



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI *AUTOPILOT* PADA
UNMANNED SURFACE VEHICLE TIPE MONOHULL
LSS01 MENGGUNAKAN *MODEL REFERENCE*
ADAPTIVE CONTROL -STATE FEEDBACK DALAM
KONTROL *WAYPOINT***

Fadli Rahmasari
NRP 07111745000055

Dosen Pembimbing
Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.
Nurlita Gamayanti, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

[Halaman ini sengaja dikosongkan]



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR -EE 184801

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI *AUTOPILOT* PADA
UNMANNED SURFACE VEHICLE TIPE MONOHULL
LSS01 MENGGUNAKAN *MODEL REFERENCE*
ADAPTIVE CONTROL -STATE FEEDBACK DALAM
KONTROL *WAYPOINT***

Fadli Rahmasari
NRP 07111745000055

Dosen Pembimbing
Ir. Rusdhianto Effendi AK., M.T
Nurlita Gamayanti.S.T., M.T

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

[Halaman ini sengaja dikosongkan]



FINAL PROJECT -EE 184801

***DESIGN OF AUTOPILOT AND GUIDANCE CONTROL
SYSTEMS ON UNMANNED SURFACE VEHICLE TYPE
MONOHULL LSS01 USING MODEL REFERENCE
ADAPTIVE CONTROL -STATE FEEDBACK IN
WAYPOINT CONTROL***

Fadli Rahmasari
NRP 07111745000055

Supervisor
Ir. Rusdhianto Effendi AK., M.T
Nurlita Gamayanti.S.T., M.T

***ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019***

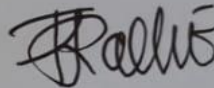
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**Perancangan Sistem Kendali *Autopilot* Pada *Unmanned Surface Vehicle* Tipe Monohull LSS01 Menggunakan *Model Reference Adaptive Control - State Feedback* dalam Kontrol *Waypoint*"** merupakan hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan – bahan yang tidak diijinkan dan buka merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 11 Juli 2019



Fadli Rahmasari
NRP 07111745000055

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI *AUTOPILOT* PADA
UNMANNED SURFACE VEHICLE TIPE MONOHULL LSS01
MENGUNAKAN *MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL-
STATE FEEDBACK* DALAM KONTROL *WAYPOINT***

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Ir. Rusdhianto Effendi AK., M.T
NIP.195704241985021001

Dosen Pembimbing II

Nurlita Gamayanti S.T., M.T
NIP.197812012002122002



[Halaman ini sengaja dikosongkan]

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI *AUTOPILOT* PADA
UNMANNED SURFACE VEHICLE TIPE *MONOHULL LSS01*
MENGUNAKAN *MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL-
STATE FEEDBACK* DALAM KONTROL *WAYPOINT***

Nama : Fadli Rahmasari
Pembimbing 1 : Ir. Rusdhianto Effendi AK.,M.T
Pembimbing 2 : Nurlita Gamayanti S.T.,M.T

ABSTRAK

Agar kapal tanpa awak dapat melaju secara otomatis, diperlukan perangkat-perangkat dan algoritma sistem *autopilot* dan navigasi *waypoint*. Sistem *autopilot* merupakan pengendalian kapal tanpa awak untuk menuju *waypoint*. Dan salah satu contoh algoritma navigasi adalah *waypoint* yang diinginkan, diperlukan kontrol sudut kemudi kapal yaitu gaya dorong dan sudut belok. Kapal tanpa awak dapat menemui gangguan eksternal saat sedang berjalan seperti ombak, angin dan arus laut. Namun diinginkan kapal tanpa awak saat beradaptasi di kedua kondisi tersebut. Salah satu cara untuk mengatasi gangguan ini adalah dengan merancang kontroler adaptif seperti *Model Reference Adaptive Control (MRAC)-state feedback*. MRAC adalah sistem kontrol adaptif berbasis referensi model. Dimana untuk mengatur perilaku plant kapal tanpa awak, diperlukan sebuah referensi model yang diinginkan controller MRAC-*state feedback*. Dengan menggunakan metode ini diharapkan kapal tanpa awak dapat melakukan pergerakan dengan akurat dari *waypoint* yang diharapkan. Kontroler MRAC-*statefeedback* mampu menghasilkan respon sudut *heading* kapal tanpa awak dan kecepatan pada sumbu *surge* sesuai dengan kriteria desain yang diinginkan. Dari simulasi yang dilakukan gain adaptif yang cocok untuk kapal tanpa awak LSS01 adalah 0,00001. Dan hasil pada saat kapal menuju *waypoint Cross track error* RMS saat tanpa gangguan 0,0846 dan saat diberi gangguan 0,2969.

Kata kunci : *kapal tanpa awak, waypoint, MRAC-state feedback*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

**DESIGN OF AUTOPILOT AND GUIDANCE CONTROL SYSTEMS
ON UNMANNED SURFACE VEHICLE TYPE MONOHULL LSS01
USING MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL - STATE
FEEDBACK IN WAYPOINT CONTROL**

Name : Fadli Rahmasari
Supervisor 1 : Ir. Rusdhianto Effendi AK.,M.T
Supervisor 2 : Nurlita Gamayanti S.T.,M.T

ABSTRACT

In order for an unmanned surface vehicle to run automatically, it takes the devices and algorithms of the autopilot system and waypoint navigation. The autopilot system is an unmanned surface vehicle towards the waypoint. And one example of a navigation algorithm is the desired waypoint, it requires control of the ship's steering angle namely thrust and turning angle. Unmanned surface vehicle can encounter external interference while walking such as waves, wind and ocean currents. But it is desirable to ship unmanned when adapting to both conditions. One way to overcome this interference is to design adaptive controllers such as the Model Reference Adaptive Control (MRAC) - state feedback. MRAC is a model-based adaptive control system. Where to regulate the behavior of unmanned ship plants, a reference to the desired model of the MRAC-state feedback controller is required. Using this method, it is expected that unmanned vessels can move accurately from the expected waypoint. The MRAC-statefeedback controller is able to produce angle response to unmanned vessel headings and speed on the surge axis according to the desired design criteria. From the simulation carried out the adaptive gain that is suitable for LSS01 unmanned surface vehicle is 0.00001. And the results when the ship headed waypoint Cross track RMS error when uninterrupted 0.0846 and when given a disturbance 0.2969

Keywords : *Unmanned Surface Vehicle, waypoint, MRAC-state feedback*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena berkat rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang merupakan persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan Sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan judul:

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI *AUTOPILOT* PADA
UNMANNED SURFACE VEHICLE TIPE *MONOHULL LSS01*
MENGUNAKAN *MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL*
-STATE FEEDBACK DALAM KONTROL *WAYPOINT***

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada seluruh pihak yang terlibat dan membantu menyelesaikan karya tulis ini. Oleh karena itu, ucapan terima kasih penulis sampaikan secara khusus kepada:

1. Allah SWT yang telah memberi rahmat-Nya dalam pembuatan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua dan keluarga yang telah memberikan dukungan penuh dan teladan bagi penulis.
3. Bapak Rusdhianto Effendi dan Bapak Nurlita Gamayanti sebagai pembimbing
4. Rekan – rekan Lintas Jalur angkatan 2017, terutama mahasiswa Teknik Sistem Pengaturan yang selalu menyemangati dan menemani
5. Pihak lain yang ikut membantu penulis tidak dapat disebutkan namanya satu-persatu

Semoga karya tulis ini dapat bermanfaat bagi penulis sendiri maupun bagi penelitian selanjutnya.

Surabaya, Juli 2019

Fadli Rahmasari
NRP 07111745000055

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan.....	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Batasan Masalah.....	2
1.5. Metodologi	3
1.6. Sistematika	3
1.7. Relevansi atau Manfaat	4
BAB 2	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Kapal Tanpa Awak & LSS-01.....	5
2.2 Model Matematis kapal Tanpa Awak Secara Umum [10]	5
2.3 Karakteristik Sistem Orde Pertama [6],[9]	14
2.4 <i>Feedback Linearization Decoupler</i>	18
2.5 Sistem Kendali Umpan Balik (<i>State Feedback</i>) [8].....	20
2.6 Sistem Pengaturan Adaptif [11]	22
2.7 <i>Model Reference Adaptive Control</i> (MRAC) [7],[11].....	24
2.8 <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE).....	26
BAB 3	29
PERANCANGAN SISTEM	29
3.1 Rancangan Umum Sistem.....	29
3.2 Model Matematika Kapal Tanpa Awak	30
3.3 Perancangan <i>Feedback Linearization Decoupler</i>	37
3.4 Perancangan Kontroler <i>MRAC-Statefeedback</i>	41

3.5 Perancangan Navigasi Waypoint	43
BAB 4	45
PENGUJIAN DAN ANALISIS	45
4.1 Gambaran Umum Pengujian Sistem	45
4.2 Pengujian plant kapal tanpa awak	45
4.3 Pengujian <i>Autopilot</i> dengan MRAC- <i>Statefeedback</i>	49
4.3.1 Pengujian respon kecepatan pada sumbu <i>surge</i> dengan MRAC- <i>Statefeedback</i>	50
4.3.2 Pengujian respon dari <i>yaw-plant</i> kapal dengan MRAC- <i>Statefeedback</i>	51
4.4 Pengujian <i>Waypoint</i> kontrol tanpa gangguan	53
4.5 Pengujian <i>Waypoint</i> Kontrol dengan gangguan	56
BAB 5	59
PENUTUP	59
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran	59
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN	63
RIWAYAT HIDUP	66

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi diagram dengan kerangka acuan body kapal <i>Obdan</i> kerangka acuan bumi <i>On</i> [10].....	6
Gambar 2.2 Diagram Blok Sistem Orde Pertama [6]	14
Gambar 2.3 Respon <i>Step</i> Sistem Orde Pertama untuk $K=1$ [6].....	15
Gambar 2.4 Respon <i>Step</i> Sistem Orde Pertama untuk $K\neq 1$ [6].....	16
Gambar 2.6 Karakteristik Sistem <i>Statefeedback</i> [8]	21
Gambar 2.7 Diagram Blok Model MRAC [11]	23
Gambar 2.8 Diagram Blok <i>Gain Scheduling</i> [11]	23
Gambar 2.9 Diagram Blok <i>Self-Tuning Regulators</i> [11]	24
Gambar 2.10 Blok Diagram MRAC[7].....	25
Gambar 3.1 Rancangan Validasi Kontroler <i>autopilot</i> dan <i>guidance</i> ..	29
Gambar 3.2 Diagram Simulink plant kapal tanpa awak beserta blok kemudi rudder	34
Gambar 3.3 Diagram simulink gangguan angin	36
Gambar 3.4 Diagram Simulink Gangguan Arus.....	36
Gambar 3.5 Diagram Simulink Gangguan Ombak.....	37
Gambar 3.6 Perancangan T_u dan T_r	39
Gambar 3.7 Blok Simulink MRAC & <i>State Feedback</i>	42
Gambar 3.8 Titik-titik Waypoint yang akan dilalui kapal tanpa Awak	44
Gambar 4.1 Respon <i>Open Loop</i>	46
Gambar 4.2 Respon kecepatan sumbu surge tanpa kontroler	47
Gambar 4.3 Respon heading kapal tanpa awak tanpa kontroler.....	48
Gambar 4.4 Respon kapal tanpa awak secara keseluruhan.....	48
Gambar 4.5 Respon posisi pergerakan kapal	49
Gambar 4.6 Respon Kecepatan surge kapal.....	50
Gambar 4.7 Respon yaw-plant kapal	52
Gambar 4.8 Respon posisi kontrol <i>waypoint</i> USV kontroller MRAC- <i>state feedback</i>	54
Gambar 4.9 Respon sudut <i>heading</i> USV dengan <i>waypoint navigation</i> tanpa gangguan	55
Gambar 4.10 Respon <i>crosstrack error</i> kapal tanpa awak dengan <i>waypoint navigation</i> melibatkan gangguan eksternal.....	55

Gambar 4.11 Respon posisi kontrol waypoint kapal tanpa awak menggunakan kontroler MRAC- <i>statefeedback</i>	57
Gambar 4.12 Respon sudut heading kapal tanpa awak dengan <i>waypoint navigation</i> melibatkan gangguan eksternal.....	57
Gambar 4.13 Respon cross track error kapal tanpa awak dengan <i>waypoint navigation</i> melibatkan gangguan eksternal.....	58

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Notasi SNAME untuk kapal [10]	6
Tabel 3.1 Parameter kapal tanpa awak	31
Tabel 3.2 Spesifikasi Desain Pengaturan Kecepatan <i>surge</i> USV	43
Tabel 3.3 Spesifikasi Desain Pengaturan Sudut Heading USV	43
Tabel 3.4 Titik waypoint yang harus dituju	43
Tabel 4.1 Tabel pengujian gain K untuk kecepatan <i>surge</i>	50
Tabel 4.2 Tabel pengujian gain K untuk kecepatan <i>surge</i>	52
Tabel 4.3 Tabel besaran dan arah gangguan akibat pengaruh lingkungan	56

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Yang dimaksud dengan kapal tanpa awak adalah kapal yang memiliki kemampuan untuk melaju tanpa ada nahkoda pada kapal tersebut. Kapal dapat berjalan secara manual dengan kendali jarak jauh, atau kapal dapat melaju semi otomatis dalam pantauan operator [1]. Besarnya potensi bawah laut perairan Indonesia memerlukan perhatian khusus baik dalam hal eksplorasi maupun penjagaan kapal tanpa awak sangat berguna untuk membantu kegiatan manusia salah satunya membantu militer dalam mengawasi wilayah perairan di Indonesia [3],[4].

Ada berbagai macam bentuk USV, ukuran, konfigurasi dan karakteristik. Secara historis USV pada awalnya dibuat dengan sangat sederhana dan akhirnya dikontrol secara otonom (*autonomous*) semakin banyak diproduksi dan digunakan. Saat ini, USV telah digunakan untuk melakukan misi intelejen pemantauan (*surveillance*), pengintaian (*reconnaissance*) serta misi serangan (*attack*). Banyak dilaporkan bahwa USV telah berhasil dengan tingkat akurasi tinggi dalam melakukan misi intelejen, pemantauan, pengintaian, dan serangan dengan menggunakan roket, rudal dan bom. USV sendiri lebih disukai untuk misi yang terlalu membosankan dan berbahaya atau berisiko tinggi bagi kapal berawak [4].

Agar sebuah kapal tanpa awak dapat bergerak, diperlukan perangkat propulsi atau perangkat penggerak. Salah satu tipe propulsi adalah *fix pitch propeller* menggunakan motor listrik tipe BLDC dan *rudder* sebagai perangkat kemudi.

Penerapan sistem *autopilot* pada USV monohull dapat menjadikannya kendaraan yang handal dan dapat beroperasi secara otomatis sesuai program yang telah ditanam di dalamnya sehingga dapat dimanfaatkan untuk beberapa keperluan khusus. Keberadaan USV diharapkan dapat memberikan kontribusi lebih dalam menangani masalah pertahanan, pengawasan, penyelamatan, ataupun misi penyerangan.

Supaya kapal tanpa awak dapat melaju secara otomatis, diperlukan perangkat-perangkat dan algoritma navigasi. Salah satu contoh algoritma navigasi adalah *waypoint* [2]. *Waypoint* adalah sebuah titik atau koordinat yang berada pada ruang fisik dimana merupakan titik yang akan dituju oleh sebuah objek. Sudut arah tujuan menuju *waypoint* dapat

dihitung dengan memanfaatkan posisi kapal tanpa awak dan koordinat *waypoint*.

Untuk mengendalikan sebuah kapal tanpa awak menuju *waypoint* yang diinginkan, diperlukan kontrol sudut kemudi kapal. Kapal tanpa awak dapat menemui gangguan eksternal saat sedang berjalan seperti ombak, angin, dan arus laut. Aksi kontrol yang diperlukan ketika kapal tanpa awak berjalan tanpa gangguan pastinya berbeda. Namun diinginkan kapal tanpa awak dapat beradaptasi di kedua kondisi tersebut.

Salah satu cara untuk mengatasi gangguan ini adalah dengan merancang controller adaptive seperti *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) - *state feedback* [5] dan. MRAC adalah sistem kontrol adaptive berbasis *reference* model [11]. Dimana untuk mengatur perilaku *plant*, diperlukan sebuah referensi model yang diinginkan. Kontroler MRAC-*state feedback* akan menyesuaikan respon *plant* sedekat mungkin dengan respon referensi model yang diinginkan.

1.2. Permasalahan

Kapal tanpa awak menggunakan pendekatan *3 degree of freedom* (derajat kebebasan) untuk *autopilot* dan navigasi *waypoint*. Kapal mampu bergerak maju pada sumbu *surge, sway* dan *yaw* dengan batasan tertentu. Untuk mengarahkan kapal tanpa awak menuju suatu *waypoint* dapat dilakukan dengan mengatur sudut kemudi kapal. Namun gangguan eksternal berupa arus, angin dan ombak dapat mempengaruhi arah laju kapal tanpa awak.

1.3. Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah mendesain sistem kontrol *autopilot* pada USV model monohull dengan metode *waypoint tracking control* menggunakan controller MRAC-*state feedback* supaya dapat melewati *waypoint* yang telah ditentukan .

1.4. Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut,

1. Ada dua variabel kontrol yaitu kecepatan arah sumbu *surge* dan *yaw*
2. Navigasi *waypoint* bekerja pada bidang planar
3. Bentuk pengaruh gangguan arus dan ombak berupa pendekatan
4. Kecepatan merupakan variabel yang dikontrol

1.5. Metodologi

Dalam pengerjaan tugas akhir ini metodologi yang pertama dilaksanakan dengan studi literatur. Studi literatur berguna untuk mencari informasi atau data mengenai plant, kontroller, atau sistem secara keseluruhan. Studi literatur dilakukan dengan membaca buku dan paper yang mendukung untuk pengerjaan tugas akhir ini dalam hal materi, konsep, algoritma, dan data. Studi literatur ini akan menjadi dasar dalam mencari dinamika gerak kapal tanpa awak monohoull dan merancang kontroler yang diperlukan.

