)

$K_{ns}$  : penguatan model dinamik kapal (rad/Nm)

Selanjutnya model matematik spesifik untuk kapal Monostab 45 dapat diturunkan dengan mensubstitusikan parameter yang telah dihitung berdasarkan data fisik dan estimasi hasil eksperimen.

E.V. Lewis dan J.P. Comstock dalam *Principles of Naval Architecture* (1967) memberikan persamaan untuk menghitung frekuensi sudut  $\omega_n$  :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\Delta \times h}{J_g}} \quad (4.15)$$

dengan :

$\Delta$  : bobot kapal (kg)

$h$  : tinggi lintang metasenter (m)

$J_g$  : momen inersia kapal terhadap sumbu barisentrik ( $\text{kg.m}^2$ )

Dari spesifikasi teknis kapal (Fortuna, 1996:27) diperoleh data sebagai berikut:

$$\Delta = 151.392 \text{ kg}$$

$$h = 1,241 \text{ m}$$

$$J_g = 1,189.10^5 \text{ kgm}^2$$

Dengan memasukkan data diatas ke Persamaan (4.15) diperoleh harga  $\omega_n$  , yaitu:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{151392 \times 1,241}{1,189.10^5}} \text{ rad/s}$$

$$\omega_n = 1,257032269 \text{ rad/s}$$

$$\omega_n \approx 1,257 \text{ rad/s}$$

Faktor redaman  $\zeta$  tidak dapat ditentukan secara eksak dari data fisik. Hal ini disebabkan karena torsi yang muncul karena gesekan kapal dengan air sangat kompleks untuk dimodelkan. Selain itu faktor redaman  $\zeta$  akan meningkat seiring dengan pergerakan maju kapal. Oleh karena itu faktor redaman hanya dapat diestimasi dalam suatu kisaran dengan ketelitian tertentu. (Lewis, 2004).

Selanjutnya faktor redaman disebabkan oleh (Bhattacharyya, 1978):

- @ Gesekan air laut terhadap permukaan air kapal
- @ Efek peralatan pereduksi goyangan kapal
- @ Pengaruh gesekan udara terhadap badan kapal
- @ Tegangan permukaan

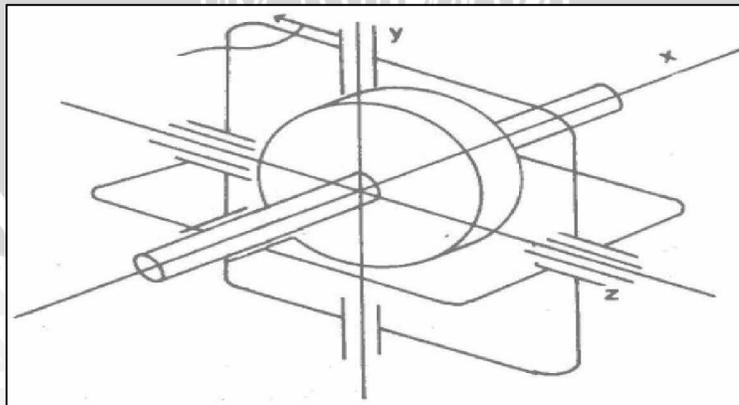
Dari hasil-hasil pengukuran pada eksperimen pendahuluan dapat diestimasi harga faktor redaman  $\zeta$ . Pada keadaan normal kapal Monostab 45 yang diam memiliki redaman relatif  $\zeta \approx 0,05-0,1$ . Jika kapal berlayar maju dengan kecepatan jelajah 35 knot,  $\zeta$  meningkat menjadi 0,4-0,5. (Fortuna, 1996:19). Adanya perubahan faktor redaman ini merupakan ketidakpastian yang harus diatasi dalam sistem.

Diketahui dari spesifikasi teknik nilai  $K_{ns} = 9,5 \cdot 10^{-7}$  rad/Nm. Faktor redaman kapal untuk kecepatan pelayaran 35 knot diasumsikan bernilai  $\zeta = 0,5$ . Dengan mensubstitusikan nilai  $\omega_n = 1,257$  ke dalam Persamaan (4.16) maka didapatkan model dinamik kapal sebagai berikut:

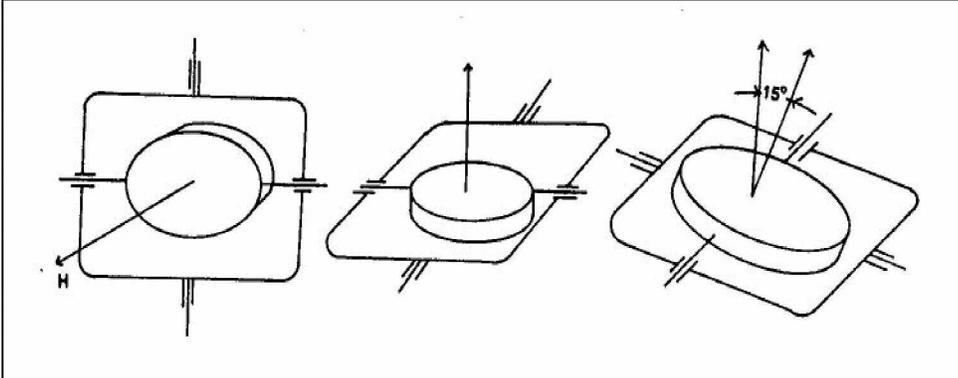
$$G(s) = \frac{1,50104655 \cdot 10^{-6}}{s^2 + 1,257s + 1,580049} \quad (4.16)$$

#### 4.5 Giroskop

Giroskop banyak digunakan pada sistem *auto-pilot* baik pada pesawat terbang maupun kapal laut. Rotor girokompas digerakkan dengan motor elektrik dengan kecepatan ribuan rpm. Kerangkanya (*frame*), yang disebut *phantom*, dapat bergerak bebas. Jika kapal mengalami perubahan arah, *phantom* turut berubah sedangkan sistem rotor tetap menunjukkan arah semula. *Phantom* dan rotor yang tidak segaris ini membangkitkan sinyal ke motor penggerak *phantom* untuk kembali menyearahkan *phantom* dan rotor.



**Gambar 4.4** Konstruksi giroskop  
Sumber: Wien, 2004

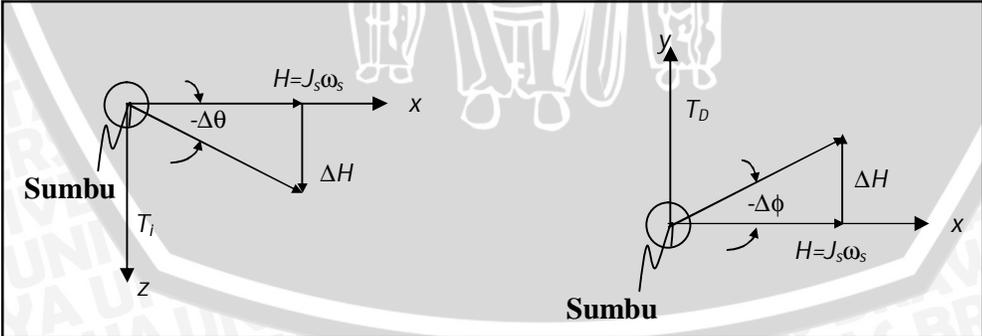


Gambar 4.5 Giroskop roll  
sumber : Wien, 2004

Persamaan lengkap dengan memperhitungkan torsi redaman dan *spring restoring* untuk giroskop adalah:

$$T_D = H\dot{\phi} + J\ddot{\theta} + f\dot{\theta} + K\theta$$

- dengan  $\theta$  : sudut putaran roda giroskop berpusat di sumbu y
- $\phi$  : sudut putaran roda giroskop berpusat di sumbu z
- $H$  : momentum terhadap sumbu putar
- $f$  : koefisien torsi redaman dan  $K$  adalah konstanta pegas.
- $J$  : momen inersia terhadap sumbu y
- $K$  : tetapan *restoring spring*



