

**DESAIN STABILISASI GERAK GULING (*ROLL MOTION*)
PADA KAPAL MONOSTAB 45 DENGAN *MODEL*
*REFERENCE ADAPTIVE SYSTEM (MRAS)***

SKRIPSI

*Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik*

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Disusun oleh:

DWI ADI BASUKI

0001060301-63

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

**DESAIN STABILISASI GERAK GULING (*ROLL MOTION*)
PADA KAPAL MONOSTAB 45 DENGAN *MODEL*
*REFERENCE ADAPTIVE SYSTEM (MRAS)***

SKRIPSI

*Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik*

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Disusun oleh:

DWI ADI BASUKI

0001060301-63

DOSEN PEMBIMBING :

Fitriana Suhartati, ST, MT.

NIP : 132 206 527

Rusmi Ambarwati, ST, MT.

NIP : 132 258 188

**DESAIN STABILISASI GERAK GULING (*ROLL MOTION*)
PADA KAPAL MONOSTAB 45 DENGAN *MODEL*
*REFERENCE ADAPTIVE SYSTEM (MRAS)***

Disusun oleh:

DWI ADI BASUKI

0001060301-63

*Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada tanggal
9 Agustus 2007*

DOSEN PENGUJI :

Ir. Dipl-Ing. Moch. Rusli
NIP. 131 653 473

Ir. Purwanto, MT
NIP. 131 574 847

Ir. Erni Yudaningtyas, MT
NIP. 131 879 035

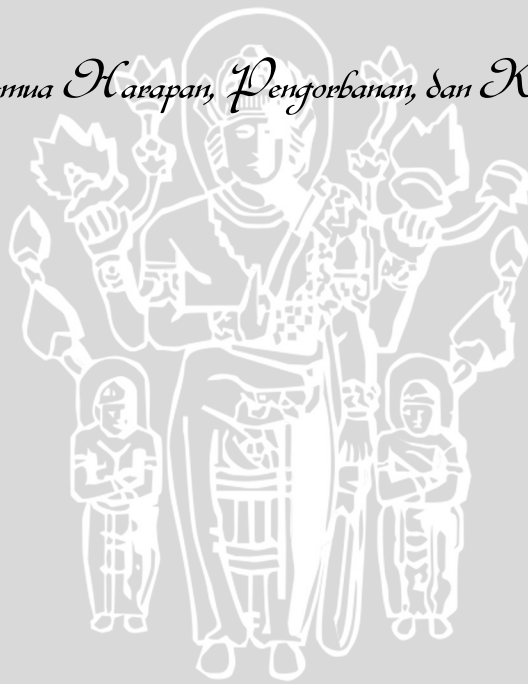
Goegoes Dwi Nusantoro, ST, MT
NIP. 132 318 316

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ir. Heru Nurwarsito, M.Kom
NIP. 131 879 033

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

"Untuk Semua Harapan, Pengorbanan, dan Kesabaran"



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT karena dengan berkat, rahmat, dan karunia serta ridho-Nya penyusunan skripsi ini dengan judul **“Desain Stabilisasi Gerak guling (Roll Motion) Pada Kapal MONOSTAB 45 Dengan Model Reference Adaptive System (MRAS)”** dapat diselesaikan. Penulis menyadari bahwa skripsi ini tidak akan mencapai titik akhir penyelesaian tanpa bantuan berbagai pihak, karenanya penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

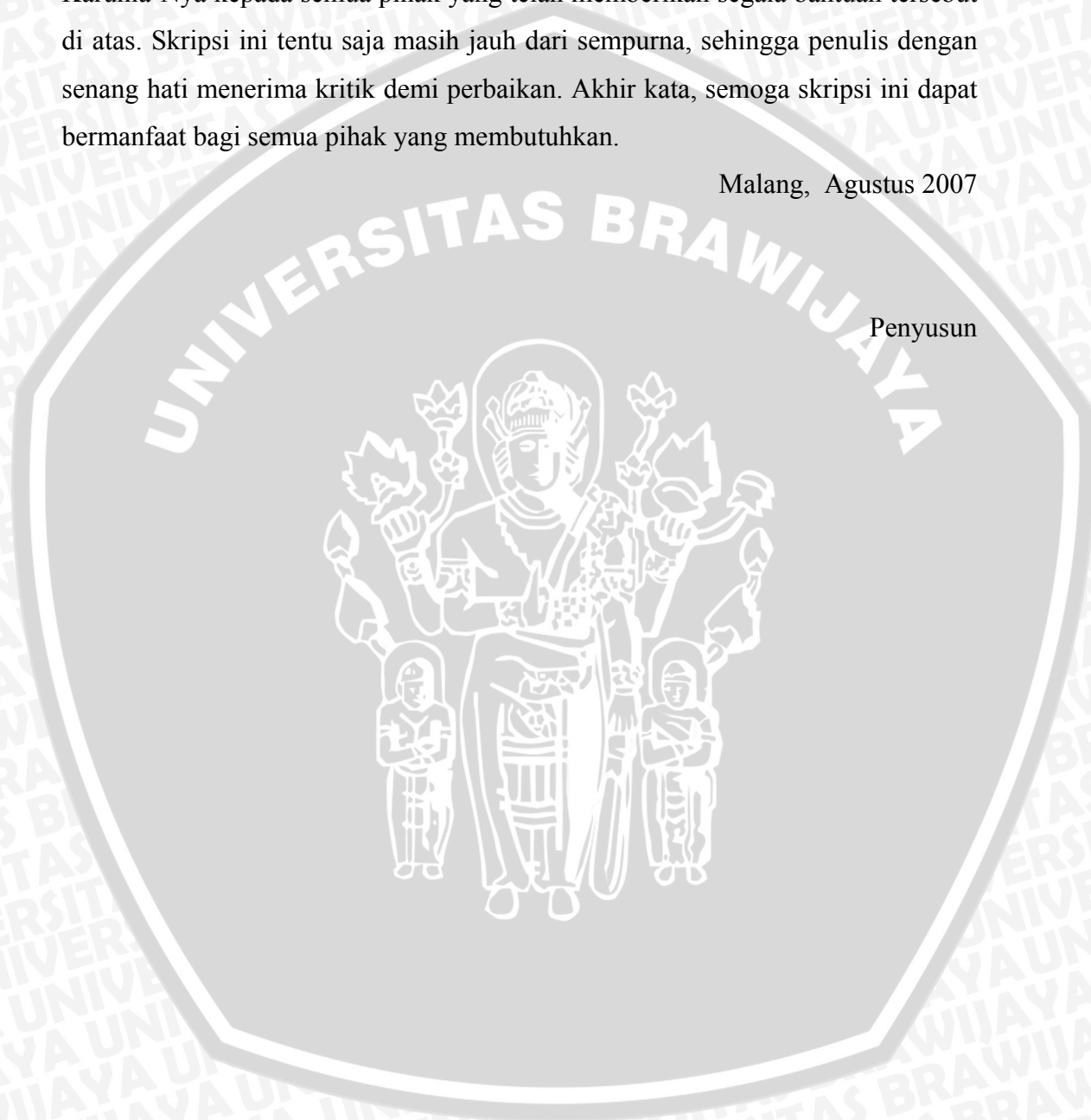
1. Bapak dan ibu, kakak dan adikku, keluarga besar Ngatmiran, adalah rahmat Allah SWT terbesar berada di antara mereka dengan dukungan dan kasih sayang mereka yang tidak dapat terbalaskan.
2. Bapak Ir. Heru Nurwarsito, M.Kom selaku Ketua Jurusan Elektro dan Bapak Rudy Yuwono, ST, M.Sc selaku Sekretaris Jurusan Elektro.
3. Ibu Fitriana Suhartati, ST, MT dan Ibu Rusmi Ambarwati, ST, MT. sebagai dosen pembimbing yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan dengan sabar sampai terselesaikannya skripsi ini.
4. Bapak dan Ibu dosen serta karyawan Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.
5. Bapak Ir. Unggul Wibawa MSc. beserta keluarga atas bimbingan dan pengarahannya.
6. Keluarga Besar Bapak Miranto atas dukungan dan perhatiannya.
7. Rekan-rekan Teknik Elektro Brawijaya angkatan 2000.
8. Rekan-rekan di Tim Pengembang Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (TPTIFT-UB) atas dukungan, masukan dan bantuan fasilitas yang diberikan.
9. Rekan-rekan komunitas *Café Teknik*.

10. Serta semua pihak yang tak dapat disebutkan satu persatu telah turut membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian skripsi ini.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa senantiasa memberikan Rahmat dan Karunia-Nya kepada semua pihak yang telah memberikan segala bantuan tersebut di atas. Skripsi ini tentu saja masih jauh dari sempurna, sehingga penulis dengan senang hati menerima kritik demi perbaikan. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkan.

Malang, Agustus 2007

Penyusun



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	xii
ABSTRAK	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Batasan Masalah	2
1.3. Rumusan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Sistematika Pembahasan	4
BAB II DASAR TEORI	5
2.1. Sistem Kontrol Adaptif	5
2.2. <i>Model Reference Adaptive System (MRAS)</i>	6
2.3. Tinjauan Umum Dinamika Kapal	11
2.4. Prinsip Kestabilan Kapal	15
2.5. Klasifikasi Sistem Kontrol Pada Kapal Laut	17
2.6. Sistem Stabilisasi Gerak Guling (<i>Roll Stabilization System</i>)	20
2.7. Kapal Monostab 45	21
2.8. Sayap Stabilisator	23
2.9. Sistem Hidrolik-Elektrik	24
2.10. Giroskop (<i>Gyroscope</i>)	25
2.11. Gelombang Permukaan Laut	27
BAB III METODOLOGI	29
3.1. Rancangan Penelitian	29
3.2. Cara Kerja Penelitian	30

3.3.	Analisa Data.....	30
3.4.	Kesimpulan dan Saran.....	30

BAB IV PEMODELAN SISTEM STABILISASI GERAK GULING

KAPAL MONOSTAB 45 DAN DESAIN MRAS 31

4.1.	Model Matematis Sistem	31
4.2.	Sistem Tanpa Pengendali dan Tanpa Gangguan.....	36
4.3.	Proses	37
4.4.	Penentuan Model Referensi	38
4.5.	Penetapan Parameter Pengendali	41
4.6.	Persamaan <i>Error</i>	43
4.7.	Penentuan Hukum Adaptasi.....	42
4.8.	Penentuan Daerah Kerja Aktuator Hidrolik.....	46
4.9.	Skema Simulasi Sistem Stabilisasi Gerak Guling Pada Kapal MONOSTAB 45 Dengan <i>Model Reference Adaptive System</i> (MRAS) Pada Matlab Simulink.....	47

BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM 49

5.1.	Simulasi Sistem Stabilisasi Gerak Guling Pada Kapal MONOSTAB 45 dengan metode <i>Model Reference Adaptive System</i> (MRAS).....	49
5.2.	Hasil Simulasi Model Referensi	49
5.3.	Hasil Simulasi Sistem Tanpa Tuning Parameter Pengendali dan Tanpa Gangguan	50
5.4.	Hasil Simulasi Sistem Dengan Tuning Parameter Pengendali Tanpa Gangguan	52
5.5.	Hasil Simulasi Sistem Dengan Tuning Parameter Pengendali Dengan Gangguan	54
5.6.	Analisis Hasil Simulasi Pengendalian Sistem Tanpa Gangguan dan Tanpa Tuning Parameter Pengendali	64
5.7.	Analisis Hasil Simulasi Pengendalian Sistem Tanpa Gangguan Dengan Tuning Parameter Pengendali.....	65



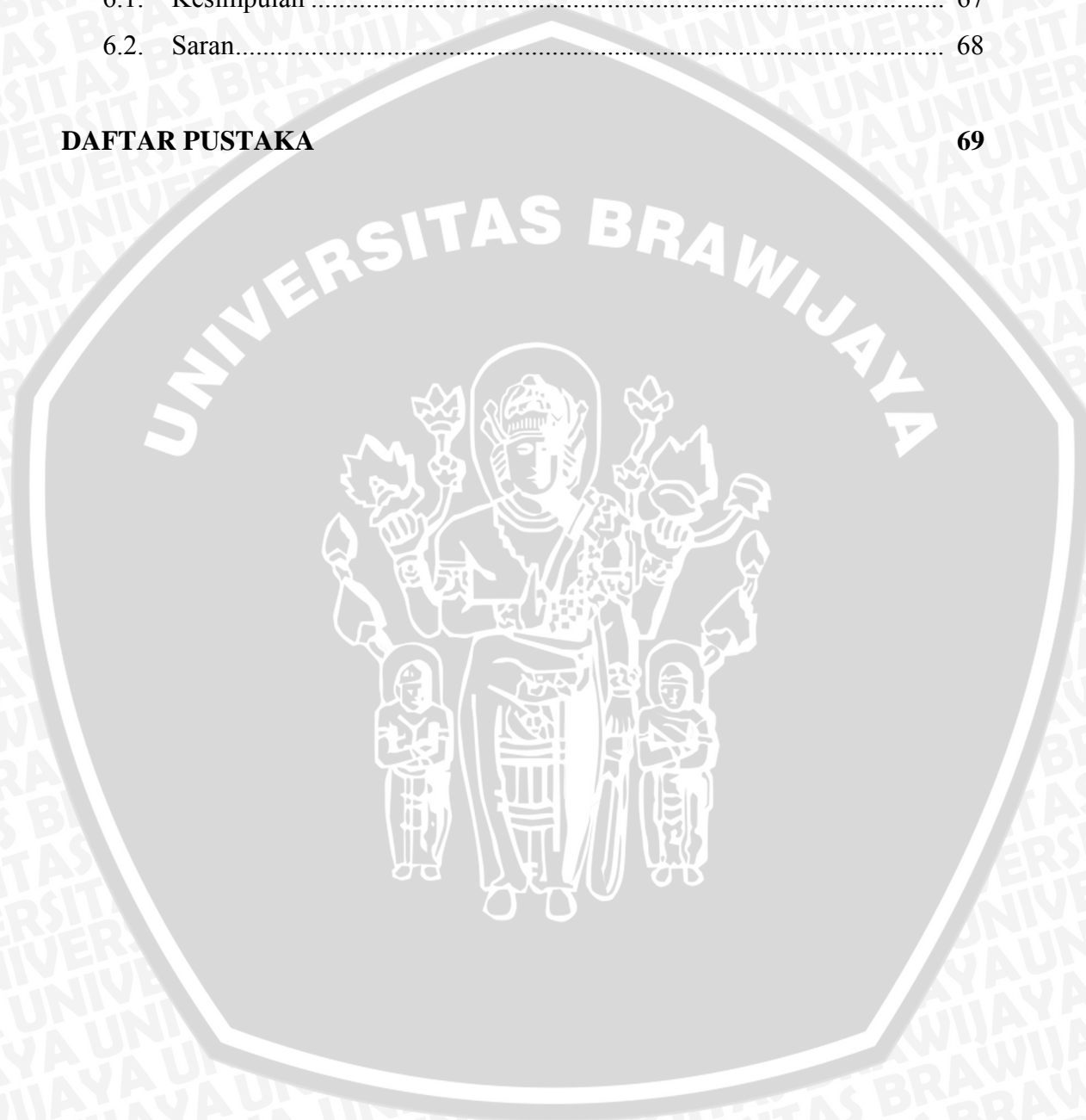
5.8. Analisis Hasil Simulasi Pengendalian Sistem Dengan Gangguan Dengan Tuning Parameter Pengendali..... 65

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 67

6.1. Kesimpulan 67

6.2. Saran..... 68

DAFTAR PUSTAKA 69



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Blok diagram MRAS.....	7
Gambar 2.2	Struktur dasar pengendali adaptif.....	10
Gambar 2.3	Definisi Posisi, Gaya, dan State pada sebuah kapal, dengan <i>inertial coordinate system</i> dan <i>body-fixed coordinate system</i>	12
Gambar 2.4	Pusat keapungan kapal.	15
Gambar 2.5	Pusat grafitasi kapal.....	16
Gambar 2.6	Prinsip kestabilan kapal.....	17
Gambar 2.7	Berbagai sistem pengendali pada kapal.....	18
Gambar 2.8	Kapal MONOSTAB 45.....	22
Gambar 2.9	Diagram blok sistem stabilisasi gerak guling kapal MONOSTAB 45.....	22
Gambar 2.10	Kapal MONOSTAB 45 dilengkapi sayap aktif.....	23
Gambar 2.11	Potongan melintang buritan kapal dengan sayap aktif.....	24
Gambar 2.12	Diagram blok aktuator hidrolik.....	25
Gambar 2.13	Sumbu putar giroskop.....	25
Gambar 2.14	Diagram vektor torsi-momentum.....	26
Gambar 4.1	Diagram Blok Sistem Stabilisasi Gerak Guling Kapal MONOSTAB 45.....	31
Gambar 4.2	Diagram blok dinamika kapal.....	32
Gambar 4.3	Diagram blok aktuator hidrolik.....	33
Gambar 4.4	Respon tangga satuan aktuator hidrolik.....	33
Gambar 4.5	Diagram blok sayap stabiolisator.....	34
Gambar 4.6	Diagram blok generator ombak.....	35
Gambar 4.7	Diagram blok giroskop.....	35
Gambar 4.8	Diagram blok sistem stabilisasi gerak guling pada kapal MONOSTAB 45 tanpa kontroler.....	35
Gambar 4.9	Respon tangga satuan pada sistem tanpa kontroler dan tanpa gangguan.....	37
Gambar 4.10	Pemodelan proses pada sistem stabilisasi gerak guling kapal MONOSTAB 45.....	37



Gambar 4.11	Respon tangga satuan proses lup terbuka pada sistem stabilisasi gerak guling kapal MONOSTAB 45	38
Gambar 4.12	Respon tangga satuan sistem tanpa kontroler dan model referensi	40
Gambar 4.13	Struktur dasar pengendali adaptif.....	41
Gambar 4.14	Diagram blok generator sinyal 1 dan parameter c_1 pada F_1	42
Gambar 4.15	Diagram blok generator sinyal 2 dan parameter d_1 pada F_2	42
Gambar 4.16	Simulasi sistem stabilisasi gerak guling pada kapal MONOSTAB 45 dengan MRAS pada Simulink.....	47
Gambar 4.17	Kontroler MRAS pada Simulink.....	47
Gambar 4.18	Proses stabilisasi gerak guling pada kapal MONOSTAB 45 pada Simulink.....	48
Gambar 5.1	Respon model referensi pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt.....	50
Gambar 5.2	Respon plant pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt tanpa tuning parameter pengendali, tanpa gangguan	50
Gambar 5.3	Respon sinyal kontrol pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt tanpa tuning parameter pengendali, tanpa gangguan	51
Gambar 5.4	Respon parameter pengendali k_0 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt tanpa tuning parameter pengendali, tanpa gangguan	51
Gambar 5.5	Respon parameter pengendali c_1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt tanpa tuning parameter pengendali, tanpa gangguan	51
Gambar 5.6	Respon Respon parameter pengendali d_1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt tanpa tuning parameter pengendali, tanpa gangguan.....	52

Gambar 5.7 Respon plant pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, tanpa gangguan 52

Gambar 5.8 Respon sinyal kontrol pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, tanpa gangguan 53

Gambar 5.9 Respon parameter pengendali k0 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, tanpa gangguan 53

Gambar 5.10 Respon parameter pengendali c1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, tanpa gangguan 53

Gambar 5.11 Respon parameter pengendali d1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, tanpa gangguan 54

Gambar 5.12 Gangguan berupa torsi eksternal 60.000 Nm pada detik ke-40.... 55

Gambar 5.13 Respon plant tanpa pengendali terhadap gangguan pada gambar 5.12 55

Gambar 5.14 Respon plant dengan pengendali MRAS terhadap gangguan pada gambar 5.12..... 55

Gambar 5.15 Respon sinyal kontrol pada pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.12 56

Gambar 5.16 Respon parameter pengendali k0 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.12 56

Gambar 5.17 Respon parameter pengendali c1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.12 56



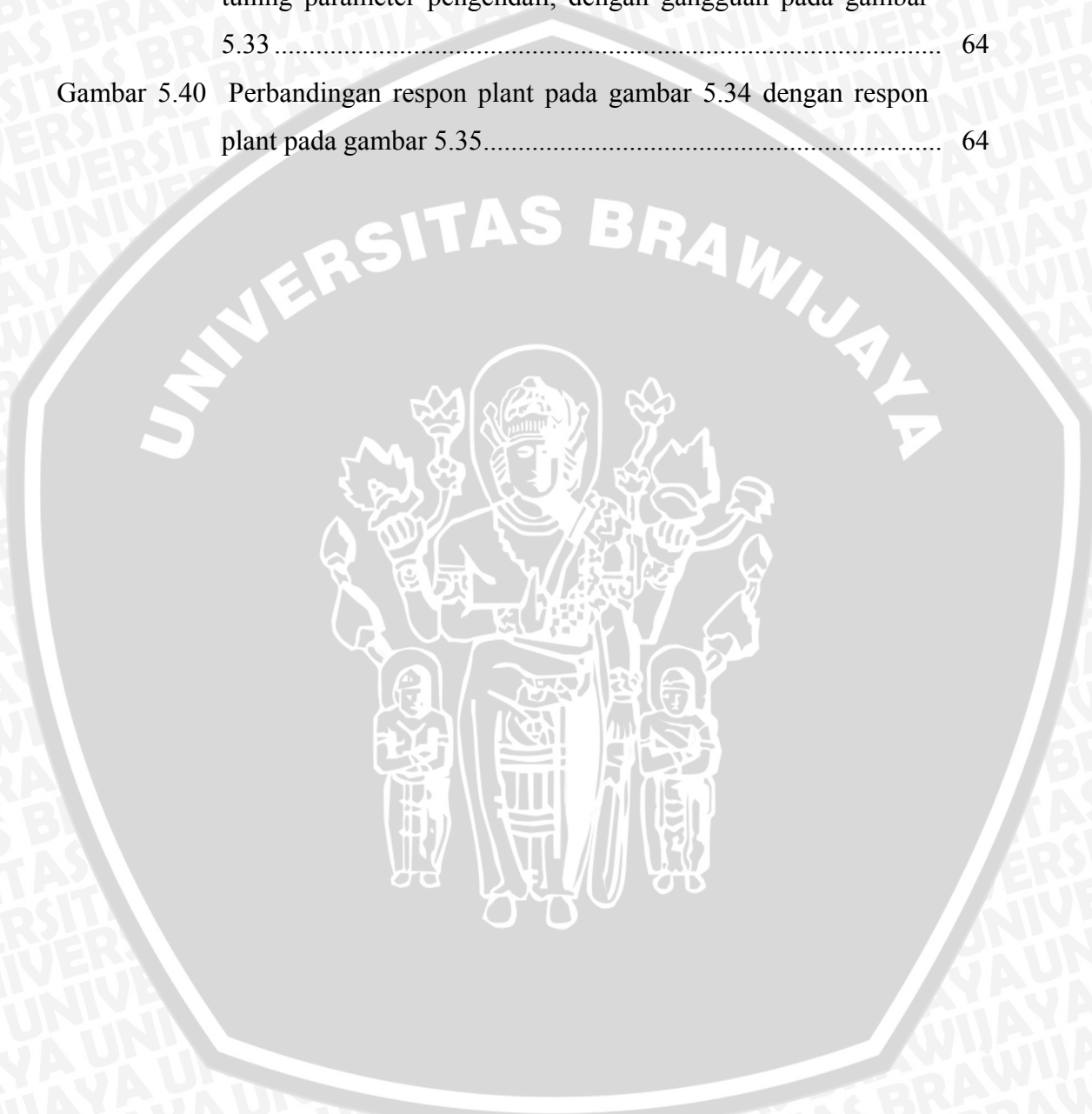
Gambar 5.18	Respon parameter pengendali d1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.12	57
Gambar 5.19	gangguan berupa torsi eksternal 120.000 Nm pada detik ke-40 ...	57
Gambar 5.20	Respon plant tanpa pengendali terhadap gangguan pada gambar 5.19	57
Gambar 5.21	Respon Respon plant dengan pengendali MRAS terhadap gangguan pada gambar 5.19	58
Gambar 5.22	Respon sinyal kontrol pada pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.19	58
Gambar 5.23	Respon parameter pengendali k0 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.19	58
Gambar 5.24	Respon parameter pengendali c1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.19	59
Gambar 5.25	Respon parameter pengendali d1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.19	59
Gambar 5.26	Gangguan berupa torsi eksternal yang acak pada kisaran +90.000 Nm setiap 12 detik	59
Gambar 5.27	Respon plant tanpa pengendali terhadap gangguan pada gambar 5.26	60
Gambar 5.28	Respon plant dengan pengendali MRAS terhadap gangguan pada gambar 5.26.....	60



Gambar 5.29	Respon sinyal kontrol pada pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.26	60
Gambar 5.30	Respon parameter pengendali k0 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.26	61
Gambar 5.31	Respon parameter pengendali c1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.26	61
Gambar 5.32	Respon parameter pengendali d1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.26	61
Gambar 5.33	Gangguan berupa torsi eksternal yang disebabkan gelombang laut pada kecepatan 15, 20 dan 30 knots.	62
Gambar 5.34	Respon plant tanpa pengendali terhadap gangguan pada gambar 5.33	62
Gambar 5.35	Respon plant dengan pengendali MRAS terhadap gangguan pada gambar 5.33.....	62
Gambar 5.36	Respon sinyal kontrol pada pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.33	63
Gambar 5.37	Respon parameter pengendali k0 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.34	63
Gambar 5.38	Respon parameter pengendali c1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan	