Kemudian yang dilakukan setelah mendapatkan model matematis dari dinamika gerak kapal tanpa awak monohoull, maka selanjutnya adalah eksperimen untuk memperoleh dinamika kapal secara *open-loop* dan mengetahui karakteristik sistem kapal tanpa awak monohoull. Respon *open-loop* ini selanjutnya yang akan menjadi acuan dalam merancang kontroler dengan kriteria performansi tertentu dengan MRAC-*Statefeedback* untuk *tracking*.

Untuk selanjutnya setelah metode MRAC-*Statefeedback* telah dirancang, tahap berikutnya adalah pengujian kontroler untuk melakukan aksi kontrol kemudi kapal tanpa awak dan *tracking* untuk tugas yang sama. Terakhir yaitu menganalisa kontroler MRAC-*Statefeedback* tersebut yang memberikan performa lebih baik pada kapal tanpa awak jenis monohoull.

Setelah didapat hasil pengujian, dilakukan penyusunan laporan tugas akhir yang berisi tentang seluruh kegiatan yang telah dilakukan selama tugas akhir ini.

1.6. Sistematika

Penulisan Tugas Akhir ini disusun berdasarkan lima bab yang tiap bagiannya membahas permasalahan yang berhubungan dengan Tugas Akhir.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini meliputi latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, metodologi penelitian, sistematika laporan dan relevansi.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini , dijabarkan teori-teori penunjang dan teori dasar yang akan menjadi acuan dalam melaakukan tugas akhir ini. Isi bab ini meliputi tinjauan pustaka dan daar teori mengenai kapal tanpa awak, kontroler MRAC-*state feedback* dan navigasi *waypoint*.

BAB III PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini dijelaskan langkah langkah merancang model matematis kapal tanpa awak, perancangan kontroler *state feedback*, dan perancangan navigasi *waypoint*.

BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISA

Pada bab ini di tampilkan hasil simulasi pengujian dari sistem yang sudah dirancang. Pengujian terdiri dari pengujian plant kapal tanpa awak, pengujian kontroler MRAC- *state feedback*

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini dijelaskan kesimpulan yang dapat di ambil dari hasil pengujian-pengujian yang telah dilakukan dan pemberian saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya

1.7. Relevansi atau Manfaat

Hasil dari pelaksanaan tugas ahkir ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai salah satu referensi untuk penelitian-penelitian yang akan datang mengenai kontroler MRAC- *state feedback* pada kapal tanpa awak.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Kegiatan penelitian dan perancangan merupakan hasil mengkaji teori-teori yang sudah ada sebelumnya. Seluruh teori yang digunakan kemudian disajikan untuk memperkuat argumen penulis dalam penelitian ini

Pada Bab ini, berisi tentang teori penunjang dari berbagai pustaka atau literatur seperti buku dan paper yang mendukung penelitian ini. Teori penunjang pada Bab ini meliputi

2.1 Kapal Tanpa Awak & LSS-01

Yang dimaksud dengan kapal tanpa awak adalah kapal yang memiliki kemampuan untuk melaju tanpa ada nahkoda pada kapal tersebut. Kapal dapat berjalan secara manual dengan kendali jarak jauh. Kapal dapat melaju semi otomatis dalam pantauan operator. Kapal dapat melaju secara otomatis penuh tanpa pantauan operator [1].

Saat ini, USV telah digunakan untuk melakukan misi intelejen pemantauan (*surveillance*), pengintaian (*reconnaissance*) serta misi serangan (*attack*). Untuk tujuan yang berbeda, maka USV perlu dilengkapi peralatan yang berbeda juga. Contohnya, USV yang digunakan untuk mengintai memerlukan warna yang tidak mencolok, kamera, dan lapisan luar yang bisa membuat USV tembus pandang jika diperlukan. Sedangkan untuk pemetaan kontur bawah air diperlukan USV yang menggunakan sonar untuk mengidentifikasi kontur bawah air.

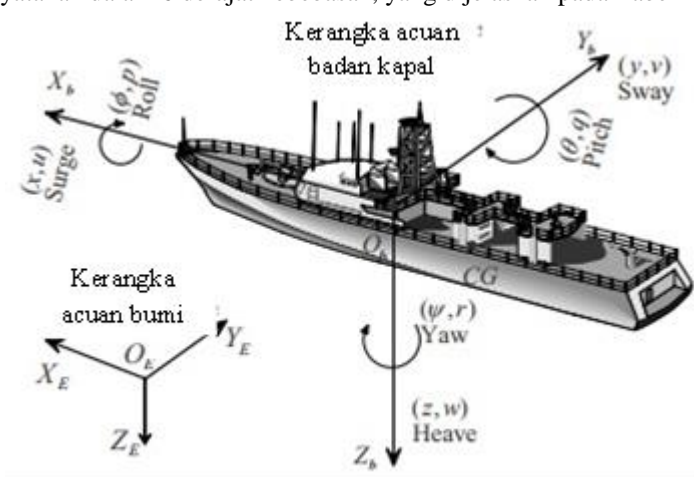
Dan kapal tanpa awak LSS-01 adalah nama USV *monohull* yang dimiliki oleh Laboratorium Sistem dan Sibernetika Teknik Elektro ITS yang digunakan untuk pengambilan data dan sebagai objek parameter pada penelitian ini. USV ini menggunakan thruster sebagai propulsi atau mesin penggerak dan *rudder* sebagai mesin kemudi. Mesin *thruster* digunakan untuk memberi gaya dorong kepada kapal, dan kemudi digunakan untuk mengatur arah kapal untuk melaju. USV ini memiliki propulsi yang digerakkan oleh motor BLDC, penggerak rudder berupa motor servo, dan sistem penerima perintah, pemberi perintah ke penggerak kapal, dan alat untuk menyimpan data yang berupa *Pixhawk Cube*.

2.2 Model Matematis kapal Tanpa Awak Secara Umum [10]

Untuk memodelkan gerakan benda kaku pada suatu kapal, sejumlah kerangka acuan harus ditentukan. Dalam pemodelan Halcyon, dua kerangka acuan digunakan: kerangka acuan bodi kapal yang disebut

sebagai *b-frame*, dan kerangka referensi *North-East-Down* (NED) yang disebut sebagai *n-frame*.

b-frame memiliki titik acuan pada bodi kapal yang mana memiliki titik origin O_b . Sedangkan *n-frame* memiliki titik acuan pada bumi yang mana memiliki titik origin di O_n . Pergerakan Kapal Tanpa Awak umum dinyatakan dalam 6 derajat kebebasan, yang dijelaskan pada Tabel 1.



Gambar 2.1 Ilustrasi diagram dengan kerangka acuan body kapal O_b dan kerangka acuan bumi O_n [10]

Tabel 2.1 Notasi SNAME untuk kapal [10]

Derajat Kebebasan	Deskripsi	Gaya dan Momen	Kecepatan Linier dan Kecepatan Sudut	Posisi dan Sudut Euler
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

Variabel derajat kebebasan USV umum dapat dinyatakan dengan vektor – vektor berikut :

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{\eta} &= [\boldsymbol{\eta}_1 \ \boldsymbol{\eta}_2]^T, & \boldsymbol{\eta}_1 &= [x \ y \ z]^T, & \boldsymbol{\eta}_2 &= [\phi \ \theta \ \psi]^T \\
\boldsymbol{v} &= [\boldsymbol{v}_1 \ \boldsymbol{v}_2]^T, & \boldsymbol{v}_1 &= [u \ v \ w]^T, & \boldsymbol{v}_2 &= [p \ q \ r]^T \\
\boldsymbol{\tau} &= [\boldsymbol{\tau}_1 \ \boldsymbol{\tau}_2]^T, & \boldsymbol{\tau}_1 &= [X \ Y \ Z]^T, & \boldsymbol{\tau}_2 &= [K \ M \ N]^T
\end{aligned}$$

dimana,

$\boldsymbol{\eta}$: vektor posisi dan orientasi pada kerangka acuan bumi (*earth-fixed*)

\boldsymbol{v} : vektor kecepatan linier dan kecepatan sudut pada kerangka acuan badan kapal (*body-fixed*)

$\boldsymbol{\tau}$: gaya dan momen yang bekerja pada USV pada kerangka acuan badan kapal (*body-fixed*)

Model matematika USV dinyatakan sebagai berikut :

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = J(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{v} \quad (2.1)$$

$$M\dot{\boldsymbol{v}} = -C(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} - D(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} - g(\boldsymbol{\eta}) + \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_E \quad (2.2)$$

dimana

$$M = M_{RB} + M_A \quad (2.3)$$

$$C(\boldsymbol{v}) = C_{RB}(\boldsymbol{v}) + C_A(\boldsymbol{v}) \quad (2.4)$$

$$D(\boldsymbol{v}) = D + D_n(\boldsymbol{v}) \quad (2.5)$$

$$\boldsymbol{\tau}_E = \boldsymbol{\tau}_E^{cu} + \boldsymbol{\tau}_E^{wa} + \boldsymbol{\tau}_E^{wi} \quad (2.6)$$

dengan

$$J = \begin{bmatrix} J_1(\boldsymbol{\eta}_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$J_1(\boldsymbol{\eta}_2)$ dan $J_2(\boldsymbol{\eta}_2)$ adalah matrix transformasi yang berhubungan dengan fungsi sudut euler : Roll(Φ), Pitch (θ), dan Yaw (ψ) yang didefinisikan sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
& J_1(\boldsymbol{\eta}_2) \\
& = \begin{bmatrix} \cos(\psi) \cos(\theta) & -\cos(\psi) \cos(\Phi) + \sin(\Phi) \sin(\theta) \cos(\psi) & \\ \sin(\psi) \cos(\theta) & \cos(\psi) \cos(\Phi) + \sin(\Phi) \sin(\theta) \sin(\psi) & \\ -\sin(\theta) & \sin(\Phi) \cos(\theta) & \\ \sin(\psi) \sin(\Phi) + \sin(\theta) \cos(\psi) \cos(\Phi) & & \\ -\cos(\psi) \sin(\Phi) + \sin(\theta) \sin(\psi) \cos(\Phi) & & \\ \cos(\Phi) \cos(\theta) & & \end{bmatrix} \quad (2.8)
\end{aligned}$$

$$J_2(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\Phi) \tan(\theta) & \cos(\Phi) \tan(\psi) \\ 0 & \cos(\Phi) & -\sin(\Phi) \\ 0 & \frac{\sin(\Phi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\Phi)}{\cos(\theta)} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

\mathbf{M}_{RB} dan \mathbf{M}_A masing – masing adalah matriks inersia dari sistem *rigid body* dan matrik massa tambahan yang didefinisikan sebagai berikut,

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_g & -I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{M}_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})$ dan $\mathbf{C}_A(\mathbf{v})$ masing – masing adalah matriks *centripetal* dan *coriolis* dari *rigid body* dan hidrodinamik yang didefinisikan sebagai berikut,

$$\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_g q + z_g r) & m(y_g p + w) & m(z_g p - v) & \dots \\ m(x_g q - w) & -m(z_g r + x_g p) & m(z_g q - u) \\ m(x q + v) & m(y_g r - u) & -m(x_g p + y_g q) \\ m(y_g q + z_g r) & -m(x_g q - w) & -m(x q + v) \\ -m(y_g p + w) & m(z_g r + x_g p) & -m(y_g r - u) \\ -m(z_g p - v) & -m(z_g q - u) & m(x_g p + y_g q) \\ 0 & -I_{yz} q - I_{xz} p + I_z r & I_{yz} r + I_{xy} p - I_y q \\ I_{xz} q + I_{xz} p - I_z r & 0 & -I_{xz} r - I_{xy} q + I_x p \\ -I_{yz} r - I_{xy} p + I_y q & I_{xz} r + I_{xy} q - I_x p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$C_A(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$a_1 = X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r \quad (2.14)$$

$$a_2 = Y_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r \quad (2.15)$$

$$a_3 = Z_{\dot{u}}u + Z_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r \quad (2.16)$$

$$b_1 = K_{\dot{u}}u + K_{\dot{v}}v + K_{\dot{w}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r \quad (2.17)$$

$$b_2 = M_{\dot{u}}u + M_{\dot{v}}v + M_{\dot{w}}w + M_{\dot{p}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r \quad (2.18)$$

$$b_3 = N_{\dot{u}}u + N_{\dot{v}}v + N_{\dot{w}}w + N_{\dot{p}}p + N_{\dot{q}}q + N_{\dot{r}}r \quad (2.19)$$

\mathbf{D} dan $\mathbf{D}_n(\mathbf{v})$ masing – masing adalah matrik damper linier dan matrik damper nonlinier. Matrik damper nonlinier $\mathbf{D}_n(\mathbf{v})$ biasanya dimodelkan menggunakan ekspansi seri Taylor orde tiga atau fungsi modulus.

$$\mathbf{D} = - \begin{bmatrix} X_u & X_v & X_w & X_p & X_q & X_r \\ Y_u & Y_v & Y_w & Y_p & Y_q & Y_r \\ Z_u & Z_v & Z_w & Z_p & Z_q & Z_r \\ K_u & K_v & K_w & K_p & K_q & K_r \\ M_u & M_v & M_w & M_p & M_q & M_r \\ N_u & N_v & N_w & N_p & N_q & N_r \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ adalah gaya dan momen yang diakibatkan oleh grafitasi dan daya apung, dapat ditulis sebagai berikut :

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} (W - B)\sin(\theta) \\ -(W - B)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ -(W - B)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ -(y_gW - y_bB)\cos(\theta)\cos(\phi) + (z_gW - z_bB)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ (z_gW - z_bB)\sin(\theta) + (x_gW - x_bB)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ -(x_gW - x_bB)\cos(\theta)\sin(\phi) + (y_gW - y_bB)\sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Dimana (x_b, y_b, z_b) dinotasikan sebagai koordinat dari titik tengah apung (CB).

$\tau_E^{cu}, \tau_E^{wa}, \tau_E^{wi}$ secara berurutan adalah gaya dan momen dari induksi arus laut, ombak dan angin yang didefinisikan sebagai berikut.

- Gaya dan momen dari arus laut (τ_E^{cu})

$$\tau_E^{cu} = (M_{RB} + M_A)\dot{v}_c + C(v_r)v_r - C(v)v + D(v_r)v_r - D(v)v \quad (2.22)$$

Dimana $v_r = v - v_c$ dan $v_c = [u_c \ v_c \ w_c \ 0 \ 0 \ 0]^T$ adalah vektor dari kecepatan arus *body-fixed* yang tidak berotasi. Sedangkan vektor kecepatan arus dari *earth-fixed* didenotasikan sebagai $[u_c^E \ v_c^E \ w_c^E]^T$. Maka komponen *body-fixed* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ w_c \end{bmatrix} = J_1^T(\eta_2) \begin{bmatrix} u_c^E \\ v_c^E \\ w_c^E \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

- Gaya dan momen dari Induksi Ombak (τ_E^{wa})

$$\tau_E^{wa} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \rho g B L T \cos(\beta) s_i(t) \\ \sum_{i=1}^N -\rho g B L T \sin(\beta) s_i(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sum_{i=1}^N \frac{1}{24} \rho g B L (L^2 - B^2) \sin(2\beta) s_i^2(t) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Dimana β adalah sudut datang kapal, lihat gambar 3.3, ρ adalah kepadatan air, L adalah panjang kapal, B adalah lebar kapal, dan T adalah tinggi kapal. Dengan mengabaikan syarat orde tinggi untuk ombak, kemiringan ombak $s_i(t)$ didefinisikan sebagai berikut:

$$s_i(t) = A_i \frac{2\pi}{\lambda_i} \sin(\omega_{ei}t + \phi_i) \quad (2.25)$$

Dimana A_i adalah amplitudo ombak, λ_i adalah panjang ombak, ω_{ei} adalah frekuensi terpaan, dan ϕ_i adalah sudut fasa acak yang terdistribusi uniform dan konstan terhadap waktu di $(0 \ 2\pi)$ yang berhubungan dengan komponen ombak i .

- Gaya dan Momen dari Induksi Angin (τ_E^{wi})

$$\tau_E^{wi} = \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 \begin{bmatrix} C_x(\gamma_w) A_{FW} \\ C_y(\gamma_w) A_{LW} \\ C_z(\gamma_w) A_{FW} \\ C_K(\gamma_w) A_{LW} H_{LW} \\ C_M(\gamma_w) A_{FW} H_{FW} \\ C_N(\gamma_w) A_{LW} H_{LW} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Dimana V_w adalah kecepatan angin, ρ_a adalah kerapatan udara, A_{FW} adalah area proyeksi dari depan, A_{LW} area proyeksi dari samping, H_{FW} adalah titik tengah dari A_{FW} di atas garis air, H_{LW} adalah titik tengah dari A_{LW} di atas garis air, L_{OA} adalah panjang keseluruhan dari kapal, dan γ_w adalah sudut relatif angin yang menghempas kapal.

$$\gamma_w = \psi - \beta_w - \pi \quad (2.27)$$

Dengan β_w adalah arah angin. $C_x(\gamma_w)$, $C_y(\gamma_w)$, $C_z(\gamma_w)$, $C_K(\gamma_w)$, $C_M(\gamma_w)$ dan $C_N(\gamma_w)$ adalah koefisien angin. [2]

Pada penelitian ini, digunakan asumsi sebagai berikut untuk pemodelan USV :

- Gerakan pada roll, pitch, dan heave diabaikan.
- Kapal memiliki distribusi massa homogen dan simetri pada bidang-xz sehingga $I_{xy} = I_{yz} = 0$.
- Titik tengah gaya gravitasi dan titik tengah daya apung terletak secara vertical pada sumbu-z.