Gambar 4.6 Diagram vektor torsi-momentum  
Sumber: Budi, 2003

Jika hanya satu sumbu giroskop yang bebas berputar, maka giro memiliki derajat kebebasan tunggal. Giro seperti ini dikenal sebagai giro tertahan (*restrained gyro*). Persamaan untuk giro tertahan diturunkan dengan menetapkan  $t_d$  sama dengan nol, mengabaikan faktor  $K$  dan penggunaan  $f$  yang berharga besar.

$$\theta(s) = -\frac{H}{f(\tau s + 1)}\phi(s)$$

untuk  $f$  berharga besar maka  $\tau = J/f \approx 0$

$$\theta_{roll} = -\frac{H}{f}\phi \quad (4.16)$$

Pada skripsi ini giroskop digunakan sebagai elemen pengukur sudut *roll* kapal. Pada *frame* giroskop terdapat *transmitter* yang dapat menentukan penyimpangan sudut. Transmitter ini merupakan potensiometer. Pada poros *frame* kontak *brass* potensiometer. Sangkar potensiometer ini ditempelkan pada kapal sehingga dapat bergerak bersama kapal. Output potensiometer diberikan oleh persamaan di bawah ini :

$$V_{roll} = K_{giroskop} \theta_{roll} \quad (4.17)$$

Pada giroskop yang digunakan sebagai elemen pengukuran dalam sistem kendali sirip stabilisator ini sudut guling aktual yang sebenarnya diukur dan dibandingkan dengan sudut guling referensi. Dari selisih antara keduanya dibangkitkan sinyal kesalahan dengan penguatan  $K_{giroskop} = 11,4$  V/rad. Sinyal kesalahan ini kemudian diumpankan ke pengendali sebagai dasar aksi kontrol yang perlu dilakukan (Fortuna, 1996 : 27).

#### 4.6 Model Gangguan Ombak

Gangguan merupakan sinyal masukan yang tidak diinginkan yang mempengaruhi sinyal keluaran sistem. (Dorf, 2000:222). Pada sistem yang dirancang dalam penulisan skripsi ini, sinyal gangguan ditimbulkan oleh gelombang atau ombak laut dan angin. Ombak dan angin yang menerpa kapal akan menimbulkan torsi eksternal yang mempengaruhi kestabilan kapal.

Dalam skripsi ini torsi gangguan yang dihasilkan oleh ombak laut dan angin dimodelkan sebagai sinyal stokastik yang spektrumnya diformulasikan oleh Pierson dan Kitaigorodskii sebagai berikut: (Fortuna, 1996:20)

$$\tau_d(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} e^{-\beta(g/v\omega)^4} \tag{4.18}$$

dengan

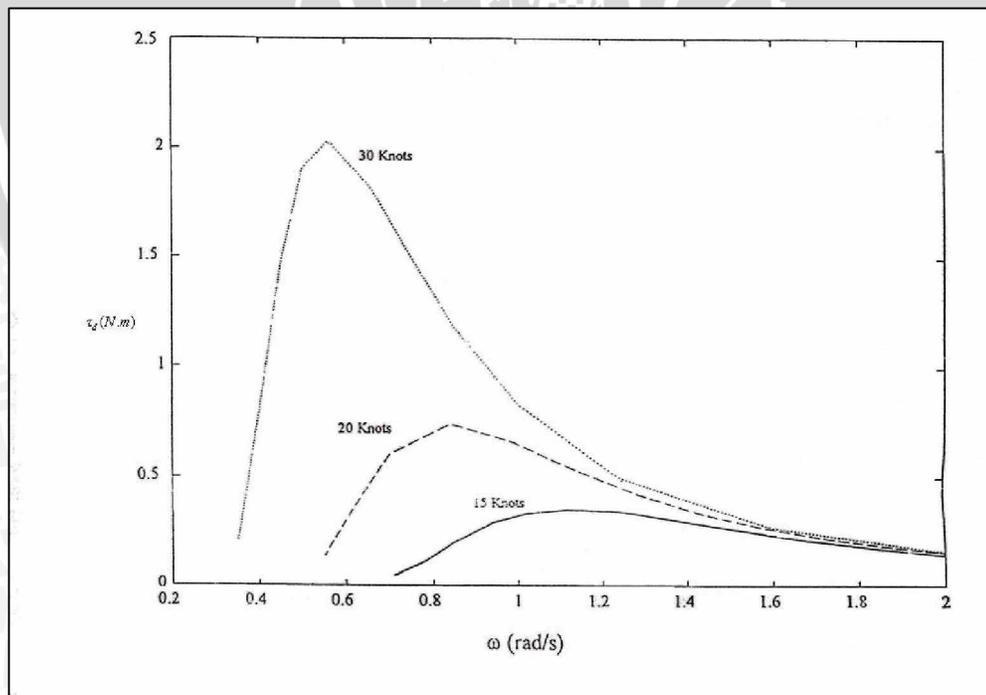
$\alpha, \beta$  : dua parameter konstan

$g$  : konstanta gravitasi =  $9,80665 \text{ m/s}^2$

$\omega$  : kecepatan anguler (rad/sec)

$v$  : kecepatan angin (m/s)

Dalam proses perhitungan untuk memperoleh torsi spektrum ombak dengan kecepatan angin berbeda perlu diingat bahwa nilai  $\alpha$  dan  $\beta \neq 0$ . Hal ini karena kedua konstanta tersebut berhubungan dengan derajat kebebasan (*degree of freedom*) pada gerak dinamika kapal tersebut. Dalam gambar 4.7 dapat dilihat spektrum ombak dengan kecepatan yang berbeda.



**Gambar 4.7** Spektrum ombak dengan kecepatan angin berbeda  
 Sumber: Fortuna, 1996:21

**BAB V**

**PENGENDALIAN LOGIKA FUZZY DAN SIMULASI SISTEM**

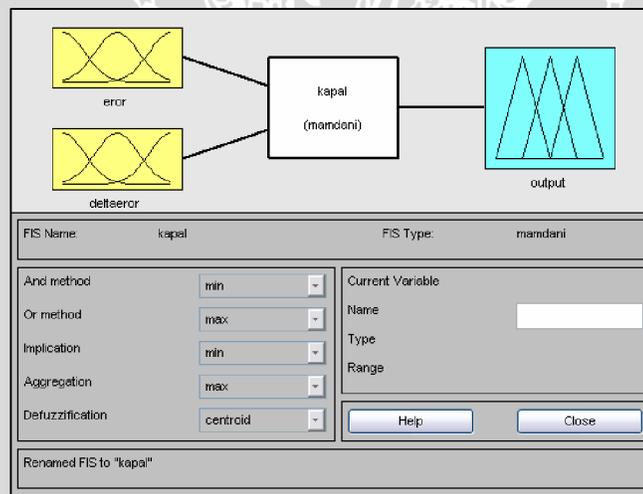
**5.1 Perancangan Kendali Logika Fuzzy**

Perancangan kendali logika *fuzzy* terdiri dari tiga tahap yaitu, proses fuzzifikasi *error* dan *delta error*, proses inferensi, dan yang terakhir adalah proses defuzzifikasi besaran *fuzzy* ke besaran *crisp*.

Sistem *fuzzy* yang dirancang memiliki dua variabel masukan yaitu *error* dan *delta error*, serta satu variabel keluaran yaitu besarnya sudut aktual guling kapal.