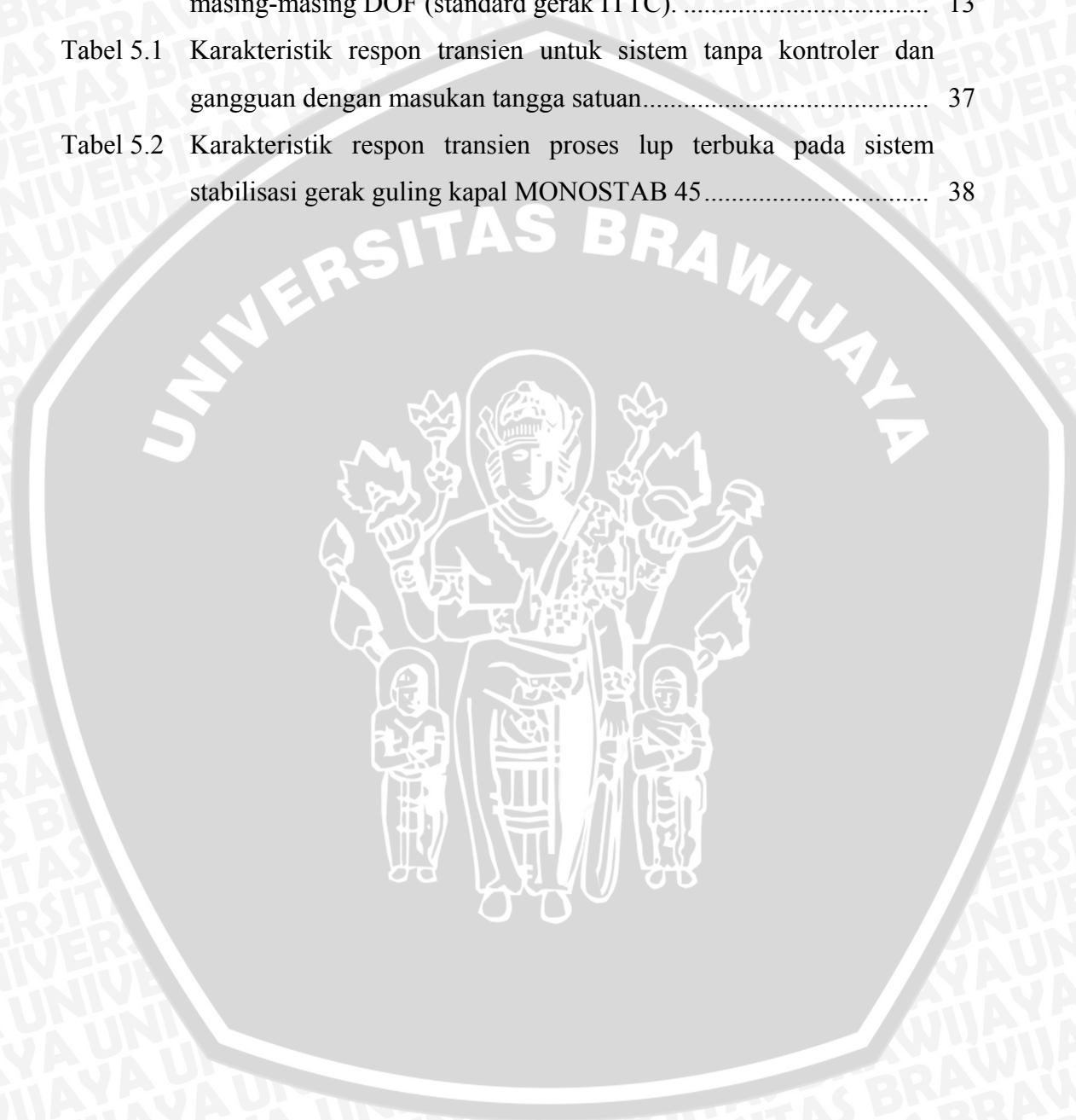


tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.33	63
Gambar 5.39 Respon parameter pengendali d1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.33	64
Gambar 5.40 Perbandingan respon plant pada gambar 5.34 dengan respon plant pada gambar 5.35.....	64



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Notasi dari Gerak, Gaya, dan Momen yang berhubungan dengan masing-masing DOF (standard gerak ITTC).....	13
Tabel 5.1 Karakteristik respon transien untuk sistem tanpa kontroler dan gangguan dengan masukan tangga satuan.....	37
Tabel 5.2 Karakteristik respon transien proses lup terbuka pada sistem stabilisasi gerak guling kapal MONOSTAB 45.....	38



ABSTRAK

DWI ADI BASUKI, 2007. Desain Stabilisasi Gerak Guling (*Roll Motion*) Pada Kapal MONOSTAB 45 Dengan *Model Reference Adaptive Systems* (MRAS). Skripsi Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Dosen Pembimbing : Fitriana Suhartati, ST, MT dan Rusmi Ambarwati, ST, MT.

Stabilisasi gerak guling pada kapal laut memegang peranan penting dalam meningkatkan kenyamanan dan keamanan bagi penumpang pada saat kapal berlayar dalam berbagai kondisi laut. Kapal MONOSTAB 45 menggunakan sepasang sayap aktif yang terkontrol sebagai stabilisator gerak guling. Sepasang sayap ini secara variabel ditenagai ke dalam air untuk mendapatkan torsi yang berlawanan dengan torsi gangguan yang bersifat dinamis yang merupakan penyebab gerak guling sehingga osilasi pada kapal dapat teredam.

Pengendali adaptif dengan metode *Model Reference Adaptive Systems*, bertujuan meminimalkan pengaruh gangguan yang bersifat dinamis. Pada prinsipnya perancangan MRAS dimulai dengan menentukan fungsi alih dari *plant*, kemudian menyusun model referensi, meminimalkan *error* dengan hukum adaptasi, dan melakukan tuning parameter pengendali.

Melalui simulasi dan *tuning* parameter diperoleh performa terbaik pada saat parameter $k_0 = 0,005$, $c_1 = -0,3$, dan $d_1 = -0,3$. dengan pengujian sinyal *step* sistem dapat mengatasi gangguan dengan sempurna hingga gangguan yang besarnya tidak lebih dari daerah kerja aktuator. Pada pengujian dengan sinyal acak yang berubah setiap 12 detik pada kisaran ± 90.000 Nm, sistem dapat melakukan redaman hingga 50%. Sedangkan pada pengujian dengan model gelombang pada kecepatan angin 15, 20, dan 30 knot sistem dapat melakukan redaman dengan nilai bervariasi.

Kata kunci : *Model Reference Adaptive Systems* (MRAS), Gerak Guling (*Roll Motion*), MONOSTAB 45.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada kapal modern yang ditujukan sebagai kapal penumpang, masalah peningkatan kenyamanan bagi penumpang sangat penting untuk diperhatikan. Selain itu peningkatan kecepatan juga harus diperhatikan, seperti yang diilustrasikan oleh David Giles bahwa delapan kapal yang berlayar dengan kecepatan 35 knots (65 km/h) atau lebih akan mampu menggantikan 35 kapal yang lebih kecil kecepatannya. Pada kenyataannya, peningkatan kecepatan yang disertai dengan peningkatan kebutuhan akan ketersediaan layanan tersebut membutuhkan kapal-kapal yang mampu berlayar dalam kondisi laut bagaimanapun. Untuk memenuhi kebutuhan ini, tanpa mengorbankan kenyamanan penumpang, dibutuhkan sistem kontrol aktif yang mampu meredam osilasi yang tidak diinginkan yang berasal dari gelombang laut pada saat kapal berlayar.

Kapal MONOSTAB 45 adalah kapal berlambung tunggal jenis baru dengan panjang 47 meter, berat yang dipindahkan pada saat beban penuh sebesar 160 tons, dan mampu mengangkut penumpang sampai dengan 512 orang. Kapal ini dirancang oleh Rodriquez Cantieri Navali S.p.A yang berasal dari Messina, Italia sebagai kapal penumpang yang mampu berlayar dengan kecepatan 35 knots dalam berbagai kondisi laut.

Pada saat kapal berlayar di lautan bebas, kestabilan kapal akan mendapat gangguan (*disturbance*) dari lingkungan berupa gaya atau moment eksternal. Gangguan tersebut akan mengakibatkan terjadinya gerak lokal yaitu gerak kapal pada *body-fixed coordinate system* dan gerak global kapal yaitu gerak kapal pada *inertial/Earth-fixed coordinate system*. Gerak lokal merupakan gerak yang dapat dirasakan oleh penumpang yang berada di dalam kapal. Gerak lokal terdiri dari enam jenis yaitu: guling (*roll*), angguk (*pitch*), geleng (*yaw*), lemparan menyamping (*sway*), empasan (*heave*), dan sentakan (*surge*). Gerak lokal yang paling mempengaruhi kenyamanan penumpang kapal adalah gerak guling (*roll motion*). Gerak guling yang besar dapat menyebabkan penumpang mengalami

mabuk laut, kelelahan dan kecenderungan melakukan kesalahan. Oleh karena itu peredaman gerak guling sangat penting untuk dilakukan.

Terdapat banyak alat yang dirancang untuk bekerja meredam osilasi pada kapal terutama untuk meredam gerak guling misalnya tank anti-guling (*antirolling tank*), *bilge keels*, sirip stabilisator (*stabilizing fins*), dan sistem kemudi peredam gerak guling (*rudder-roll damping system*). Untuk meredam gerak guling yang disebabkan oleh gelombang permukaan, kapal MONOSTAB 45 dirancang dengan memiliki dua sayap tambahan yang terkontrol secara aktif. Perancang sistem ini berpendapat bahwa sistem ini akan mampu mencapai performansi yang lebih bagus, walaupun pada kecepatan yang rendah, bila dibandingkan dengan performansi yang dapat dicapai oleh sistem yang menggunakan sirip aktif (*active fins*). Dan lebih lanjut, profil khusus sayap ini dapat meningkatkan redaman alamiah dari kapal walaupun dalam keadaan sayap tidak terkontrol secara aktif (misalnya sayap dibiarkan dalam kondisi tetap).

Salah satu sistem kontrol yang sudah diterapkan untuk mengendalikan sayap aktif, yang merupakan aktuator pada sistem stabilisasi gerak guling, pada kapal MONOSTAB 45 adalah sistem kontrol adaptif dengan metode *LQ gain scheduling*. Sistem ini berhasil mencapai performansi yang baik dalam meredam gerak guling pada kapal MONOSTAB 45 dalam beberapa kondisi laut. Namun pada dasarnya proses adaptasi pada sistem ini merupakan gelung terbuka, setiap keluaran plant memiliki pasangan parameter pengendali tertentu sehingga untuk pengembangan lebih lanjut, sistem ini memerlukan identifikasi lebih detail untuk setiap pasangan keluaran dan parameter pengendalinya. Untuk mendapatkan hasil estimasi yang baik, proses identifikasi ini memerlukan pengukuran dalam jangka waktu yang panjang. Metode *Model Reference Adaptive System* (MRAS) akan digunakan dalam sistem stabilisasi gerak guling pada kapal MONOSTAB 45 untuk mengatasi masalah tersebut dan untuk memperoleh performansi redaman gerak guling yang lebih baik.

1.2. Batasan Masalah

Untuk membatasi permasalahan agar tepat sesuai dengan tujuan, maka batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah :

1. Obyek penelitian adalah kapal MONOSTAB 45 yang dilengkapi dengan sayap stabilisator yang berlayar pada kelajuan konstan sebesar 35 knot (kelajuan nominal kapal).
2. Gangguan pada kapal hanya disebabkan oleh torsi eksternal dari gelombang permukaan laut.
3. Kapal hanya mengalami efek gerak guling (*roll motion*), pengaruh efek gerak yang lain terhadap kapal diabaikan.
4. Kapal diasumsikan sebagai benda kaku yang elastisitasnya diabaikan.
5. Data-data sistem diperoleh berdasarkan data-data sekunder yang terdapat pada jurnal yang terkait dengan pokok bahasan dalam skripsi ini.
6. Pembahasan hanya mengenai penerapan *Model Reference Adaptive System* (MRAS) pada pengendalian gerak guling.
7. Analisis dan simulasi sistem menggunakan *software* Matlab versi 7.0.4

1.3. Rumusan Masalah

1. Bagaimana memodelkan persamaan pengendalian gerak guling pada kapal MONOSTAB 45 dalam bentuk persamaan fungsi alih.
2. Bagaimana merancang sebuah pengendali adaptif untuk meredam gerak guling pada kapal MONOSTAB 45 yang disebabkan oleh gangguan dari luar.
3. Bagaimana mensimulasikan pengendalian gerak guling pada kapal MONOSTAB 45 menggunakan kendali adaptif dengan metode *model reference adaptive system* (MRAS).

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan yang akan dicapai pada pengerjaan skripsi ini adalah mendapatkan desain kontroler pada pengendalian gerak guling pada kapal MONOSTAB 45 dengan metode *Model Reference Adaptive System* (MRAS) sehingga diperoleh sistem yang mampu mengatasi gangguan dengan baik.

1.5. Sistematika Pembahasan

Bab I Pendahuluan

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

Bab II Dasar Teori

Pada bab ini dijelaskan mengenai dasar teori sistem kontrol *Adaptif*, *Model Reference Adaptive System (MRAS)*, tinjauan umum dinamika kapal, prinsip kestabilan kapal, klasifikasi sistem kontrol pada kapal, sistem stabilisasi gerak guling, kapal MONOSTAB 45 dan komponen di dalamnya serta gangguan yang dialami oleh kapal berupa gelombang laut.

Bab III Metodologi

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

Bab IV Pemodelan Sistem

Membahas mengenai penurunan rumus untuk parameter-parameter sistem stabilisasi gerak guling hingga penyajian dalam bentuk fungsi alih.

Bab V Pengendalian Dan Simulasi Sistem

Bab ini berisi perancangan sistem kontrol dengan *Model Reference Adaptive System (MRAS)* dan penerapannya pada *plant*, serta simulasi sistem.

Bab VI Kesimpulan Dan Saran

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

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Sistem Kontrol Adaptif

Dalam bahasa sehari-hari, beradaptasi berarti merubah tingkah-laku untuk menyesuaikan diri dengan lingkungan sekitar yang baru. Jadi secara intuisi dapat dinyatakan, pengendali adaptif adalah pengendali yang dapat memodifikasi tingkah-lakunya dalam menanggapi perubahan dinamika proses dan perubahan karakter gangguan (*disturbances*). Secara pragmatis pengendali adaptif adalah sebuah pengendali yang memiliki parameter-parameter yang dapat disesuaikan (*adjustable parameters*) serta memiliki mekanisme dalam menyesuaikan parameter-parameter tersebut. Dengan adanya mekanisme tersebut, kontroler ini bersifat nonlinier (Astrom and Wittenmark, 1989: 1).

Pada pengendalian adaptif penyesuaian dilakukan sedemikian rupa sehingga keluaran sistem dapat terus dipertahankan sesuai dengan keadaan yang diinginkan. Selain itu, karakteristik dinamik *process* diidentifikasi setiap saat, sehingga parameter pengendali dapat diubah-ubah sedemikian sehingga dicapai keluaran sistem sesuai dengan yang diinginkan pada kondisi lingkungan yang berbeda-beda. Sedangkan sistem dinamik didefinisikan sebagai sistem dengan keluaran yang tidak dapat mengikuti perubahan masukan secara tiba-tiba.

Pendekatan yang digunakan pada pengendalian adaptif dikelompokkan menjadi tiga, yaitu :

1. *Gain Scheduling* (penjadwalan penguatan)
2. *Self Tuning Controller* (pengaturan *self-tuning*)
3. *Model References Adaptive Systems* (sistem adaptif model referensi)

Pengendalian adaptif metode *Gain Scheduling* memerlukan pengetahuan yang mendalam tentang *plant* yang akan dikendalikan (Sastry and Bodson, 1993) karena parameter pengendali ditentukan langsung pada saat perancangan. Setiap keluaran *plant* mempunyai pasangan parameter pengendali tertentu yang telah ditetapkan nilainya oleh perancang. Pengendalian metode ini digunakan apabila keluaran *plant* dan variasi gangguannya dapat diprediksi.

Proses adaptasi dalam pengendalian adaptif metode *Self Tuning Controller* merupakan proses adaptasi tak langsung. Pada proses ini parameter *plant* ditentukan terlebih dahulu, kemudian parameter tersebut digunakan untuk mengubah parameter pengendali. Sedangkan proses adaptasi dalam pengendalian adaptif metode *Model References Adaptive Systems* adalah proses adaptasi langsung tanpa terlebih dahulu melakukan estimasi parameter *plant*. Jadi proses adaptasi pada pengendalian metode *Self Tuning Controller* lebih kompleks untuk dilakukan daripada pengendalian adaptif metode *Model References Adaptive Systems* karena harus terlebih dahulu melakukan estimasi parameter *plant*. Maka dalam penulisan skripsi ini digunakan pengendalian adaptif dengan *Model References Adaptive Systems*.

2.2. Model Reference Adaptive System MRAS

Model References Adaptive Systems (MRAS) sebagai pengendali adaptif dikenalkan pertama kali oleh Whitaker pada tahun 1958 (Butler, 1992: 4). Gagasan baru yang terdapat pada MRAS adalah:

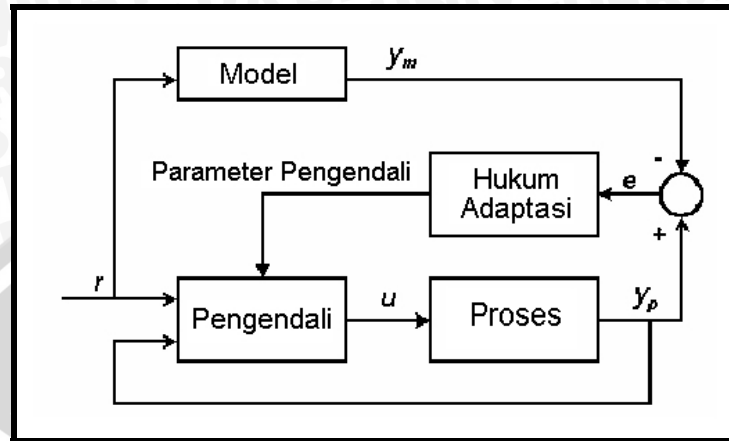
1. Keluaran sistem ditentukan melalui keluaran model sistem
2. Nilai parameter pengendali disesuaikan besarnya dengan kesalahan (*error*) yang terjadi antara keluaran model referensi dengan keluaran sistem yang dikendalikan.

Prinsip pengendalian dengan menggunakan MRAS adalah dengan membuat keluaran sistem yang dikendalikan sedemikian rupa sehingga bertingkah laku sama dengan tingkah laku referensi yang diberikan. Diagram blok *Model References Adaptive Systems* diberikan dalam Gambar 2.1.

Sistem pengendalian adaptif memiliki dua *loop* umpan balik, yaitu *loop* dalam dan *loop* luar. *Loop* dalam terdiri atas proses (*process*) dan pengendali. Sedangkan *loop* luar digunakan untuk menyesuaikan harga parameter yang digunakan pada *loop* dalam. Setelah nilai parameter pengendali sudah tepat, maka *loop* dalam berjalan seperti pengendalian biasa.

Dalam pengendalian ini, keluaran model referensi digunakan untuk menentukan keluaran sistem agar sesuai dengan yang diinginkan. Model referensi menghasilkan sinyal keluaran y_m , selanjutnya sinyal keluaran referensi ini dibandingkan dengan sinyal keluaran proses y_p . Bila terdapat adanya *error* e

diantara y_m dengan y_p , maka parameter yang ada pada pengendali akan berubah melalui hukum adaptasi. Melalui hukum ini, pengendali akan menghasilkan sinyal kendali u yang selanjutnya menjadi masukan bagi proses sehingga keluaran y_p akan sesuai dengan keluaran model referensi (Butler, 1992: 4).



Gambar 2.1 Blok diagram MRAS

Sumber : Butler, 1992 : 4 (dengan modifikasi)

a. Proses

Proses merupakan bagian dari sistem yang akan dikendalikan. Proses dinyatakan dalam fungsi alih. Fungsi alih didefinisikan sebagai perbandingan antara transformasi Laplace fungsi tanggapan (keluaran) terhadap transformasi fungsi penentu (masukan) dengan semua keadaan awal sama dengan nol. Fungsi alih proses $W_p(s)$ dengan keluaran $Y_p(t)$ terhadap sinyal kendali $u(t)$ dapat dinyatakan dengan Persamaan (2-1) :

$$W_p(s) = \frac{Y_p(t)}{u(t)} = k_p \frac{\beta_p(s)}{\alpha_p(s)} \quad (2-1)$$

$\alpha_p(s)$ adalah polinomial dengan derajat n , $\beta_p(s)$ adalah polinomial berderajat m , dengan $m \leq n$. Diasumsikan bahwa koefisien $\alpha_p(s)$ dan $\beta_p(s)$ tidak diketahui, hanya n , m dan tanda penguatan k_p yang diketahui.

b. Model Referensi

Model Referensi $W_m(s)$ menyatakan fungsi alih keluaran $Y_m(t)$ terhadap $r(t)$. Fungsi alih $W_m(s)$ dinyatakan sebagai berikut :

$$W_m(s) = \frac{Y_m(t)}{r(t)} = k_m \frac{\beta_m(s)}{\alpha_m(s)} \quad (2-2)$$

$\alpha_m(s)$ dan $\beta_m(s)$ adalah polinomial stabil, yaitu polinomial yang semua akarnya berada pada sebelah kiri bidang s , sedangkan k_m adalah konstanta. $\alpha_m(s)$ adalah polinomial dengan derajat n dan $\beta_m(s)$ adalah polinomial dengan derajat m , dengan $m \leq n$.

Keluaran dari model referensi menyatakan keluaran yang diinginkan dari *plant* yang dikendalikan jika sistem tersebut ditambah dengan pengendali yang tepat.

Dalam menentukan model referensi, derajat relatif model referensi harus sama dengan derajat relatif dari proses. Derajat relatif adalah selisih antara orde *pole* dan *zero* atau $n-m$ (Butler, 1992: 8).

Namun perlu dicatat bahwa pada prakteknya ketika kebutuhan teoritis tidak dapat terpenuhi maka model referensi harus ditentukan dengan hati-hati dengan syarat keluaran proses sebenarnya dapat mengikuti keluaran model referensi. Jika model referensi dipilih yang memiliki respon terlalu cepat, sebagai contoh, maka sinyal kontrol yang dibutuhkan harus sangat besar, sehingga menyebabkan efek saturasi pada masukan atau dinamika tak termodelkan yang merusak sistem adaptif (Butler, 1992: 8).

c. Pengendali Adaptif

Struktur pengendali adaptif terdiri dari penguat k_o , F_1 dan F_2 . F_1 terdiri atas generator sinyal bantu dan parameter c_i , dengan $i = 1, 2, \dots, n$. F_2 terdiri atas generator sinyal bantu dan parameter d_j , dengan $j = 1, 2, \dots, n$. Generator sinyal yang ada pada F_1 dan F_2 masing-masing menghasilkan parameter sinyal $\omega^{(1)}$ dan $\omega^{(2)}$.

Sinyal kendali $u(t)$ terdiri atas sinyal masukan r dan sinyal $\omega^{(1)}$ dan $\omega^{(2)}$, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut (Mariani, 2005 : 8) :

$$u(t) = (r(t), \omega^{(1)}(t), \omega^{(2)}(t)) \quad (2.3)$$

Parameter-parameter yang terdapat dalam pengendali didefinisikan sebagai parameter pengendali yang dituliskan sebagai berikut (Mariani, 2005 : 8):

$$\theta(t) = [k_o(t), c_1(t), \dots, c_n(t), d_1(t), \dots, d_n(t)] \quad (2.4)$$

Sinyal kendali u yang dihasilkan oleh pengendali adalah:

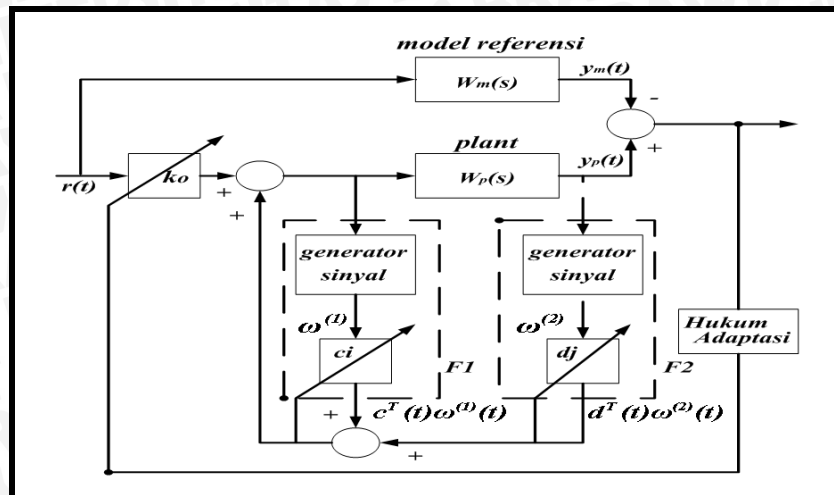
$$\begin{aligned} u(t) &= \theta^T(t) \cdot \omega(t) \\ &= k_o(t) r(t) + c^T(t) \omega^{(1)}(t) + d^T(t) \omega^{(2)}(t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Sinyal kendali u ini digunakan sebagai masukan bagi *plant*.

F_1 dan F_2 masing-masing terdiri atas generator sinyal bantu dan parameter pengendali yang dinyatakan dengan fungsi alih W_1 dan W_2 , yaitu (Butler, 1997: 64):

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{C(s)}{N(s)} \\ W_2 &= \frac{D(s)}{N(s)} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Polinomial $N(s)$ pada generator sinyal bantu adalah *zero* model referensi (Sastry and Bodson, 1993 :105). $N(s)$ adalah polinomial dengan orde m atau $n-1$, $C(s)$ dan $D(s)$ adalah polinomial dengan orde $n-2$.



Gambar 2.2 Struktur dasar pengendali adaptif

Struktur pengendali adaptif dapat digambarkan dalam bentuk sederhana seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.2

d. Hukum Adaptasi

Proses adaptasi terjadi melalui adanya perubahan nilai pada parameter pengendali. Proses ini berlangsung selama terjadi *error* antara keluaran *plant* $y_p(t)$ dan keluaran model referensi $y_m(t)$ (Mariani, 2005 : 11). Proses adaptasi dilakukan berdasarkan hukum adaptasi (Narendra and Annaswamy, 1989 : 195).