Dengan 3 asumsi diatas, maka pemodelan USV menjadi sebagai berikut :

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (2.28)$$

$$M\dot{v} = -C(v)v - (D + D_n(v))v + \tau + \tau_E \quad (2.29)$$

Dengan,

$$\eta = [x \ y \ \psi]^T \quad (2.30)$$

$$v = [u \ v \ r]^T \quad (2.31)$$

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{u}} & 0 \\ 0 & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ m(x_g r + v) - Y_{\dot{v}} v - Y_{\dot{r}} r & -mu + X_{\dot{u}} u & \dots \\ -m(x_g r + v) + Y_{\dot{v}} v + Y_{\dot{r}} r \\ mu - X_{\dot{u}} u \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$D = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{r}} \\ 0 & N_{\dot{v}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$D_n(v) = - \begin{bmatrix} X_{|u|u}|u| & 0 \\ 0 & Y_{|v|v}|v| + Y_{|r|v}|r| \dots \\ 0 & N_{|v|v}|v| + N_{|r|v}|r| \\ 0 \\ Y_{|v|r}|v| \\ N_{|v|r}|v| + N_{|r|r}|r| \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_u \\ 0 \\ \tau_r \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$\tau_E = \begin{bmatrix} \tau_{uE} \\ \tau_{vE} \\ \tau_{rE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{uE}^{cu} + \tau_{uE}^{wa} + \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_x(\gamma_w) A_{FW} \\ \tau_{vE}^{cu} + \tau_{vE}^{wa} + \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_y(\gamma_w) A_{LW} \\ \tau_{rE}^{cu} + \tau_{rE}^{wa} + \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_N(\gamma_w) A_L W L_{OA} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Dimana,

- η : Vektor posisi dan orientasi pada kerangka acuan bumi
- v : Vektor kecepatan translasi dan kecepatan sudut pada kerangka acuan badan kapal
- $J(\eta)$: Matrik transformasi
- M : Penjumlahan matrik massa rigid body dan massa tambahan
- $C(v)$: Penjumlahan matriks centripetal dan coriolis dari rigid body dan hidrodinamik
- D : Matrik damper linier

- $D_n(v)$: Matrik damper nonlinier
 τ : Matrik gaya dan momen yang bekerja USV Trimaran
 τ_E : Vektor gaya dan momen dari induksi arus laut, ombak dan angin

Dari persamaan diatas, dengan mengabaikan gangguan eksternal maka didapatkan persamaan matematika per sumbu koordinat sebagai berikut :

$$\dot{u} = \frac{(m - Y_{\dot{v}})}{(m - X_{\dot{u}})} vr - \frac{X_u}{(m - X_{\dot{u}})} u - \frac{X_{|u|u}}{(m - X_{\dot{u}})} |u|u + \frac{1}{(m - X_{\dot{u}})} \tau_u \quad (2.39)$$

$$\dot{v} = \frac{(X_{\dot{u}} - m)}{(m - Y_{\dot{v}})} ur - \frac{Y_v}{(m - Y_{\dot{v}})} v - \frac{Y_{|v|v}}{(m - Y_{\dot{v}})} |v|v - \frac{Y_{|r|v}}{(m - Y_{\dot{v}})} |r|v - \frac{Y_{|v|r}}{(m - Y_{\dot{v}})} |v|r \quad (2.40)$$

$$\dot{r} = \frac{(Y_{\dot{v}} - X_{\dot{u}})}{(I_z - N_{\dot{r}})} uv - \frac{N_r}{(I_z - N_{\dot{r}})} r - \frac{N_{|v|v}}{(I_z - N_{\dot{r}})} |v|v - \frac{N_{|r|v}}{(I_z - N_{\dot{r}})} |r|v - \frac{N_{|v|r}}{(I_z - N_{\dot{r}})} |v|r - \frac{N_{|r|r}}{(I_z - N_{\dot{r}})} |r|r + \frac{1}{(I_z - N_{\dot{r}})} \tau_r \quad (2.41)$$

Persamaan diatas dapat ditulis sebagai berikut :

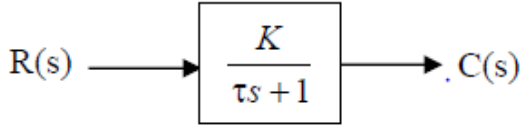
$$f1 = A(1)vr - A(2)u - A(3)|u|u + A(4)\tau_u \quad (2.44)$$

$$f2 = A(5)ur - A(6)v - A(7)|v|v - A(8)|r|v - A(9)|v|r \quad (2.45)$$

$$f3 = -A(10)|v|v - A(11)|r|v - A(12)|v|r - A(13)|r|r - A(14)r + A(15)\tau_r + A(16)uv \quad (2.46)$$

2.3 Karakteristik Sistem Orde Pertama [6],[9]

Model matematika dari sistem orde pertama dapat dinyatakan dalam bentuk diagram blok seperti berikut ini.



Gambar 2.2 Diagram Blok Sistem Orde Pertama [6]

Dimana $R(s)$ dan $C(s)$ masing-masing adalah sinyal masukan dan sinyal keluaran sistem orde pertama dalam domain s . Fungsi alih *loop* tertutup (*Closed Loop Transfer Function*) sistem orde pertama dapat dituliskan pada Persamaan (2.45) dimana K adalah *gain overall* dan τ adalah konstanta waktu.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.45)$$

Selanjutnya dibahas mengenai analisis respon sistem orde pertama untuk sinyal *step*. Dalam bahasan ini, diasumsikan bahwa syarat awalnya adalah nol. Untuk masukan *unit step*, $r(t) = 1u(t) \rightarrow R(s) = 1/s$, maka keluaran sistem orde pertama dalam domain s adalah:

$$C(s) = \frac{A}{s} + \frac{B}{s + \frac{1}{\tau}} \quad (2.46)$$

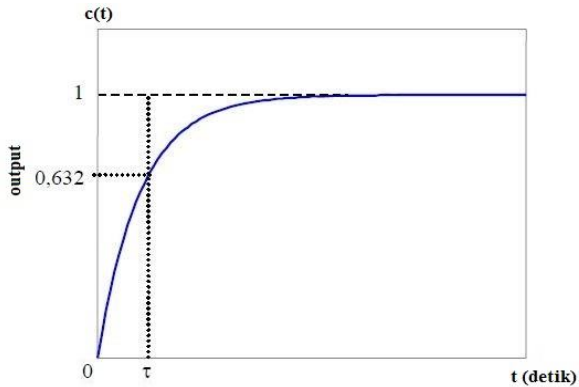
$$A = \frac{K/\tau}{s + 1/\tau} \Big|_{(s=0)} = K$$

$$B = \frac{K/\tau}{s} \Big|_{(s=-1/\tau)} = -K$$

$$C(s) = K \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{\tau}} \right) \quad (2.47)$$

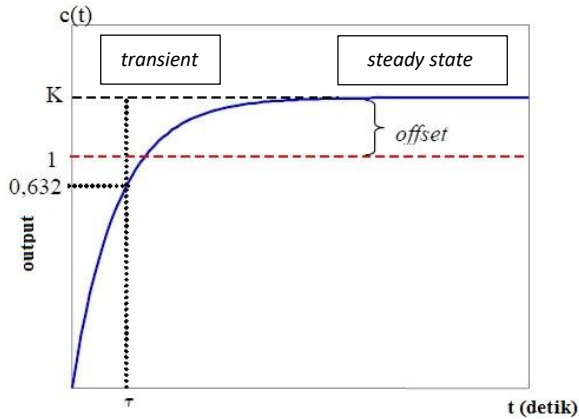
Dengan menggunakan transformasi laplace invers pada Persamaan (2.46) diperoleh Persamaan (2.47).

$$c(t) = K \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}t} \right) \quad t \geq 0 \quad (2.48)$$



Gambar 2.3 Respon *Step* Sistem Orde Pertama untuk $K=1$ [6]

Gambar 2.3 merupakan kurva dari Persamaan (2.48). Kurva keluaran $c(t)$ mula-mula nol kemudian akhirnya menjadi sama dengan 1. Salah satu karakteristik penting dari kurva respon eksponensial $c(t)$ tersebut adalah bahwa pada $t = \tau$ harga $c(t)$ adalah 0,632 atau respon $c(t)$ telah mencapai 63,2% perubahan totalnya. Tampak pada kurva tidak terdapat *offset*, sehingga untuk $K = 1$ sistem ini merupakan sistem orde pertama *zero offset*. Untuk nilai $\neq 1$, Persamaan (2.48) digambarkan oleh Gambar 2.3.

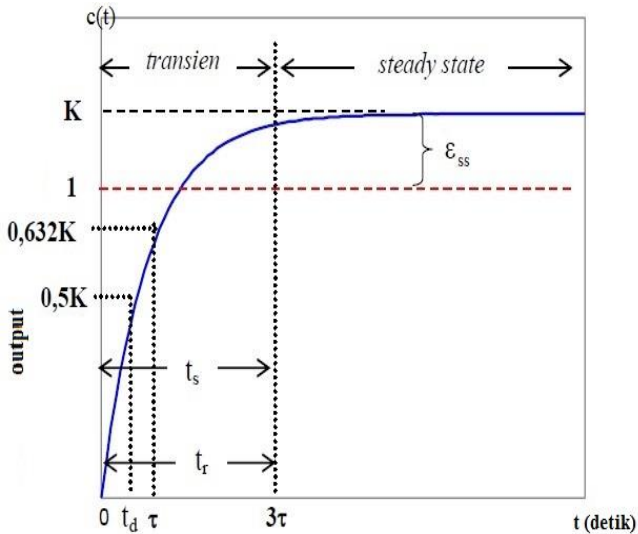


Gambar 2.4 Respon *Step* Sistem Orde Pertama untuk $K \neq 1$ [6]

Kurva keluaran $c(t)$ mula-mula bernilai nol kemudian akhirnya menjadi sama dengan K . Pada nilai $t = \tau$ harga $c(t)$ adalah $0,632K$. Tampak pada kurva terdapat *offset*, sehingga untuk $K \neq 1$ sistem ini merupakan sistem orde pertama *nonzero offset*. *Offset* adalah *error* sistem pada keadaan tunak (*steady state*) atau biasa disebut dengan *error steady state* (e_{ss}). Besarnya *offset* atau *error steady state* dari sistem orde pertama terhadap masukan sinyal step dapat dituliskan sebagai Persamaan (2.49).

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = 1 - K \quad (2.49)$$

Karakteristik respon waktu untuk sistem orde pertama diberikan berdasarkan respon sistem terhadap masukan sinyal *step*. Karakteristik respon waktu sistem orde pertama dibedakan menjadi karakteristik respon *transient* dan karakteristik respon keadaan tunak atau *steady state* yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.5 Karakteristik Sistem Orde Pertama [6]

Karakteristik respon transien sistem orde pertama terdiri dari spesifikasi teoritis dan spesifikasi praktis. Spesifikasi teoritis konstanta waktu (τ) adalah waktu yang dibutuhkan respon mulai $t=0$ sampai dengan respon mencapai 63,2% dari respon *steady state*. Konstanta waktu menyatakan kecepatan respon sistem. Konstanta waktu yang kecil akan mempercepat respon sistem.

Spesifikasi praktis sistem orde pertama terdiri dari waktu tunak atau *setting time*, waktu naik atau *rise time*, dan waktu tunda atau *delay time*.

1. Waktu tunak atau *settling time* (t_s) adalah ukuran waktu yang menyatakan bahwa respon sistem telah masuk pada daerah stabil (dapat dianggap stabil). Jika dihubungkan dengan konstanta waktu, maka nilai t_s dapat diformulasikan menjadi Persamaan (2.50) untuk 5%, Persamaan (2.51) untuk 2%, dan Persamaan (2.52) untuk 0,5%.

$$t_s(\pm 5\%) \approx 3\tau \quad (2.50)$$

$$t_s(\pm 2\%) \approx 4\tau \quad (2.51)$$

$$t_s(\pm 0,5\%) \approx 5\tau \quad (2.52)$$

2. Waktu naik atau *rise time* (t_r) adalah waktu yang menyatakan bahwa respon sistem telah naik dari 5% ke 95% yang dinyatakan oleh Persamaan (2.53) atau 10% ke 90% yang dinyatakan oleh Persamaan (2.54) dari nilai respon pada keadaan tunak (*steady state*).

$$t_r(5\% - 95\%) = \tau \ln 19 \quad (2.53)$$

$$t_r(10\% - 90\%) = \tau \ln 9 \quad (2.54)$$

3. Waktu tunda adalah waktu yang dibutuhkan respon mulai $t=0$ sampai respon mencapai 50% dari nilainya pada keadaan tunak (*steady state*). Waktu tunda menyatakan besarnya faktor keterlambatan respon akibat proses *sampling*. Jika dihubungkan dengan konstanta waktu maka nilai waktu tunda dapat diformulasikan menjadi Persamaan (2.55).

$$t_d = \tau \ln 2 \quad (2.55)$$

Karakteristik respon keadaan tunak (*steady state*) sistem orde pertama diukur berdasarkan kesalahan pada keadaan tunak atau *error steady state* (e_{ss}). Besarnya kesalahan pada keadaan tunak dapat dituliskan dengan Persamaan (2.56).

$$e_{ss} = C_{ss} - R_{ss} \quad (2.56)$$

Dimana C_{ss} dan R_{ss} masing-masing adalah keluaran dan masukan sistem pada keadaan tunak yang besarnya dapat dituliskan dengan Persamaan (2.57) dan Persamaan (2.58). Dengan nilai *error steady state* pada Persamaan (2.59)

$$C_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} c(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sC(s) = K \quad (2.57)$$

$$R_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sR(s) = 1 \quad (2.58)$$

$$e_{ss} = 1 - K \quad (2.59)$$

2.4 Feedback Linearization Decoupler

Sistem dibagi menjadi dua bagian berdasarkan sifat linearitasnya, yaitu sistem linear dan sistem *non-linear*. Sistem linier adalah sistem yang memenuhi hukum superposisi. Prinsip superposisi adalah respon

sistem (keluaran) terhadap jumlah bobot sinyal akan sama dengan jumlah bobot yang sesuai dari respon (keluaran) sistem terhadap masing-masing sinyal masukan individual. Sedangkan sistem *non-linear* adalah suatu sistem yang sifatnya tidak tetap, mudah berubah, sulit dikontrol, dan sulit diprediksi. Selain itu, sistem *non-linear* memiliki perilaku kualitatif, yaitu mempunyai nilai ekuilibrium lebih dari satu.

Feedback linearization adalah pendekatan umum yang digunakan dalam mengendalikan sistem *non-linear*. Pendekatan ini melibatkan transformasi sistem *non-linear* menjadi sistem linier ekuivalen melalui perubahan variabel dan masukan kontrol yang sesuai.

Umpan balik dapat diterapkan pada sistem *non-linear* yang merupakan persamaan dari kapal tanpa awak, sistem tersebut dapat disebut sebagai sistem MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) disebabkan adanya beberapa masukan dan keluaran pada sistem. Persamaan matematika dari kapal tanpa awak tipe monohull juga masih bersifat *non-linear* dan terikat satu dengan yang lainnya (*coupled*)

[7].

Metode *Feedback Linearization Decoupler* digunakan sebagai metode umpan balik yang dapat membuat suatu sistem MIMO menjadi suatu sistem yang hanya dipengaruhi satu variable input. Pada penelitian ini, digunakan metode *Feedback Linearization Decoupler* untuk mengubah persamaan matematika pada \dot{u} dan \dot{r} sehingga output merupakan hasil dari pengaruh satu input saja. yaitu u_r mempengaruhi \dot{u} dan r_r mempengaruhi \dot{r}

(2.60)

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + g(x) u \\ y &= h(x)\end{aligned}$$

di mana, $\dot{x} \in R$ merupakan matriks *state* sistem yang bersifat *non-linear* dan *coupled*, $u \in R$ adalah vektor masukan yang merupakan sudut defleksi dari kapal tanpa awak dan $y \in R$ adalah vektor keluaran sistem. Tujuan dari proses *Feedback Linearization Decoupler* adalah untuk membuat persamaan *state* baru yaitu:

$$\dot{x} = f(x) + g(x) u + Ax - Ax + Bv - Bv \quad (2.61)$$

di mana v adalah nilai masukan baru. Selanjutnya (2.61) dapat disusun ulang menjadi (2.62)

$$\dot{x} = Ax + Bv + f(x) + g(x)u + -Ax + -Bv \quad (2.62)$$

Persamaan (2.63) terdapat komponen *non-linear* yang ingin dibuat menjadi persamaan linear dan *decoupled*, maka persamaan tersebut dipaksa bernilai nol sehingga menjadi sebagai berikut:

$$f(x) + g(x)u + -Ax + -Bv = 0 \quad (2.63)$$

sehingga $\dot{x} = Ax + Bv$.

Persamaan (2.64) baru untuk input v adalah

$$u = g(x)^{-1}(Ax + Bv - f(x)) \quad (2.64)$$

Diagram *feedback linearization* dibuat dengan mengikuti *plant* sistem dengan masukan λ .