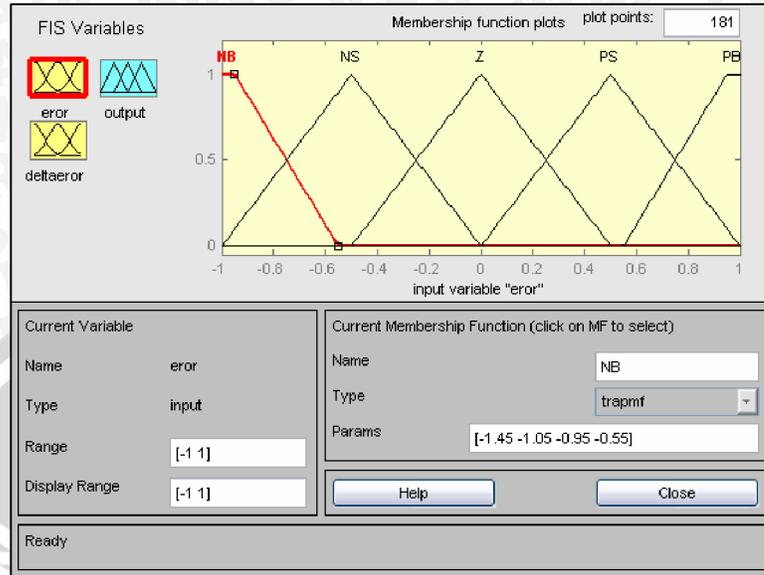
*Term-term* yang digunakan dalam fungsi keanggotaan *error*, *delta error* dan output adalah *negative big* (NB), *negative small* (NS), *zero* (Z), *positive small* (PS), dan *positif big* (PB).

**5.2 Proses Fuzzifikasi**



**Gambar 5.1** FIS editor  
sumber : simulasi

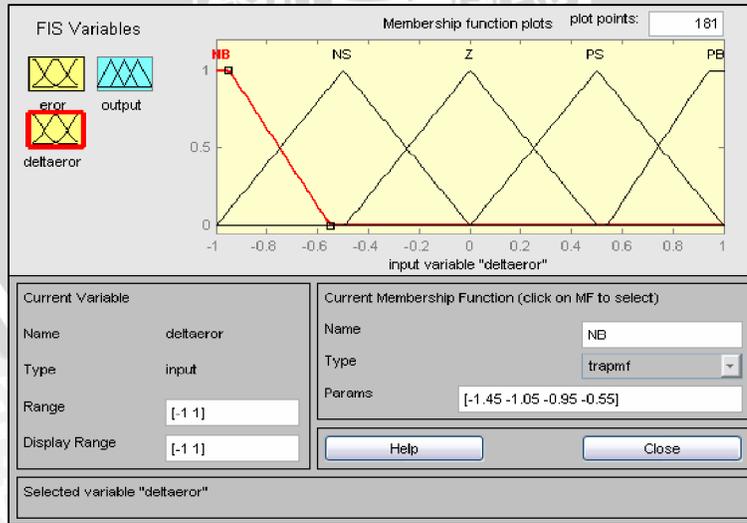
Pada tahap ini terjadi proses pemetaan *error*, *delta error* dan output, masing-masing terbagi menjadi lima fungsi keanggotaan menggunakan *fuzzy inference system* yang terdapat pada program matlab sehingga diperoleh fungsi keanggotaan untuk *error*, *delta error* dan *output* sebagai berikut :



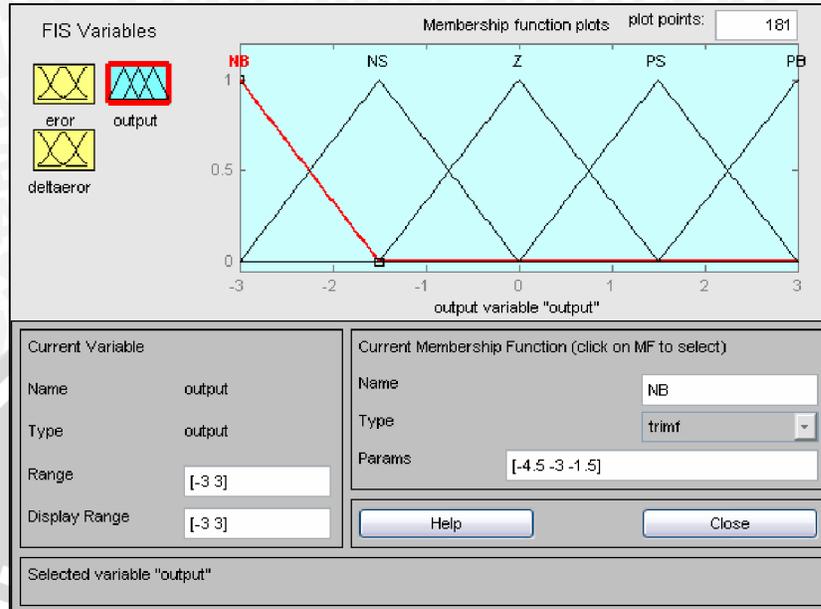
**Gambar 5.2** Membership function editor error untuk 5 himpunan fuzzy sumber : simulasi

Nilai *error* (Gambar 5.2) diset dalam rentang -1 sampai 1. Domain untuk masing- masing *term* adalah sebagai berikut: NB [-1.45 -1.05 -0.95 - 0.55], NS [-1 -0.5 0], Z [-0.5 0 0.5], PS [0 0.5 1], dan PB [0.55 0.95 1.05 1.45].

Nilai *delta error* (Gambar 5.3) diset dalam rentang -1 sampai 1. Domain untuk masing- masing *term* adalah sebagai berikut: NB [-1.45 -1.05 -0.95 - 0.55], NS [-1 -0.5 0], Z [-0.5 0 0.5], PS [0 0.5 1], dan PB [0.55 0.95 1.05 1.45].



**Gambar 5.3** Membership function editor delta error untuk 5 himpunan fuzzy sumber : simulasi



**Gambar 5.4** Membership function editor output untuk 5 himpunan fuzzy sumber : simulasi

Nilai *output* (Gambar 5.4) diset dalam rentang -3 sampai 3. Domain untuk masing-masing *term* adalah sebagai berikut: NB [-4.5 -3 -1.5], NS [-3 -1.5 0], Z [-1.5 0 1.5], PS [0 1.5 3], dan PB [1.5 3 4.5].

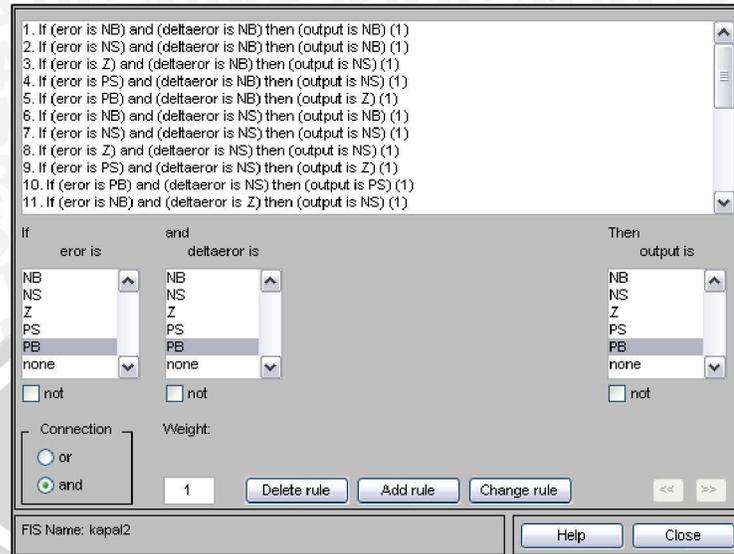
### 5.3 Inferensi

Pada tahap ini terjadi proses penyusunan aturan-aturan serta penalaran logika *fuzzy*. Penyusunan aturan berdasarkan pada kaidah “Jika (proposisi *fuzzy*) maka (proposisi *fuzzy*)” yang melibatkan variabel *error* dan delta *error* seperti pada Tabel 5.1.