Dalam hukum adaptasi parameter pengendali diubah sedemikian hingga *error* antara $y_p(t)$ dengan $y_m(t)$ sama dengan 0 . Penyesuaian parameter pengendali menghasilkan sinyal kendali $u(t)$ sebagai masukan bagi *plant*, sehingga keluaran $y_p(t)$ akan mendekati $y_m(t)$ pada saat t menuju tak hingga. Hal tersebut dapat dituliskan sebagai berikut (Narendra and Annaswamy, 1989 : 195):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_p(t) - y_m(t)| = 0 \tag{2.7}$$

Pada MRAS, *error* antara y_p dengan y_m digunakan secara langsung untuk mengubah nilai parameter pengendali. Proses adaptasi pada MRAS ini disebut dengan adaptasi langsung. (Sastry and Bodson, 1993 : 110).



e. Persamaan *Error*

Pada pengendalian dengan MRAS, proses adaptasi akan berhenti apabila keluaran *plant* sama dengan keluaran model referensi. Dengan kata lain *error* sama dengan 0. Sedangkan persamaan *error* antara model referensi dengan *plant* adalah (Mariani, 2005 : 37) :

$$e_1(t) = y_p(t) - y_m(t) \quad (2.8)$$

Parameter pengendali θ dalam MRAS adalah (Butler, 1997 :54) :

$$\theta(t) = \theta^*(t) + \phi(t) \quad (2.9)$$

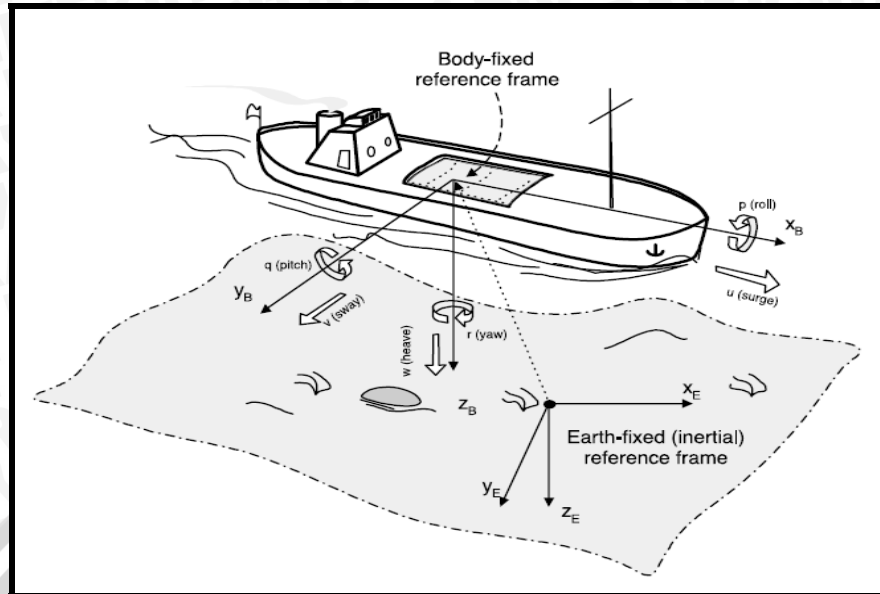
dengan θ^* adalah parameter pengendali pada saat fungsi alih *plant* dan pengendalinya sesuai dengan fungsi alih model referensi. $\phi(t)$ adalah parameter *error* (Sastry and Bodson, 1993 :105). θ adalah parameter pengendali yang akan disesuaikan menjadi θ^* . θ dapat dinyatakan sebagai :

$$\theta(t) = [k_o(t), c_n(t), d_n(t)] \quad (2.10)$$

Proses adaptasi berlangsung dengan mengubah $\theta(t)$ menjadi θ^* . Pengubahan ini dilakukan agar keluaran *plant* bergerak menuju ke keluaran yang diinginkan sesuai dengan keluaran model referensi.

2.3. Tinjauan Umum Dinamika Kapal

Untuk dapat merancang sistem kontrol pada kapal, dibutuhkan deskripsi matematis dari semua gerak kapal. Secara tradisional dinamika gerak kapal ditetapkan dari prinsip pertama hukum Newton tentang gerak yang diaplikasikan pada benda tegar yang bergerak pada fluida.



Gambar 2.3 Definisi Posisi, Gaya, dan State pada sebuah kapal, dengan *inertial coordinate system* dan *body-fixed coordinate system*.

Sumber : El-Hawary, 2000: 16

Kesulitan utama dalam menentukan deskripsi matematis dari semua gerak kapal adalah menentukan gaya hidrodinamik yang bekerja pada lambung kapal. Biasanya hal tersebut diperoleh melalui percobaan dengan model pada kolam hidrodinamik. Vibrasi internal pada lambung kapal diabaikan. Dan secara normal digunakan dua sistem koordinat, yaitu satu sistem koordinat tetap terhadap badan kapal yang bergerak (*body-fixed coordinat system*) dan sistem koordinat yang lainnya adalah sistem koordinat tetap terhadap ruang (*inertial or Earth-fixed coordinat system*) (lihat gambar 2.3 dan tabel 2.1). *Body-fixed coordinat system* memiliki poros yang terletak pada titik pusat simetri lambung kapal, dengan sumbu x diletakkan sepanjang sumbu simetri utama badan kapal. Sistem koordinat ini menghasilkan gerakan dengan 6 tingkat kebebasan (*6 degrees of freedom/ 6DOF*): tiga gerak bersifat translasi dan tiga gerak bersifat rotasi. *Body-fixed coordinat system* berguna untuk menjelaskan gerak lokal (relatif terhadap badan kapal) pada kapal laut, sedangkan *inertial coordinate system* berguna untuk menjelaskan gerak global kapal laut pada ruang.

Enam gerak dinamik pada kapal laut :

1. Goyang guling (*roll*): gerak ini terjadi jika ombak datang dari samping sehingga menyebabkan kapal berguling ke kanan dan ke kiri.

2. Goyang angguk (*pitch*): adalah gerak yang terjadi akibat serangan ombak yang menyebabkan kapal bergerak menukik dan menengadiah.
3. Goyang geleng (*yaw*): merupakan gerak kapal yang terjadi jika ombak datang agak menyerong dari haluan atau buritan sehingga mengubah arah gerak kapal.
4. Lemparan menyamping (*sway*): merupakan gerak melintang yang terjadi jika kapal bergeser dari satu sisi ke sisi yang lain akibat ombak yang berturutan.
5. Empasan (*heave*): adalah gerak vertikal kapal yang diakibatkan oleh gerak naik turun ombak taut.
6. Sentakan (*surge*): adalah gerakan memanjang jika kapal terkena ombak yang berjalan searah panjang lambung sehingga laju kapal dipercepat atau diperlambat.

Tabel 2.1. Notasi dari Gerak, Gaya, dan Momen yang berhubungan dengan masing-masing DOF (standard gerak ITTC).

1.	<i>Surge</i>	X	u	x
2.	<i>Sway</i>	Y	v	y
3.	<i>Heave</i>	Z	w	z
4.	<i>Roll</i>	K	p	φ
5.	<i>Pitch</i>	M	q	θ
6.	<i>Yaw</i>	N	r	ψ

Kapal laut bergerak jika ada gaya dan torsi eksternal yang bekerja pada lambungnya. Gaya dan torsi ini berasal dari gaya dan moment yang dihasilkan oleh aktuator atau penggerak utama (*propellers, propulsor, rudders*) atau bisa juga berasal dari resultan gaya yang berasal dari lingkungan sekitar misalnya ombak, angin, arus laut, gangguan kapal yang berpapasan, dll. Gaya dan moment yang diinginkan yang dikomando oleh *autopilot* atau jurumudi disebut gaya dan moment terkendali dan membentuk vektor kendali, sedangkan gaya lainnya, yaitu yang berasal dari lingkungan, disebut gangguan eksternal (*external disturbances*) atau singkatnya disebut gangguan (*disturbances*). Aktuator, seperti : *rudder, hydroplane, propeller, jet propulsors*, dll, menghasilkan vektor kontrol. Gaya vektor kontrol tergantung pada pendorong utama (*propeller/thruster*) dan jenis

kemudi (*rudder*). Sedangkan torsi juga tergantung pada posisi dari penghasil gaya di sepanjang lambung kapal.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan tentang gerak guling kapal laut, maka dinamika kapal dapat direpresentasikan dalam bentuk umum model matematik linier orde dua. Model tersebut merupakan fungsi alih antara sudut guling terhadap torsi masukan total. Dalam skripsi ini, model dinamika kapal dinyatakan sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{\varphi(s)}{o(s)} = \frac{K_{ns} \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (2-11)$$

(R. Bhattacharya. *Dynamics of Marine Vehicles*, 1978)

dengan :

- $\varphi(s)$ = sudut guling kapal (radian)
- $o(s)$ = torsi total, terdiri dari torsi masukan τ ; dan torsi gangguan τ_d (N.m)
- K_{ns} = penguatan model dinamika kapal. (rad/N.m.)

Nilai dari parameter-parameter model dinamika kapal di atas selanjutnya dihitung berdasarkan data-data fisik kapal. Menurut E.V. Lewis dan J.P. Comstock dalam *Principles of Naval Architecture* (1976), frekuensi sudut ω_n pada model dinamika kapal di atas, dapat dihitung dengan persamaan:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\Delta h}{J_g}} \quad (2-12)$$

dengan:

- Δ = massa kapal (kg)
- h = tinggi lintang metasentrik kapal (m)
- J_g = momen inersia kapal terhadap sumbu barisentrik (kg.m²)

sedangkan nilai redaman ξ tidak dapat ditentukan secara pasti. Redaman ini dipengaruhi oleh banyak faktor. Nilai redaman akan meningkat seiring dengan pergerakan maju kapal (EN. Lewis. *Principle of Naval Architecture*. 1967). Faktor

redaman hanya dapat diestimasi pada suatu kisaran dengan ketelitian tertentu.

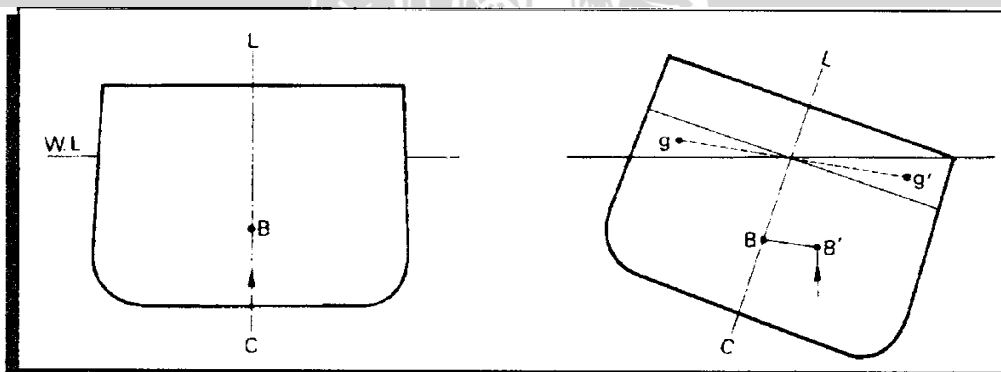
Berdasarkan literatur, pada saat kapal MONOSTAB 45 dalam kondisi diam nilai faktor redaman berada pada kisaran 0,05 s/d 0,1. Sedangkan pada saat kapal berlayar maju dengan kecepatan jelajah 35 knot, nilai faktor redaman akan meningkat pada kisaran 0,4 s/d 0,5 (Fortuna, 1996). Adanya faktor redaman ini disebabkan oleh (R. Bhattacharya. *Dynamics of Marine Vehicles*, 1978) :

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

2.4. Prinsip Kestabilan Kapal

Kestabilan kapal didefinisikan sebagai kecenderungan kapal yang sedang bergoyang ke kanan dan ke kiri untuk selalu kembali ke kedudukan normal. Unsur kestabilan ini sangat penting dan harus diperhitungkan dalam perancangan kapal karena merupakan salah satu penentu keamanan dan kenyamanan penumpang. Ada dua gaya yang bekerja berlawanan arah yang mempengaruhi kestabilan kapal, yaitu:

- gaya tekan air pada pusat keapungan kapal
- gaya berat total dari kapal yang bekerja pada pusat gravitasi

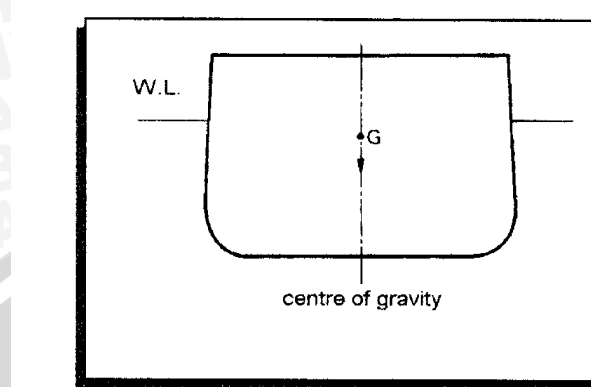


Gambar 2.4 Pusat keapungan kapal.

Sumber : Howell, 1977: 114

Pusat keapungan kapal (*centre of buoyancy*) merupakan titik kerja dari gaya tekan air ke atas pada kapal. Titik ini secara geometris terletak pada bagian kapal di bawah permukaan air, seperti tampak pada gambar 2.4 di atas.

Pusat gravitasi merupakan titik pada dimana gaya berat total kapal diasumsikan terkonsentrasi. Posisi pusat gravitasi G ditentukan oleh distribusi berat kapal ditunjukkan pada gambar 2.5

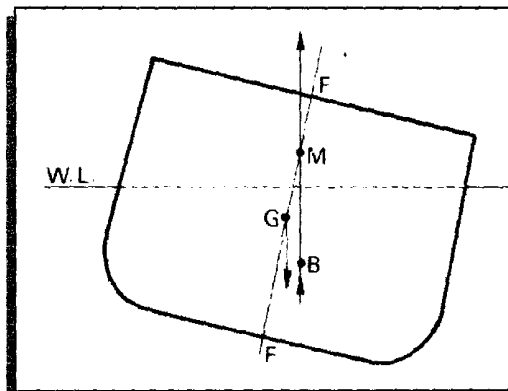


Gambar 2.5 Pusat grafitasi kapal.

Sumber : Howell, 1977: 115

Hukum Archimedes menjelaskan bahwa jika suatu benda, baik sebagian atau seluruhnya, terendam dalam zat cair maka benda tersebut akan disangga oleh suatu gaya ke atas yang besarnya sama dengan berat cairan yang didesaknya. Hukum ini dapat di terapkan pada kapal yang sedang berlayar di laut. Berdasarkan hukum ini maka pada lambung kapal yang terendam air akan bekerja gaya ke atas yang menjaga kapal tetap terapung. Keseluruhan gaya yang bekerja ini dapat diasumsikan terkonsentrasi pada satu titik. Titik ini disebut sebagai pusat keapungan, yang disimbolkan dengan B .

Untuk kapal dalam keadaan tenang, posisi titik pusat gravitasi G berada di atas titik pusat keapungan B pada satu garis vertikal tepat di tengah kapal. Kedudukan titik-titik ini akan berubah jika posisi 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.



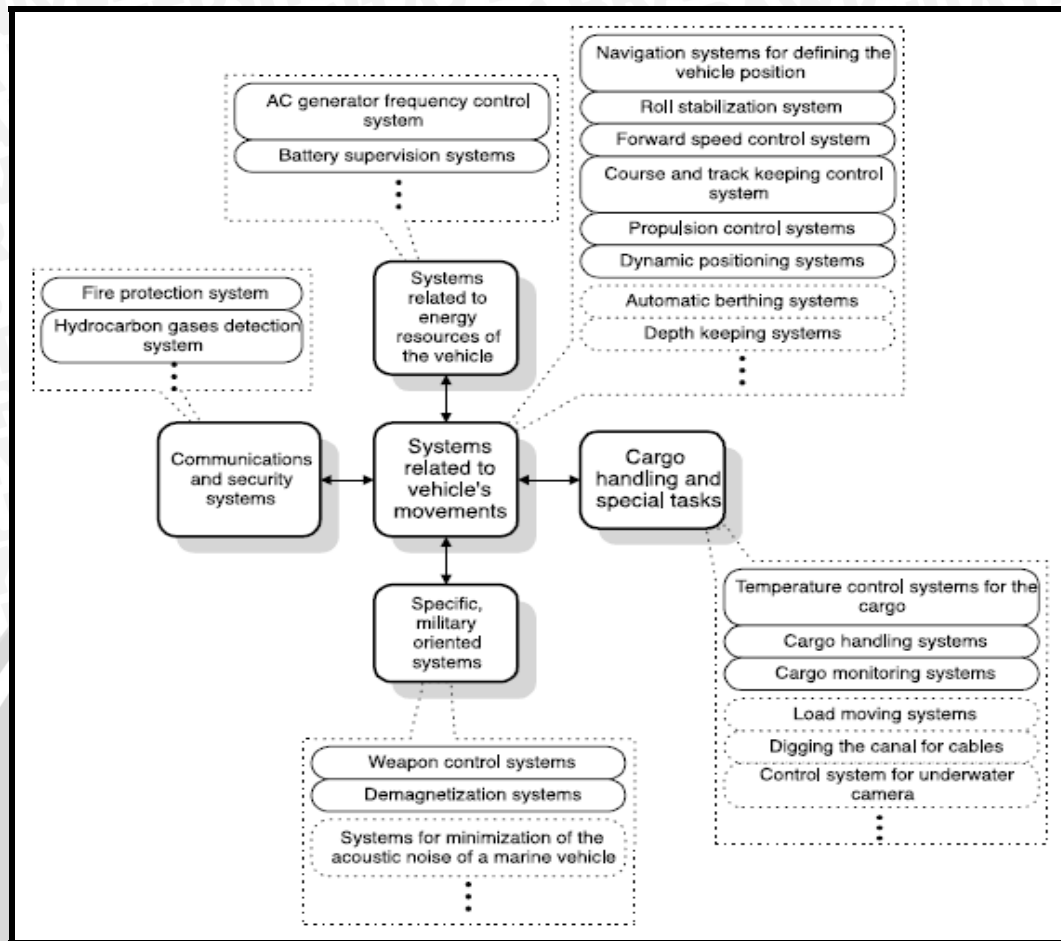
Gambar 2.6 Prinsip kestabilan kapal.

Sumber : Antony, 1982 :15

Pierre Bouger, seorang ahli matematika dan ahli ilmu struktur kapal modern berkebangsaan Perancis di pertengahan abad ke-18, menemukan sebuah cara praktis untuk menentukan kestabilan kapal. Konsep Bouger didasarkan atas suatu titik yang disebut metasenter M, yaitu titik perpotongan antara garis tengah pembelahan 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, maka kapal mudah terbalik. Jika GM kecil, yang berarti G terlalu dekat dengan M sedangkan G berada di bawah maka kapal dapat mengguling dan kembali ke kedudukan tegak secara perlahan-lahan. Sedangkan jika G terlalu jauh di bawah M, maka kapal akan menjadi "kaku", artinya kapal akan kembali tegak dengan sentakan yang dapat merusak muatan dan melukai awak serta penumpang kapal. GM yang aman bagi kapal dengan muatan penuh adalah kira-kira sebesar lima persen dari lebar kapal di tempat yang paling lebar.

2.5. Klasifikasi Sistem Kontrol Pada Kapal Laut

Sistem kontrol pada kapal laut berhubungan dengan jenis dari kapalnya. Setiap jenis kapal akan memiliki perbedaan pada sistem kontrol yang digunakannya. Kapal pengangkut bahan mentah, tangker, kapal pengangkut gas, kapal pengebor atau jenis yang lainnya memiliki sistem kontrol yang secara umum sama dan juga memiliki sistem kontrol yang berbeda karena masing-masing memiliki perlengkapan yang khusus.



Gambar 2.7 Berbagai sistem pengendali pada kapal.

Sumber : El-Hawary, 2000 :17

Gambar 2.7 memperlihatkan beberapa subsistem pada sistem kontrol kapal laut yang dikelompokkan dalam 5 kelompok utama, yaitu:

1. Sistem yang berhubungan dengan pergerakan kapal.

Tujuan utama sistem ini adalah sebagai bantuan untuk memandu kapal laut yang bergerak dari satu tempat ke tempat lain dengan peningkatan pada keakuratan, penurunan konsumsi bahan bakar atau spesifikasi performansi lainnya yang diinginkan. Sistem-sistem yang masuk dalam kelompok ini antara lain : sistem kontrol yang mampu secara seksama mengikuti jalan atau jalur tertentu, sistem kontrol lup tertutup dengan sebuah autopilot sebagai pengendali, sistem navigasi posisi kapal, sistem kontrol untuk menjaga kecepatan kapal sesuai keinginan, sistem stabilisasi gerak *roll* yang bertujuan meminimalisasi goyang guling (*roll motion*) pada kapal dan membuat perjalanan lebih nyaman atau tugas-tugas tertentu bisa

dilaksanakan, sistem penggerak (mesin diesel, turbin gas, motor DC atau AC, atau jenis lainnya) yang bertugas menghasilkan gaya atau mement yang dibutuhkan untuk menggerakkan kapal.

2. Sistem yang berhubungan dengan penanganan kargo dan tugas-tugas khusus.

Tujuan utama sistem ini adalah membantu dalam penanganan kargo atau muatan-muatan tertentu, sehingga kargo tersebut dapat dipindahkan dari kapal ke pelabuhan dan sebaliknya (termasuk juga perpindahan muatan dalam kapal itu sendiri misalnya perpindahan amunisi) secepat mungkin atau dengan keakuratan tinggi untuk tugas-tugas tertentu. Kargo tidak boleh membahayakan keselamatan kapal sehingga sistem ini harus memperhatikan keseimbangan dan beban kargo serta menjaga kondisi lingkungan sesuai kebutuhan kargo. Sistem kontrol yang masuk dalam kelompok ini antara lain: sistem penanganan kargo yang diangkut kapal, sistem kontrol temperature untuk kargo, sistem pengawasan kargo, sistem kontrol untuk tugas khusus misalnya pemindahan beban, penggalian kanal untuk kabel bawah laut, penggerakan kamera bawah laut, dll.

3. Sistem yang berhubungan dengan sumber energi kapal.

Setiap kapal laut harus memiliki cukup energi agar dapat mencapai tujuannya. Mayoritas kapal memiliki sumber energi sendiri dan hanya sebagian kecil yang membutuhkan energi dari tempat lain, misalnya kendaraan bawah laut yang dikendalikan secara *remote*. Sehingga, untuk mayoritas kapal laut, sumber energi harus bersifat otonom dan tidak dapat dihubungkan dengan sumber lain bila terjadi gangguan, seperti yang bisa dilakukan pada sistem tenaga di darat. Oleh karena itu sistem pembangkit tenaga harus secara tepat terukur dan terkendali.

4. Sistem yang berhubungan dengan komunikasi dan keselamatan.

Sistem kendali yang masuk dalam kelompok ini adalah sistem komunikasi kapal dengan dunia luar, sistem alarm dan keselamatan kapal, sistem monitor gaya yang bekerja pada lambung dan haluan kapal yang digunakan untuk membantu pengambilan keputusan saat kapal berlayar dalam cuaca yang buruk.

5. Sistem yang spesifik berorientasi militer.

Sistem-sistem yang masuk dalam kelompok ini adalah sistem pengendalian persenjataan, sistem demagnetisasi kapal perang dan sistem peredam desah akustik (*acoustic noise*). Sistem-sistem tersebut khusus digunakan pada kapal perang angkatan laut.

2.6. Sistem Stabilisasi Gerak Guling (*Roll Stabilization System*)

Stabilisasi gerak guling digunakan pada kapal penumpang bertujuan untuk meningkatkan kenyamanan, sedangkan pada kapal barang digunakan untuk mencegah kerusakan kargo dan untuk meningkatkan efisiensi awak kapal. Gerak guling yang besar dapat menyebabkan penumpang mengalami mabuk laut, kelelahan, dan kecenderungan berbuat kesalahan. Pada kapal perang, beberapa operasi, misalnya operasi pendaratan helikopter dan operasi penyelamatan, serta efektivitas awak kapal dalam perang akan mengalami hambatan yang disebabkan oleh gerak guling yang besar. Oleh karena itu peredaman gerak guling dan pengembangan sistem stabilisasi gerak guling sangat penting dilakukan (El-Hawary, 2000).

Sistem peredaman gerak guling dapat dibagi dalam dua kelompok utama: sistem yang menggunakan stabilisator aktif dan sistem yang menggunakan stabilisator pasif. Sistem aktif diterapkan pada sistem stabilisasi gerak guling dengan menggunakan aktuator seperti kemudi, sayap stabilisator, dll. Tujuan utama sistem ini adalah mengurangi gerak guling pada kapal tanpa mengorbankan kualitas dalam menjaga fungsi kapal dan jalur kapal.

Di lain pihak, sistem pasif diterapkan tanpa aktuator sistem kontrol. Sistem ini menggunakan sirip tetap sepanjang lambung kapal sehingga meningkatkan hambatan pada lambung kapal dan tidak efektif pada kecepatan rendah. Sistem ini juga merubah dinamika kapal.

Tiga sistem stabilisasi aktif yang secara umum telah digunakan untuk mengurangi gerak guling pada kapal:

- Tank anti-guling (*Anti-rolling tanks*)
- Stabilisator sirip (*fin stabilizers*)
- Stabilisasi gerak guling dengan kemudi (*rudder roll stabilization*)

Beberapa jenis tank anti-guling telah digunakan pada kapal. Tank yang paling umum digunakan adalah jenis *free surface tanks*, *U-tube tanks*, dan *diversified tanks*. Kelebihan sistem ini adalah kemampuannya melakukan peredaman walaupun dalam kecepatan rendah. Sedangkan kekurangannya adalah adanya pengurangan ketinggian metacenter dan kebutuhan ruang yang besar untuk sistem ini. Sistem ini pertama kali digunakan sekitar tahun 1874.

Sistem dengan stabilisator sirip (*Fin stabilizers*) dapat menghasilkan redaman gerak guling jika kecepatan kapal tidak terlalu rendah. Sistem ini meningkatkan redaman lambung kapal (kecuali pada sistem dengan sirip yang bisa ditarik masuk) dan instalasi sistem ini cukup mahal karena paling tidak menggunakan dua sistem hidraulik. Penggunaan sirip tidak efektif pada kecepatan rendah dan menyebabkan efek mengerem serta *noise* bawah air. Paten sistem ini diberikan pada John I. Thornycroft pada tahun 1889.