2.5 Sistem Kendali Umpan Balik (*State Feedback*) [8]

Dimulai dengan persamaan state linier time invariant

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (2.65)$$

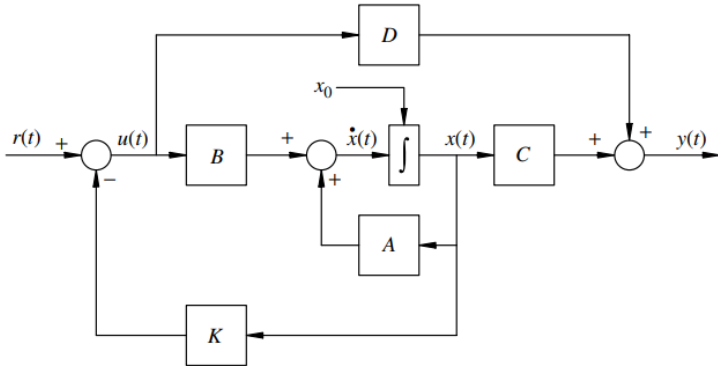
Yang mana mewakili atau merepresentasikan sistem *open loop* atau *plant* yang akan dikendalikan. Fokus kali ini terhadap penerapan hukum dari *state feedback*.

$$u(t) = -Kx(t) + r(t) \quad (2.66)$$

Dengan tujuan mencapai karekteristik kinerja yang diinginkan untuk persamaan keadaan open loop.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A - BK)x(t) + Br(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (2.67)$$

Efek dari *state feedback* pada diagram blok *open loop* ditunjukkan pada gambar (). Hukum *state feedback control* menampilkan konstant keadaan dari *state feedback*. Mendapatkan matriks K dari dimensi $m \times n$ dan *input* referensi dari eksternal baru $r(t)$, Dimana memiliki dimensi yang sama $m \times 1$ sebagai *input open loop* $u(t)$ serta unit fisik yang sama



Gambar 2.6 Karakteristik Sistem *Statefeedback* [8]

Hukum *state feedback control* digunakan untuk memasukkan *gain* matriks yang dikalikan dengan masukan *reference*. *State feedback control* dapat di tuliskann dalam bentuk scalar.

$$\begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m(t) \end{matrix} = - \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{m1} & k_{m2} & \dots & k_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \\ \vdots \\ r_m(t) \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

Untuk bentuk *single input, single output* (SISO), *gain* K *state feedback* adalah $1 \times n$ baris vektor, masukan *reference* $r(t)$ adalah sinyal scalar, dan hukum *state feedback control* mempunyai bentuk.

(2.69)

$$\begin{aligned}
 u(t) &= -[k_1 \quad k_2 \quad \dots \quad k_n] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + r(t) \\
 &= -k_1 x_1 - k_2 x_2 - \dots - k_n x_n + r(t)
 \end{aligned}$$

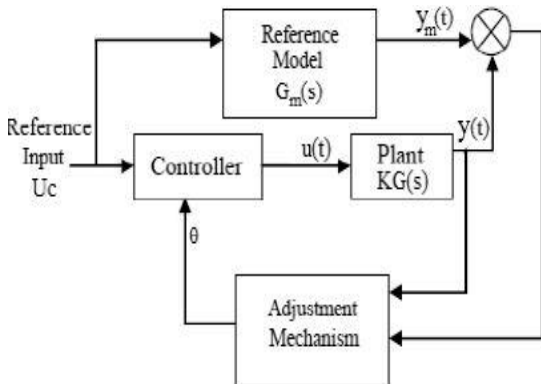
Jika masukan referensi eksternal tidak ada, hukum kontrol state feedback adalah disebut regulator yang dirancang untuk memberikan respon transien yang diinginkan untuk kondisi awal yang tidak nol / atau menipiskan gangguan yang harus di pertahankan keadaan keseimbangan $\dot{x} = 0$

2.6 Sistem Pengaturan Adaptif [11]

Sistem kendali adaptif merupakan sistem kendali yang mempunyai parameter-parameter kendali yang dapat beradaptasi. Parameter-parameter kendali tersebut beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan disekitarnya, seperti adanya gangguan, serta perubahan karakter internal dari sistem yang dikendalikan. Penggunaan sistem kendali adaptif menunjukkan peningkatan kinerja sistem karena suatu sistem umumnya berada dalam situasi yang mengandung derau dan gangguan serta kondisi internal dan eksternalnya mengandung ketidakpastian. Sistem kendali adaptif telah banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang industri pengolahan bahan kimia, sistem penerbangan, serta sistem otomotif. Dalam bidang pengolahan hasil bumi, pengolahan bahan dasar minyak CPO (*crude-palm oil*). Terdapat bebera pengaturan adaptif yaitu *model reference adaptive control*, *gain scheduling*, dan *self tuning regulators*.

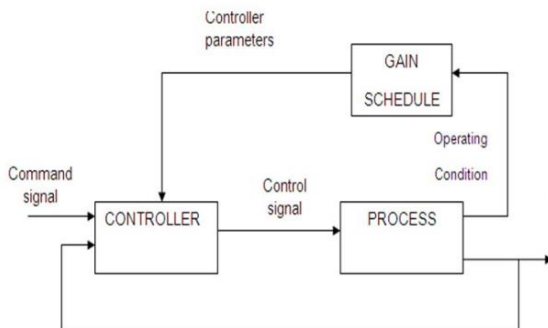
Model Reference Adaptive Control (MRAC) adalah kontroler adaptif yang penting. Dalam MRAC performa sistem yang diinginkan dinyatakan dalam suatu model referensi. Diagram blok dari sistem ditunjukkan pada Gambar 2.8. Sistem memiliki *loop* umpan balik yang terdiri dari proses dan kontroler serta *loop* umpan balik yang lain yang mengubah parameter kontroler. Parameter diubah berdasarkan umpan balik dari *error*, yang merupakan selisih antara *output* dari sistem dan *output* dari model referensi. *Loop* umpan balik pertama disebut *inner loop* dan *loop* kedua disebut *outer loop*. Mekanisme penyesuaian parameter dalam MRAC dapat diperoleh dengan dua cara yaitu dengan

menggunakan metode gradien atau dengan menerapkan teori stabilitas. Dalam MRAC perilaku yang diinginkan dari sistem ditentukan oleh sebuah model dan parameter kontroler disesuaikan berdasarkan *error* yang merupakan selisih antara *output* dari sistem *loop* tertutup dan model tersebut.



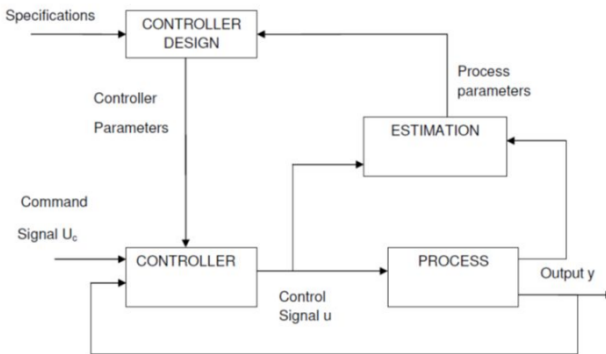
Gambar 2.7 Diagram Blok Model MRAC [11]

Gain scheduling adalah sebuah metode kontrol dimana besar parameter kontrol yang digunakan adalah berdasarkan titik kerja atau kondisi operasi yang dihadapi. Agar setiap saat kontroler mengetahui kondisis proses, maka dalam skema kontrol ini diperlukan pengukuran variabel tambahan yang secara teknik digunakan sebagai variabel penjadwal (*scheduled variable*).



Gambar 2.8 Diagram Blok *Gain Scheduling* [11]

Kontroler adaptif secara umum mempunyai dua *loop*, *inner loop* terdiri dari proses dan umpan balik kontroler dan *outer loop* yang merupakan proses untuk mendapatkan parameter kontroler. Pada *estimator* terjadi proses estimasi terhadap perubahan parameter proses yang dilakukan secara terus-menerus. Sinyal kontroler yang dihasilkan akan dapat mengikuti adanya perubahan parameter proses. *Estimator* pada blok merepresentasikan proses estimasi parameter secara langsung. Blok kontroler desain merepresentasikan penyelesaian langsung untuk desain dari parameter yang telah diidentifikasi sebelumnya untuk menghasilkan parameter kontroler terbaru sesuai kondisi objek pada saat itu. Dan terakhir pada blok kontroler adalah untuk menghitung aksi kontrol yang akan diberikan kepada objek dengan parameter kontroler yang telah dihitung pada blok sebelumnya. Sehingga sistem dapat dikatakan sebagai otomatisasi proses modeling (*estimation*) dan desain. Yang mana model dari proses dan desain kontrol diperbaharui setiap saat.



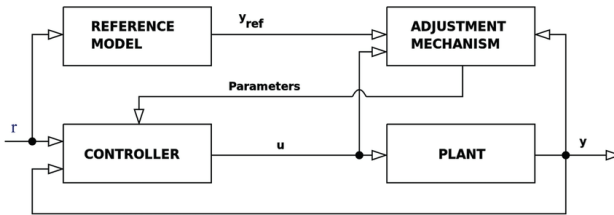
Gambar 2.9 Diagram Blok *Self-Tuning Regulators* [11]

2.7 Model Reference Adaptive Control (MRAC) [7],[11]

Model Reference Adaptive Control (MRAC) merupakan salah satu skema kendali adaptif di mana performansi keluaran sistem (proses) mengikuti performansi keluaran model referensinya. Parameter-parameter kontroler diatur (mekanisme pengaturan) berdasarkan pada *error* yang merupakan selisih antara keluaran proses dengan keluaran model. Dalam menentukan metode pengaturan parameter kontroler ada beberapa pendekatan diantaranya dengan *MIT rule* dan Teori kestabilan Lyapunov di mana keduanya memiliki kecepatan adaptasi atau

konvergensi yang berbeda karena memiliki formulasi dan algoritma yang berbeda dalam melakukan pengaturan parameter. Pada tugas akhir ini dilakukan pengujian terhadap kerja sistem kontrol adaptif MRAC dengan pendekatan MIT *rule*.

Sebelum menentukan karakteristik translasi yang diinginkan, maka diperlukan stabilisasi kecepatan surge dan kecepatan yaw terlebih dahulu. Kontrol MRAC akan menstabilkan posisi sudut dan mendapatkan nilai sesuai dengan referensi sudut orientasi. Kontrol MRAC digunakan untuk mendapatkan nilai sinyal kontrol berupa input kecepatan surge dan kecepatan yaw. Berikut blok diagram MRAC dengan menggunakan *model reference*.



Gambar 2.10 Blok Diagram MRAC[7]

Keluaran dari MRAC adalah sinyal referensi kecepatan *surge* dan *yaw* yang menjadi masukan bagi *Feedback Linearization*. MRAC yang digunakan berdasarkan aturan MIT *rule*. MRAC mendapatkan nilai *error* dari selisih antara respon keluaran sistem terhadap keluaran model referensi, seperti pada (2.70).

$$e = y_{plant} - y_{model} \quad (2.70)$$

Dari *error* tersebut dapat dicari nilai *cost function* seperti pada (2.71). Pemilihan dari *cost function* akan menentukan bagaimana perubahan parameter.

$$J(x) = \frac{1}{2} e^2(x) \quad (2.71)$$

Hubungan antara perubahan *theta* dan *cost function* dikenal dengan nama MIT *rule*.

$$\frac{dx}{dt} = -\gamma \frac{\delta J}{\delta x} = -\gamma e \frac{\delta e}{\delta x} \quad (2.72)$$

Bisa diasumsikan kontroler memiliki gain adaptif *feed forward* (x_1) dan gain adaptif *feedback* (x_2). Untuk memperoleh penurunan sensitivitas dengan parameter tersebut, fungsi *error* harus memiliki x_1 dan x_2 .

$$\frac{\partial e}{\partial x_1} = \frac{a_{1m}s + a_{0m}}{s^2 + a_{1m} + a_{0m}} u_c \quad (2.73a)$$

$$\frac{\partial e}{\partial x_2} = -\frac{a_{1m}s + a_{0m}}{s^2 + a_{1m} + a_{0m}} y_{plant} \quad (2.73b)$$

Selanjutnya, menggunakan MIT *rule* untuk mendapatkan parameter *theta* yang berubah setiap saat.

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma \frac{\partial e}{\partial \theta_1} = -\gamma \left(\frac{a_{1m}s + a_{0m}}{s^2 + a_{1m} + a_{0m}} u_c \right) e \quad (2.74a)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = -\gamma \frac{\partial e}{\partial \theta_2} = \gamma \left(\frac{a_{1m}s + a_{0m}}{s^2 + a_{1m} + a_{0m}} y_{plant} \right) e \quad (2.74b)$$

Metode adaptasi Lyapunov me miliki kemampuan mengikuti model referensi yang lebih baik terhadap perubahan referensi naik yang diberikan dari pada metode adaptasi MIT *rule*, namun dalam mengatasi gangguan metode adaptasi MIT *rule* memiliki kemampuan lebih baik dari pada metode adaptasi Lyapunov yang dapat dilihat dari waktu yang dibutuhkan untuk mengatasi gangguan yang lebih singkat

2.8 Root Mean Square Error (RMSE)

Pada suatu pemodelan, dalam hal ini adalah pemodelan parameter *body* USV, diperlukan suatu validasi untuk mengetahui bahwa parameter sudah sesuai atau belum. Maka pada penelitian ini digunakan analisa *error* untuk validasi parameter tersebut, dan yang digunakan adalah *Root Mean Square Error*.

Root Mean Square Error atau akar kesalahan kuadrat rata-rata merupakan suatu ukuran kesalahan yang didasarkan pada selisih antara dua buah nilai yang bersesuaian atau dengan kata lain merupakan selisih antara data *output* referensi dengan data *output* sebenarnya untuk menyatakan tingkat kemiripan antara nilai yang diinginkan dengan nilai

fakta. Semakin kecil eror yang dihasilkan maka semakin mendekati dengan sistem sebenarnya. Dengan kata lain RMSE merupakan standar deviasi dari residual (kesalahan prediksi). Residual adalah ukuran seberapa jauh dari titik-titik data garis regresi. Pada umumnya metode ini digunakan dalam analisis regresi untuk memverifikasi hasil eksperimen.

Nilai RMSE yang akan didapatkan untuk analisa data antara sinyal referensi dengan sinyal aktual dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{in} - Y_{out})^2}{N}} \quad (2.64)$$

di mana,

Y_{in} = Data *ouput* sinyal referensi

Y_{out} = Data *ouput* sinyal sebenarnya

N = Banyaknya data

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

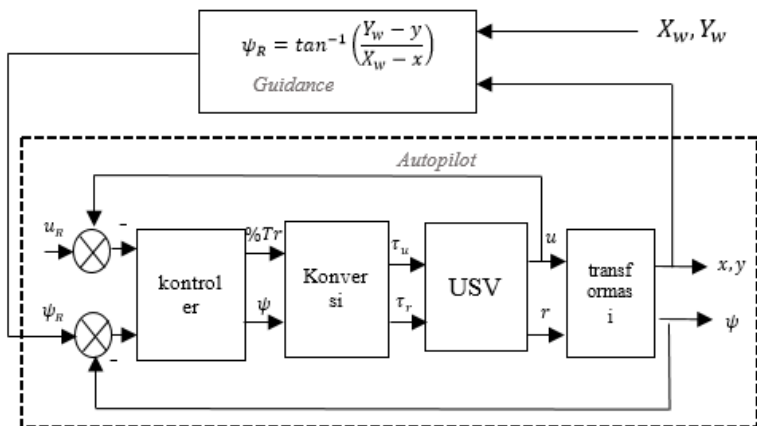
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini dibahas mengenai perancangan sistem kendali *autopilot* pada *unmanned surface vehicle* (usv) tipe monohull LSS01 menggunakan *model reference adaptive control* (MRAC)- *state feedback* dalam kontrol *waypoint*

3.1 Rancangan Umum Sistem

Sistem yang saya buat merupakan sistem pengaturan pada kapal tanpa awak rancangan sistem yang diajukan pada penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu rancangan sistem untuk validasi kontroller dan rancangan sistem untuk *waypoint* controlnya

Rancangan sistem untuk validasi kontroller *autopilot* dan rancangan sistem untuk *waypoint* control ditunjukkan oleh Gambar 3.1 Validasi kontroller dilakukan dengan uji manuver pada rancangan sistem untuk mengetahui apakah respon *plant* setelah mendapat sinyal kontrol sudah sesuai dengan kriteria performasi yang diinginkan. Mula-mula kapal tanpa awak digerakkan lurus dengan torsi gaya dorong konstant kemudian setelah beberapa saat, kapal dibelokkan ke arah tertentu.