**Tabel 5.1** Tabel keputusan logika *fuzzy* untuk 5 himpunan *fuzzy*

		DELTA ERROR				
		NB	NS	Z	PS	PB
ERROR	NB	NB	NB	NS	NS	Z
	NS	NB	NS	NS	Z	PS
	Z	NS	NS	Z	PS	PS
	PS	NS	Z	PS	PS	PB
	PB	Z	PS	PS	PB	PB

sumber : Mac. Vecar Whelan



**Gambar 5.5** Rule editor untuk 5 himpunan fuzzy  
sumber : simulasi

Untuk kontroler fuzzy dengan lima himpunan masukan digunakan 25

basis aturan sebagai berikut:

1. **IF** Error is NB **AND** Delta Error is NB **THEN** Output is NB.
2. **IF** Error is NB **AND** Delta Error is NS **THEN** Output is NB.
3. **IF** Error is NB **AND** Delta Error is Z **THEN** Output is NS.
4. **IF** Error is NB **AND** Delta Error is PS **THEN** Output is NS.
5. **IF** Error is NB **AND** Delta Error is PB **THEN** Output is Z.
6. **IF** Error is NS **AND** Delta Error is NB **THEN** Output is NB.
7. **IF** Error is NS **AND** Delta Error is NS **THEN** Output is NS.
8. **IF** Error is NS **AND** Delta Error is Z **THEN** Output is NS.
9. **IF** Error is NS **AND** Delta Error is PS **THEN** Output is Z.
10. **IF** Error is NS **AND** Delta Error is PB **THEN** Output is PB.
11. **IF** Error is Z **AND** Delta Error is NB **THEN** Output is NS.
12. **IF** Error is Z **AND** Delta Error is NS **THEN** Output is NS.
13. **IF** Error is Z **AND** Delta Error is Z **THEN** Output is Z.
14. **IF** Error is Z **AND** Delta Error is PS **THEN** Output is PS.
15. **IF** Error is Z **AND** Delta Error is PB **THEN** Output is PS.
16. **IF** Error is PS **AND** Delta Error is NB **THEN** Output is NS.
17. **IF** Error is PS **AND** Delta Error is NS **THEN** Output is Z.
18. **IF** Error is PS **AND** Delta Error is Z **THEN** Output is PS.
19. **IF** Error is PS **AND** Delta Error is PS **THEN** Output is PS.
20. **IF** Error is PS **AND** Delta Error is PB **THEN** Output is PB.
21. **IF** Error is PB **AND** Delta Error is NB **THEN** Output is Z.
22. **IF** Error is PB **AND** Delta Error is NS **THEN** Output is PS.
23. **IF** Error is PB **AND** Delta Error is Z **THEN** Output is PS.
24. **IF** Error is PB **AND** Delta Error is PS **THEN** Output is PB.
25. **IF** Error is PB **AND** Delta Error is PB **THEN** Output is PB.

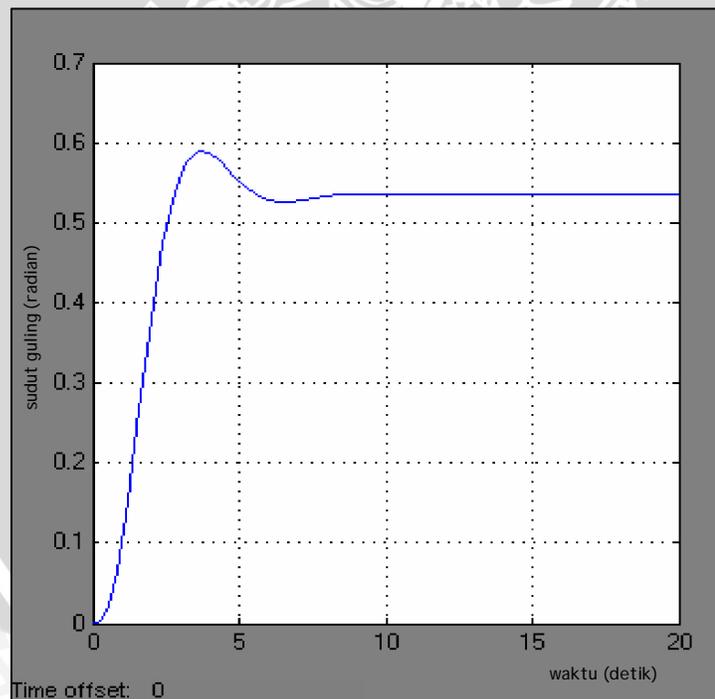
#### 5.4 Proses Defuzzifikasi

Tahap ini merupakan tahap terakhir dalam perancangan kontroler *fuzzy*. Proses mekanisme pengambilan keputusan (*reasoning mechanism*) bertugas untuk melakukan pengambilan keputusan berdasarkan basis data dan basis aturan sehingga dari masukan fuzzifikasi dapat diperoleh keluaran logika *fuzzy*. Metode implikasi yang digunakan dalam pengontrolan ini adalah metode max-min.

Proses defuzzifikasi yang digunakan dalam pengontrolan ini adalah metode *centroid*.

#### 5.5 Simulasi Model

Simulasi-simulasi yang dilakukan untuk skripsi ini menggunakan perangkat lunak Simulink yang terdapat pada MATLAB versi 7.1 Release 14.

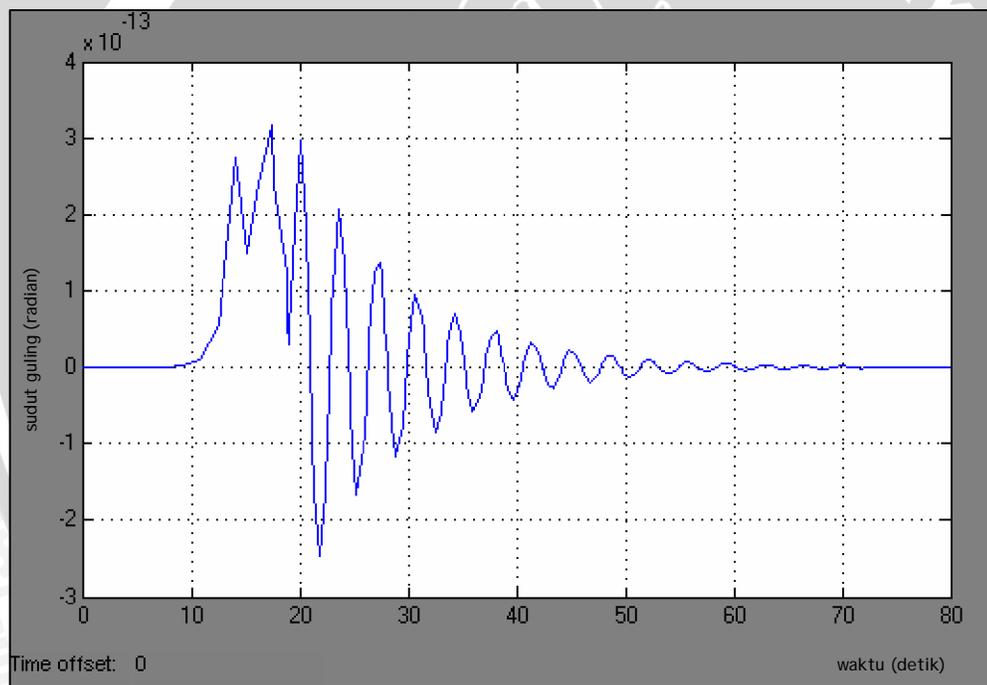


**Grafik 5.1** Respon sistem tanpa kontroler  
sumber : simulasi

Pada Grafik 5.1 dapat dilihat respon sistem *open loop* tanpa menggunakan controller. Pada simulasi ini menggunakan set point sebesar 1 volt. Dari grafik respon dapat diketahui terdapat :