Rudder roll stabilization systems (RRS) menggunakan kemudi yang relatif cepat untuk meredam gerak roll. Sistem ini relatif tidak mahal bila dibandingkan dengan sistem yang menggunakan sirip aktif, cukup memuaskan dalam meredam gerak guling (50-70%) dan tidak menyebabkan efek *drag*. Kelemahan sistem ini adalah peredaman tidak akan bekerja efektif bila kecepatan kapal rendah. Referensi awal yang membahas sistem ini dilaporkan pada awal 1970-an.

Selain tiga sistem utama diatas terdapat sistem lain yang berusaha diterapkan dalam meredam gerak guling pada kapal, salah satunya adalah penggunaan sayap stabilisator pada kapal MONOSTAB 45.

2.7. Kapal Monostab 45

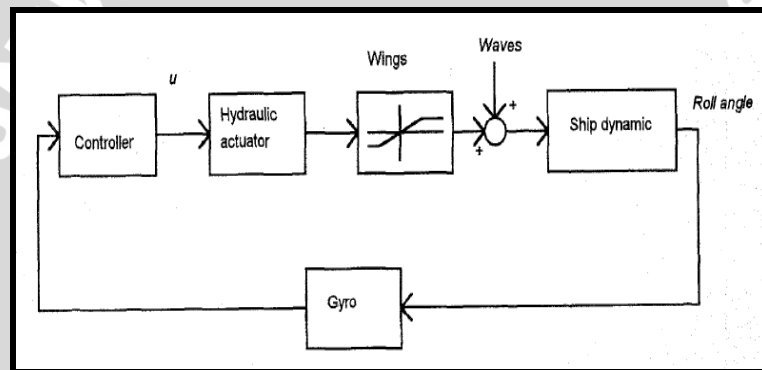
Kapal MONOSTAB 45 merupakan kapal jenis baru dengan panjang 47 meter, dengan berat yang dipindahkan pada saat beban penuh 160 ton, dan mampu mengangkut 512 penumpang. Kapal ini dirancang oleh Rodriquez Cantieri Navali S.p.A, Messina, Italia, serta banyak di aplikasikan untuk keperluan pelayaran jarak menengah, khususnya penyeberangan antar pulau.

Kapal MONOSTAB 45 digerakkan oleh sepasang *waterjet*, sehingga kapal mampu berlayar dengan kecepatan jelajah 35 knot, yang merupakan kecepatan yang mengagumkan untuk kapal dengan dimensi ini.



Gambar 2.8 Kapal MONOSTAB 45.

Sumber : Fortuna, 1996 :19



Gambar 2.9 Diagram blok sistem stabilisasi gerak guling kapal MONOSTAB 45

Sumber : Fortuna, 1996 :20

Bentuk lambung kapal MONOSTAB 45 telah dirancang sedemikian rupa sehingga didapatkan kecepatan jelajah yang cukup baik. Lebih lanjut, lambung tersebut secara efisien dikopel dengan dua buah sayap yang terletak pada bagian buritan (lihat gambar 2.10) yang berfungsi sebagai aktuator dalam sistem stabilisasi gerak guling. Secara khusus, sistem stabilisasi ini tersusun atas dua buah lengan, satu di setiap sisi lambung dan panjangnya 2,5 m, memanjang dari sisi samping buritan sampai bagian sayap, terhubung kaku dengan lengan, dalam bentuk khusus yang terbuat dari *carbon/glass fiber* agar mudah dipelihara dan ringan. Kedua sayap ini secara variable dibenamkan ke dalam air oleh sistem hidraulik-elektrik yang terhubung dengan lengan. Sistem ini menghasilkan moment yang melawan gerak guling pada kapal sehingga gerak guling tersebut

dapat diminimalkan dan diperoleh kenyamanan yang lebih besar bagi penumpang. (Fortuna. 1996: 17).

2.8. Sayap Stabilisator

Pada kapal MONOSTAB 45 digunakan dua buah sayap yang dikendalikan oleh sistem kontrol. Perancang sistem ini berpendapat bahwa sistem ini akan menghasilkan performansi yang lebih baik, walaupun dalam kecepatan lebih rendah, bila dibandingkan dengan penggunaan sirip aktif. Selain itu, bentuk dari permukaan sayap akan menghasilkan redaman alami pada kapal walaupun dalam kondisi sayap ini tidak dikendalikan secara aktif. Gambar 2.10 memperlihatkan kapal MONOSTAB 45 yang menggunakan sayap aktif.



Gambar 2.10 Kapal MONOSTAB 45 dilengkapi sayap aktif

Sumber : Fortuna, 1996 :19

Pada saat sebuah sayap dimasukan ke dalam laut sayap ini menghasilkan gaya hidrodinamik yang besarnya sesuai dengan persamaan:

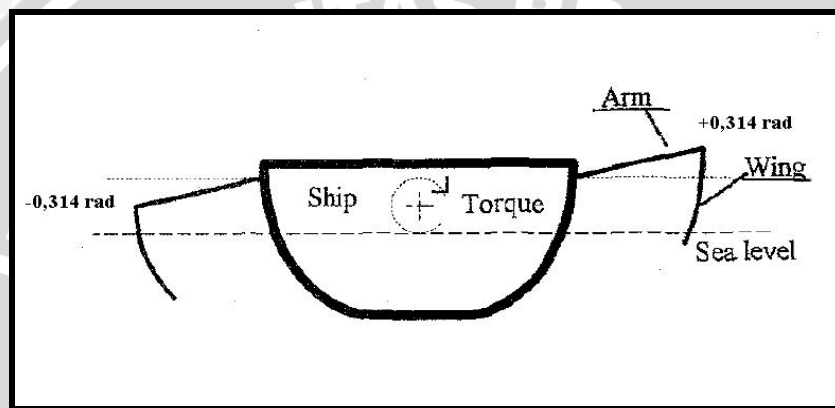
$$F_{hd} = \frac{1}{2} k A_p V_n^2 \quad (2-13)$$

di mana A_p adalah area permukaan sayap yang masuk ke dalam air, V_n adalah kecepatan kapal, dan k adalah sebuah parameter yang tergantung pada kerapatan air laut. Bentuk sayap ini dirancang sedemikian sehingga gaya bekerja secara langsung ke arah pangkal lengan sayap pada bagian belakang buritan kapal.

Berdasarkan hal itu sistem dirancang dengan membuat dua sayap identik yang terhubung kaku dengan dua lengan yang bergerak simetris (lihat gambar 2.11) dengan hipotesis bahwa kapal bergerak dengan kecepatan konstan, sehingga hubungan antara sudut sayap Φ dan torsi C_p dapat didekati dengan persamaan:

$$C_p = K_p \Phi \quad (2-14)$$

Jangkauan variasi untuk sudut masukan sayap adalah antara -0,314 rad sampai dengan 0,314 rad atau -18 derajat sampai dengan 18 derajat.



Gambar 2.11 Potongan melintang buritan kapal dengan sayap aktif

Sumber : Fortuna, 1996 :20

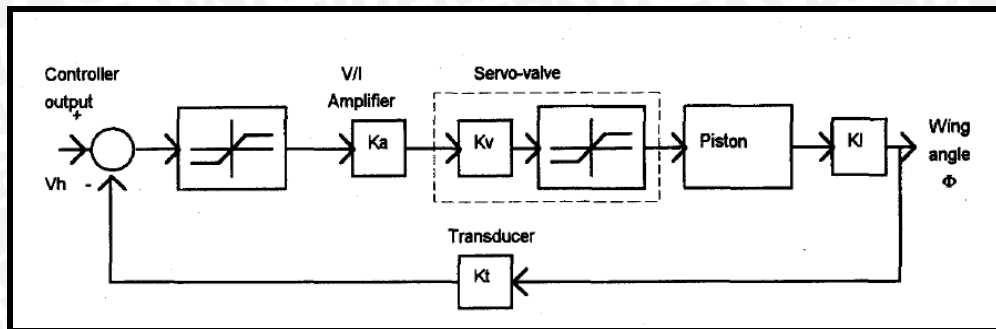
2.9. Sistem Hidrolik-Elektrik

Dua lengan dengan dua sayap digerakkan oleh alat yang berupa dua sistem hidroulik-elektrik yang identik yang menghasilkan variabel torsi. Masing-masing sistem memiliki sebuah katup elektrik yang mengatur aliran minyak bertekanan tinggi menuju masing-masing silinder. Perbedaan tekanan pada piston yang terletak dalam silinder menyebabkan gerakan pada lengan yang terhubung dengan sayap.

Pada gambar 2.12 diberikan diagram blok dari sistem hidrolik-elektrik. Dari skema tersebut dan dari data fisik sistem, dihasilkan fungsi transfer orde pertama antara tegangan masukan terhadap sistem V_h dan sudut sayap Φ ,

$$\Phi(s)/V_h(s) = \frac{0,33}{s + 1,57} \quad (2-15)$$

yang merupakan pendekatan linier untuk sistem hidrolik-elektrik. (fortuna, 1996)

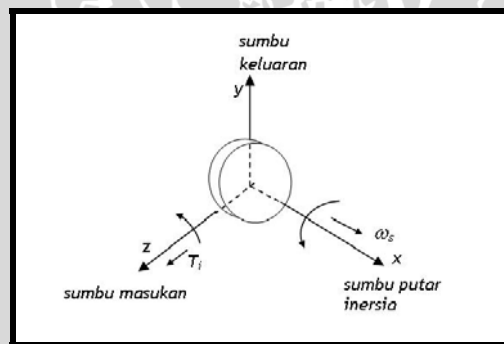


Gambar 2.12 Diagram blok aktuator hidrolik

Sumber : Fortuna, 1996 :21

2.10. Giroskop (Gyroscope)

Rotor giroskop digerakkan dengan motor elektrik dengan kecepatan ribuan rpm. Kerangkanya, 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.



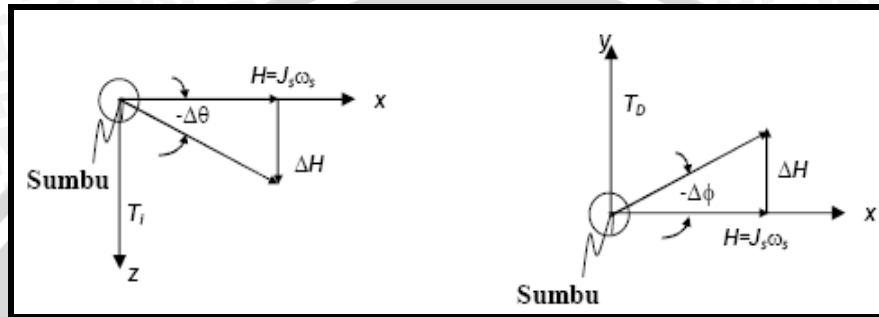
Gambar 2.13 Sumbu putar giroskop

Sumber : Nagrath, 1986: 123

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

$$T_D = H \ddot{\phi} + J \dot{\theta} + f \theta + K\theta \quad (2-16)$$

- dengan θ : sudut putaran roda giroskop berpusat di sumbu y
 ϕ : 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 2.14 Diagram Vektor Torsi-momentum

Sumber : Nagrath, 1986: 124

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 $\tau = J/f \approx 0$

$$\theta = -\frac{H}{f}\phi \quad (2-17)$$

Sebuah *gyroscope* digunakan sebagai transduser sudut guling. Alat ini menghasilkan tegangan referensi yang proporsional terhadap sudut guling, sesuai dengan persamaan

$$V_{roll} \approx K_{gyro}\phi_{roll} \quad (2-18)$$

Dengan V_{roll} adalah sinyal keluaran yang sebanding dengan sudut guling kapal, Φ_{roll} (Fortuna, 1996:20)

2.11. Gelombang Permukaan Laut

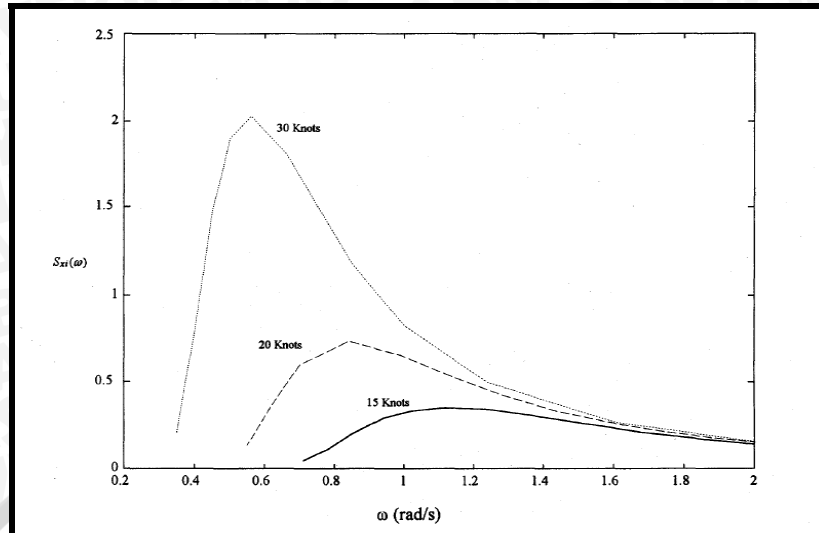
Gelombang merupakan salah satu *noise* utama yang berada pada lapisan permukaan laut. Angin yang berhembus melalui permukaan laut menghasilkan gelombang. Pada daerah perbatasan antara laut dan udara, terjadi interaksi yang berubah-ubah menurut waktu, di mana laut menerima energi dari angin melalui tepi lapisan *turbulent* (El-Hawary. 2000). Semakin cepat angin berhembus, semakin lama waktu hembusannya, dan semakin luas area dimana angin tersebut berhembus maka akan semakin besar pula gelombang yang dihasilkan.

Terdapat berbagai macam model sinyal gelombang, salah satunya, yang paling sederhana, adalah sinyal gelombang yang dimodelkan oleh Pierson dan Moskowitz (1964). Mereka mengasumsikan jika angin berhembus mantap dalam waktu yang lama di atas area yang luas, maka gelombang akan menjadi setimbang dengan angin. Waktu yang lama di sini sekitar 10.000 periode gelombang dan area yang luas adalah sekitar 5.000 panjang gelombang pada sisi-sisinya.

Untuk mendapatkan spektrum gelombang dilakukan pengukuran dengan *accelerometer* pada kapal pemantau cuaca Inggris di laut atlantik utara. Pertama, mereka memilih data gelombang pada saat angin berhembus mantap dalam waktu yang lama di atas area yang luas. Kemudian mereka melakukan perhitungan spektrum gelombang untuk beragam kecepatan angin, dan mereka menemukan persamaan :

$$S_{xi}(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} e^{-\beta(\omega_0/\omega)^4} \quad (2-19)$$

yang cukup mendekati spektrum yang diamati, di mana $\omega = 2\pi f$, f adalah frekuensi gelombang dalam Hertz, g adalah konstanta gravitasi, $\alpha = 8,1 \times 10^{-3}$, $\beta = 0,74$, $\omega_0 = g/U_{19,5}$ dan $U_{19,5}$ adalah kecepatan angin pada ketinggian 19,5 m di atas permukaan laut. (Stewart. 2006: 284). Pada gambar 2.15 ditunjukkan magnitudo dari spektrum untuk tiga kondisi angin yang berbeda.



Gambar 2.15 Spektrum gelombang untuk empat kecepatan angin yang berbeda.

Sumber : Fortuna, 1996: 21



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Rancangan Penelitian

Untuk memudahkan dalam penyusunan tugas akhir ini sehingga tercapai tujuan penulisan tugas akhir ini, maka penyusun membagi tahap pengerjaan menjadi:

1. Pengumpulan data

Pengumpulan data dilakukan melalui kajian literatur yang meliputi data-data sekunder yang didapat dari penelitian sebelumnya (Fortuna, Luigi & Giovanni Muscato. 1996. *A Roll Stabilization System of Monohull Ship: Modelling, Identification, and Adaptive Control*: IEEE transaction on Control System Technology, vol. 4, no. 1 Januari 1996). Data-data tersebut meliputi sistem yang akan diteliti, parameter-parameter dan komponen-komponen yang menyusun sistem tersebut.

2. Pemodelan matematika sistem

Pemodelan yang dilakukan meliputi:

- a. Penentuan fungsi alih dari plant.
- b. Penentuan model referensi.
- c. Penentuan persamaan *error*.
- d. Penentuan hukum adaptasi.
- e. Penentuan dan tuning parameter pengendali.

3. Simulasi model matematis

Simulasi model matematis dilakukan dengan menggunakan fasilitas yang ada pada *software* MATLAB 7.0.4 *service pack 2, Release 14*.

4. Analisa respon sistem dinamik

Analisa respon sistem dilakukan dengan mengamati respon sistem pengendalian menggunakan metode *Model References Adaptive Systems* (MRAS).

3.2. Cara Kerja Penelitian

Dalam menjawab masalah-masalah dalam suatu penelitian dan pembuktian tentang ditolak dan diterimanya hipotesis yang diajukan, diperlukan cara-cara ilmiah berupa ketentuan-ketentuan yang sudah baku dan dapat dipertanggungjawabkan kebenarannya. Berdasarkan hal tersebut, cara kerja penelitian ini dilakukan dengan tahap-tahap sebagai berikut:

1. Studi literatur, yaitu membaca, mempelajari dan memahami literatur tentang sistem pengendalian adaptif metode *Model References Adaptive Systems* (MRAS) dan *plant* yakni; kapal MONOSTAB 45 serta literatur lain yang erat kaitannya dan menunjang perancangan sistem tersebut.
2. Merancang sistem stabilisasi gerak guling kapal MONOSTAB 45 dengan pengendali adaptif metode *Model References Adaptive Systems* (MRAS).
3. Membuat simulasi program dan analisa hasil simulasinya.

3.3. Analisa Data

Proses analisa dilakukan melalui tiga tahap, yaitu:

1. Penurunan model matematis
Analisa data dilakukan dengan perhitungan menggunakan metode yang akan dibahas pada BAB IV.
2. Analisa pemodelan
Analisis pemodelan dimaksudkan untuk menjelaskan metode-metode yang digunakan dalam perancangan sistem stabilisasi gerak guling.
3. Visualisasi
Analisis data yang dilakukan bertujuan agar dapat mengetahui perilaku dari sistem, yang diperoleh dalam bentuk respon terhadap masukan dengan melihat tampilan grafik setelah melakukan simulasi pemodelan matematik pada *software* MATLAB 7.0.4 *service pack 2, Release 14*

3.4. Kesimpulan dan Saran

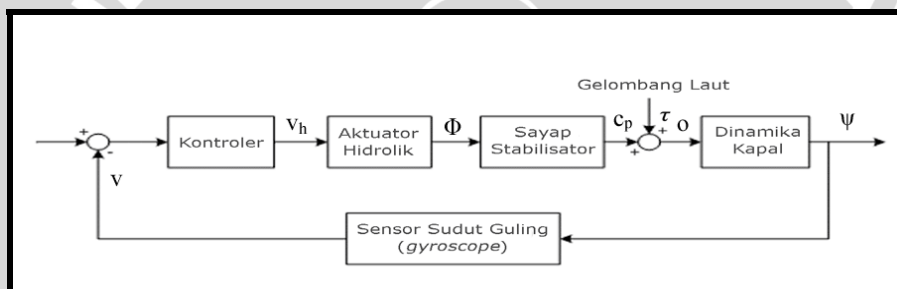
Penarikan kesimpulan berdasarkan hasil pengujian dan simulasi *software* MATLAB 7.0.4 *service pack 2, Release 14* serta saran-saran mengenai proses stabilisasi gerak guling pada kapal MONOSTAB 45 untuk mencapai performansi sistem yang lebih baik di masa mendatang.

BAB IV

PEMODELAN SISTEM STABILISASI GERAK GULING KAPAL MONOSTAB 45 DAN DESAIN MRAS

4.1. Model Matematis Sistem

Sistem stabilisasi gerak guling pada kapal MONOSTAB 45 meliputi beberapa komponen sistem yang bekerja di dalamnya, yaitu: kontroler, aktuator hidrolis, sayap stabilisator, dinamika kapal dan sensor sudut guling (giroskop). Masukan dalam sistem ini adalah sudut guling kapal yang diinginkan yaitu 0 derajat dan gangguan yang berupa gelombang laut dengan spektrum tertentu, sedangkan keluarannya adalah sudut guling kapal yang sebenarnya. Diagram blok sistem secara umum dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Diagram Blok Sistem Stabilisasi Gerak Guling Kapal MONOSTAB 45

Kontroler berfungsi menghasilkan sinyal kendali yang menjadi masukan aktuator hidrolis untuk menggerakkan sayap stabilisator sehingga sayap ini menghasilkan torsi yang bersesuaian untuk mempertahankan nilai sudut guling aktual kapal mendekati nol, dengan gangguan yang diterima berupa gelombang laut.

Data parameter utama pada sistem ini adalah sebagai berikut:

1. berat kapal $\Delta = 151392$ kg.
2. momen inersia kapal $J_g = 1,189 \cdot 10^5$ kgm².
3. tinggi lintang metasentrik $h = 1,241$ m.
4. penguatan dinamika kapal $K_{ns} = 9,5 \cdot 10^{-7}$ rad/Nm.
5. penguatan sayap stabilisator $K_p = 2,3356 \cdot 10^5$ Nm/rad.
6. penguatan giroskop $K_{gyro} = 11,46$ V/rad.

(Fortuna,1996: 27)

a. Model Matematis Dinamika Kapal

Model matematis dinamika kapal diperoleh dengan memasukkan nilai parameter dari referensi ke dalam persamaan 2-11:

$$G(s) = \frac{\psi(s)}{o(s)} = \frac{K_{ns}\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

dan persamaan 2-12:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\Delta h}{j_g}}$$

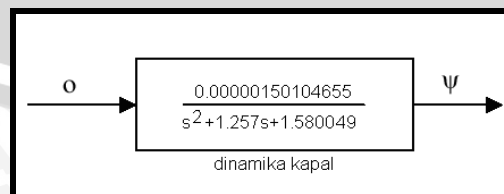
Dengan memasukkan nilai parameter utama ke dalam persamaan 2-12, diperoleh :

$$\begin{aligned}\omega_n &= \sqrt{\frac{151392 \cdot 1,241}{1,189 \cdot 10^5}} \text{ rad/s} \\ &= 1,257032269 \text{ rad/s} \\ &= 1,257 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

Model dinamika kapal dihitung dengan mensubstitusikan nilai faktor redaman pada kondisi operasional normal pada kecepatan jelajah 35 knot. Sehingga diasumsikan ξ sebesar 0,5. berdasarkan data parameter utama sistem $K_{ns} = 9,5 \cdot 10^{-7}$ rad/Nm dan dan hasil perhitungan $\omega_n = 1,257$ rad/s. selanjutnya model dinamika kapal dapat dituliskan sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{1,50104655 \cdot 10^{-6}}{s^2 + 1,257s + 1.580049} \quad (4-1)$$

dan model tersebut digambarkan dalam diagram blok sebagai berikut :



Gambar 4.2 Diagram blok dinamika kapal

Keterangan : o = torsi yang bekerja pada kapal (Nm)

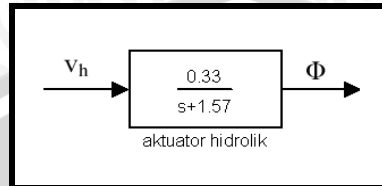
ψ = sudut guling kapal (rad)

b. Model Matematis Aktuator Hidrolik

Model matematis aktuator hidrolik diperoleh dari persamaan 3-26:

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

Model ini digambarkan dalam diagram blok sebagai berikut :

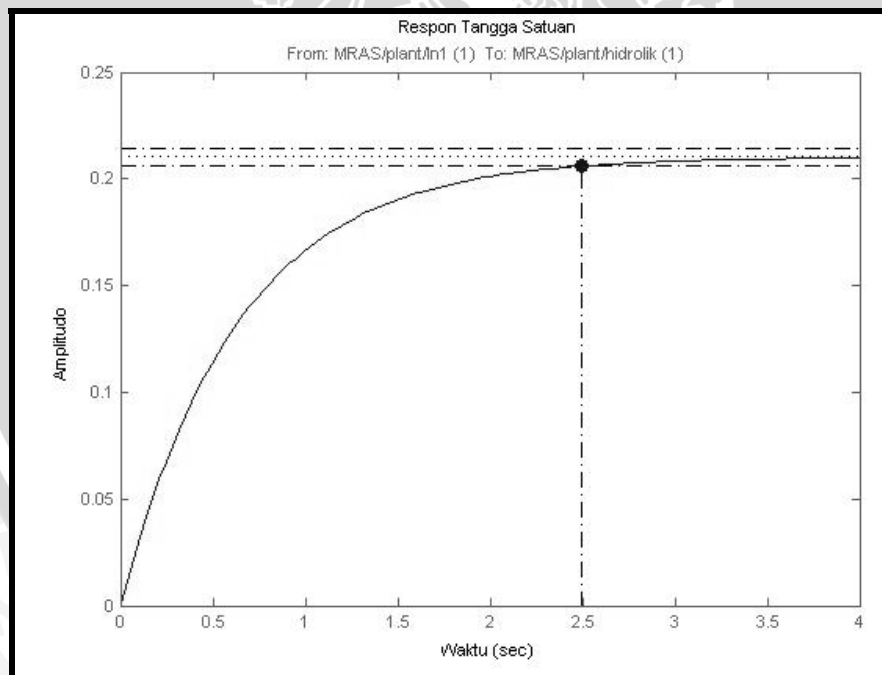


Gambar 4.3 Diagram blok aktuator hidrolik

Keterangan : V_h = sinyal kendali (volt)

Φ = sudut sayap (rad)

Dari pemodelan di atas diperoleh respon transien aktuator hidrolik dengan masukan tangga satuan sebagai berikut :



Gambar 4.4 Respon tangga satuan aktuator hidrolik

c. Model Matematis Sayap Stabilisator

Model matematis sayap stabilisator diperoleh dari persamaan 3-25:

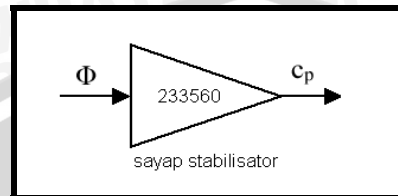
$$C_p = K_p \Phi$$

dengan $K_p = 2,3356 \cdot 10^5$ Nm/rad

Φ = sudut sayap (rad)

C_p = torsi yang dibangkitkan oleh sayap stabilisator (Nm)

Sehingga diperoleh model matematis sayap stabilisator yang digambarkan dalam diagram blok sebagai berikut:



Gambar 4.5 Diagram blok sayap stabilisator

d. Model Matematis Gangguan (*Disturbance*)

Model matematis gangguan yang berupa gelombang permukaan laut diperoleh dari persamaan 3-28:

$$S_{xi}(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} e^{-\beta(\omega_0/\omega)^4}$$

Dengan ω = kecepatan gelombang (rad/s)

g = konstanta gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$)

$$\alpha = 8,1 \times 10^{-3}$$

$$\beta = 0,74$$

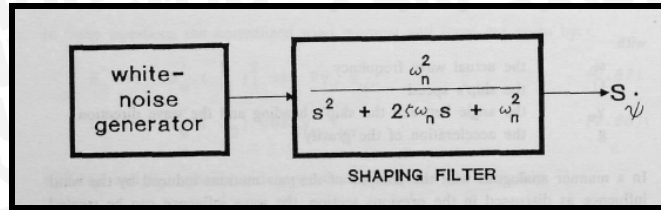
$$\omega_0 = g/U_{19,5}$$

$U_{19,5}$ = kecepatan angin pada ketinggian 19,5 m di atas permukaan laut. (Stewart. 2006: 284)

Sehingga diperoleh :

$$S_{xi}(\omega) = \frac{0,777924}{\omega^5} e^{-6825,524384/(U_{19,5} \cdot \omega)^4} \quad (4-2)$$

Selanjutnya gelombang dengan spektrum ini dimodelkan sebagai sinyal white-noise yang melalui sebuah filter seperti Gambar 4.6 :



Gambar 4.6 Diagram blok generator ombak

Sumber : Passenier, 1989 : 30

e. Model Matematis Giroskop

Model matematis giroskop diperoleh dari persamaan 3-27:

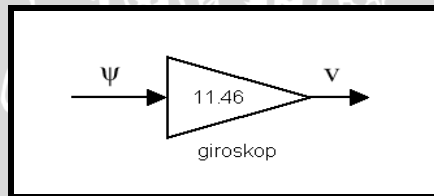
$$V_{roll} \approx K_{gyro} \Psi_{roll}$$

dengan $K_{gyro} = 11,46$ V/rad.