Gambar 3.1 Rancangan Validasi Kontroler *autopilot* dan *guidance*

Rancangan sistem untuk *waypoint control* juga ditunjukkan oleh gambar. 3.1 Torsi gaya dorong kapal tanpa awak diberi nilai konstant. Titik *waypoint* yang di inginkan untuk dilewati kapal di definisikan lebih dahulu sebelum simulasi dijalankan. Saat simulasi, apabila *waypoint navigation* menyatakan ada *waypoint* yang harus di tuju, maka *waypoint navigation* akan mengirim sinyal ψ_R sebagai acuan heading kapal yang di inginkan. Apabila panjang vektor kapal ke titik *waypoint* lebih kecil dari batas toleransi yang ditetapkan, maka *waypoint navigation* akan mengambil titik *waypoint* selanjutnya sebagai acuan. Apabila semua waypoint telah dilalui, *waypoint navigation* akan mengirim ulang sinyal acuan ψ_R

3.2 Model Matematika Kapal Tanpa Awak

Model matematis kapal tanpa awak didapatkan dari analisa fisis kinematika dan dinamika yang mencari hubungan antara posisi dan kecepatan serta hubungan antar gaya dan momen gaya model tersebut yang akan direpresentasikan pada software Matlab. Untuk menjalankan simulasi diperlukan model matematis kapal tanpa awak . Model tersebut dinyatakan dalam persamaan

$$\dot{u} = \frac{(m - Y_{\dot{v}})}{(m - X_{\dot{u}})} vr - \frac{X_u}{(m - X_{\dot{u}})} u - \frac{X_{|u|u}}{(m - X_{\dot{u}})} |u|u + \frac{1}{(m - X_{\dot{u}})} \tau_u \quad (3.1)$$

$$\dot{v} = \frac{(X_{\dot{u}} - m)}{(m - Y_{\dot{v}})} ur - \frac{Y_v}{(m - Y_{\dot{v}})} v - \frac{Y_{|v|v}}{(m - Y_{\dot{v}})} |v|v - \frac{Y_{|r|v}}{(m - Y_{\dot{v}})} |r|v - \frac{Y_{|v|r}}{(m - Y_{\dot{v}})} |v|r \quad (3.2)$$

$$\dot{r} = \frac{(Y_{\dot{v}} - X_{\dot{u}})}{(I_z - N_{\dot{r}})} uv - \frac{N_r}{(I_z - N_{\dot{r}})} r - \frac{N_{|v|v}}{(I_z - N_{\dot{r}})} |v|v - \frac{N_{|r|v}}{(I_z - N_{\dot{r}})} |r|v - \frac{N_{|v|r}}{(I_z - N_{\dot{r}})} |v|r - \frac{N_{|r|r}}{(I_z - N_{\dot{r}})} |r|r + \frac{1}{(I_z - N_{\dot{r}})} \tau_r \quad (3.3)$$

Berdasarkan model pada diatas , maka dirancanglah model sistem yang terdiri dari b

Tabel 3.1 Parameter kapal tanpa awak

Parameter	Nilai	Keterangan
m	8,437	Massa <i>rigid body</i>
x_g	67,3	Jarak antara pusat koordinat kapal dengan titik berat kapal searah sumbu x
$X_{\dot{u}}$	-11,26	Massa tambahan kapal searah sumbu x karena percepatan kapal \dot{u}
$Y_{\dot{v}}$	8,136	Massa tambahan kapal searah sumbu y karena percepatan kapal \dot{v}
$N_{\dot{r}}$	0,01	Massa tambahan kapal searah sumbu ψ karena percepatan kapal \dot{r}
X_u	2,57	Konstanta damper linier x karena kecepatan translasi u
Y_v	-0,0022	Konstanta damper linier y karena kecepatan translasi v
N_r	0,0066	Konstanta damper linier ψ karena kecepatan translasi r
I_z	0,562Kg.m ²	Momen Inersia terhadap $O_b Z_b$
$X_{ u u}$	$1,96 \times 10^3$	Konstanta damper nonlinier x karena kecepatan translasi u
$Y_{ v v}$	$6,86 \times 10^{-4}$	Konstanta damper nonlinier y karena kecepatan translasi v
$Y_{ v r}$	0,0042	Konstanta damper nonlinier y karena kecepatan translasi v dan kecepatan sudut r

$Y_{ r v}$	-0,0033	Konstanta damper nonlinier y karena kecepatan sudut r dan kecepatan translasi v
$N_{ v v}$	$1,82 \times 10^{-4}$	Konstanta damper nonlinier ψ karena kecepatan translasi v
$N_{ r v}$	$4,74 \times 10^{-4}$	Konstanta damper nonlinier ψ karena kecepatan sudut r dan kecepatan translasi v
$N_{ v r}$	$2,52 \times 10^{-4}$	Konstanta damper nonlinier ψ karena kecepatan translasi v dan kecepatan sudut r
$N_{ r r}$	-0,0042	Konstanta damper nonlinier ψ karena kecepatan sudut r
ρ_w	1000 kg/m^3	Massa jenis air laut
L	1,5 m	Panjang kapal
ρ_a	1,2 kg/m^3	Massa jenis udara
A_{FW}	0,0324 m^2	Area proyeksi angina dari depan
A_{LW}	0,54 m^2	Area proyeksi angin dari samping
A_{Fc}	0,0204 m^2	Area proyeksi air dari depan
A_{Lc}	0,4046 m^2	Area proyeksi air dari samping
L_oA	1,5 m	Panjang kapal keseluruhan
$C_{xwi}(\gamma_w)$	$-0,8\cos(\gamma_w)$	Koefisien angin pada sumbu gerak x
$C_{ywi}(\gamma_w)$	$-0,9\sin(\gamma_w)$	Koefisien angin pada sumbu gerak y
$C_{Nwi}(\gamma_w)$	$-0,18\sin(2\gamma_w)$	Koefisien angina pada sumbu gerak yaw
$C_{xcu}(\gamma_w)$	$-0,1453\cos(\gamma_c)$	Koefisien arus pada sumbu gerak x

$C_{Ycu}(\gamma_w)$	$-0,3712\sin(\gamma_c)$	Koefisien arus pada sumbu gerak y
$C_{Ncu}(\gamma_w)$	$-0,1036\sin(2\gamma_c)$	Koefisien arus pada sumbu gerak yaw
$C_{Xwa}(\gamma_w)$	$-0,028244\cos(2\gamma_{wa})$	Koefisien ombak pada sumbu gerak x
$C_{Ywa}(\gamma_w)$	$-0,08374\sin(2\gamma_{wa})$	Koefisien ombak pada sumbu gerak y
$C_{Nwa}(\gamma_w)$	$-0,02094\sin(2\gamma_{wa})$	Koefisien ombak pada sumbu gerak yaw

Dari identifikasi konstanta dilakukan pembatasan, diantaranya sudut *yaw* adalah maksimum 0.536 rad, dan gaya dorong maksimum sebesar 19,3 N atau sama dengan 100% *throttlet*

Pada perancangan plant kapal awak dibutuhkan pendorong atau propulsi. Pemodelan propulsi yang digunakan *plant* kapal tanpa awak adalah kemudi *rudder*. Pemodelan kemudi *rudder* telah dilakukan oleh tim laboratorium system dan *Cybernetics* Teknik Elektro ITS sehingga menghasilkan formula hubungan antara gaya dorong pada sumbu *surge* (τ_u) dengan *%throttlet* dan gaya dorong sumbu *yaw* (τ_r) dengan θ_{rudder} yang dijelaskan sebagai berikut:

$$\omega = \frac{242.7027 \cdot \sqrt{\%throttlet}}{2\pi}$$

$$F_{thrust} = KT \cdot \rho \cdot D^4 \cdot \omega^2$$

$$F_{rudder} = \sin(\theta_{rudder}) \cdot L_{rudder} \cdot v_{surge}$$

$$\tau_u = KT \cdot \rho \cdot D^4 \cdot \omega^2 - |F_{rudder}| \quad (3.2)$$

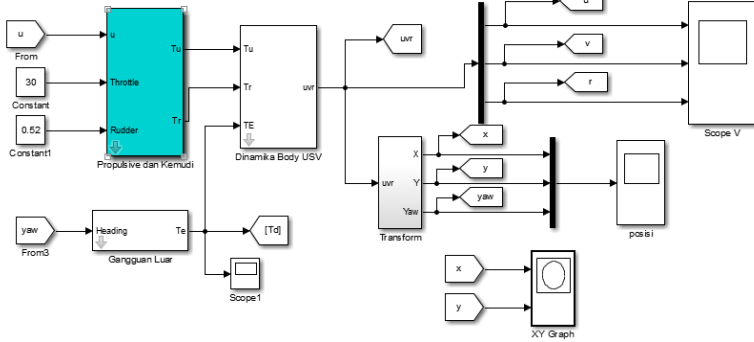
$$\tau_v = 0$$

$$\tau_r = F_{rudder} \cdot LG$$

Dimana,

- F_{thrust} : Gaya dorong *thruster* (N)
- F_{rudder} : Momen gaya *rudder* (N/m)
- %throttlet* : Persen gas *throttlet* (0% – 100%)
- θ_{rudder} : Sudut defleksi *rudder* (0 – 0.536 rad)
- KT : Konstanta *Thrust* dengan nilai 0.020188
- ρ : massa jenis air dengan nilai 1025 kg/m³
- L_{rudder} : Luas permukaan *rudder* dengan nilai 6.75 · 10⁻³m²
- LG : Lengan gaya *rudder* dengan nilai 0.673
- ω : Kecepatan Sudut(rad/s)

- v_{surge} : Kecepatan USV pada sumbu X *body-frame*
 τ_u : Gaya dorong pada sumbu surge (N)
 τ_r : Gaya dorong pada sumbu yaw (N.m)



Gambar 3.2 Diagram Simulink plant kapal tanpa awak beserta blok kemudi rudder

Model gangguan eksternal berkerja pada sumbu *surge, sway* dan *yaw* dijelaskan pada persamaan. Gaya –gaya yang disebabkan oleh pengaruh arus dimisalkan sama dengan pengaruh angin, namun kepadatan jenis udara ρ_a digantikan dengan kepadatan jenis air ρ_w . Luas proyeksi permukaan kapal yang semula berada di atas air dirubah menjadi luasan pryeksi permukaan kapal dibawah air. Dan kecepatan angin V_w diubah menjadi V_c . Model matematis gangguan arus terhadap kapal dijelaskan pada Persamaan (3.4).

$$\tau_E^{cu} = \frac{1}{2} \rho_w V_c^2 \begin{bmatrix} C_x(\gamma_c) A_{Fc} \\ C_y(\gamma_c) A_{Lc} \\ C_N(\gamma_c) A_{Lw} L_{OA} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Dimana A_{Fc} adalah area proyeksi dari depan yang terendam air, L_{OA} adalah panjang keseluruhan dari kapal, dan γ_c adalah sudut relatif arus yang menghempas kapal.

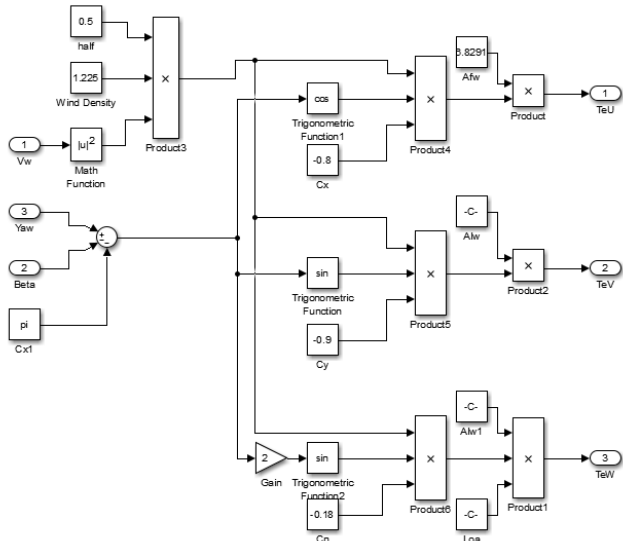
Besarnya gaya dan momen dari induksi ombak diambil dari Persamaan (3.4) kemudian dimodifikasi untuk memasukkan komponen gelombang sinusoidal menjadi seperti Persamaan (3.5).

$$\boldsymbol{\tau}_E^{wa} = \frac{1}{2} \rho_w (A_{wa})^2 \sin(\omega t + \theta) \begin{bmatrix} C_x(\gamma_{wa}) A_{Fc} \\ C_y(\gamma_{wa}) A_{Lc} \\ C_N(\gamma_{wa}) A_{Lw} L_{OA} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

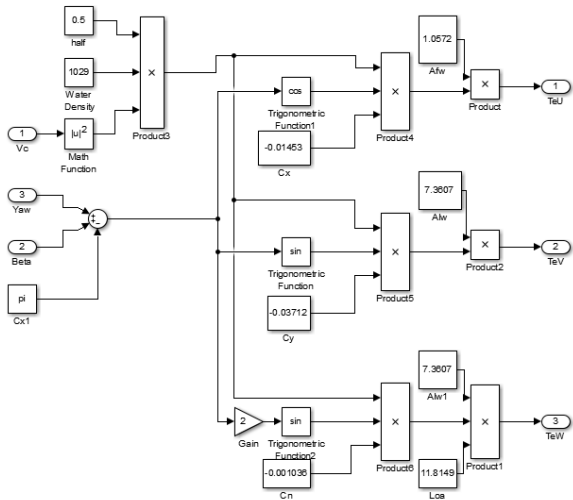
Dimana A_{wa} adalah amplitudo ombak, ρ_w adalah kerapatan air, ω adalah frekuensi ombak, θ adalah sudut fasa ombak, A_{Fc} adalah area proyeksi dari depan yang terendam air, A_{Lc} area proyeksi dari samping yang terendam air, L_{OA} adalah panjang keseluruhan dari kapal, dan γ_{wa} adalah sudut relatif ombak yang menghempas kapal.

Dengan menggabungkan Persamaan (2.26), Persamaan(3.4), dan Persamaan(3.5), didapatkan persamaan (3.5), didapatkan model pengaruh lingkungan seperti pada Persamaan(3.6). Gambar 3.3, Gambar 3.4, dan Gambar 3.5 masing-masing menunjukkan diagram blok gangguan angin, arus, dan, ombak dengan parameter sesuai dengan Tabel 3.1

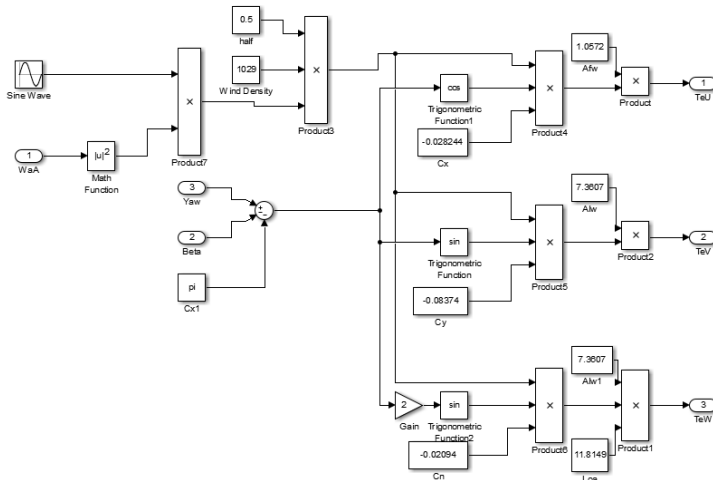
$$\boldsymbol{\tau}_E = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_{uE} \\ \boldsymbol{\tau}_{vE} \\ \boldsymbol{\tau}_{rE} \end{bmatrix} = \boldsymbol{\tau}_E^{cu} + \boldsymbol{\tau}_E^{wa} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_x(\gamma_w) A_{Fw} \\ \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_y(\gamma_{wa}) A_{Lw} \\ \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_N(\gamma_{wa}) A_{Lw} L_{OA} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$



Gambar 3.3 Diagram simulink gangguan angin



Gambar 3.4 Diagram Simulink Gangguan Arus



Gambar 3.5 Diagram Simulink Gangguan Ombak

3.3 Perancangan *Feedback Linearization Decoupler*

Pada subbab ini akan dibahas mengenai perancangan *Feedback Linearization Decoupler*, yaitu metode kontrol untuk me-linierisasi model *plant* dari kapal tanpa awak dengan menghilangkan keterkaitan antar persamaan. Metode kontrol ini difokuskan untuk kestabilan pada model dinamika kapal tanpa awak yaitu pada pengaturan kecepatan *surge* dan *yaw*. Pada persamaan model matematika kapal tanpa awak pada sub bab 3.1 di atas, terlihat bahwa model matematika tersebut bersifat *non-linear* dan *ter-coupled* di mana terdapat keterkaitan antar persamaan model matematika. Untuk itu dirancang metode kontrol *Feedback Linearization decoupler* agar keterkaitan tersebut dapat dihilangkan dengan menambahkan variabel baru.

Proses linierisasi dilakukan dengan membuat variabel persamaan selain masukan dan variabel baru yang merupakan sinyal kendali, di mana masukan dari persamaan dinamika kapal tersebut adalah pada *thuster*, dan *rudder* yang masing-masing bertanggung jawab terhadap gerakan *surge*, dan *yaw*. Parameter baru dengan *time constant* ditambahkan, juga nilai input referensi yang baru agar output *Feedback Linearization* berupa masukan dorongan dan sudut kemudi pada kapal tanpa awak dapat

mengatur keluaran kecepatan *surge* dan pada kecepatan *yaw* untuk mengikuti sinyal referensi yang diberikan.