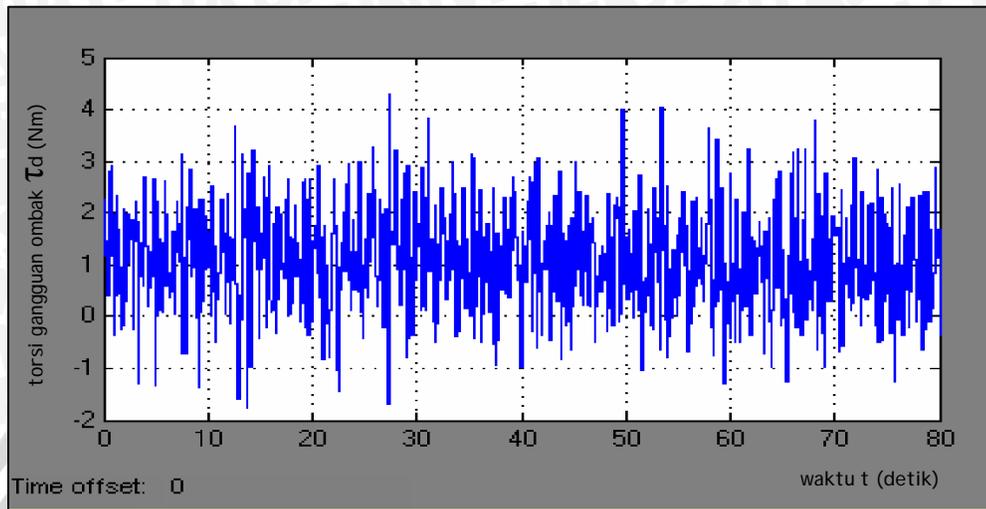
- @ kesalahan keadaan tunak  $e_{ss} = (1 - 0,5375) \times 100\% = 46,25\%$
- @ maksimum *overshoot*  $M_p = \frac{0,5875 - 0,5375}{0,5375} \times 100\% = 9,3\%$
- @ waktu mencapai keadaan tunak  $t_s = 8,21$  detik

### 5.6 Simulasi Pengendali Logika Fuzzy

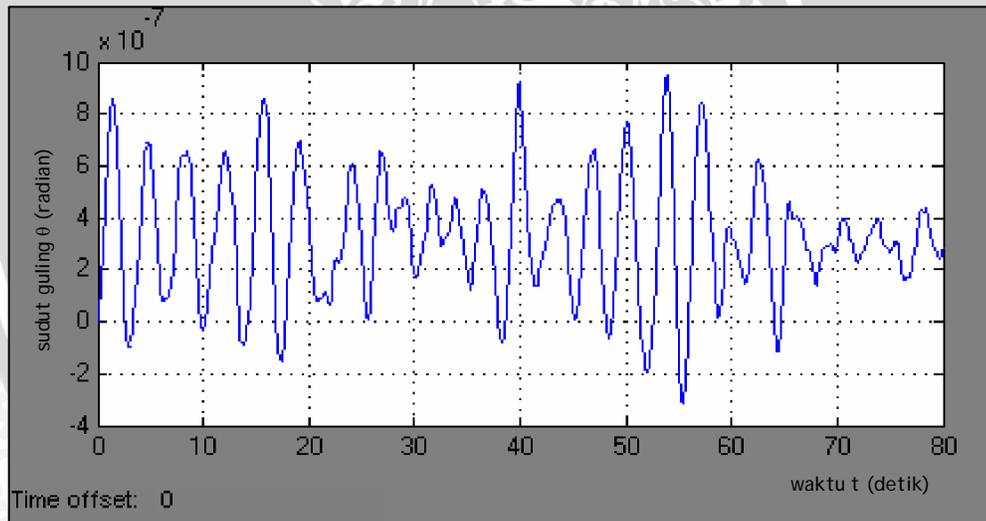


**Grafik 5.2** Respon sistem dengan controller *fuzzy* tanpa gangguan  
sumber : simulasi

Dari grafik 5.2 dapat diketahui bahwa sistem mempunyai karakteristik tidak stabil karena walaupun tanpa adanya gangguan torsi eksternal, sehingga membutuhkan waktu untuk kembali ke keadaan awal.



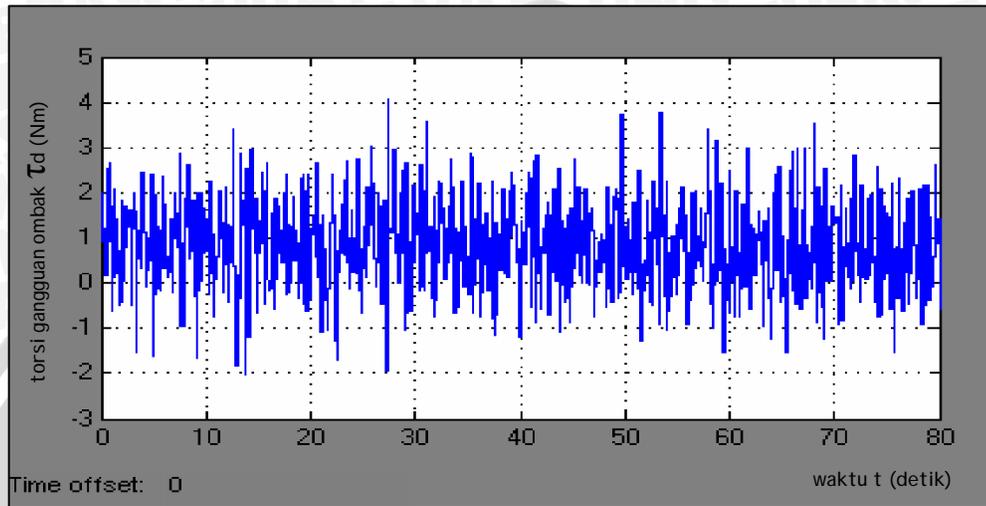
**Grafik 5.3** Sinyal gangguan dengan kecepatan angin 15 knots  
sumber : simulasi



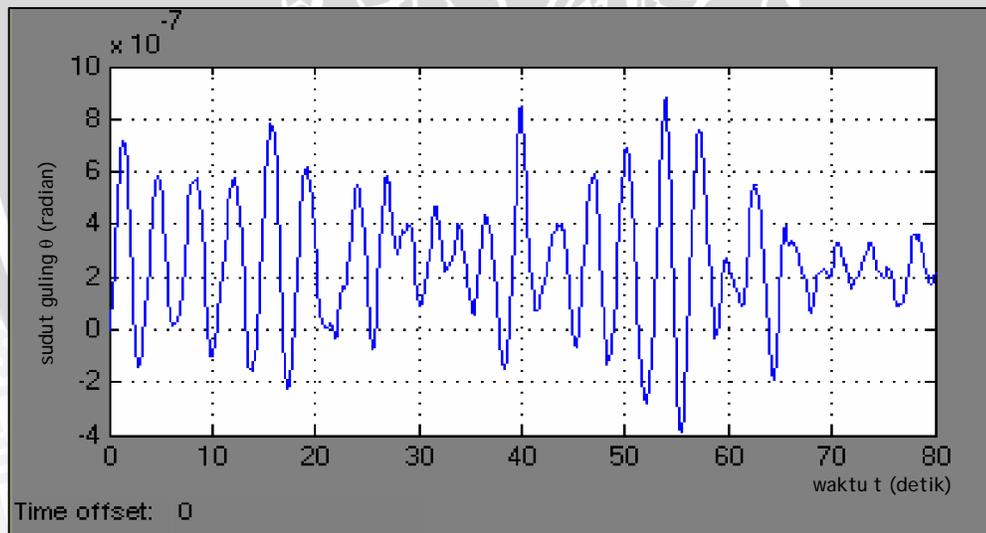
**Grafik 5.4** Respon sistem dengan gangguan kecepatan angin 15 knots  
sumber : simulasi