$\Psi_{roll} =$ sudut guling kapal (rad)

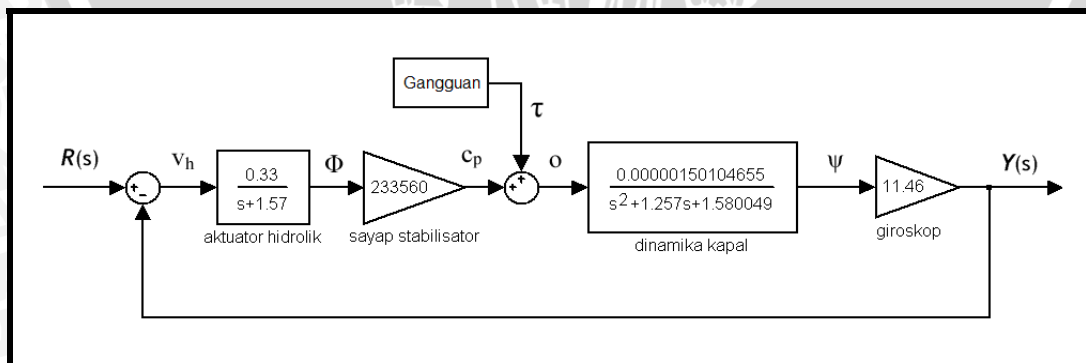
$V_{roll} =$ konversi sudut guling kapal (Volt)

Sehingga diperoleh model matematis giroskop yang digambarkan dalam diagram blok sebagai berikut:



Gambar 4.7 Diagram blok giroskop

Dari pemodelan setiap subsistem di atas dapat diperoleh diagram blok sistem stabilisasi gerak guling pada kapal MONOSTAB 45 tanpa kontroler seperti pada gambar 4.8 berikut ini:



Gambar 4.8 Diagram blok sistem stabilisasi gerak guling pada kapal MONOSTAB 45 tanpa kontroler

4.2. Sistem tanpa pengendali dan tanpa gangguan

Fungsi alih sistem untai tertutup tanpa pengendali dan tanpa gangguan pada sistem stabilisasi gerak guling kapal MONOSTAB 45 dapat diturunkan dari Gambar 4.6 sebagai berikut:

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1,325840205762}{s^3 + 2,827s^2 + 3,553539s + 3,806517135762} \quad (4-3)$$

Penurunan persamaan untuk kesalahan $E(s)$

$$E(s) = R(s) - Y(s)$$

$$E(s) = R(s) - E(s) \cdot G(s)$$

$$E(s)[1 + G(s)] = R(s)$$

$$E(s) = \frac{1}{1 + G(s)} \cdot R(s)$$

Dari persamaan ini dapat dihitung kesalahan keadaan tunak untuk masukan tangga satuan dengan teorema nilai akhir.

Analisis matematis untuk mengetahui kesalahan keadaan tunak:

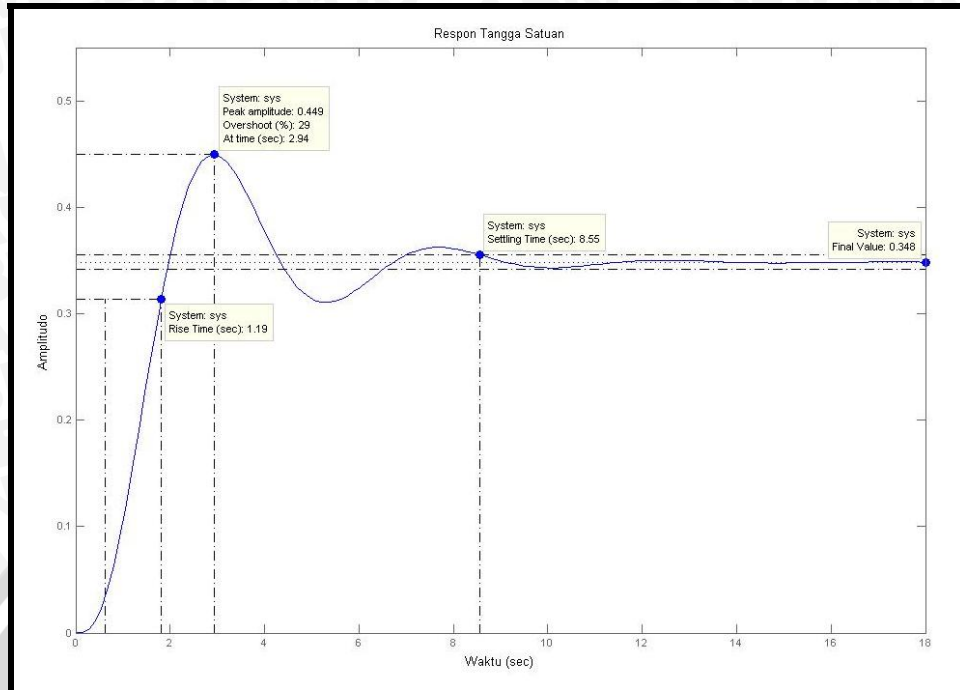
$$e_{ss}(t \rightarrow \infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s)$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{1 + G(s)} \cdot \frac{1}{s}$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s^3 + 2,827s^2 + 3,553539s + 2,48067693}{s^3 + 2,827s^2 + 3,553539s + 3,806517135762}$$

$$e_{ss} = \frac{2,48067693}{3,806517135762} = 0,651692 = 65,1692\%$$

Respon transien sistem untai tertutup dapat diketahui dengan memberikan masukan sinyal uji tertentu. Sinyal uji yang lazim dipakai adalah sinyal masukan tangga satuan (*unit step*). Sinyal uji ini mudah dibangkitkan, cukup radikal, dan memberikan respon yang mudah diamati dan dianalisis untuk mendapatkan karakteristik waktu naik t_r , lewatan maksimum M_p , waktu penetapan t_s dan keadaan tunak sistem.



Gambar 4.9 Respon tangga satuan pada sistem tanpa kontroler dan tanpa gangguan

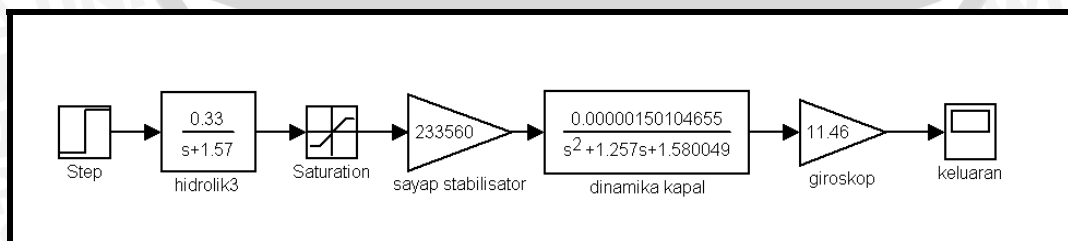
Dari Gambar 4.9 di atas diperoleh karakteristik respon transien untuk sistem tanpa kontroler dan tanpa gangguan seperti pada tabel 5.1

Tabel 5.1 Karakteristik respon transien untuk sistem tanpa kontroler dan gangguan dengan masukan tangga satuan

Waktu naik t_r (detik)	Lewatan maksimum M_p (%)	Waktu penetapan t_s (detik)	Keadaan tunak
1,19	29	8,55	0,348

4.3. Proses

Proses pada sistem stabilisasi gerak guling kapal MONOSTAB 45 terdiri dari aktuator hidrolik, sayap stabilisator, dinamika kapal dan giroskop. Pemodelan proses pada simulink dengan diberi masukan tangga satuan dapat dilihat pada gambar 4.10.

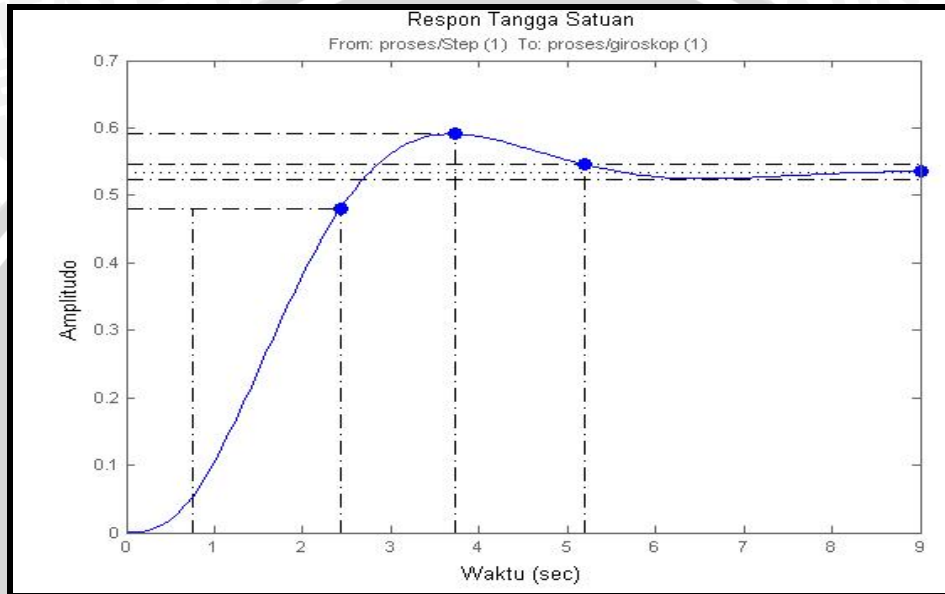


Gambar 4.10 Pemodelan proses pada sistem stabilisasi gerak guling kapal MONOSTAB 45

Fungsi alih proses di atas adalah :

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1,325840205762}{s^3 + 2,827s^2 + 3,553539s + 2,48067693} \quad (4-4)$$

Dari pemodelan di atas diperoleh respon transien pada proses dengan masukan tangga satuan seperti pada 4.11.



Gambar 4.11 Respon tangga satuan proses lup terbuka pada sistem stabilisasi gerak guling kapal MONOSTAB 45

Dari Gambar 4.11 di atas diperoleh karakteristik respon transien untuk proses pada sistem stabilisasi gerak guling kapal MONOSTAB 45 seperti pada tabel 5.2

Tabel 5.2 Karakteristik respon transien proses lup terbuka pada sistem stabilisasi gerak guling kapal MONOSTAB 45

Waktu naik t_r (detik)	Lewatan maksimum M_p (%)	Waktu penetapan t_s (detik)	Keadaan tunak
1,68	10,6	5,2	0,534

4.4. Penentuan Model Referensi

Secara teoritis model referensi ditentukan dengan mempertimbangkan derajat relatif proses. Derajat relatif adalah selisih antara derajat polinomial *pole* dengan derajat polinomial *zero*. Derajat relatif model referensi lebih besar atau sama dengan derajat relatif proses.

Namun perlu dicatat bahwa pada prakteknya ketika kebutuhan teoritis tidak dapat terpenuhi maka model referensi harus ditentukan dengan hati-hati dengan syarat keluaran proses sebenarnya dapat mengikuti keluaran model referensi. Jika model referensi yang dipilih memiliki respon terlalu cepat, sebagai contoh, maka sinyal kontrol yang dibutuhkan harus sangat besar, sehingga menyebabkan efek saturasi pada masukan atau dinamika tak termodelkan yang merusak sistem adaptif (Butler, 1992: 8).

Penentuan fungsi alih model referensi pada simulasi ini ditentukan dengan kriteria sebagai berikut:

- Settling time* model referensi tidak lebih cepat daripada waktu yang dibutuhkan oleh aktuator hidrolik untuk mencapai nilai *steady* yaitu sebesar 2,5 detik (lihat gambar 4.4).
- Derajat relatif model referensi adalah tiga. Besar derajat relatif ini diperoleh dengan melihat fungsi alih proses yang akan dikendalikan (persamaan 4-4), yaitu :

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1,325840205762}{s^3 + 2,827s^2 + 3,553539s + 2,48067693}$$

- Pada sistem stabilisasi gerak guling, performansi sistem dinilai berdasarkan besarnya prosentase redaman gerak guling. Sistem dikatakan memiliki performansi yang tinggi jika nilai redamannya lebih dari 60% (Passenier, 1989). Sistem stabilisasi dengan menggunakan sayap aktif dirancang untuk memiliki performansi yang lebih baik daripada sistem yang menggunakan sirip aktif.

Penentuan model referensi dilakukan dengan hati-hati sesuai kriteria di atas. Bentuk umum persamaan dengan derajat relatif sama dengan tiga yang akan digunakan sebagai model referensi adalah :

$$W_m(s) = \frac{1}{(s + A)^3} \quad (4-5)$$

Mengingat nilai *zero* pada persamaan model referensi nantinya akan digunakan sebagai persamaan pada generator sinyal bantu dan dengan tetap mempertahankan derajat relatifnya sama dengan tiga maka persamaan model referensi di atas diubah menjadi :

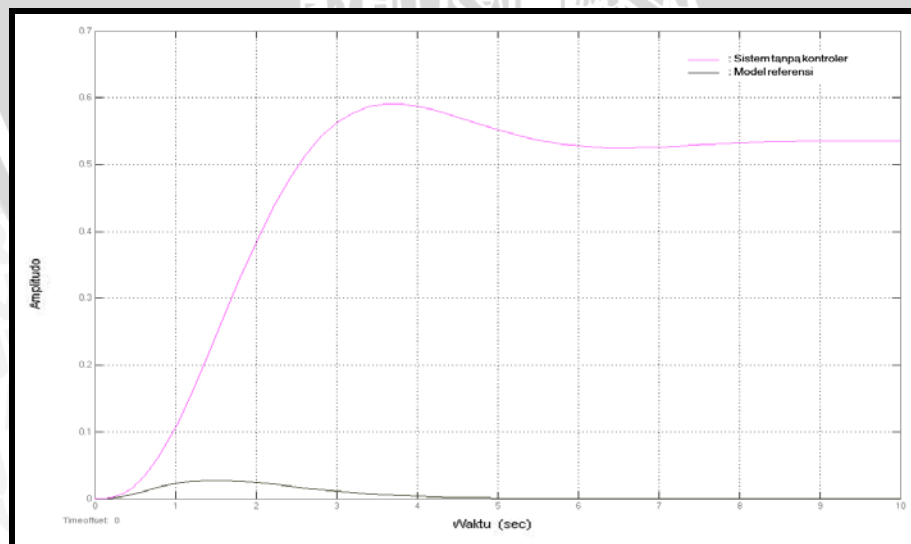
$$W_m(s) = \frac{(S + B)}{(S + A)^3(S + C)} \quad (4-6)$$

Dengan nilai A sama dengan C sedangkan nilai B dipilih sekecil mungkin sehingga diperoleh sistem yang mampu meredam gerak guling hingga sudut guling kapal dapat mendekati nol. Melalui metode *trial and error* diperoleh nilai A sama dengan 2 dan nilai B sama dengan 0,0001. Sehingga persamaan model referensi menjadi :

$$W_m(s) = \frac{(s + 0,0001)}{(s + 2)^4} \quad (4-7)$$

$$W_m(s) = \frac{s + 0,0001}{s^4 + 8s^3 + 24s^2 + 32s + 16}$$

Perbandingan antara respon transien sistem tanpa kontroler dan respon transien model referensi terhadap masukan unit step dapat dilihat pada gambar 4.12.

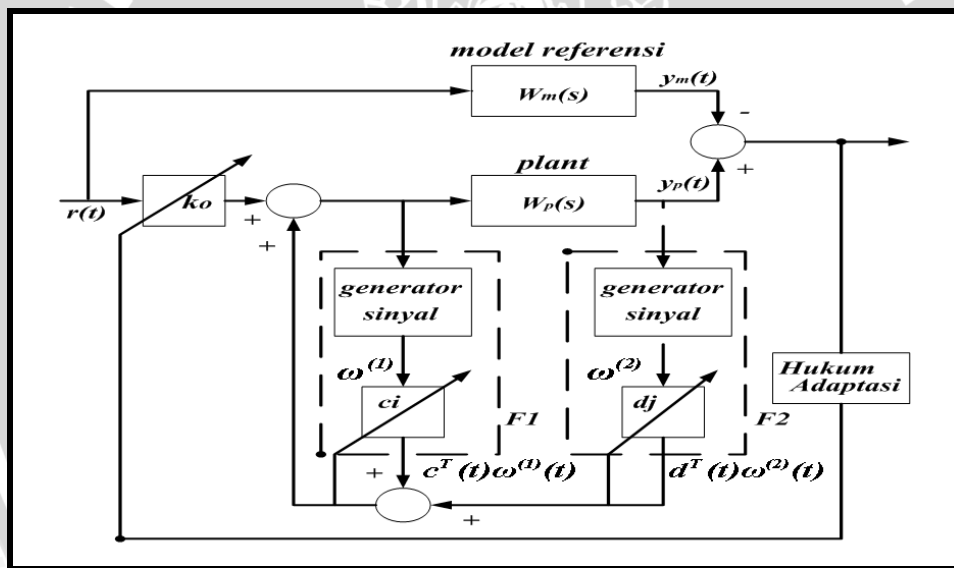


Gambar 4.12 Respon tangga satuan sistem tanpa kontroler dan model referensi

4.5. Penetapan parameter pengendali

Sistem pengendalian MRAS mempunyai syarat harus mampu menyesuaikan fungsi alih y_p terhadap r sama dengan y_m terhadap r . Struktur pengendali secara umum mempunyai generator sinyal bantu yang membangkitkan parameter sinyal ω sehingga sinyal kendali yang dihasilkan pengendali adalah $u = \theta^T \cdot \omega$. Dalam hal ini θ adalah parameter pengendali.

Plant yang akan dikendalikan mempunyai orde sama dengan empat dan derajat relatif sama dengan tiga. Sinyal kendali diberikan kepada *plant* agar sinyal keluaran *plant* dapat mengikuti sinyal keluaran model referensi. Pada gambar 4.13, pengendali terdiri atas penguat k_0, F_1 , dan F_2 . F_1 terdiri atas generator sinyal bantu dan parameter c . F_2 terdiri atas generator sinyal bantu dan parameter d .



Gambar 4.13 Struktur dasar pengendali adaptif

Sumber : Butler, 1992: 53

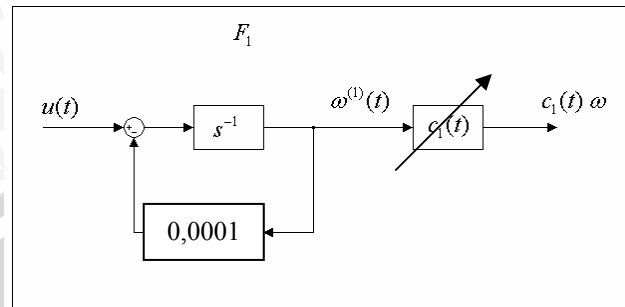
F_1 dan F_2 dinyatakan dalam fungsi alih W_1 dan W_2 , dengan persamaan :

$$W_1(s) = \frac{C(s)}{N(s)} \quad \text{dan} \quad W_2(s) = \frac{D(s)}{N(s)}$$

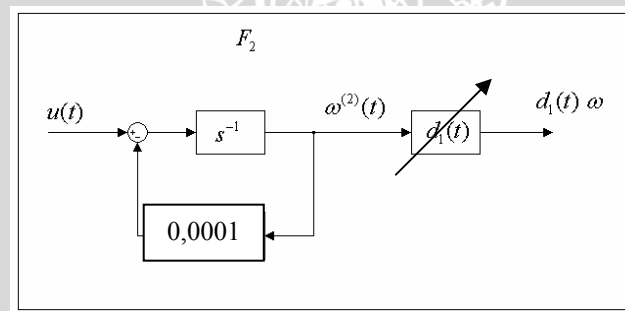
Polinomial $N(s)$ pada generator sinyal bantu sama dengan *zero* model referensi (Sastry dan Bodson, 1993 : 105). Sehingga fungsi alih W_1 dan W_2 adalah :

$$W_1(s) = \frac{c_1}{s + 0,0001} \quad \text{dan} \quad W_2(s) = \frac{d_1}{s + 0,0001} \quad (4-8)$$

Dalam diagram blok, F_1 dan F_2 digambarkan sebagai berikut:



Gambar 4.14 Diagram blok generator sinyal 1 dan parameter c_1 pada F_1



Gambar 4.15 Diagram blok generator sinyal 2 dan parameter d_1 pada F_2

Parameter pengendali adalah θ^T , dan parameter generator sinyal adalah ω^T , dengan

$$\theta^T = [k_0(t), c_1(t), d_1(t)]$$

$$\omega^T = [r(t), \omega^{(1)}(t), \omega^{(2)}(t)]$$

maka sinyal kendali adalah

$$u(t) = \theta^T \cdot \omega^T$$

$$u(t) = k_0(t) \cdot r(t) + c_1(t) \cdot \omega^{(1)}(t) + d_1(t) \cdot \omega^{(2)}(t) \quad (4-9)$$

4.6. Persamaan Error

Proses adaptasi berakhir jika keluaran *plant* dapat mengikuti keluaran model referensi. Selama berlangsung proses adaptasi, berlaku parameter *error* ϕ yang besarnya,

$$\phi = \theta(t) - \theta^* \quad (4-10)$$

Dalam hal ini, θ^* adalah parameter pengendali yang diharapkan dalam proses adaptasi. Sedangkan ϕ adalah parameter *error* (Sastry dan Bodson, 1993 : 109).

$$\theta^{*T} = [k_0^*, c_1^*, d_1^*] \quad (4-11)$$

sehingga sinyal kendali dinyatakan sebagai

$$u(t) = k_0^*(t).r(t) + c_1^*(t).\omega^{(1)}(t) + d_1^*(t).\omega^{(2)}(t) \quad (4-12)$$

Sedangkan persamaan *error* antara model referensi dengan *plant* adalah :

$$e_1(t) = y_p(t) - y_m(t) \quad (4-13)$$

4.7. Penentuan Hukum Adaptasi

Proses adaptasi berlangsung dengan adanya perubahan nilai parameter pengendali. Proses ini berlangsung selama terjadi error antara keluaran *plant* dengan keluaran model referensi. Proses adaptasi diatur melalui cara yang disebut dengan hukum adaptasi (Narendra dan Annaswamy, 1989 : 184). Nilai parameter pengendali akan diubah sedemikian rupa sehingga error antara y_p dan y_m sama dengan nol. Penyesuaian parameter pengendali akan menghasilkan sinyal kontrol u sebagai masukan bagi *plant*., sehingga keluaran *plant* mendekati model referensi pada saat t sama dengan tak terhingga. Hal tersebut dinyatakan sebagai,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_p(t) - y_m(t)| = 0 \quad (4-14)$$

Pada pengendalian adaptif dengan MRAS, error antara keluaran plant dengan keluaran model referensi digunakan secara langsung untuk mengubah nilai parameter pengendali. Proses adaptasi pada MRAS disebut dengan adaptasi langsung (Sastry dan Bodson, 1993 : 110).

Hukum adaptasi yang digunakan adalah metode *Lyapunov*. Metode *Lyapunov* dipilih karena melalui metode ini akan diperoleh sistem pengendalian adaptif yang stabil (Sastry dan Bodson, 1993 : 8).

Untuk mencapai kestabilan, fungsi *Lyapunov* $V(x)$ harus merupakan fungsi dalam bentuk *state*. Dengan syarat (Butler, 1997 : 12):

$$V(x) > 0, \text{ untuk } x \neq 0 \text{ (definit positif)}$$

$$\dot{V}(x) < 0, \text{ untuk } x \neq 0 \text{ (definit negatif)}$$

$$V(x) \rightarrow \infty, \text{ untuk } |x| \rightarrow \infty$$

$$V(x) = 0$$

Untuk menerapkan metode *Lyapunov*, diperlukan tahapan :

1. Adanya persamaan *error*. Persamaan *error* tersebut dapat berupa *error* keluaran yaitu $y_p - y_m$.
2. Untuk mendapatkan hukum adaptasi, dipilih fungsi *Lyapunov* yang mengandung sinyal *error* e dan parameter *error* ϕ , yang dituliskan sebagai (Butler, 1997 : 12) :

$$V = e^T P e + \phi^T \xi^{-1} \phi \quad (4-15)$$

Dengan e merupakan vektor sinyal *error*, dan ϕ adalah vektor parameter *error*. $\phi = \theta - \theta^*$. Sedangkan ξ adalah matriks penguatan adaptasi yang memenuhi syarat definit positif, matriks ditentukan sebagai matriks diagonal sehingga ξ^{-1} juga memenuhi syarat definit positif. Matriks P merupakan matriks simetri definit positif.