Akan dibuat suatu kontrol *state-feedback* digunakan untuk mendapatkan nilai gain dengan perintah akermen. Agar sistem menjadi SISO (*Single input single output*) yang terpisah dari persamaan lain (*decouple*) dibuat dengan menambahkan variabel baru lamda yang merupakan nilai dari satu per *time constant*. Persamaan untuk mendapatkan *feedback linearization decoupler* adalah sebagai berikut.

$$\dot{u} = \frac{(m - Y_{\dot{v}})}{(m - X_{\dot{u}})} vr - \frac{X_u}{(m - X_{\dot{u}})} u - \frac{X_{|u|u}}{(m - X_{\dot{u}})} |u|u + \frac{1}{(m - X_{\dot{u}})} \tau_u \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \dot{r} = & \frac{(Y_{\dot{v}} - X_{\dot{u}})}{(I_z - N_{\dot{r}})} uv - \frac{N_r}{(I_z - N_{\dot{r}})} r - \frac{N_{|v|v}}{(I_z - N_{\dot{r}})} |v|v \\ & - \frac{N_{|r|v}}{(I_z - N_{\dot{r}})} |r|v - \frac{N_{|v|r}}{(I_z - N_{\dot{r}})} |v|r \\ & - \frac{N_{|r|r}}{(I_z - N_{\dot{r}})} |r|r + \frac{1}{(I_z - N_{\dot{r}})} \tau_r \end{aligned} \quad (3.8)$$

Dengan permisalan bahwa

$$\dot{u} = -\lambda u + u_r + A(17)\tau_{ad} + A(1)vr - A(2)u - A(3)|u|u + A(4)\tau_u - u_r + \lambda u \quad (3.10)$$

Pada permisalan diatas terdapat komponen non-linear yang ingin dibuat menjadi persamaan *linear* dan *decouple*, maka persamaan tersebut dipaksakan bernilai nol dan agar kecepatan *surge* hanya dipengaruhi u_r sehingga menjadi berikut :

$$A(1)vr - A(2)u - A(3)|u|u + A(4)\tau_u + \lambda u - u_r = 0 \quad (3.11)$$

Sehingga

$$\dot{u} = -\lambda u + (u_r) + A(17) \quad (3.12)$$

Sehingga didapatkan persamaan baru

$$\tau_u = 1/A(4)(-A(1)vr - A(2)u - A(3)|u|u + \tau_u + \lambda u \quad (3.13)$$

Dan untuk persamaan dilakukan cara yang sama persamaan percepatan terhadap sumbu X

$$\begin{aligned} \dot{r} = & -\lambda r + r_r - A(10)|v|v - A(11)|r|v - A(12)|v|r \\ & - A(13)|r|r - A(14)r + A(15)\tau_r \\ & + A(16)uv - r_r + \lambda r + A(18)\tau_{cd} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Pada permasalahan diatas terdapat komponen non-linear yang ingin dibuat menjadi persamaan *linear* dan *decouple* an agar kecepatan *yaw* hanya dipengaruhi r_r , maka persamaan tersebut dipaksakan bernilai nol sehingga menjadi berikut

$$\begin{aligned} A(10)|v|v - A(11)|r|v - A(12)|v|r - A(13)|r|r \\ - A(14)r + A(15)\tau_r + A(16)uv - r_r \\ + \lambda r = 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

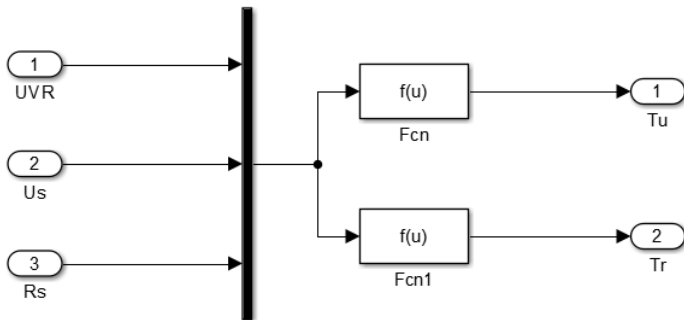
Sehingga

$$\dot{r} = -\lambda r + r_r + A(18) \quad (3.16)$$

Sehingga didapatkan persamaan baru

$$\begin{aligned} \tau_r = 1/A(15)(A(10)|v|v + A(11)|r|v + A(12)|v|r \\ + A(13)|r|r + A(14)r - A(16)uv - r_r \\ + \lambda r \end{aligned} \quad (3.17)$$

Setelah mendapatkan persamaan Tr dan Tu maka selanjutnya adalah membuat function sistem yang diinginkan



Gambar 3.6 Perancangan Tu dan Tr

Apabila sudah mendapatkan dan merancang persamaan Tr dan Tu langkah selanjutnya adalah mencari nilai gain K menggunakan metode perintah akermen. Persamaan yang digunakan dalam bentuk matriks sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{a1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{a2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{b1}{a1} & 0 \\ 0 & -\frac{b2}{a2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1' \\ x2' \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Sehingga didapatkan persamaan percepatan sumbu *surge* dan sumbu *yaw* adalah sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{1.5} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{1.5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1.5}{1.5} & 0 \\ 0 & -\frac{1.5}{1.5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1' \\ x2' \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Rumus matriks di atas diatas didapatkan dari persamaan orde satu kecepatan start sumbu x (u)

$$X1 = \frac{1,5}{1,5s + 1} X1r \quad (3.21)$$

$$1,5x\dot{1} + x1 = 1,5x1r \quad (3.22)$$

$$x\dot{1} = \frac{1}{1,5} + \frac{1,5}{1,5} x1r \quad (3.23)$$

Dan rumus matriks diatas juga didapatkan dari persamaan orde satu kecepatan sumbu *yaw*

$$X2 = \frac{1,5}{1,5s + 1} X2r \quad (3.24)$$

$$1,5x\dot{2} + x2 = 1,5x2r \quad (3.25)$$

$$x\dot{2} = \frac{1}{1,5} + \frac{1,5}{1,5} x2r \quad (3.26)$$

3.4 Perancangan Kontroler MRAC-Statefeedback

Setelah melakukan linierisasi dengan menggunakan metode *Feedback Linearization Decoupler*, maka selanjutnya dirancang kontroler MRAC yang bertujuan agar output respon dapat mengikuti model referensi yang diinginkan. Fungsi kontroler MRAC ini juga dapat memenuhi kesetabilan ketika adanya gangguan luar berupa arus air, angin dan lain sebagainya.

Untuk mendapatkan respon yang cepat, maka *model reference* yang digunakan memiliki time constant yang cukup sesuai kebutuhan dari sistem kapal tanpa awak yaitu 1 sekon yang memiliki bentuk dari transfer function orde 1 sebagai berikut

$$\frac{y_r(s)}{u(s)} = \frac{1}{0.5s + 1} \quad (3.27)$$

Model reference dibuat agar memiliki respon yang lebih cepat dibandingkan respon *plant*, seperti yang sudah dirancang sebelumnya bahwa keluaran respon sistem memiliki *time constant* 1.5 s dikarenakan apabila respon sistem terlalu cepat maka akan membuat sistem menjadi tidak stabil, sedangkan apabila respon sistem lebih dari perancangan maka sistem akan membutuhkan waktu cukup lama untuk mengikuti model referensi yang diberikan. Pemilihan model *model reference* dengan *time constant* 0,5 sekon didasarkan pada hal tersebut, agar respon sistem dapat mengikuti model referensi yang diberikan dengan baik.

Error di dapatkan dari selisih antara *output* referensi dengan *output plant* yang selanjutnya akan menjadi masukan bagi kontroler MRAC. Kontroler MRAC memiliki dua komponen bagian yaitu kontroler *gain* dilambangkan (K) dan kontroler mekanisme adaptif (γ). Kontroler yang digunakan memiliki nilai gain kontrol untuk referensi kecepatan *surge* dan *gain* kontrol untuk referensi kecepatan *yaw* adalah selalu berubah sesuai dengan perubahan parameter yang menghasilkan respon yang sesuai dengan referensi. *Adaptation rate* yang digunakan bernilai 0.0001 sehingga *output* respon dapat relatif cepat mengikuti referensi yang diberikan

$$\gamma = 0.0001 \quad (3.28)$$

Keluaran dari MRAC ini berupa sinyal kontrol yang akan terus mengubah parameter kontrol selama adanya selisih antara keluaran *plant*

dengan referensi atau tersedianya error, saat nilai keluaran sama dengan referensi maka *error* yang dihasilkan adalah nol sehingga tidak ada perubahan pada parameter. Perubahan *theta* tersebut dapat terlihat dalam persamaan.

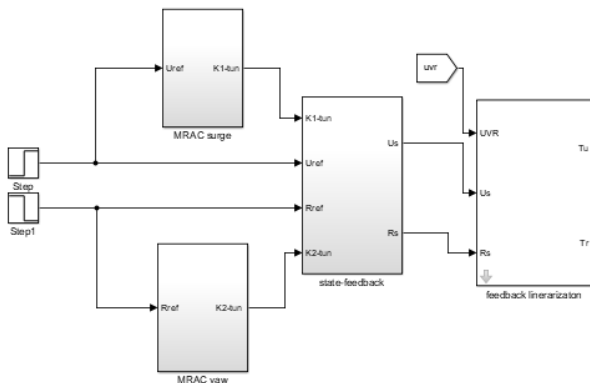
$$\frac{d\theta}{dt} = \gamma \frac{\partial e}{\partial \theta_1} = \gamma \left(\frac{a_{0m}}{S + a_{0m}} u_c \right) e \quad (3.29)$$

Sehingga didapatkan persamaan theta sebagai berikut

$$\frac{d\theta}{dt} = \gamma \frac{\partial e}{\partial \theta_1} = 0,0001 \left(\frac{1}{0,5S + 1} u_c \right) e \quad (3.29)$$

Dengan nilai *adaptation rate* sebesar 0.0001 respon keluaran sistem diharapkan dapat dengan cepat mengikuti referesi yang diberikan pada model *reference system*

Masukkan bagi blok *State-Feedback Linearization* adalah keluaran dari MRAC untuk kecepatan *surge* dan dan kecepatan *yaw*. Berikut adalah diagram simulink MRAC-*statefeedback* yang telah dibuat.



Gambar 3.7 Blok Simulink MRAC & *State Feedback*

Dibawah ini adalah tabel desain spesifikasi dari sistem USV yang akan dirancang tabel 3.2 desain pengaturan kecepatan translasi kapal tanpa awak dan tabel tabel 3.3 menunjukkan desain pengaturan sudut *heading* dari kapal tanpa awak.

Tabel 3.2 Spesifikasi Desain Pengaturan Kecepatan *surge* USV

Spesifikasi Desain	Nilai
Kecepatan Referensi	3 m/s
Time Constant	1.5 sekon
<i>Error steady state</i>	0
<i>%Overshoot</i>	0

Tabel 3.3 Spesifikasi Desain Pengaturan Sudut Heading USV

Spesifikasi Desain	Nilai
Sudut <i>Heading</i>	0.1 radian
Time Constant	1.5 sekon
<i>Error steady state</i>	0
<i>%Overshoot</i>	0

3.5 Perancangan Navigasi Waypoint

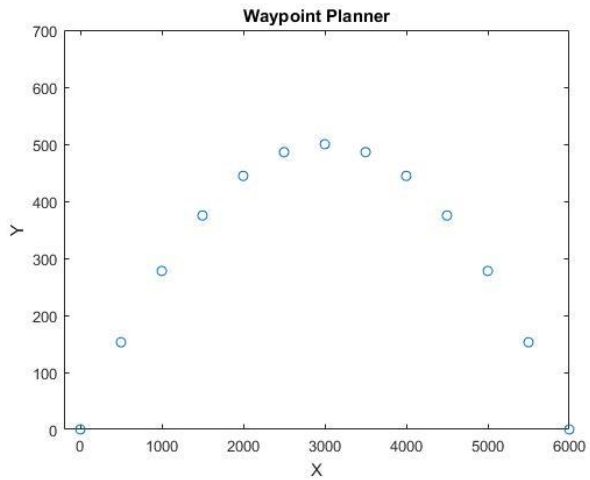
Perancangan dan metode perhitungan sudut *heading* acuan yang harus dicapai oleh kapal untuk mencapai *waypoint* yang diinginkan telah dijabarkan pada subbbab penentuan koordinat *waypoint* yang telah dikehendaki untuk dilalui oleh kapal tanpa awak dijalankan. Koordinat *waypoint* yang akan digunakan pada penelitian ini disajikan pada tabel

Gambar 3.8 menunjukkan titik-titik *waypoint* yang akan dilalui oleh kapal tanpa awak elah berada di radius toleransi yang akan dituju, maka *waypoint navigation* akan mengubah acuan titik *waypoint* ke *waypoint* selanjutnya. Apabila tidak ada lagi *waypoint* yang akan dituju maka simulasi secara otomatis akan berhenti

Tabel 3.4 Titik *waypoint* yang harus dituju

Index	Xw(parameter)	Yw (meter)
1	0	0
2	500	152.78
3	1000	277.78
4	1500	375
5	2000	444.4

6	2500	486.11
7	3000	500
8	3500	486.11
9	4000	444.4
10	4500	375
11	5000	277.78
12	5500	152.78
13	6000	0



Gambar 3.8 Titik-titik Waypoint yang akan dilalui kapal tanpa Awak

BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS

4.1 Gambaran Umum Pengujian Sistem

Pada tahap ini dilakukan beberapa pengujian. Sebelumnya merupakan pengujian sistem secara *open loop*. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan *input step* pada model kapal tanpa awak dan dilihat respon yang muncul. Pengujian kedua merupakan pengujian *plant* kapal tanpa awak dengan tiga derajat kebebasan dan akan disumulasikan dengan simulink MatLab. Pengujian selanjutnya adalah *plant* kapal tanpa kontroler, yang seterusnya pengujian manuver menggunakan *MRAC-Statefeedback* dan terakhir pengujian *waypoint* kontrol penjabarannya sebagai berikut:

1. Pengujian Model Matematika USV
Pengujian model ini dilakukan dengan memberi input untuk masing-masing elemen input yaitu kecepatan *surge* dan kecepatan *yaw* dengan nilai tertentu dan melihat keluaran USV tanpa tambahan kontroler.
2. Pengujian *plant* kapal tanpa awak dengan *MRAC-Statefeedback*
Selanjutnya ditambahkan kontroler dengan *MRAC-Statefeedback* dengan nilai referensi yang telah ditentukan sebelumnya dan melihat respon keluaran dari sumbu *surge* dan dengan *MRAC-Statefeedback*.

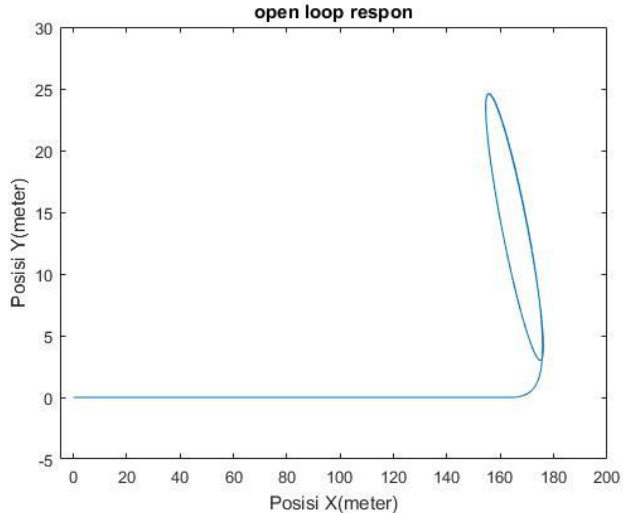
4.2 Pengujian *plant* kapal tanpa awak

Pada sub bab ini akan diberikan hasil pengujian system kapal tanpa awak dengan 3 derajat kebebasan tanpa kontroler. Hal ini dilakukan untuk mengetahui ketabilan sistem serta akan mempermudah dan membandingkan bagaimana hasil sebelum dan sesudah dikontrol

Sebelumnya pengujian ini dilakukan dengan memberikan masukan (*input*) berupa sinyal *step* ke model kapal tanpa awak untuk mencari model nilai *reference* yang tepat untuk tanpa awak. Berikut adalah respon dari sistem pengujian *open loop*.

Mula-mula *plant* kapal tanpa awak diberikan persentase *throttle* sebesar 30%, dan diberikan gaya dorong sebesar 5,788 newton, kemudian kemudi *rudder* dibuat lurus selama 80 detik pertama, lalu dibelokkan sebesar 0.1 radian untuk saat detik ke 80 hingga waktu simulasi berakhir di detik 200. Gambar 4.1 Menunjukkan pergerakan posisi kapal tanpa awak dari titik mula (0,0) membentuk garis lurus kemudian membentuk

lintasan melingkar. Namun gambar lintasan nya masih belum dapat membentuk lingkaran yang sempurna



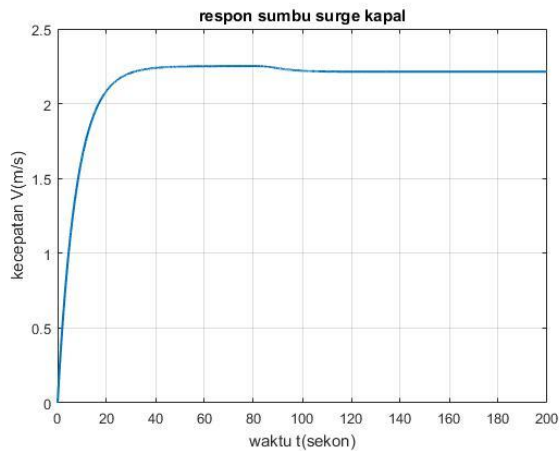
Gambar 4.1 Respon *Open Loop*

Gambar 4.2 Menunjukkan kecepatan translasi kapal tanpa awak searah sumbu kecepatan surge acuan *bodyframe* kapal tanpa awak atau searah gerak *surge*. Diperoleh respon kecepatan translasi surge mencapai nilai settling time kriteria $\pm 5\%$ dari 2,215m/s pada saat detik ke 22,365 detik dengan *time constant* nya pada saat 7,455. Lalu saat detik ke 80 dan seterusnya terjadi penurunan kecepatan translasi searah gerak *surge* dikarenakan kemudi *rudder* posisinya sudah tidak lurus lagi. Dan gambar menunjukkan kestabilan pada kecepatan 2,2215m/s. Akibatnya terjadi perpecahan vektor gaya dorong ke arah sumbu *yaw* dan kearah sumbu *surge*. Dan diperoleh juga kecepatan *yaw* mencapai nilai *settling time* kriteria $\pm 5\%$ dari 0,23 rad/s pada saat detik ke 90,35 detik dengan *time constant* nya pada saat 83,45 atau 3,45

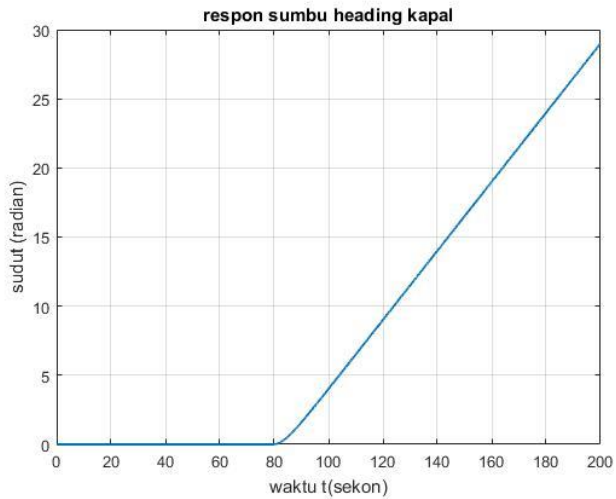
Pada gambar 4.3 Menunjukkan sudut heading kapal tanpa awak tiap waktunya. Terlihat bahwa dari detik ke 0 hingga 80, sudut *heading* kapal tanpa awak tetap menunjukkan arah heading 0 atau lurus ke arah sumbu X acuan bumi. Kapal tanpa awak berjalan lurus searah dengan sudut

kemudi kemudi *rudder* lalu detik ke 80 hingga detik ke 200 sudut kemudi kemudi *rudder* dibelokkan sebesar 0,1 radian. Dengan dibelokkannya arah kemudi *rudder* menyebabkan vektor gaya dorong propulsi terpecah ke arah sumbu gerak *surge* dan sumbu gerak *yaw* dan akhirnya sudut *heading* bertambah seiring kapal tanpa awak membentuk lingkaran namun pada sistem masih belum dapat membentuk lingkaran tetapi masih dalam bentuk oval.