Pengaruh sinyal gangguan dengan kecepatan angin 15 knots dapat dilihat pada grafik 5.4. Dari grafik tersebut dapat diperoleh :

- @ Nilai maksimum sudut guling =  $9,5 \cdot 10^{-7}$  radian
- @ Nilai minimum sudut guling =  $-3,1 \cdot 10^{-7}$  radian



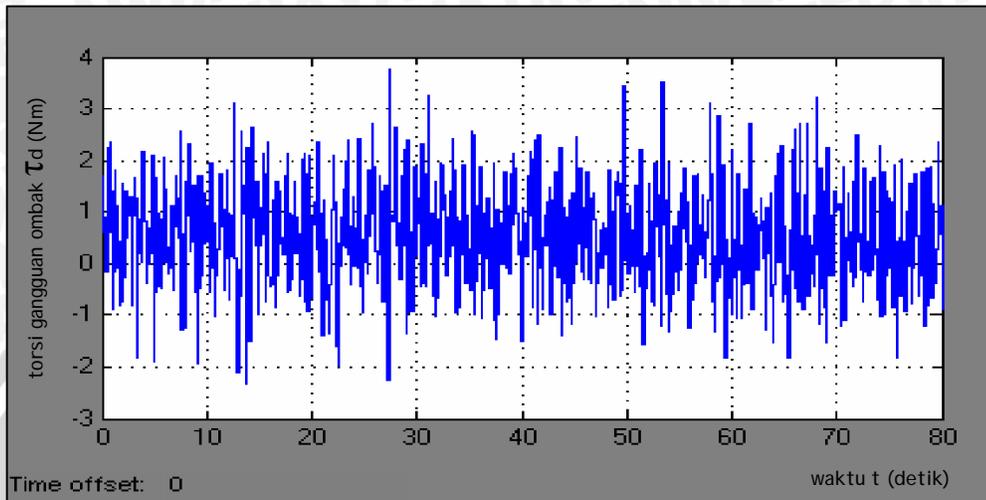
**Grafik 5.5** Sinyal gangguan dengan kecepatan angin 20 knots  
sumber : simulasi



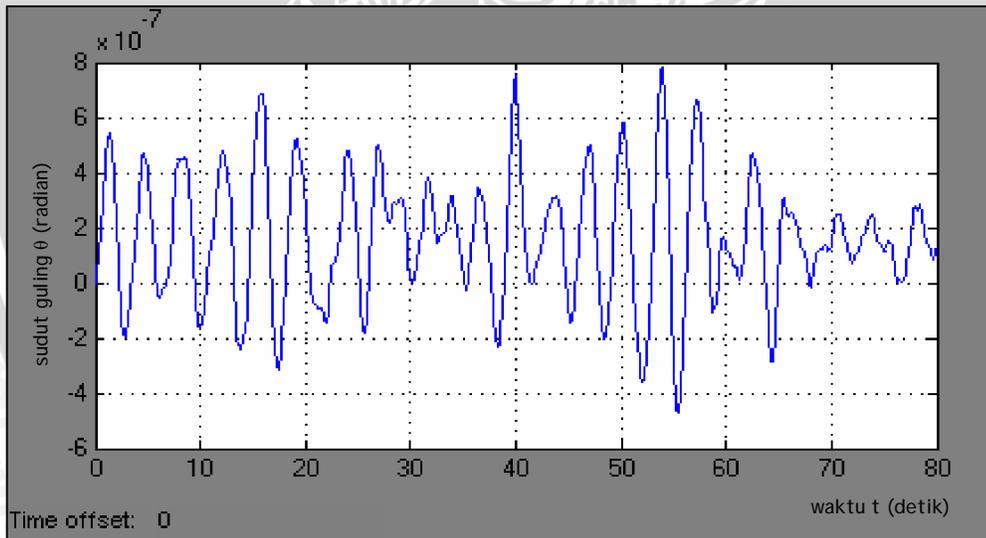
**Grafik 5.6** Respon sistem dengan gangguan kecepatan angin 20 knots  
sumber : simulasi

Pengaruh sinyal gangguan dengan kecepatan angin 20 knots dapat dilihat pada grafik 5.6. Dari grafik tersebut dapat diperoleh :

- @ Nilai maksimum sudut guling =  $9.10^{-7}$  radian
- @ Nilai minimum sudut guling =  $-4.10^{-7}$  radian



**Grafik 5.7** Sinyal gangguan dengan kecepatan angin 30 knots  
sumber : simulasi



**Grafik 5.8** Respon sistem dengan gangguan kecepatan angin 30 knots  
sumber : simulasi

Pengaruh sinyal gangguan dengan kecepatan angin 30 knots dapat dilihat pada grafik 5.4. Dari grafik tersebut dapat diperoleh :

- @ Nilai maksimum sudut guling =  $8.10^{-7}$  radian
- @ Nilai minimum sudut guling =  $-4,75.10^{-7}$  radian

## BAB VI PENUTUP

### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan kendali logika *fuzzy* pada sirip stabilisator di kapal Monostab 45 serta simulasi sistem yang telah dibahas pada bab sebelumnya maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

- @ Penggunaan kendali logika *fuzzy* pada sirip stabilisator di kapal Monostab 45 dapat meningkatkan kestabilan kapal dengan mengurangi sudut guling (*roll motion*) sehingga dapat meningkatkan keamanan pelayaran dan kenyamanan penumpang kapal

**Tabel 6.1** Respon sistem dengan kontroller

Sinyal Gangguan $\tau_d$ ( knots )	Nilai Sudut Guling $\theta$ (rad)	
	Maksimum ( $\cdot 10^{-7}$ )	Minimum ( $\cdot 10^{-7}$ )
15	9,5	-3,1
20	9	-4
30	8	-4,75

sumber : simulasi

- @ Nilai sudut guling ( $\theta$ ) maksimum yang dialami kapal menurun seiring dengan meningkatnya sinyal gangguan ( $\tau_d$ )
- @ Nilai sudut guling ( $\theta$ ) minimum yang dialami kapal menurun seiring dengan meningkatnya sinyal gangguan ( $\tau_d$ )

### 6.2 Saran

Penelitian yang telah dilakukan tentu saja masih terdapat banyak kekurangan, sehingga untuk penyempurnaan terdapat beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut yaitu :

- @ Penelitian dan perancangan sistem kontrol logika *fuzzy* yang masih dalam tahap simulasi dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menerapkannya pada sistem fisik yang sesungguhnya.
- @ Perlu dilakukan studi lebih jauh tentang ketidakpastian parameter dalam proses pemodelan yang disebabkan oleh berbagai perubahan faktor gangguan. Dalam hal ini disarankan untuk melakukan penelitian tentang hubungan antara kecepatan kapal dengan dinamika kapal lainnya selain goyang guling untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik.