Dengan menurunkan fungsi Lyapunov terhadap waktu maka langsung diperoleh hukum adaptasi. V mempunyai bentuk $V = -e^T Q e + \{\text{beberapa persamaan yang mengandung } \phi\}$ (Butler, 1997 : 13). Persamaan yang mengandung ϕ dibuat sama dengan nol, sehingga diperoleh hukum adaptasi.

V definit negatif jika Q definit positif. Matriks A adalah matriks state pada model referensi. Q dinyatakan sebagai matriks identitas I .

$$A^T P + PA = -Q \quad (4-16)$$

Fungsi *Lyapunov* yang digunakan yaitu fungsi yang mengandung vektor sinyal *error* e dan vektor parameter *error* ϕ , yaitu:

$$V = e^T P e + \phi^T \xi^{-1} \phi \quad (4-17)$$

dengan penurunan V , maka diperoleh (Butler, 1997 : 39) :

$$\dot{V} = e^T (A_m^T P + P A_m) e + 2(\phi^T \omega) b_m^T P e + 2\phi^T \xi^{-1} \dot{\phi} \quad (4-18)$$

Matriks P dan Q sebagai matriks simetris definit positif, seperti pada persamaan berikut (Butler, 1997 : 39) :

$$A_m^T P + P A_m = -Q \quad (4-19)$$

$$b_m^T P e = e_1 \quad (4-20)$$

Dengan demikian maka persamaan (4-18) dituliskan lagi menjadi:

$$\dot{V} = -e^T Q e + 2(\phi^T \omega) e_1 + 2\phi^T \xi^{-1} \dot{\phi} \quad (4-21)$$

Untuk memastikan bahwa V adalah definit negatif, maka dua suku terakhir pada persamaan (4-19) dibuat sama dengan nol, sehingga:

$$(\phi^T \omega)e_1 = -\phi^T \xi^{-1} \phi \quad (4-22)$$

Dengan demikian, diperoleh hukum adaptasi :

$$\theta = \phi = -\xi \omega e_1 \quad (4-23)$$

Dalam fungsi waktu, hukum adaptasi dinyatakan dengan (Butler, 1997 : 40) :

$$\theta(t) = \theta(t-1) - \xi \omega(t) e_1(t) \quad (4-24)$$

Sehingga,

$$\dot{\theta}(t) = \theta(t) - \xi \omega(t) e_1(t) \quad (4-25)$$

Dengan penguatan adaptasi yang telah ditentukan dan parameter pengendali yang telah ditentukan maka persamaan hukum adaptasi dinyatakan sebagai :

$$\dot{k}_0(t) = k_0(t) - \xi r(t) e_1(t) \quad (4-26)$$

$$\dot{c}_1(t) = c_1(t) - \xi \omega^{(1)}(t) e_1(t) \quad (4-27)$$

$$\dot{d}(t) = d_1(t) - \xi \omega^{(2)}(t) e_1(t) \quad (4-28)$$

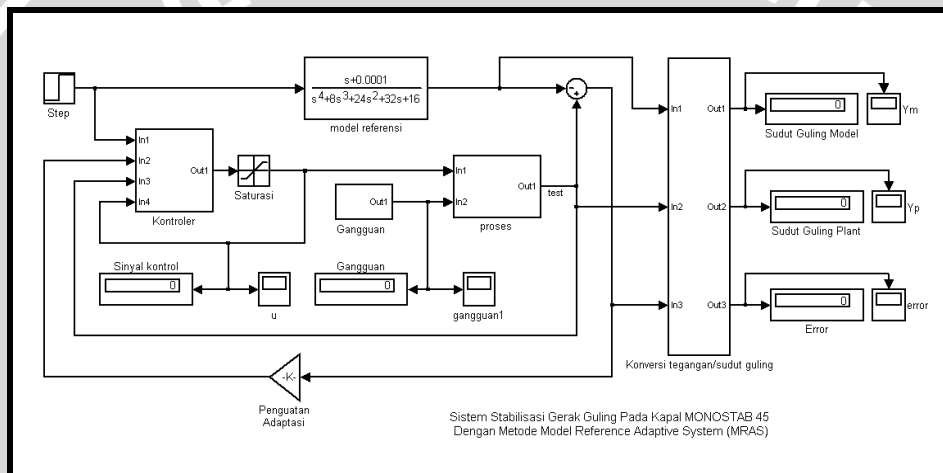
4.8. Penentuan daerah kerja aktuator hidrolik

Sayap stabilisator memiliki daerah kerja -18 derajat sampai dengan 18 derajat atau sama dengan -0,314 rad sampai dengan 0.314 rad, sehingga keluaran dari aktuator hidrolik yang akan menjadi masukan bagi sayap stabilisator tidak boleh melebihi jangauan kerja tersebut. Agar menghasilkan keluaran sesuai syarat

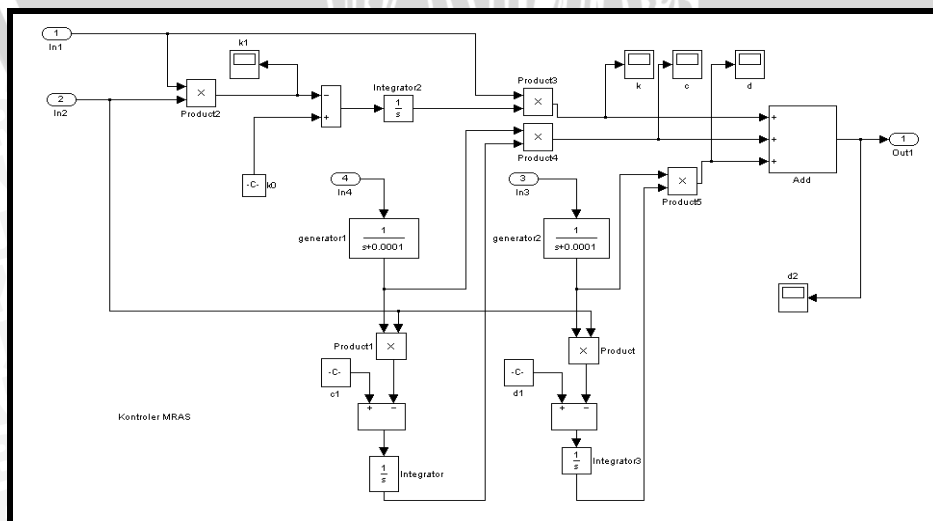
tersebut maka sinyal kendali yang masuk ke dalam aktuator hidrolik nilainya berkisar antara -1,460465 volt sampai dengan 1,460465 volt.

4.9. Skema Simulasi Sistem Stabilisasi Gerak Guling Pada Kapal MONOSTAB 45 Dengan Model Reference Adaptive System (MRAS) Pada Matlab Simulink

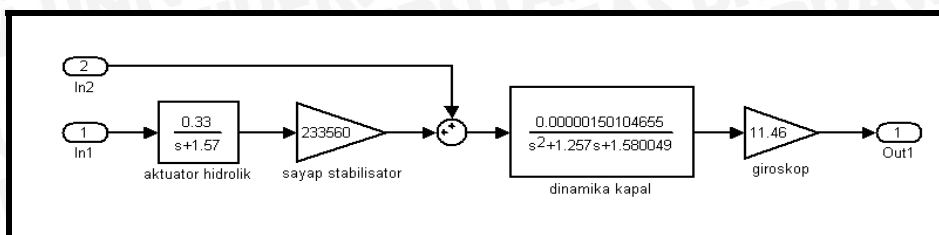
Hasil pemodelan dari masing-masing bagian pada sistem stabilisasi gerak guling kapal MONOSTAB 45 disimulasikan pada Simulink, dengan besar penguatan adaptasi yang diambil adalah sebesar 0,1. Besarnya nilai penguatan adaptasi tentukan melalui metode *tuning*, sampai didapatkan respon yang terbaik pada keluaran *plant*.



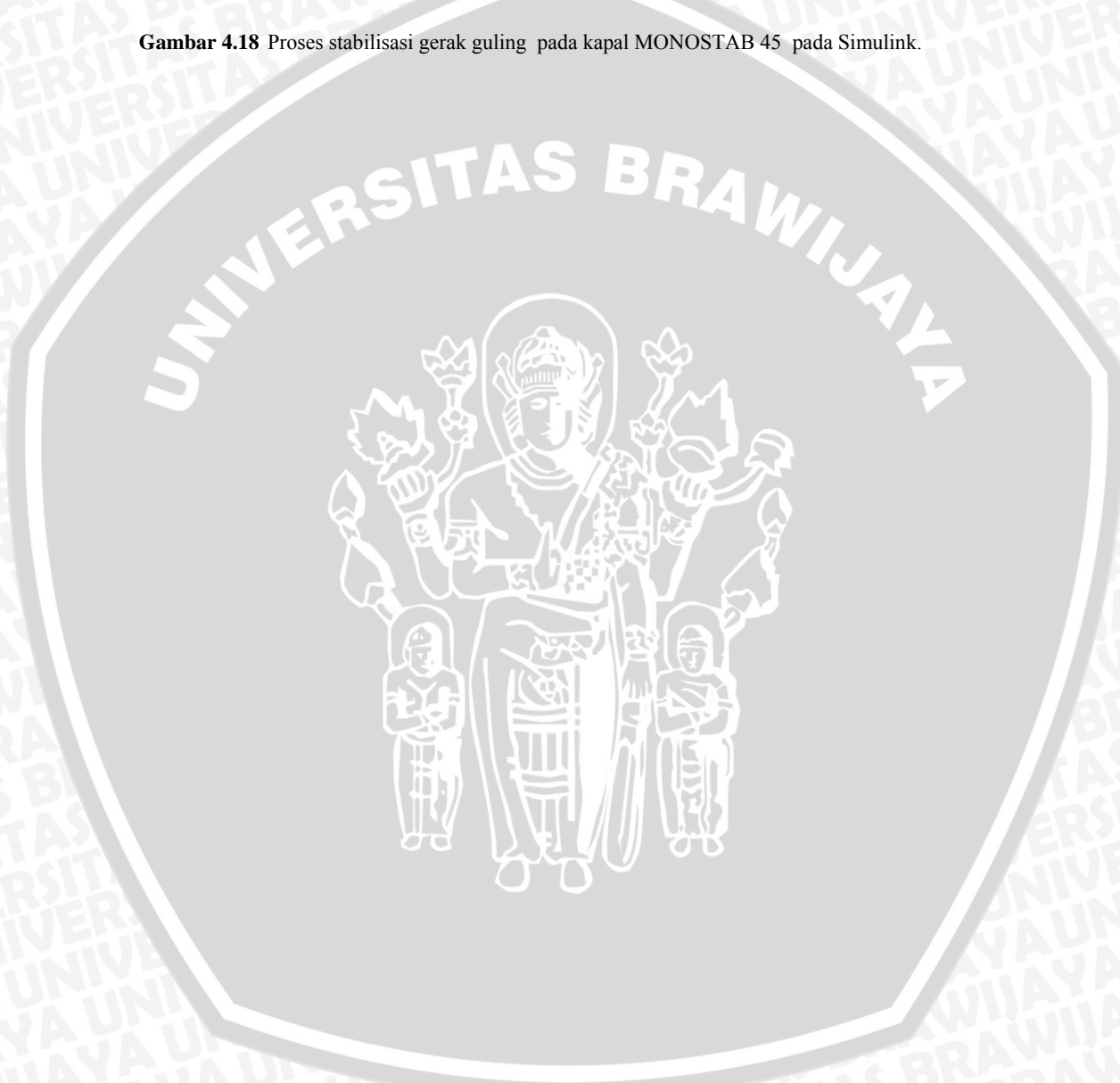
Gambar 4.16 Simulasi sistem stabilisasi gerak guling pada kapal MONOSTAB 45 dengan MRAS pada Simulink.



Gambar 4.17 Kontroler MRAS pada Simulink.



Gambar 4.18 Proses stabilisasi gerak guling pada kapal MONOSTAB 45 pada Simulink.



BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM

5.1. Simulasi Sistem Stabilisasi Gerak Guling Pada Kapal MONOSTAB 45 dengan metode Model Reference Adaptive System (MRAS)

Simulasi dalam bab ini merupakan simulasi penggunaan metode MRAS pada sistem stabilisasi gerak guling pada kapal MONOSTAB 45. Tujuan dari simulasi ini untuk mendapatkan data hasil pengendalian pada Sistem stabilisasi gerak guling.

Dalam simulasi ini dilakukan tahap-tahap:

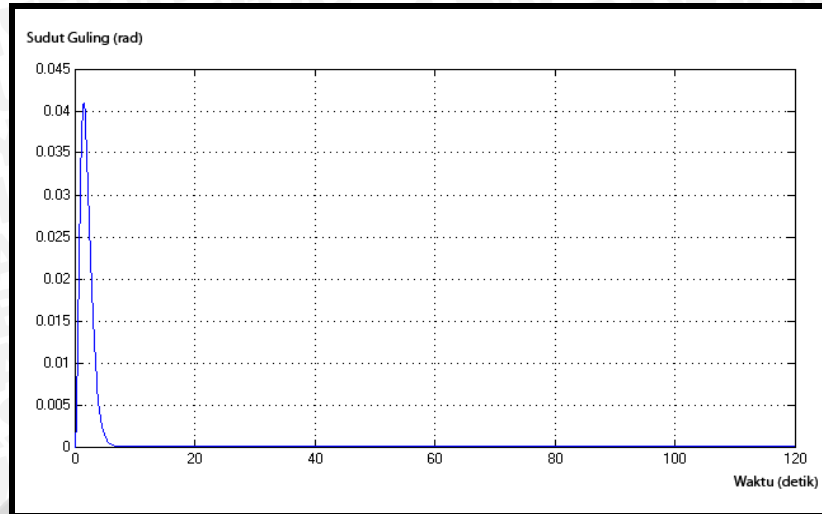
1. Simulasi sistem tanpa *tuning* parameter pengendali dan tanpa gangguan.
2. Simulasi sistem dengan *tuning* parameter pengendali dan tanpa gangguan.

Tuning parameter pengendali pada MRAS digunakan untuk mendapatkan respon *plant* yang dapat menjejaki respon keluaran model referensi. Jika keluaran *plant* sudah dapat menjejaki respon keluaran dari model referensi dengan baik, maka *tuning* parameter pengendali tidak perlu dilakukan. *Tuning* dilakukan dengan cara memberikan nilai awal parameter pengendali pada nilai tertentu sebelum simulasi dilakukan.

3. Simulasi sistem dengan *tuning* parameter pengendali dengan gangguan.

5.2. Hasil Simulasi Model Referensi

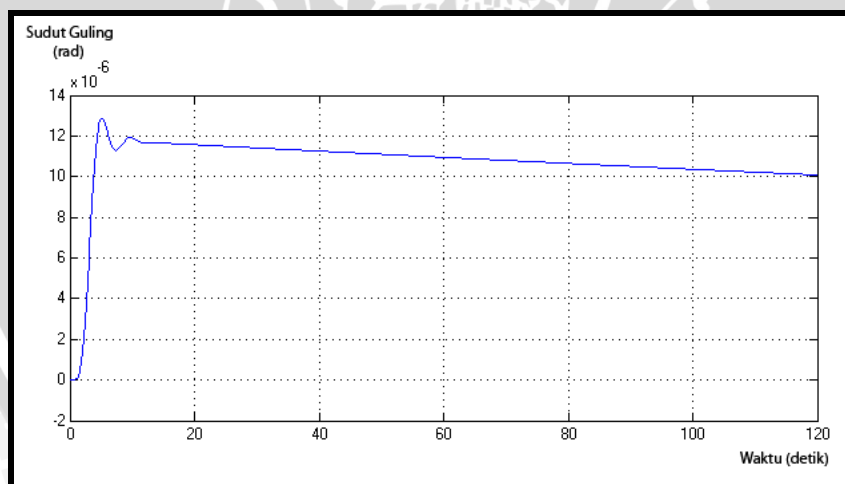
Model referensi disimulasikan dengan *sinjal referensi* sebesar 1,460465 volt. Penentuan *sinjal referensi* ini berdasarkan daerah kerja aktuator hidrolik yang nilai keluarnya dibatasi maksimum sebesar 18 derajat atau sama dengan 0,314 radian, yang merupakan sudut maksimum dari sayap stabilisator.



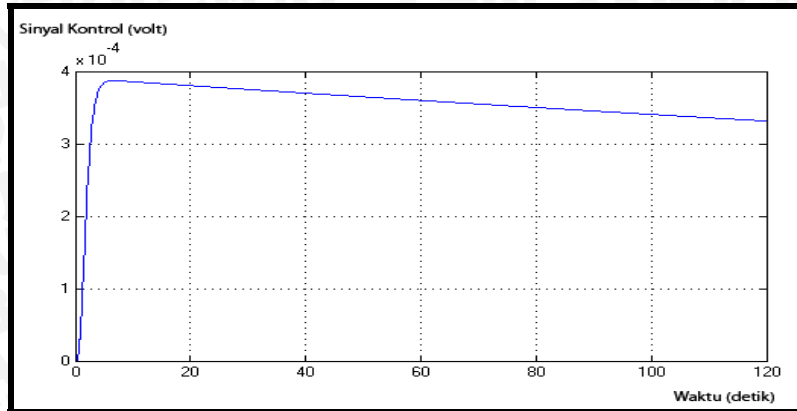
Gambar 5.1 Respon model referensi pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt

5.3. Hasil Simulasi Sistem Tanpa Tuning Parameter Pengendali dan Tanpa Gangguan

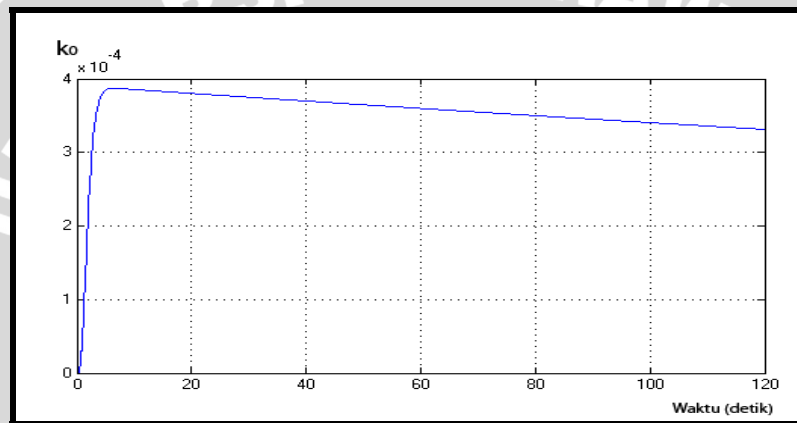
Hasil simulasi sistem tanpa *tuning* parameter pengendali tanpa gangguan dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt ditunjukkan pada Gambar 5.2 sampai dengan Gambar 5.6. Dengan parameter awal $k_0 = 0$, $c_1 = 0$ dan $d_1 = 0$.



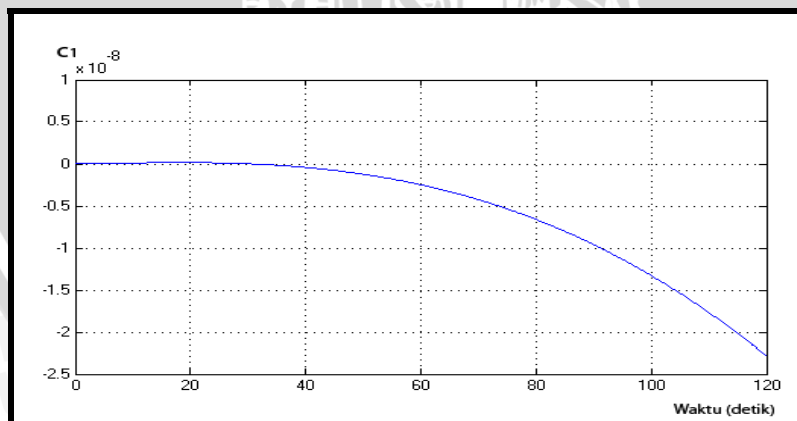
Gambar 5.2 Respon plant pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt tanpa tuning parameter pengendali, tanpa gangguan



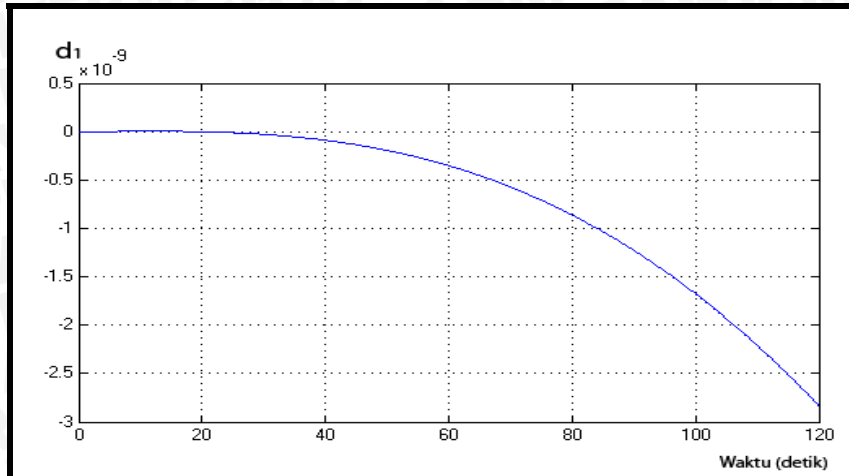
Gambar 5.3 Respon sinyal kontrol pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt tanpa tuning parameter pengendali, tanpa gangguan



Gambar 5.4 Respon parameter pengendali k_0 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt tanpa tuning parameter pengendali, tanpa gangguan



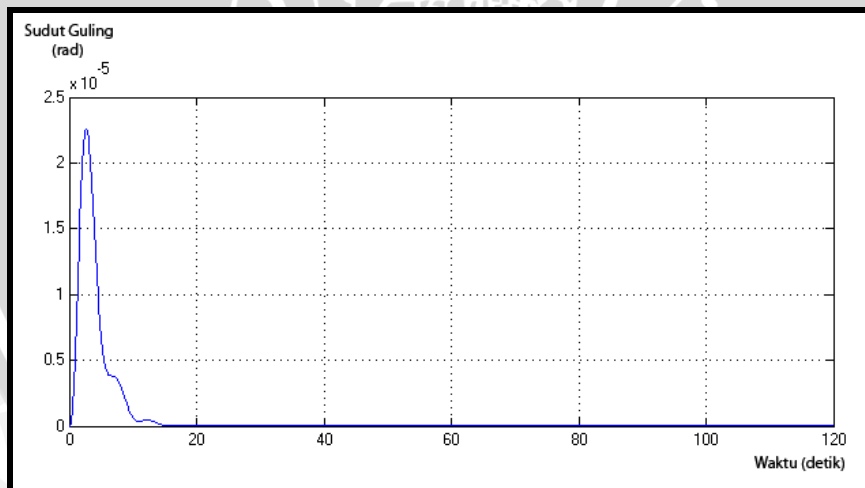
Gambar 5.5 Respon parameter pengendali c_1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt tanpa tuning parameter pengendali, tanpa gangguan



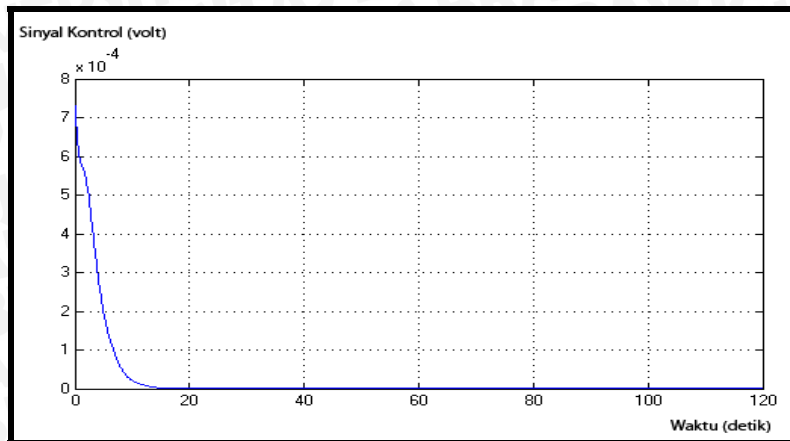
Gambar 5.6 Respon Respon parameter pengendali d_1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt tanpa tuning parameter pengendali, tanpa gangguan

5.4. Hasil Simulasi Sistem Dengan Tuning Parameter Pengendali Tanpa Gangguan

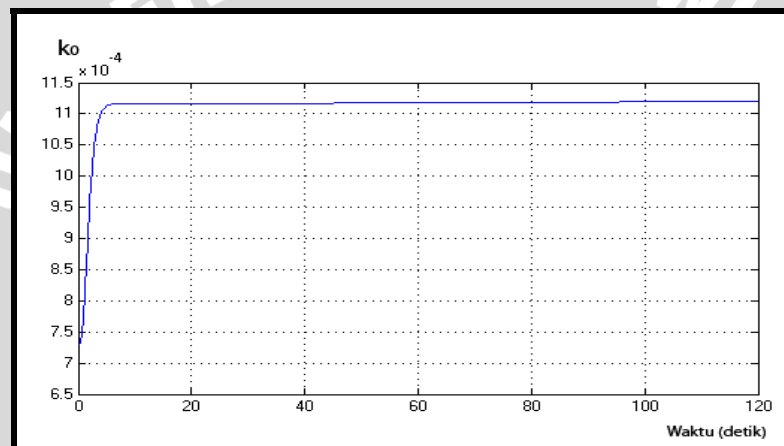
Hasil simulasi sistem dengan *tuning* parameter pengendali tanpa gangguan dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt ditunjukkan pada Gambar 5.7 sampai dengan Gambar 5.11. Parameter awal dari k_0 adalah 0,0005, sedangkan parameter yang dituning adalah c_1 sebesar -0,3 dan d_1 sebesar -0,3