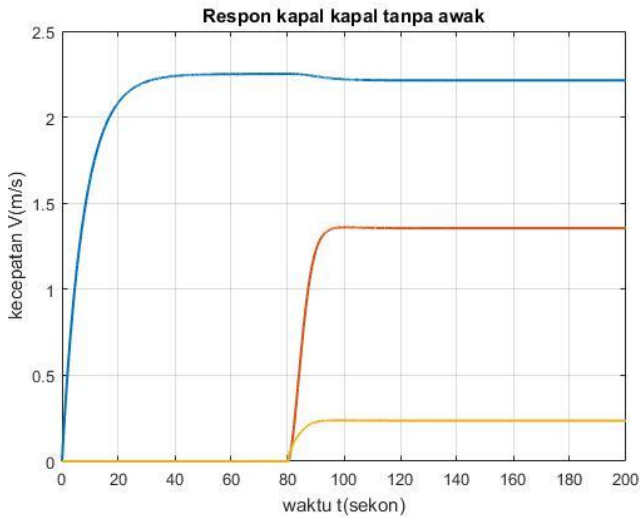
Pada gambar 4.4 menunjukkan gambar keseluruhan respon kecepatan dari kapal tanpa awak sebelum diberikan kontroler adalah respon kecepatan plant USV *open loop* pada sumbu u (*surge*), sumbu v (*sway*), dan sumbu r (*yaw*). Tidak adanya nilai *overshoot* dan kecepatan sistem dalam mencapai *steady-state* menunjukkan bahwa *plant* USV bekerja dengan baik dalam mengikuti respon referensi yang diberikan. Hal ini dapat mempengaruhi posisi USV saat berbelok akan terlampaui jauh dari posisi yang diinginkan.



Gambar 4.2 Respon kecepatan sumbu surge tanpa kontroler



Gambar 4.3 Respon heading kapal tanpa awak tanpa kontroler

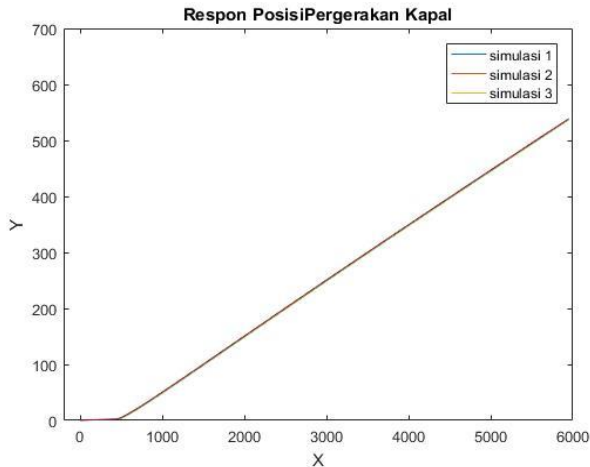


Gambar 4.4 Respon kapal tanpa awak secara keseluruhan

4.3 Pengujian *Autopilot* dengan MRAC-*Statefeedback*

Pada subbab ini akan dibahas mengenai perbandingan hasil respon sistem kapal tanpa awak tanpa kontroller MRAC dan pengujian yang diberikan hasil pengujian manuver kapal tanpa awak menggunakan kontroller MRAC-*Statefeedback* sebelum menggunakan *waypoint*. Pengujian dilakukan *linearization decoupler* yang berfungsi untuk membuat kapal tanpa awak dapat dikendalikan untuk mengikuti respon referensi yang diberikan

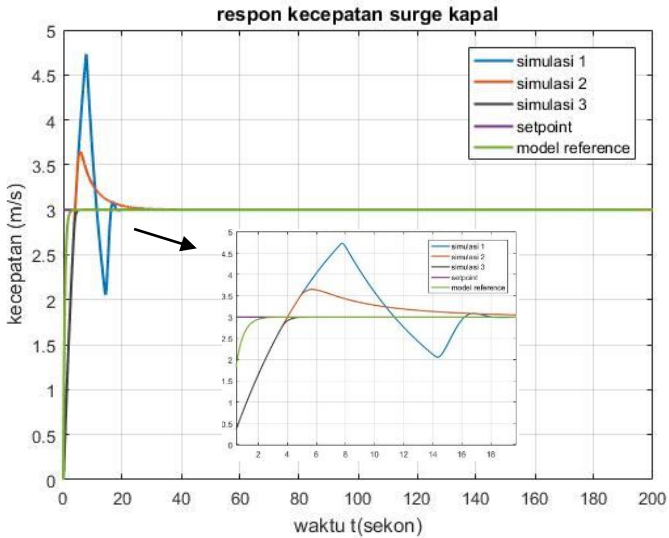
Pengujian dilakukan dengan memberikan sinyal uji *step* berupa nilai konstant pada kecepatan parameter pada kecepatan *surge* sebesar 3 dan pada *heading yaw* sebesar -0,1. Dimana setiap simulasi menggunakan gain adaptasi yang berbeda-beda. Setiap simulasi di lakukan sepanjang 200 detik waktu simulasi. Skenario yang dijalankan pada pengujian manuver adalah persentase *throttle* sebesar 30%, dan diberikan gaya dorong sebesar 5,788 newton serta *set point heading* bernilai nol untuk detik 0 hingga 80 lalu bernilai 0,1 untuk sisa waktu simulasi. Sudut kemudi *rudder* juga dibatasi sebesar 30 derajat atau sebesar 0,52333 radian untuk mencegah kemudi *rudder* berputar dengan sudut lebih besar dari 90 derajat yang menyebabkan kapal tanpa awak kehilangan gaya dorong searah sumbu gerak *surge* atau menyebabkan kapal tanpa awak akan bergerak berputar di tempat secara cepat bahkan akan mundur. Hasil respon posisi kapal tanpa awak ditunjukkan oleh gambar 4.5



Gambar 4.5 Respon posisi pergerakan kapal

4.3.1 Pengujian respon kecepatan pada sumbu *surge* dengan MRAC-*Statefeedback*

Pada sub sub bab berikut dijelaskan pengaruh MRAC *Statefeedback* terhadap kecepatan translasi *surge*. Yakni dengan membandingkan hasil pengujian dengan 3 gain adaptasi yang berbeda. Berikut hasil pengujian MRAC *Statefeedback* adaptif dengan perbedaan gain adaptasi terhadap sumbu X (*surge*) :



Gambar 4.6 Respon Kecepatan surge kapal

Tabel 4.1 Tabel pengujian gain K untuk kecepatan *surge*

Uji	Gain K _u	respon	τ ref. (s)	Error Steady State
1	1	Osilasi dan overshoot	0,5	0
2	0,1	Overshoot	0,5	0
3	0,0001	Tidak ada overshoot atau osilasi	0,5	0

Pada simulasi 1 *gain* adaptif K di atur sebesar 1 dan hasil simulasi menunjukkan respon kecepatan kapal tanpa awak berupa sistem orde 2 terjadi sistem mengalami osilasi dan *overshoot*. Sistem mengalami osilasi pada detik ke 6,78 sebesar 4,36 serta mengalami perlambatan sampai menuju kondisi *steady state* Dengan begitu respon dari simulasi 1 masih jauh dikatakan dengan model *reference* yang memiliki *time konstant* 0,5 detik. Pada saat sebelum *steady state* terjadi osilasi pada sistem karena *gain* terlalu besar.

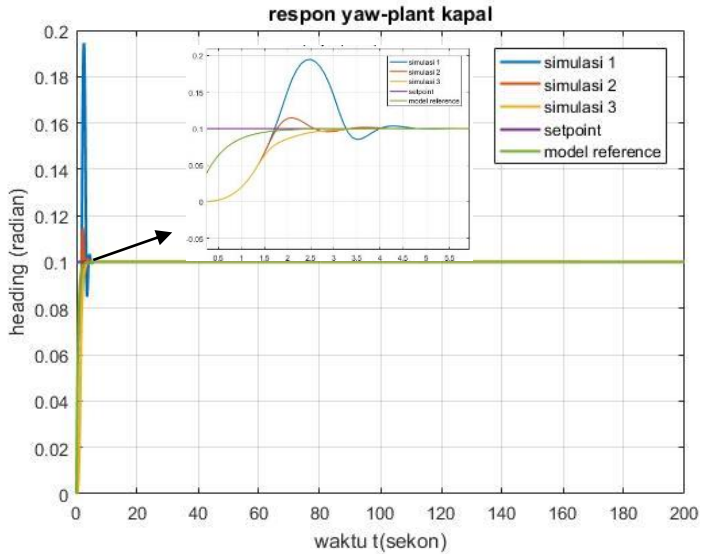
Pada simulasi ke 2, dicoba untuk menurunkan *gain* besar *gain* adaptif sebesar 0,1 hasil simulasi menunjukkan respon kecepatan *surge* kapal tanpa awak berupa respon sistem orde 2 tanpa osilasi dan masih terjadi *overshoot* pada sistem. Sistem mengalami osilasi pada detik ke 6,027 sebesar 3,375 serta mengalami perlambatan sampai menuju kondisi *steady state*. Dengan begitu respon dari simulasi 2 masih jauh dikatakan masih jauh dengan model referensi yang diinginkan.

Pada simulasi ke 3, dicoba untuk menaikkan *gain* adaptif K sebesar 0,001. Hasil simulasi menunjukkan respon kecepatan *surge* kapal tanpa awak berupa respon sistem orde 1 tanpa *overshoot* dan tanpa osilasi menunjukkan nilai 3.00 pada detik ke 2,99 setelah terjadi perubahan *setpoint* kecepatan *surge*. Dengan begitu respon dari simulasi 3 mirip dengan *model reference* yang memiliki *time konstant* 0,5 detik.

Dari ke tiga hasil simulasi yang telah dijalankan, terlihat bahwa parameter *gain* adaptif pada simulasi ke 3 memiliki respon yang mendekati karakter dari model *reference* tanpa *overshoot* dan tanpa osilasi. Sehingga parameter *gain* adaptif yang ada di simulasi 3 dianggap memenuhi spesifikasi desain kontroller yang diinginkan dan akan diambil sebagai model kontroller MRAC-*Statefeedback* untuk respon kecepatan pada sumbu *surge* kapal tanpa awak.

4.3.2 Pengujian respon dari *yaw-plant* kapal dengan MRAC-*Statefeedback*

Pada sub sub bab berikut dijelaskan pengaruh MRAC *Statefeedback* terhadap kecepatan *yaw*. Yakni dengan membandingkan hasil pengujian dengan 3 *gain* adaptasi yang berbeda. Berikut hasil pengujian MRAC *Statefeedback* adaptif dengan perbedaan *gain* adaptasi terhadap sumbu r (*yaw*) :



Gambar 4.7 Respon yaw-plant kapal

Tabel 4.2 Tabel pengujian gain K untuk kecepatan surge

Uji	Gain K r	respon	τ ref. (s)	<i>Error Steady State</i>
1	10	Overshoot dan osilasi	0,5	0
2	5	Overshoot dan osilasi	0,5	0
3	0,0001	Tidak ada overshoot atau osilasi	0,5	0

Pada simulasi1 *gain* adaptif K di atur sebesar 10 dan hasil simulasi menunjukkan respon sudut heading kapal tanpa awak berupa sistem orde 2 namun respon sistem masih terjadi osilasi dan overshoot. Sistem mengalami osilasi pada detik ke 2,5 sebesar 0,1946 dari respon sudut *heading*. Dengan begitu respon dari simulasi 1 masih jauh dikatakan

dengan *model reference* yang memiliki time konstant 0,5 detik. Pada saat sebelum *steady state* terjadi osilasi pada sistem karena *gain* terlalu besar.

Pada simulasi ke 2, dicoba untuk menurunkan besar *gain* adaptif sebesar 5 hasil simulasi menunjukkan respon sudut *heading yaw* kapal tanpa awak berupa respon sistem orde 1 namun respon sistem masih terjadi *overshoot* dan osilasi. Sistem mengalami osilasi pada detik ke 2,1 sebesar 0,1147 dari respon sudut *heading*. Namun dibandingkan dengan simulasi pertama simulasi ke dua lebih baik. Dengan begitu respon dari simulasi 2 hampir mendekati dengan model referensi *time* konstant 0,5 detik tetapi masih keluar dari proses adaptasi sistem

Pada simulasi ke 3, dicoba untuk menaikkan *gain* adaptif K sebesar 0,0001. Hasil simulasi menunjukkan respon kecepatan *yaw* kapal tanpa awak berupa respon sistem orde 1 tanpa *overshoot* dan tanpa osilasi serta tidak menuju sistem yang tak hingga. Respon sudut *heading yaw* kapal tanpa awak sebesar 0,1 dan mengalami *steady state* pada detik ke 3,8 setelah terjadi perubahan *setpoint heading yaw*. Dengan begitu respon dari simulasi 3 mirip dengan *model reference* yang memiliki *time* konstant 0,5 detik.

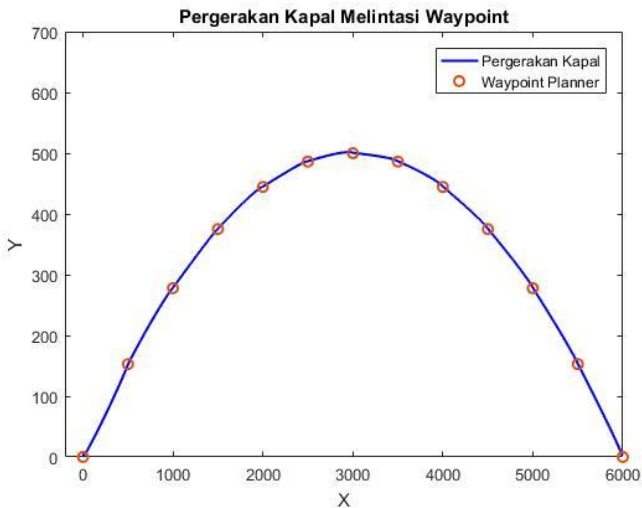
Dari ke tiga hasil simulasi yang telah dijalankan, terlihat bahwa parameter *gain* adaptif pada simulasi ke 3 memiliki respon yang mendekati karakter dari *model reference* tanpa *overshoot* dan tanpa osilasi serta sistem tidak menuju nilai tak hingga. Sehingga parameter *gain* adaptif yang ada di simulasi 3 dianggap memenuhi spesifikasi desain controller yang diinginkan dan akan diambil sebagai model controller MRAC-*Statefeedback* untuk respon *yaw-plant* kapal pada sumbu *yaw* kapal tanpa awak.

4.4 Pengujian Waypoint kontrol tanpa gangguan

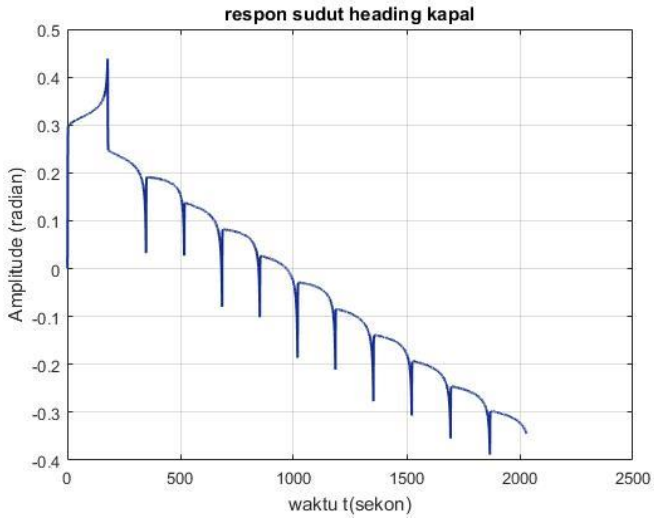
Pada subbab ini akan diberikan hasil pengujian kontrol *waypoint* kapal tanpa awak menggunakan controller MRAC-*statefeedback* pengujian dilakukan tanpa melibatkan gangguan eksternal. Controller MRAC-*statefeedback* memiliki parameter yang telah dipilih dari eksperimen sebelumnya. Setiap simulasi dilakukan dengan diberikan waktu sepanjang 2000 detik waktu simulasi. Skenario yang dilakukan adalah kapal tanpa awak harus mampu melewati 13 *waypoint* yang dapat dilihat di tabel 3.2. gaya dorong kemudi rudder dibuat konstant sebesar 30% dan *set point heading* akan selalu berubah sesuai dengan koordinat kapal dan titik *waypoint* yang akan dituju. Sudut kemudi kemudi *rudder* juga dibatasi sebesar 30 derajat atau sebesar 0.532 radian.

Gambar 4.8 menunjukkan hasil simulasi respon posisi kontrol *waypoint* kapal tanpa awak menggunakan kontroller MRAC-*statefeedback*. Gambar 4.9 menunjukkan respon sudut *heading* kapal tanpa awak dengan *waypoint navigation*.