## DAFTAR PUSTAKA

- Bhattacharyya, R., 1978, *Dynamic of Marine Vehicle*, New York:John Wiley & Sons Ltd.
- Dorf, R.C & Robert H.B., 2000, *Modern Control System*. 9<sup>th</sup> ed, Prentice-Hall International Edition.
- Fortuna, L & Giovanni M., 1996, *A Roll Stabilization System for A Monohull Ship:Modelling, Identifitation, and Adaptive Control*, IEEE transaction on Control System Technology, vol. 4, no. 1
- Hind, J.A., 1982, *Stability and Trim of Fishing Vessels and Other Small Ships*. 2<sup>nd</sup> edition, Kent, Inggris:Whistable Litho Ltd.
- <http://www.krosys.com>
- <http://www.pacinoti.com>
- Indra, B.W., 2003, *Perancangan Sistem Kendali Sirip Stabilisator Pada Kapal Penumpang Monostab 45 Dengan Menggunakan PID Robust*, Malang:Universitas Brawijaya
- Kawazoe, T & Shingo N, Yojirou, W., 1994, *Effect of Fin Area and Control Methods on Reduction of Roll Motion with Fin Stabilizers*, Journal of the MESJ Vol. 28, No. 4
- Kridaaksama, W., 2004, *Desain Regulator Robust Pada Sistem Stabilisasi Gerak Roll Kapal Monostab 45 Dengan Metode  $H_{\infty}$* , Malang:Universitas Brawijaya
- Kusumadewi, S., 2002, *Analisis Desain System Fuzzy Menngunakan Tool Box Matlab*, Yogyakarta:Graha Ilmu
- Kuswandi, S., 2000, *Kendali Cerdas*, Surabaya:EEPIS Press.
- Ogata, K., 1997, *Teknik Kontrol Automatik*. Jilid I, Jakarta:Penerbit Erlangga.
- Schuler, X.F & Howel., 1953, *Modern Ship Element of Their Design, Construction and Operation*, Cambridge:Cornell Maritime Press
- Yan, J. & Michael R, James P., 1994, *Using Fuzzy Logic Towards Intelligent Systems*, New York:Prentince-Hall.

## LAMPIRAN 1

**Data Parameter Sistem :**

1. Berat Kapal ( $\Delta$ ) = 151 392 kg
2. Momen Inersia Kapal ( $J_g$ ) =  $1,189 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
3. Tinggi Lintang Metasentrik ( $H$ ) = 1,241 m
4. Penguatan Dinamika Kapal ( $K_{ns}$ ) =  $9,5 \cdot 10^{-7} \text{ rad/Nm}$
5. Penguatan Sirip Stabilisator ( $K_p$ ) =  $2,3356 \cdot 10^5 \text{ Nm/rad}$
6. Penguatan Giroskop ( $K_{gyro}$ ) = 11,46 V/rad

## Sumber :

Fortuna, L & Giovani M., 1996, *A Roll Stabilization System for A Monohull Ship: Modelling, Identification, and Adaptive Control*, IEEE transaction on Control System Technology, vol. 4, no. 1

## LAMPIRAN 2

**M-file untuk FIS editor**

```
[System]
Name='kapal'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=25
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'
```

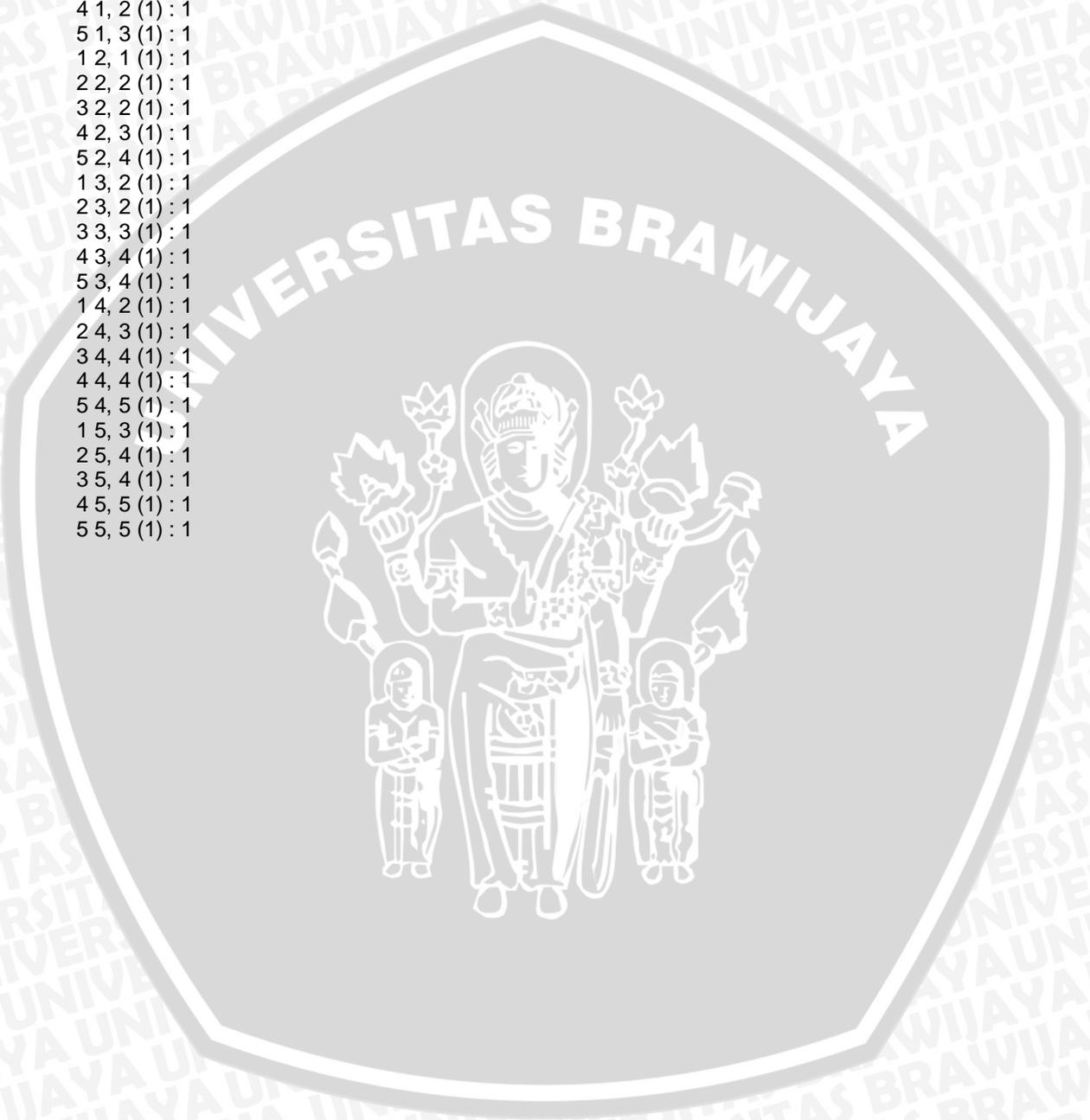
```
[Input1]
Name='eror'
Range=[-1 1]
NumMFs=5
MF1='NB':trapmf,[-1.45 -1.05 -0.95 -0.55]
MF2='NS':trimf,[-1 -0.5 0]
MF3='Z':trimf,[-0.5 0 0.5]
MF4='PS':trimf,[0 0.5 1]
MF5='PB':trapmf,[0.55 0.95 1.05 1.45]
```

```
[Input2]
Name='deltaeror'
Range=[-1 1]
NumMFs=5
MF1='NB':trapmf,[-1.45 -1.05 -0.95 -0.55]
MF2='NS':trimf,[-1 -0.5 0]
MF3='Z':trimf,[-0.494 0 0.5]
MF4='PS':trimf,[0 0.5 1]
MF5='PB':trapmf,[0.5394 0.9394 1.039 1.439]
```

```
[Output1]
Name='output'
Range=[-3 3]
NumMFs=5
MF1='NB':trimf,[-4.5 -3 -1.5]
MF2='NS':trimf,[-3 -1.5 0]
MF3='Z':trimf,[-1.5 0 1.5]
MF4='PS':trimf,[0 1.5 3]
MF5='PB':trimf,[1.5 3 4.5]
```