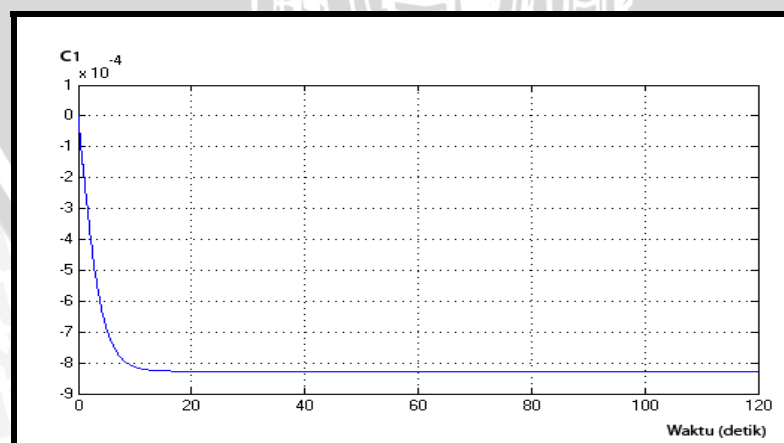
Gambar 5.7 Respon plant pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, tanpa gangguan



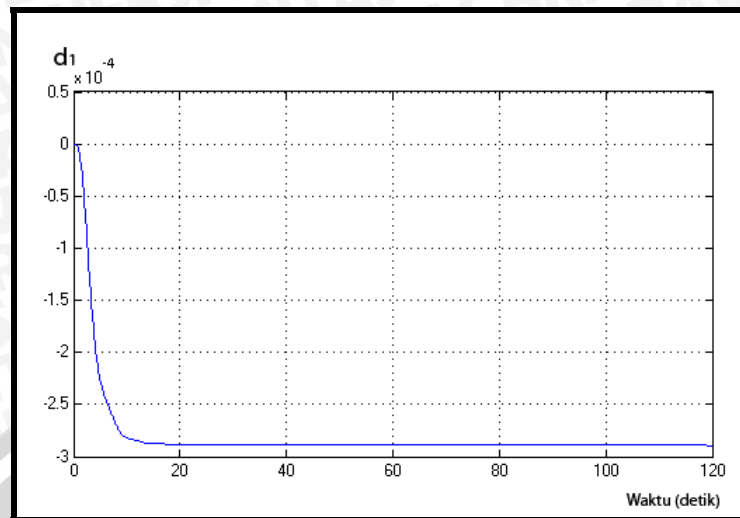
Gambar 5.8 Respon sinyal kontrol pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, tanpa gangguan



Gambar 5.9 Respon parameter pengendali k_0 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, tanpa gangguan



Gambar 5.10 Respon parameter pengendali c_1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, tanpa gangguan

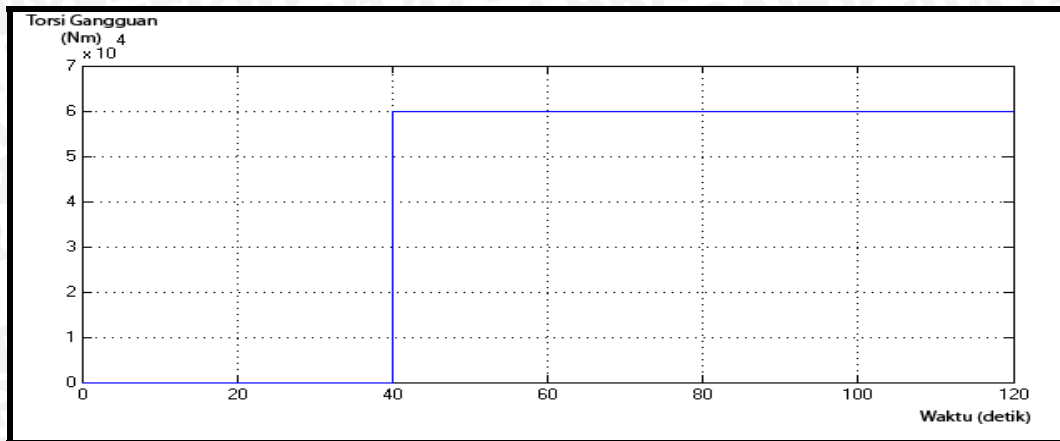


Gambar 5.11 Respon parameter pengendali d_1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, tanpa gangguan

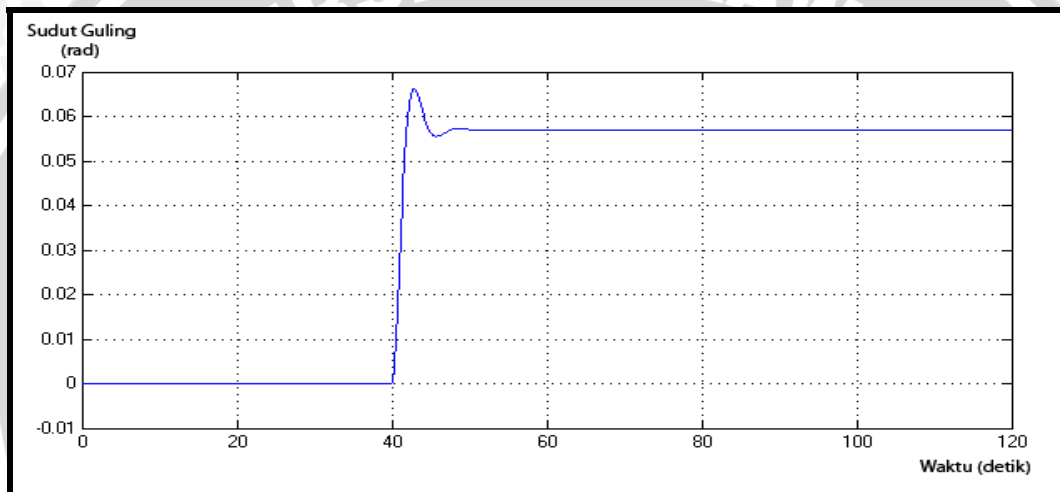
5.5. Hasil Simulasi Sistem Dengan Tuning Parameter Pengendali Dengan Gangguan

Hasil simulasi sistem dengan *tuning* parameter pengendali dengan gangguan dan dengan sinyal referensi sebesar 1,460465, ditunjukkan pada gambar 5.12 sampai dengan gambar 5.19. Parameter awal dari k_0 adalah 0,005, sedangkan parameter yang dituning adalah c_1 sebesar -0,3 dan d_1 sebesar -0,3. Simulasi dilakukan dengan memberi empat jenis gangguan, yaitu:

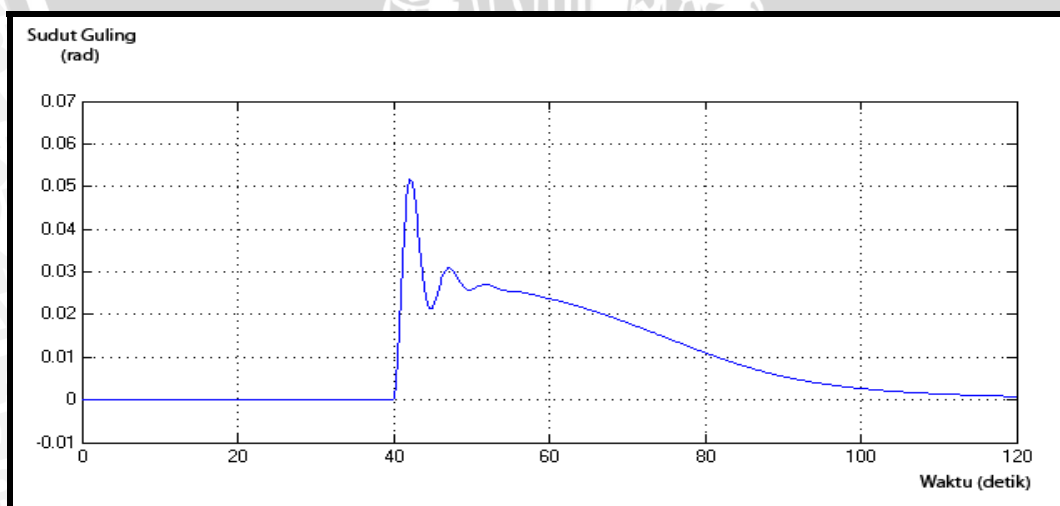
- Gangguan berupa torsi eksternal yang nilainya lebih kecil dari torsi maksimum yang dihasilkan sayap stabilisator, disimulasikan dengan sinyal *step* sebesar 60.000 Nm pada detik ke-40 dari proses, bertujuan untuk mengetahui waktu pulih dari sistem.
- Gangguan berupa torsi eksternal yang nilainya lebih besar dari torsi maksimum yang dihasilkan sayap stabilisator, disimulasikan dengan sinyal *step* sebesar 120.000 Nm pada detik ke-40 dari proses, bertujuan untuk mengetahui terjadinya saturasi pada sistem.
- Gangguan berupa torsi eksternal yang acak pada kisaran ± 90.000 Nm setiap 12 detik.
- Gangguan berupa torsi eksternal yang disebabkan gelombang laut pada kecepatan 15, 20 dan 30 knots.



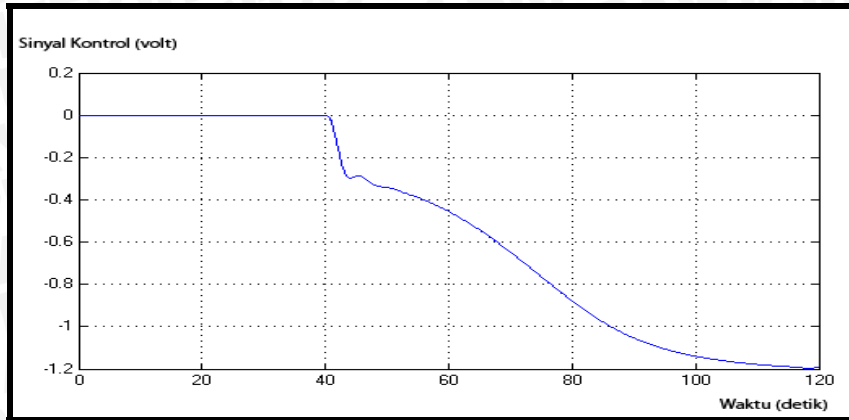
Gambar 5.12 Gangguan berupa torsi eksternal 60.000 Nm pada detik ke-40.



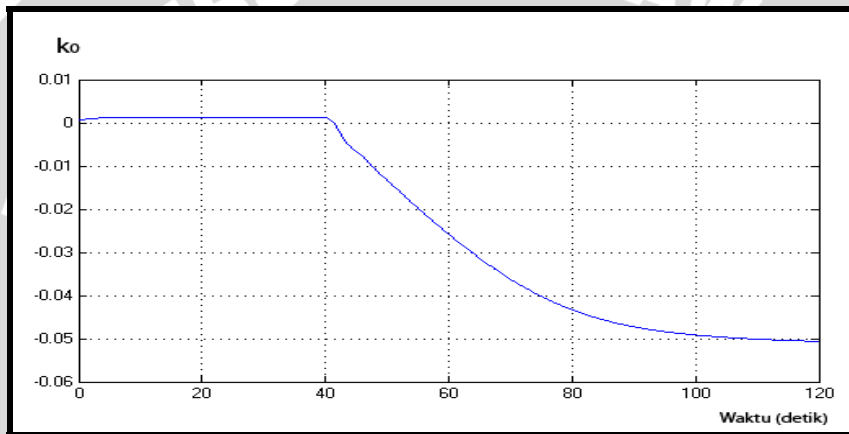
Gambar 5.13 Respon plant tanpa pengendali terhadap gangguan pada gambar 5.12



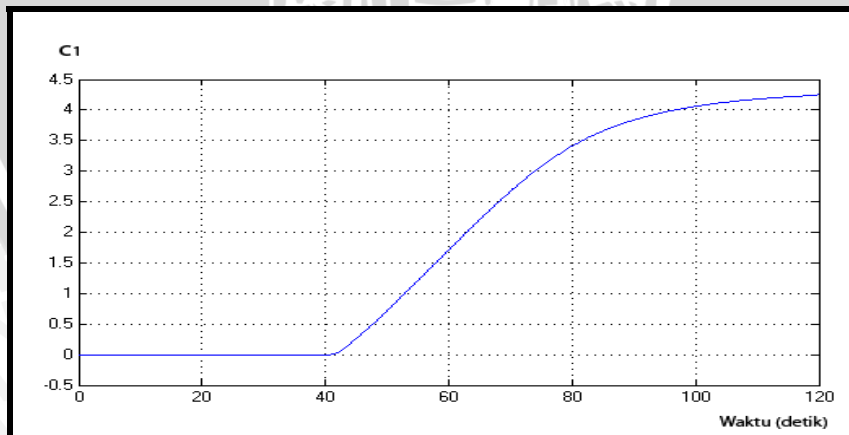
Gambar 5.14 Respon plant dengan pengendali MRAS terhadap gangguan pada gambar 5.12



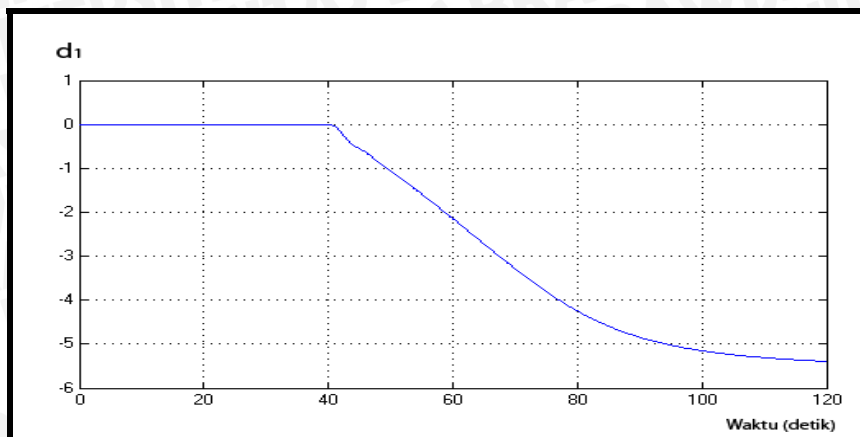
Gambar 5.15 Respon sinyal kontrol pada pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.12



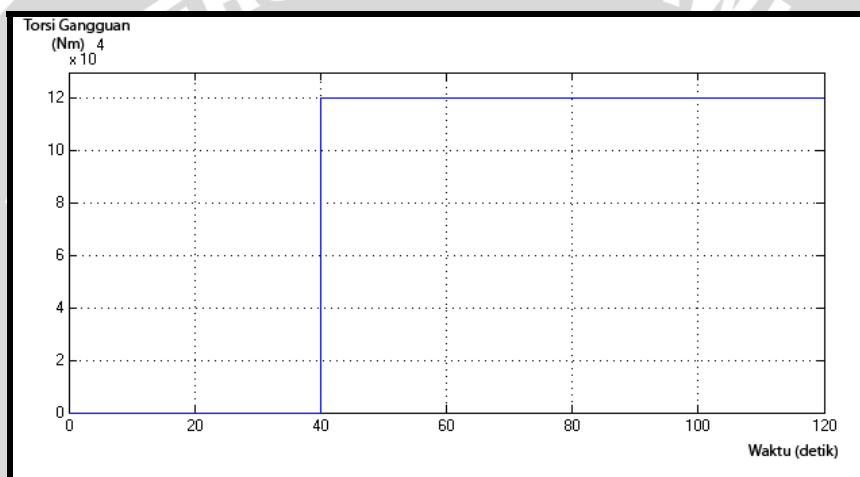
Gambar 5.16 Respon parameter pengendali k_0 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.12



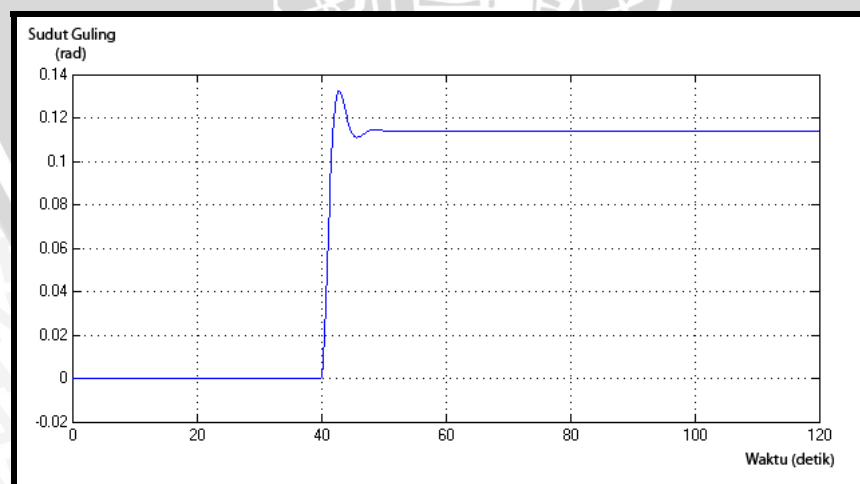
Gambar 5.17 Respon parameter pengendali c_1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.12



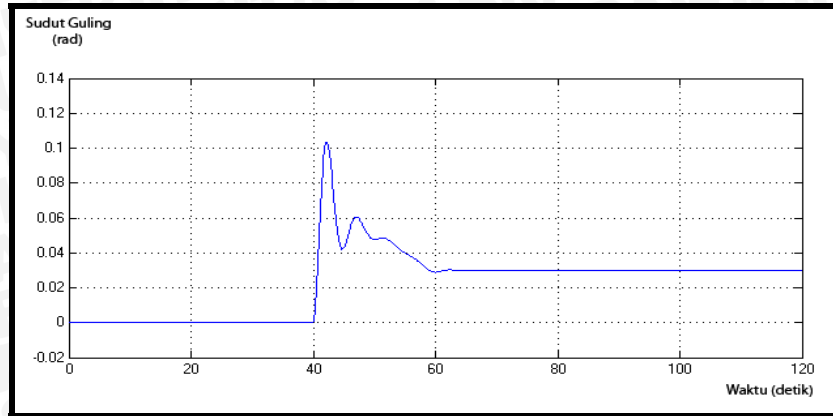
Gambar 5.18 Respon parameter pengendali d_1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.12



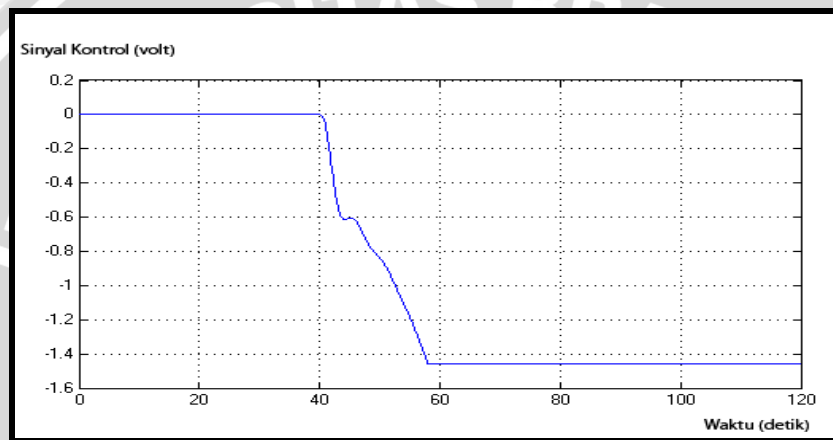
Gambar 5.19 gangguan berupa torsi eksternal 120.000 Nm pada detik ke-40



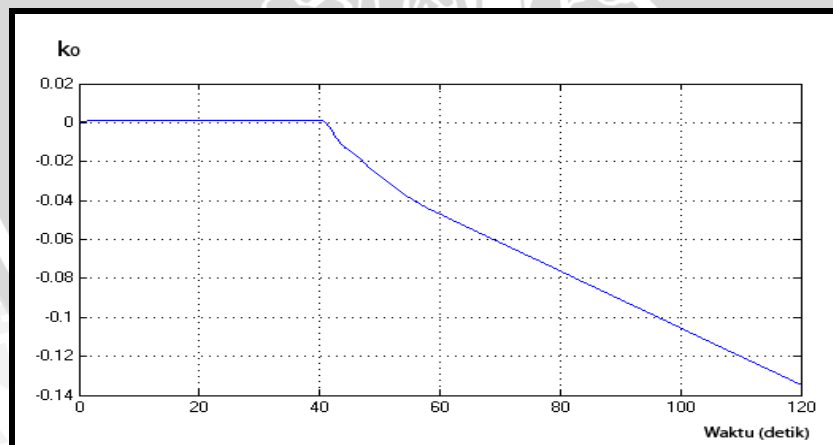
Gambar 5.20 Respon plant tanpa pengendali terhadap gangguan pada gambar 5.19



Gambar 5.21 Respon Respon plant dengan pengendali MRAS terhadap gangguan pada gambar 5.19

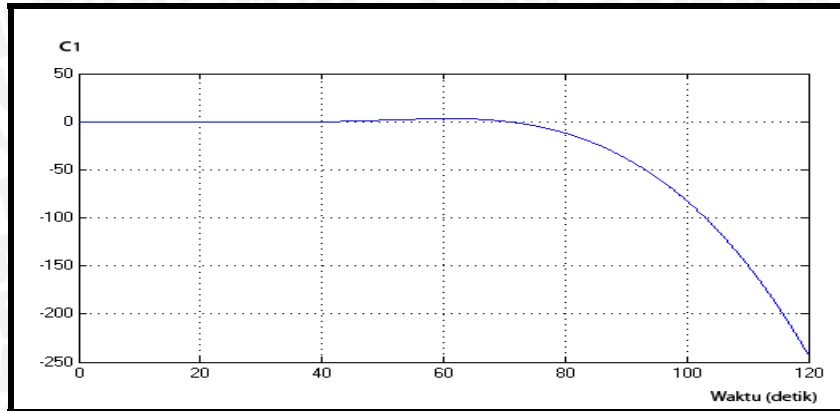


Gambar 5.22 Respon sinyal kontrol pada pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.19

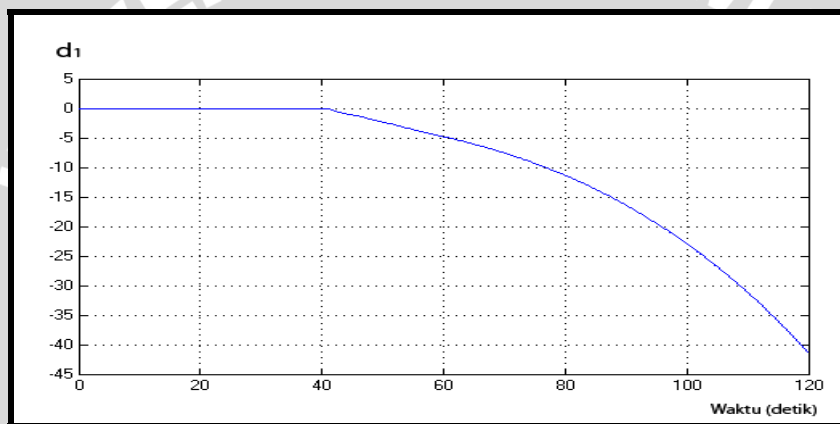


Gambar 5.23 Respon parameter pengendali k_0 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar

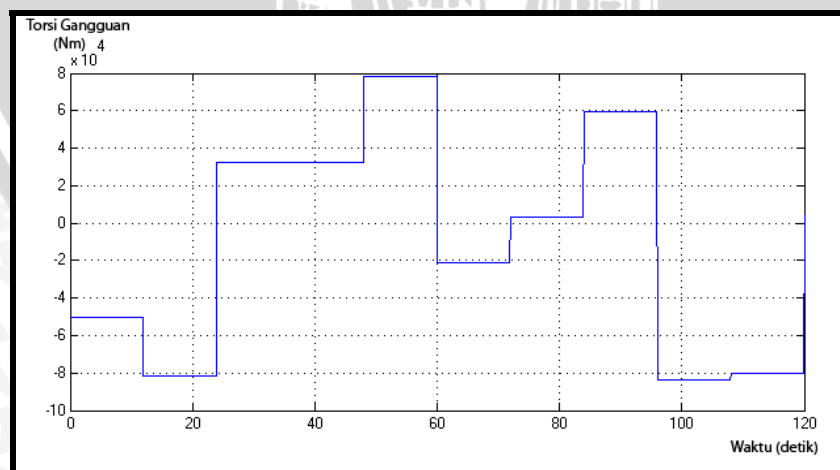
5.19



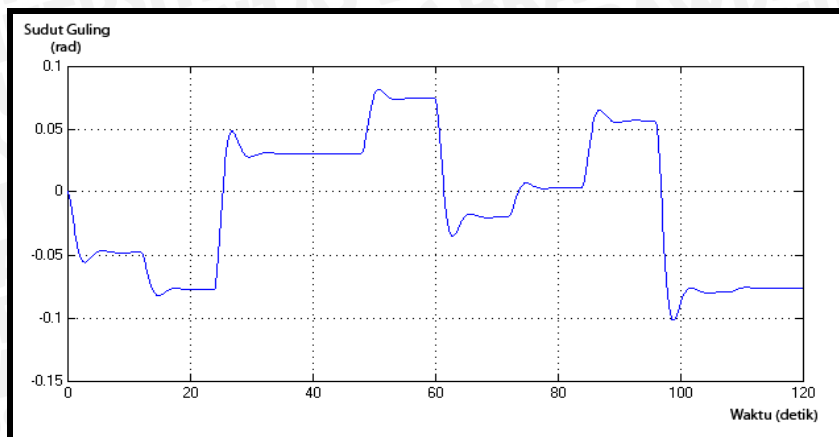
Gambar 5.24 Respon parameter pengendali c_1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.19



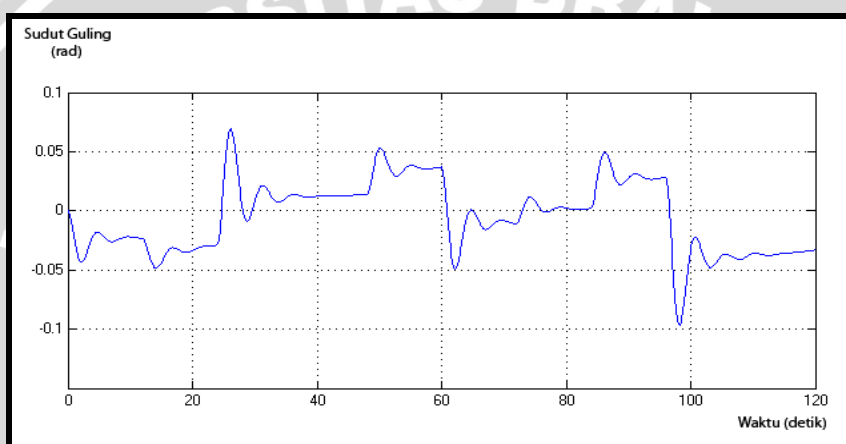
Gambar 5.25 Respon parameter pengendali d_1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.19