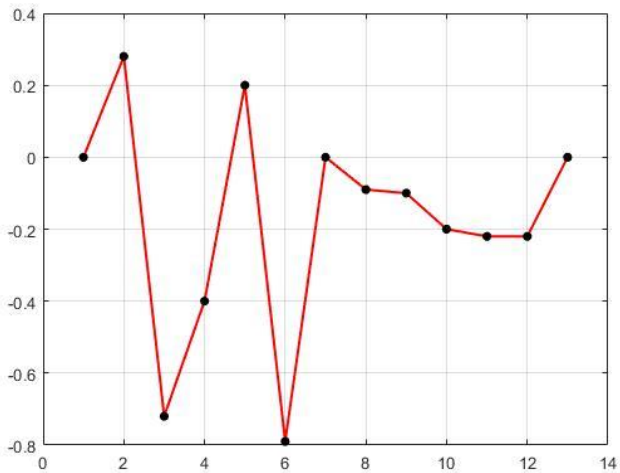
Dari gambar 4.8 dan gambar 4.9 dapat dilihat bahwa hasil dari kapal tanpa awak yang menggunakan MRAC-*State feedback* melalui *waypoint-waypoint* cenderung lebih cepat dalam beradaptasi dan sinyal sudut tidak beresilasi sehingga saat diperintahkan untuk melalui *waypoint-waypoint* yang ditetapkan tidak menghasilkan gerakan berkelok-kelok. *Cross track error* posisi kapal tanpa awak terhadap garis yang menghubungkan antara titik-titik *waypoint* ditunjukan pada gambar 4.10 dari hasil perhitungan RMS didapatkan *cross track error* RMS dari MRAC-*Statefeedback* adalah 0,1738



Gambar 4.8 Respon posisi kontrol *waypoint* USV kontroller MRAC-*state feedback*



Gambar 4.9 Respon sudut *heading* USV dengan *waypoint navigation* tanpa gangguan



Gambar 4.10 Respon *crosstrack error* kapal tanpa awak dengan *waypoint navigation* melibatkan gangguan eksternal.

4.5 Pengujian *Waypoint* Kontrol dengan gangguan

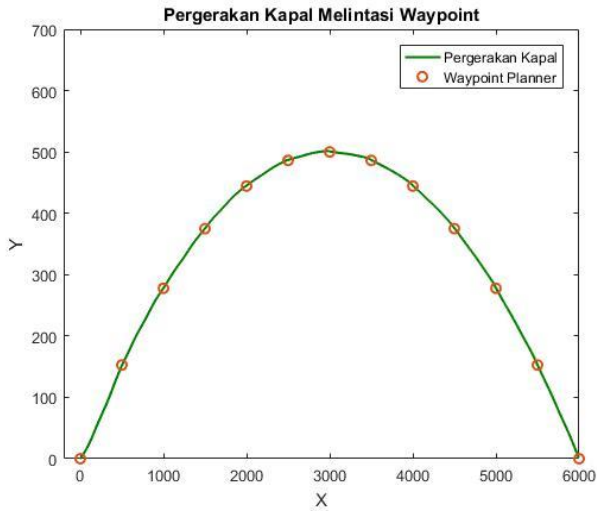
Pada subbab ini akan diberikan hasil pengujian kontrol *waypoint* menggunakan kontroller MRAC-*Statefeedback*. Pengujian dilakukan dengan melibatkan gangguan eksternal. Gangguan eksternal berupa gangguan angin, arus, ombak frekuensi 0.08 radian/s. Besaran dan arah gangguan disajikan dalam tabel 4.1 setiap simulasi dilakukan sepanjang 2000 sekon waktu simulasi. Skenario yang dijalankan adalah kapal tanpa awak harus mampu melewati 13 titik *waypoint* yang dapat dilihat pada tabel subbab 3. Gaya dorong kemudi *rudder* di buat konstant sebesar 30% dan *setpoint heading* akan selalu berubah sesuai koordinat kapal dan titik *waypoint* yang akan dituju. Sudut kemudi kemudi *rudder* juga dibatasi sebesar 30 derajat atau sebesar.

Tabel 4.3 Tabel besaran dan arah gangguan akibat pengaruh lingkungan

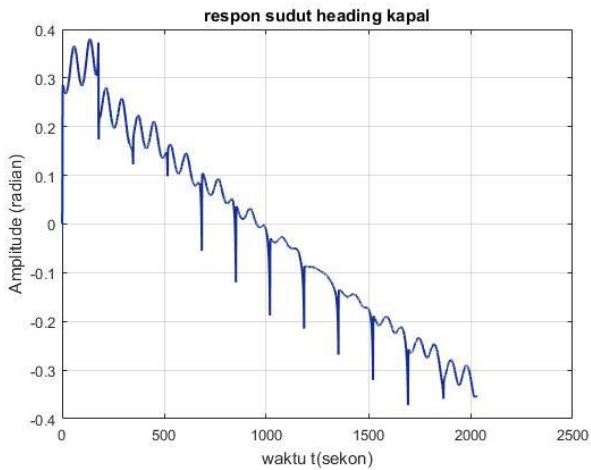
Gangguan	Besaran	Arah
Angin	1 m/s	-0,1 radian
Arus	0.15 m/s	-0,1 radian
Ombak	1 m	-0,1 radian

Gambar 4.10 Menunjukkan hasil simulasi respon posisi kontrol *waypoint* kapal tanpa awak menggunakan kontroler MRAC-*statefeedback* gambar 4.11 Menunjukkan perbandingan respon sudut heading kapal tanpa awak dengan *waypoint navigation*. Pada gambar 4.13 menunjukkan gambar *error waypoint* yang dihitung dengan RMS.

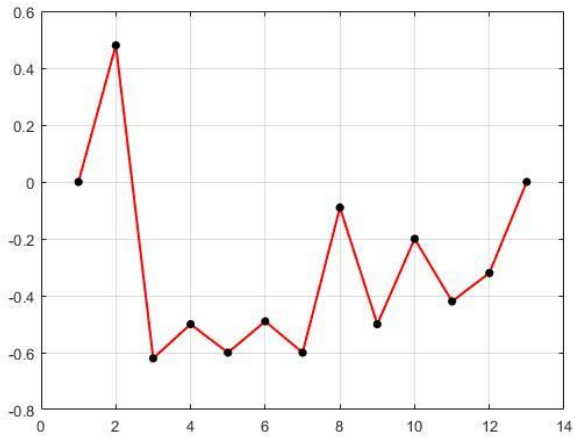
Dari gambar 4.10, gambar 4.11 dapat dilihat bahwa hasil dari kapal tanpa awak yang telah dikontrol dengan MRAC-*statefeedback* dapat melalui *waypoint-waypoint* yang telah ditetapkan namun masih berkelok-kelok pada awalnya. Ini dikarena kan respon sudut kemudi yang dihasilkan cenderung beresilasi diawal kapal tanpa awak dijalankan dan belum dapat beradaptasi, setelah berjalan lebih lama, kapal tanpa awak yang di kendalikan dengan menggunakan MRAC-*statefeedback* menghasilkan belok yang lebih besar dibandingkan saat kapal tanpa awak tidak diberikan gangguan. *Cross track error* posisi kapal tanpa awak terhadap garis yang menghubungkan antara titik-titik *waypoint* ditunjukkan pada gambar 4.13 dari hasil perhitungan RMS didapatkan *cross track error* RMS dari MRAC-*Statefeedback* adalah 0,2969.



Gambar 4.11 Respon posisi kontrol waypoint kapal tanpa awak menggunakan kontroler MRAC-*statefeedback*



Gambar 4.12 Respon sudut heading kapal tanpa awak dengan *waypoint navigation* melibatkan gangguan eksternal



Gambar 4.13 Respon cross track error kapal tanpa awak dengan *waypoint navigation* melibatkan gangguan eksternal

BAB 5

PENUTUP

Pada bab ini akan dibahas mengenai kesimpulan yang diambil berdasarkan hasil analisa dan pengujian dari pemodelan dan desain kontroler MRAC-statefeedback untuk kapal tanpa awak LSS01 juga saran untuk pengembangan kedepannya.

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pemodelan dan pengaturan kecepatan *surge* dan *yaw* kapal tanpa awak LSS-01 yang dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari simulasi dengan menggunakan MRAC-*statefeedback* kapal tanpa awak LSS01 dapat mengikuti atau beradaptasi dengan gangguan dari lingkungan yaitu angin, arus, dan ombak.
2. Kontroler MRAC-*statefeedback* mampu menghasilkan respon sudut heading kapal tanpa awak dan respon kecepatan translasi yang sesuai dengan kriteria desain yang diinginkan. Dari ketiga simulasi gain adaptif yang cocok untuk kapal tanpa awak LSS01 adalah 0,00001
3. *Cross track error* posisi kapal tanpa awak tanpa gangguan terhadap garis yang menghubungkan antara titik-titik *waypoint* tanpa gangguan dari hasil perhitungan RMS didapatkan *cross track error* RMS dari MRAC-*Statefeedback* adalah 0,0846 dan dengan gangguan dari hasil perhitungan RMS didapatkan *cross track error* RMS dari MRAC-*Statefeedback* adalah 0,2969.

5.2 Saran

Untuk pengembangan selanjutnya dalam penelitian ini, terdapat beberapa saran antara lain:

1. Menerapkan metode estimasi parameter yang lain sehingga bisa dibandingkan metode mana yang lebih cocok untuk pemodelan USV.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR PUSTAKA

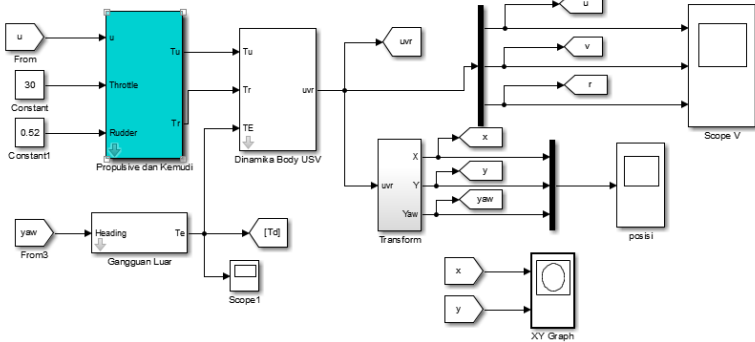
- [1] "THE NAVY UNMANNED SURFACE," Department of The Navy United States of America, 23 July 2007. [Online]. Available: <http://www.navy.mil/navydata/technology/usvmppr.pdf>.
- [2] S.M.Rajesh,S.Bhargava,S.B dan K.Sivanathan,'Mission Planning and Waypoint Navigation of a Micro Quadcopter by Selectable GPS Co-Ordinates.'*International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, p.143,2014
- [3] Hardianto, Dwiko, and Wasis Dwi Aryawan. "Pembuatan Konsep Desain Unmanned Surface Vehicle (USV) untuk Monitoring Wilayah Perairan Indonesia." *Jurnal Teknik ITS* 6.2 (2017): G65-G70.
- [4] Ramadhan, Fajar, and Wasis Dwi Aryawan. "Pembuatan Detail Desain Unmanned Surface Vehicle (USV) untuk Monitoring Wilayah Perairan Indonesia." *Jurnal Teknik ITS* 6.2 (2017): G302-G307.
- [5] Guo, Jiaying, Yu Liu, and Gang Tao. "Multivariable MRAC with state feedback for output tracking." 2009 American Control Conference. IEEE, 2009.
- [6] Gamayanti, Nurlita. "Karakteristik Sistem Orde Pertama dan Orde Kedua." *Handout Mata Kuliah Dasar Sistem Pengaturan*.
- [7] M. Haris, "Perancangan Kontroler Adaptif MRAC dan LQT untuk Kestabilan dan Trayektori Tracking pada UAV berjenis Fixed-Wing," *Departmen of Electrical Engineering ITS*, 2019.
- [8] R.L.W.li and D.A.Lawrence,LINER STATE-SPACE CONTROL SYSTEM.
- [9] K.Ogata, Modern Control Engineering 3 th edition, Minnesota: Prentice-Hall International, 1997.

[10] A.Al-Farabi, R. Effendie, and N.Gamayanti, “Perbandingan PID Model Reference Adaptive *Control* dengan L1 Adaptif Control untuk Kemudi Kapal Tanpa Awak Dalam Kontrol Waypoint”, p. 72.2018

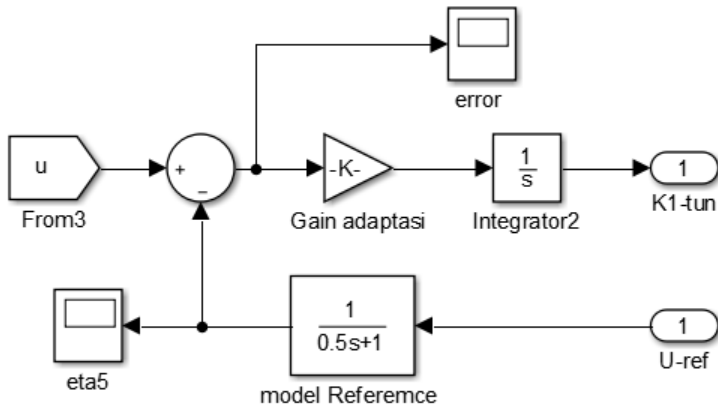
[11] K. J. Astroom and B. Wittenmark, “Adaptive Control”, Second ed., Dover Publication, 1994, p. 2.

LAMPIRAN

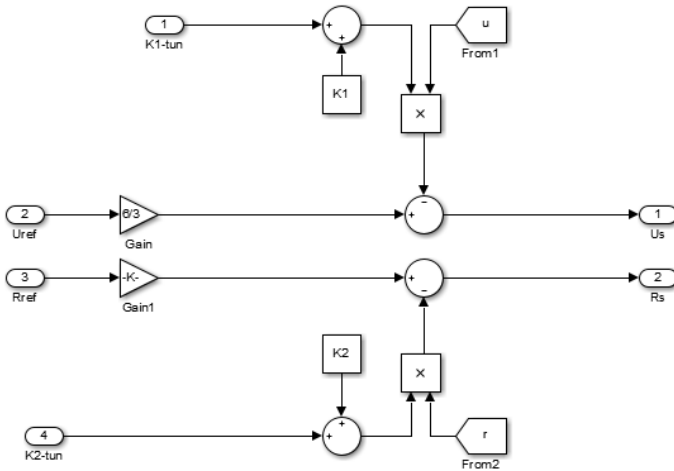
A. Diagram Blok *Simulink* Dinamika Kapal Tanpa Awak



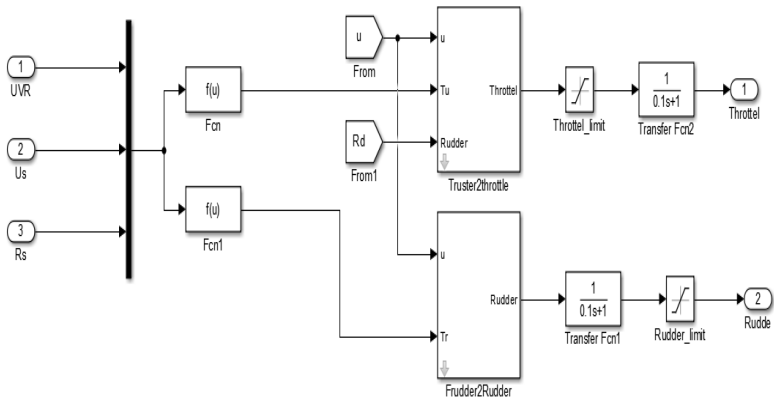
B. Diagram Blok *Simulink* MRAC



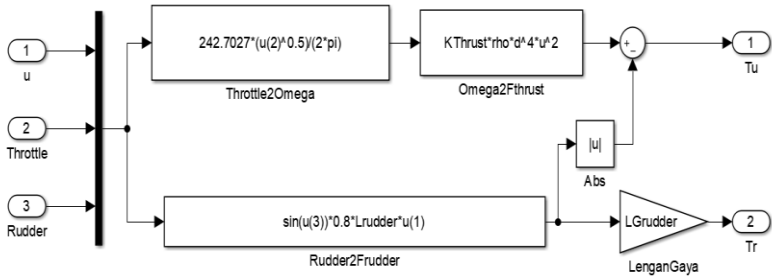
C. Diagram Blok *Simulink* State-feedback



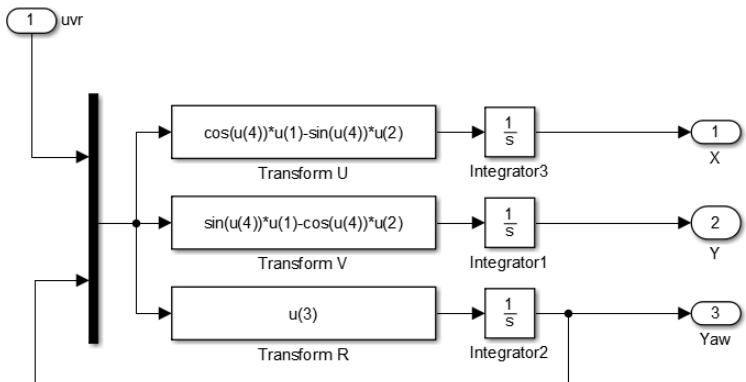
D. Diagram Blok *Simulink Feedback Linearization*



E. Diagram Blok *Simulink Propulsi dan kemudi*



F. Diagram Blok *Simulink Transformasi*



G. Diagram Blok *Simulink Propulsi dan kemudi*



Fadli Rahmasari, lahir di Boyolali pada tanggal 13 Desember 1995. Anak (putri) pertama dari pasangan Ir. Agung Susilo dan Umi Hardini A.md dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan di TK LKMD Dopleng Teras Boyolali. Kemudian memasuki SDN 1 Kadireso pada tahun 2001. Pada tahun 2007 penulis melanjutkan pendidikan nya di SMPN 2 Boyolali dan selanjutnya melanjutkan pendidikannya di SMAN 1 Boyolali pada tahun 2010. Pada tahun 2013 setelah lulus dari SMA penulis melanjutkan kuliah nya D3 di Universitas Gadjah Mada (UGM) Yogyakarta kuliah di Teknik Elektro dengan mengambil konsentrasi teknik elektronika. Selanjutnya pada tahun 2017 penulis melanjutkan jenjang pendidikan S1 Departemen Teknik Elektro, di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dengan mengambil Program Studi Teknik Sistem Pengaturan. Untuk menghubungi penulis, dapat melalui surat elektronik pada alamat email

Kontak: fadli.rahmasari76@gmail.com

[Halaman ini sengaja dikosongkan]