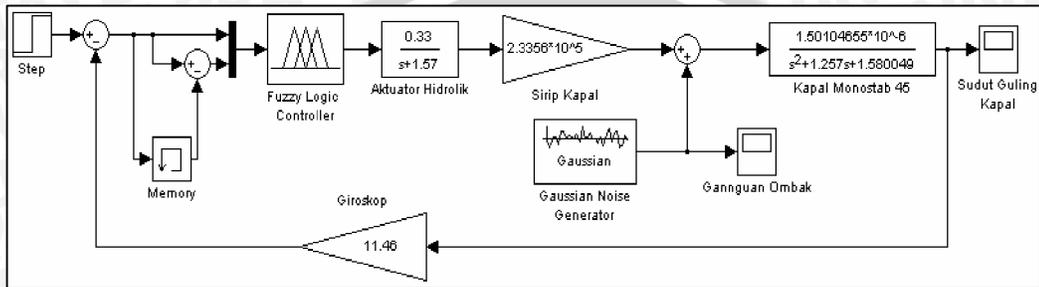
[Rules]

- 1 1, 1 (1) : 1
- 2 1, 1 (1) : 1
- 3 1, 2 (1) : 1
- 4 1, 2 (1) : 1
- 5 1, 3 (1) : 1
- 1 2, 1 (1) : 1
- 2 2, 2 (1) : 1
- 3 2, 2 (1) : 1
- 4 2, 3 (1) : 1
- 5 2, 4 (1) : 1
- 1 3, 2 (1) : 1
- 2 3, 2 (1) : 1
- 3 3, 3 (1) : 1
- 4 3, 4 (1) : 1
- 5 3, 4 (1) : 1
- 1 4, 2 (1) : 1
- 2 4, 3 (1) : 1
- 3 4, 4 (1) : 1
- 4 4, 4 (1) : 1
- 5 4, 5 (1) : 1
- 1 5, 3 (1) : 1
- 2 5, 4 (1) : 1
- 3 5, 4 (1) : 1
- 4 5, 5 (1) : 1
- 5 5, 5 (1) : 1

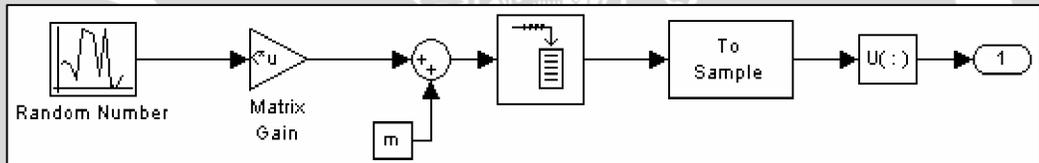


LAMPIRAN 3

**BLOK SIMULASI SIMULINK**



Blok Simulasi Sistem



Blok Simulasi Gaussian Noise Generator

LAMPIRAN 4

**Conversion Table**

<i>Multiply</i>	<i>by</i>	<i>to obtain</i>	<i>Multiply</i>	<i>by</i>	<i>to obtain</i>
atmospheres.....	33.90	feet of water	grams .....	10 <sup>3</sup>	milligrams
atmospheres.....	10.333	kgs. per sq. meter	grams .....	0.03527	ounces
atmospheres.....	14.70	pounds per sq. inch	grams .....	0.03215	ounces (troy)
centimeters.....	0.3397	inches	grams .....	0.07093	poundals
centimeters.....	0.01	meters	grams .....	2.205 × 10 <sup>-3</sup>	pounds
centimeters.....	10	millimeters	horse-power .....	44.44	B. t. units per min.
centimeters per second.....	0.6	meters per minute	horse-power .....	33.000	foot-pounds per min.
centimeters per second.....	0.02237	miles per hour	horse-power .....	550	foot-pounds per sec.
cubic centimeters .....	3.531 × 10 <sup>-5</sup>	cubic feet	horse-power.....	745.7	watt (w)
cubic centimeters .....	6.102 × 10 <sup>-3</sup>	cubic inches	horse-power.....	1.014	horse-power (metric)
cubic centimeters .....	10 <sup>-4</sup>	cubic meters	horse-power.....	735.50	watt (W)
cubic centimeters .....	2.642 × 10 <sup>-4</sup>	gallons	inches .....	2.540	centimeters
cubic centimeters .....	10 <sup>-3</sup>	liters	inches of water .....	25.40	kgs. per sq. meter
cubic feet .....	62.43	pounds of water	inches of water .....	5.204	pounds per sq. ft.
cubic feet .....	2.832 × 10 <sup>4</sup>	cubic cms.	kilograms .....	10 <sup>3</sup>	grams
cubic feet .....	1728	cubic inches	kilograms .....	2.2046	pounds
cubic feet .....	0.02832	cubic meters	kilogram force (kgf) .....	9.807	Newton (N)
cubic feet .....	7.481	gallons	kilogram-force		
cubic feet .....	28.32	liters	per square meter .....	9.807	pascals (Pa)
cubic feet per minute .....	472.0	cubic cms. per sec.	kilogram-force		
cubic feet per minute .....	0.1247	gallons per sec.	per square centimeter .....	9.8067 × 10 <sup>4</sup>	pascals (Pa)
cubic feet per minute .....	62.4	lbs. of water per min.	kilometers .....	10 <sup>5</sup>	centimeters
cubic inches .....	16.39	cubic centimeters	kilometers .....	3281	feet
cubic inches .....	5.787 × 10 <sup>-4</sup>	cubic feet	kilometers .....	10 <sup>3</sup>	meters
cubic inches .....	1.639 × 10 <sup>-3</sup>	cubic meters	kilometers .....	0.6214	miles
cubic inches .....	4.329 × 10 <sup>-3</sup>	gallons	knot .....	1.689	ft per sec
cubic inches .....	1.639 × 10 <sup>-3</sup>	liters	log <sub>10</sub> N .....	2.303	log <sub>e</sub> N or ln N
degrees (angle) .....	60	minutes	log <sub>e</sub> N or ln N .....	0.4343	log <sub>10</sub> N
degrees (angle) .....	0.01745	radians	meters .....	100	centimeters
feet .....	0.3048	meters	meters.....	3.2808	feet
feet of water .....	0.02950	atmospheres	meters .....	39.37	inches
feet of water .....	304.8	kgs. per sq. meter	meters .....	10 <sup>-2</sup>	kilometers
feet of water .....	62.43	pounds per sq. ft.	meters .....	10 <sup>2</sup>	millimeters
foot-pounds .....	5.050 × 10 <sup>-7</sup>	horse-power-hours	miles .....	1.609 × 10 <sup>5</sup>	centimeters
foot-pounds .....	0.1383	kilogram-meters	miles .....	5280	feet
foot-pounds per min. ....	3.030 × 10 <sup>-5</sup>	horse-power	miles .....	1.6093	kilometers
foot per second .....	0.592	knots	miles .....	1760	yards
gallons .....	0.1337	cubic-feet	miles (nautical) .....	1852	meters (m)
gallons .....	3.785 × 10 <sup>-3</sup>	cubic meters	miles per hour .....	44.70	centimeters per sec.
gallons .....	3.785	liters	miles per hour .....	88	feet per minute
grams .....	10 <sup>3</sup>	kilograms	miles per hour .....	1.467	feet per second

Sumber :

Bhattacharyya, R., 1978, *Dynamic of Marine Vehicle*, New York:John Wiley & Sons Ltd, hal : 482