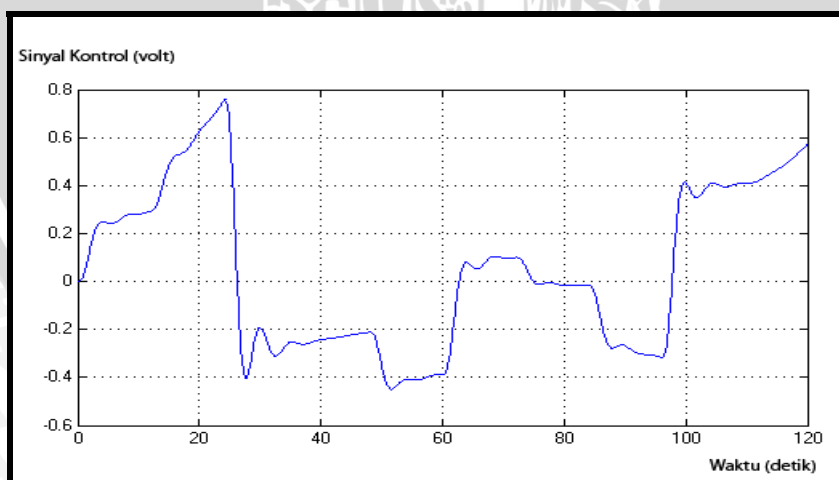
Gambar 5.26 Gangguan berupa torsi eksternal yang acak pada kisaran +90.000 Nm setiap 12 detik



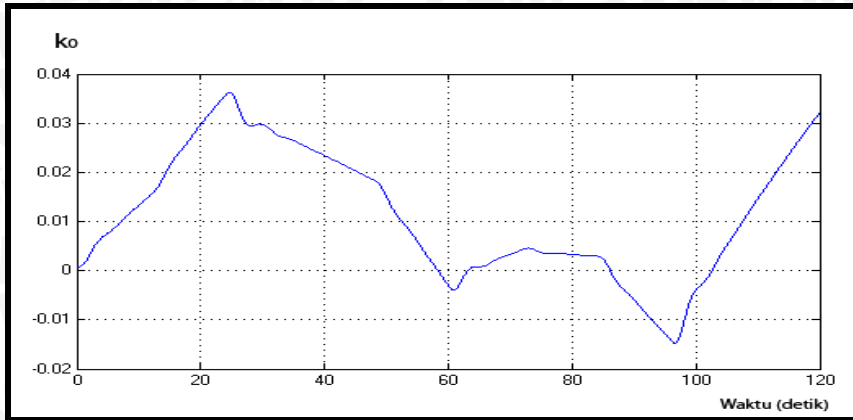
Gambar 5.27 Respon plant tanpa pengendali terhadap gangguan pada gambar 5.26



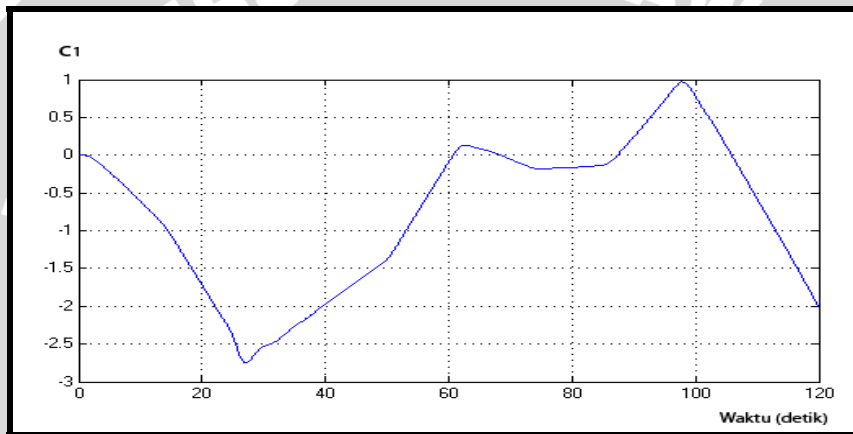
Gambar 5.28 Respon plant dengan pengendali MRAS terhadap gangguan pada gambar 5.26



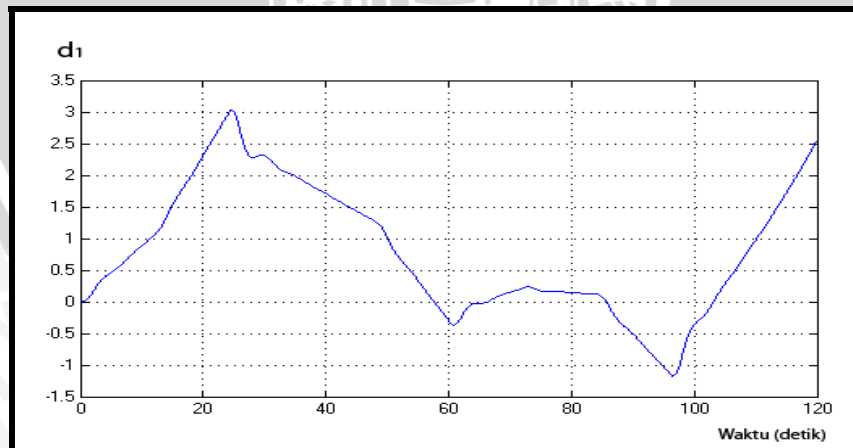
Gambar 5.29 Respon sinyal kontrol pada pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.26



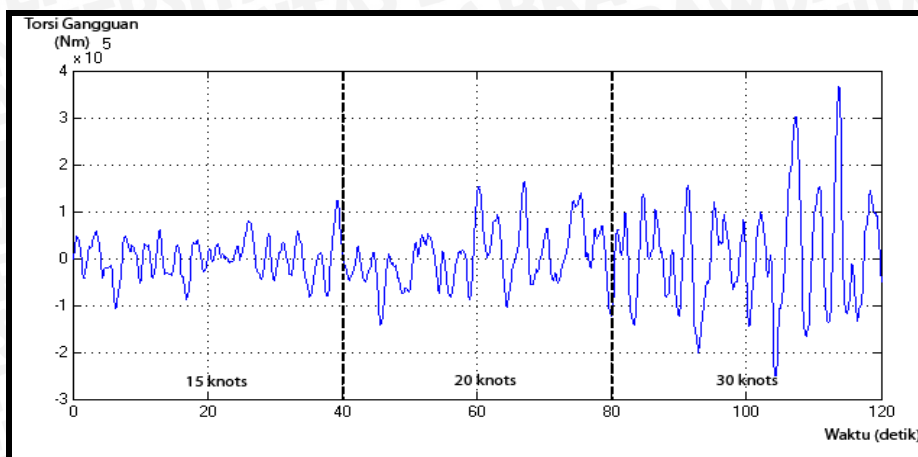
Gambar 5.30 Respon parameter pengendali k_0 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.26



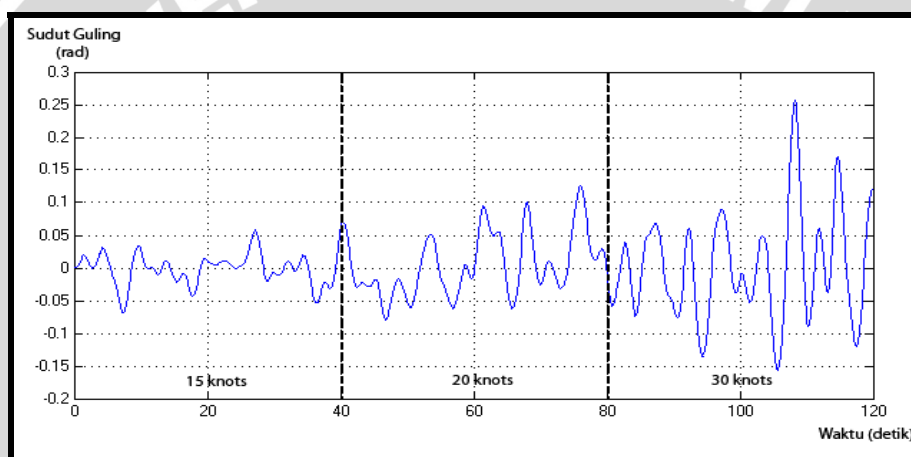
Gambar 5.31 Respon parameter pengendali c_1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.26



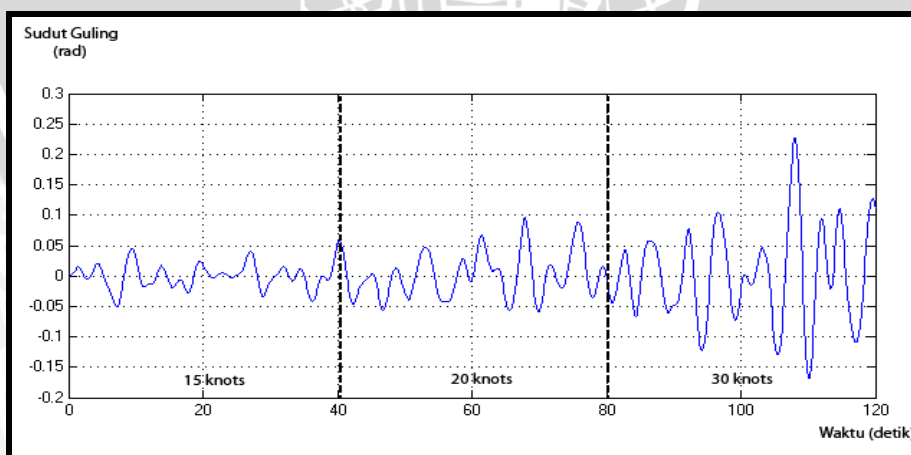
Gambar 5.32 Respon parameter pengendali d_1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.26



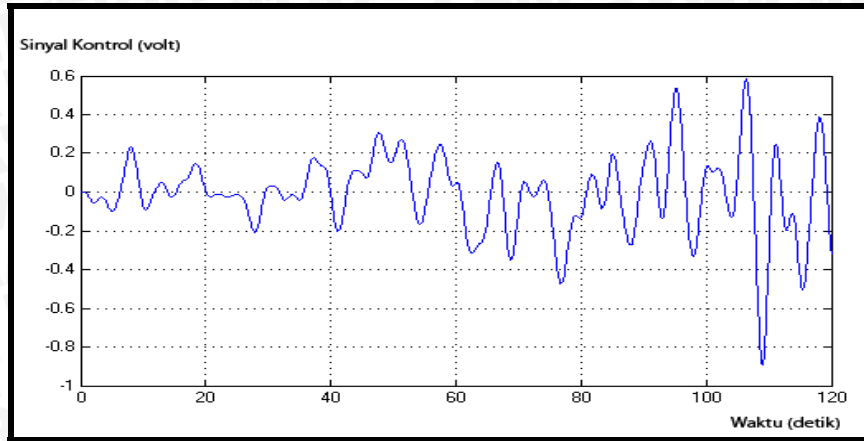
Gambar 5.33 Gangguan berupa torsi eksternal yang disebabkan gelombang laut pada kecepatan 15, 20 dan 30 knots.



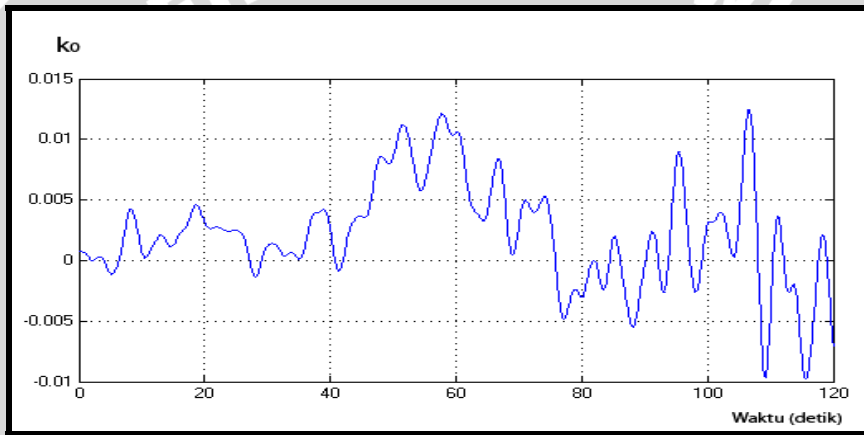
Gambar 5.34 Respon plant tanpa pengendali terhadap gangguan pada gambar 5.33



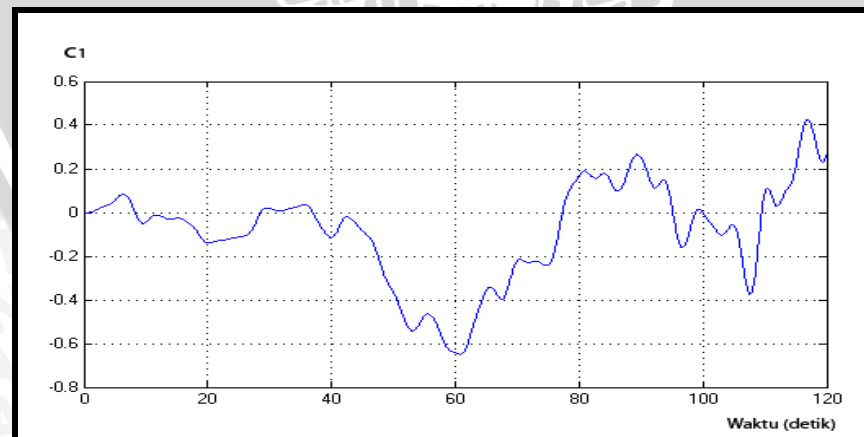
Gambar 5.35 Respon plant dengan pengendali MRAS terhadap gangguan pada gambar 5.33



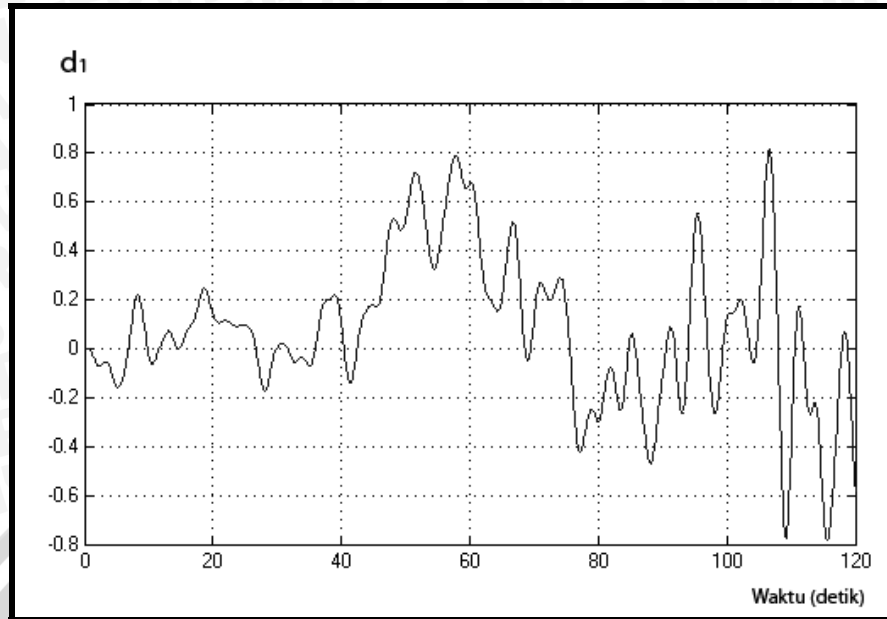
Gambar 5.36 Respon sinyal kontrol pada pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.33



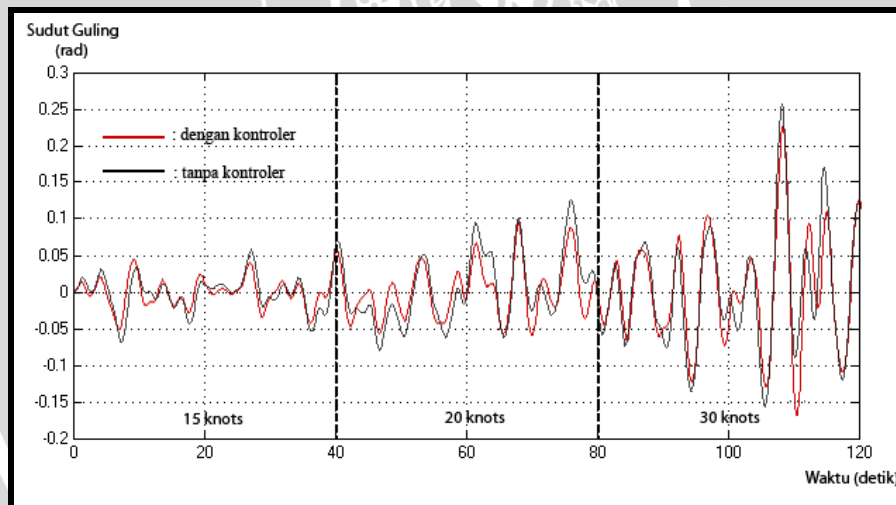
Gambar 5.37 Respon parameter pengendali k_0 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.34



Gambar 5.38 Respon parameter pengendali c_1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.33



Gambar 5.39 Respon parameter pengendali d_1 pada sistem stabilisasi gerak guling dengan sinyal referensi sebesar 1,460465 volt dengan tuning parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.33



Gambar 5.40 perbandingan respon plant pada gambar 5.34 dengan respon plant pada gambar 5.35

5.6. Analisis Hasil Simulasi Pengendalian Sistem Tanpa Gangguan dan Tanpa Tuning Parameter Pengendali

Dengan menambahkan kontroler MRAS pada sistem stabilisasi gerak guling, didapatkan respon pada Gambar 5.2 sampai dengan Gambar 5.6. Sistem tanpa tuning parameter membutuhkan waktu yang lama untuk mencapai keadaan mantap. Dengan sinyal referensi 1,460465 volt sudut guling keluaran sebesar $10 \cdot 10^{-6}$ rad pada detik ke-120 dan belum mencapai kondisi mantap. Sedangkan

model referensi membutuhkan waktu sebesar 8 detik untuk mencapai kondisi mantap dengan nilai mendekati nol.

5.7. Analisis Hasil Simulasi Pengendalian Sistem Tanpa Gangguan Dengan Tuning Parameter Pengendali

Pada pengujian ini, parameter k_0 nilainya sebesar 0,0005, parameter pengendali c_1 dan d_1 diubah nilainya menjadi -0,3 dan nilai sinyal referensi tetap 1,460465 volt. Dengan tuning parameter pengendali ini, keluaran *plant* dapat menyamai keluaran model referensi dengan sempurna mendekati nol, dengan kata lain *error steady state* sebesar 0%. Dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan mantap sebesar 15 detik.

5.8. Analisis Hasil Simulasi Pengendalian Sistem Dengan Gangguan Dengan Tuning Parameter Pengendali

Gangguan yang diberikan pada sistem ada empat macam. Gangguan pertama berupa perubahan torsi eksternal sebesar 50.000 Nm pada detik ke-40 dari proses, pemberian gangguan ini bertujuan untuk mengamati waktu pulih dari sistem, gangguan ke dua berupa torsi eksternal sebesar 120.000 Nm pada detik ke-40, simulasi ini bertujuan untuk melihat karakteristik saturasi pada sistem, gangguan ke tiga berupa gangguan acak pada kisaran -90.000 Nm sampai dengan 90.000 Nm yang bertujuan untuk mengetahui besar redaman sistem, sedangkan gangguan ke empat berupa model torsi eksternal yang disebabkan oleh gelombang laut pada saat angin berhembus dengan kecepatan 15, 20 dan 30 knots.

Pada pengujian pertama dengan gangguan seperti pada Gambar 5.12, sistem dengan pengendali MRAS dapat mengatasi gangguan dan kembali pada posisi sudut guling = 0 dalam waktu 80 detik.

Pada pengujian ke dua dengan gangguan seperti Gambar 5.19, sistem dapat meredam gangguan dengan waktu pulih sebesar 22 detik namun sudut gulingnya tidak dapat mendekati nol melainkan *steady* pada nilai 0,03 rad (Gambar 5.21) hal ini disebabkan adanya elemen saturasi pada masukan aktuator hidrolik yang ditentukan sebesar 1,460465 volt. Sehingga, seperti tampak pada gambar 5.22, sinyal kontrol mengalami saturasi pada nilai 1,460465 volt. Pada kondisi saturasi, sayap stabilisator bekerja pada titik maksimumnya sebesar 18

derajat atau 0,314 rad, sehingga torsi yang dihasilkan tidak lagi dapat meredam torsi eksternal secara penuh.

Pada pemberian gangguan ke tiga seperti pada Gambar 5.26 sistem dengan MRAS mampu meredam sudut guling sehingga dicapai sudut guling yang nilainya 50% lebih kecil bila dibandingkan sistem tanpa pengendali (Gambar 5.27 dan Gambar 5.28), namun pada sistem dengan MRAS terdapat osilasi yang lebih besar.

Pada pemberian gangguan ke empat yaitu berupa torsi eksternal yang disebabkan gelombang laut pada tiga kecepatan angin yang berbeda (15,20 dan 30 knots), sistem masih mampu melakukan redaman sudut guling namun nilai redaman tersebut tidak sebesar pada simulasi sebelumnya bahkan pada beberapa bagian sistem mengalami penguatan sudut guling (Gambar 5.40).



BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dengan *Model Reference Adaptive System* pada Sistem Stabilisasi Gerak Guling pada Kapal MONOSTAB 45, melalui pengujian dan analisis yang dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Desain simulasi pengendalian stabilisasi gerak guling dengan MRAS pada kondisi tanpa gangguan dengan *tuning* parameter pengendali $k_0 = 0,005$, $c_1 = -0,3$, dan $d_1 = -0,3$ sistem dapat mencapai kondisi mantap dengan nilai mendekati nol dalam waktu 8 detik, pada sinyal referensi sebesar 1,460465 volt.
2. Pada simulasi dengan gangguan, pengendali MRAS dapat mengatasi gangguan atau melakukan peredaman.
 - a. Pada pengujian dengan gangguan berupa sinyal *step* sebesar 60.000 Nm pada detik ke 40 sistem dengan pengendali MRAS dapat mengatasi gangguan dan kembali pada posisi sudut guling = 0 dalam waktu 80 detik.
 - b. Pada pengujian dengan gangguan berupa sinyal *step* sebesar 120.000 Nm pada detik ke 40 sistem dengan pengendali MRAS dapat melakukan redaman dan mencapai kondisi mantap dalam waktu 24 detik dengan sudut guling 0,03 rad.
 - c. Pada pengujian dengan gangguan berupa sinyal acak pada kisaran ± 90.000 Nm setiap 12 detik sistem dengan pengendali MRAS mampu melakukan redaman hingga sudut guling kapal 50% lebih kecil bila dibandingkan dengan sistem tanpa MRAS.
 - d. Pada pengujian dengan gangguan berupa pemodelan gelombang permukaan laut pada kecepatan angin 15, 20 dan 30 knot sistem dapat melakukan peredaman dengan baik sampai dengan kecepatan angin sebesar 20 knot namun pada kecepatan angin sebesar 30 knot sistem kadangkala tidak mampu melakukan peredaman.

6.2. Saran

1. Kemampuan sistem dalam melakukan proses stabilisasi gerak guling dibatasi oleh daerah kerja aktuator. Untuk meningkatkan kemampuan sistem maka perlu ditingkatkan sudut kerja dari sayap stabilisator atau dilakukan pengembangan desain profil sayap stabilisator yang mampu menghasilkan torsi yang lebih besar pada daerah kerja yang tetap.
2. Untuk pengembangan dan sebagai alternatif lain perancangan, dapat digunakan pengendali adaptif prediktif dan *adaptive dual control* karena kelebihanannya dalam hal optimasi dan estimasi parameter.



DAFTAR PUSTAKA

- Astrom, Karl Johan. 1989. *Adaptive Control*. Massachusetts. Addison-Wesley Publishing Company
- Derrett, Capt. D.R., Barrass, Dr C.B. 1999. *Ship Stability for Masters and Mates, Fifth Edition*. Oxford: Butterworth-Heinemann
- Dooling, D. 1996. *Smoother sailing [ship design and control]*: Spectrum, IEEE, vol. 33, no. 8 Agustus 1996
- El-Hawary, Ferial. 2000. *The Ocean Engineering Handbook*. Florida: CRC Press LLC
- Fortuna, Luigi & Giovanni Muscato. 1996. *A Roll Stabilization System of Monohull Ship: Modelling, Identification, and Adaptive Control*: IEEE transaction on Control System Technology, vol. 4, no. 1 Januari 1996
- Gunterus, Frans. *Falsafah Dasar: Sistem Pengendalian Proses*. 1994. Jakarta. Elex Media Komputindo
- Kridaaksama, Wien. 2004. *Desain Regulator Robust Pada Sistem Stabilisasi Gerak Roll Kapal MONOSTAB 45 Dengan Metode H_∞* . Skripsi. Tidak Diterbitkan. Malang : Jurusan Elektro FT Unibraw 2004
- Ogata, Katshuhiko. 1997. *Teknik Kontrol Automatik*. Jilid 1 dan 2, Jakarta: Penerbit Erlangga
- P. A. Ioannou and J. Sun. 1996. *Robust Adaptive Control*. New Jersey . Prentice Hall
- Passenier, P.O. 1989. *An Adaptive Track Predictor for ship*. Sint Laurens.
- Sastry, Shankar and Marc Bodson.1994. *Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness*. New Jersey. Prentice-Hall
- Stewart, Robert H. 2006. *Introduction to Physical Oceanography*. Texas. Departement of Oceanography Texas A & M University.
- Surendran, S., Lee, S.K., Kim, S.Y. 2000. *Studies on An Algorithm to Control the Roll Motion Using Active Fins*. Ocean Engineering 34 (2007)