



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**PERBANDINGAN *PID MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* DENGAN *L1 ADAPTIVE CONTROL* UNTUK KEMUDI KAPAL TANPA AWAK DALAM KONTROL *WAYPOINT***

Muh Alif Farabi E.  
NRP. 07111440000195

Dosen Pembimbing  
Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.  
Nurlita Gamayanti, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**PERBANDINGAN *PID MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* DENGAN *L1 ADAPTIVE CONTROL* UNTUK KEMUDI KAPAL TANPA AWAK DALAM KONTROL *WAYPOINT***

Muh Alif Farabi E.  
NRP. 07111440000195

Dosen Pembimbing  
Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.  
Nurlita Gamayanti, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





**FINAL PROJECT - TE 141599**

**COMPARISON OF MODEL REFERENCE ADAPTIVE  
CONTROL PID WITH L1 ADAPTIVE CONTROL FOR  
UNMANNED SURFACE VEHICLE STEERING IN  
WAYPOINT CONTROL**

Muh Alif Farabi E.  
NRP. 0711144000195

Supervisor  
Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.  
Nurlita Gamayanti, S.T., M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



**PERBANDINGAN *PID* MODEL REFERENCE  
ADAPTIVE CONTROL DENGAN *LI* ADAPTIVE  
CONTROL UNTUK KEMUDI KAPAL TANPA AWAK  
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,**

**Dosen Pembimbing II,**

**Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.**  
NIP. 195704241985021001

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



**[Halaman ini sengaja dikosongkan]**



## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “*PERBANDINGAN PID MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL DENGAN LI ADAPTIVE CONTROL* UNTUK KEMUDI KAPAL TANPA AWAK DALAM KONTROL *WAYPOINT*” adalah hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan 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, Juli 2018

Muh Alif Farabi E.  
NRP. 07111440000195

**[Halaman ini sengaja dikosongkan]**

# **PERBANDINGAN *PID MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* DENGAN *L1 ADAPTIVE CONTROL* UNTUK KEMUDI KAPAL TANPA AWAK DALAM KONTROL *WAYPOINT***

Nama Mahasiswa : Muh Alif Farabi E.  
NRP : 07111440000195  
Pembimbing : 1. Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.  
2. Nurlita Gamayanti, S.T., M.T.

## **ABSTRAK**

Agar kapal tanpa awak dapat melaju secara otomatis, diperlukan perangkat-perangkat dan algoritma navigasi. Salah satu contoh algoritma navigasi adalah *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. Namun diinginkan kapal tanpa awak dapat beradaptasi di kedua kondisi tersebut. Salah satu cara untuk mengatasi gangguan ini adalah dengan merancang kontroler adaptif seperti *PID Model Reference Adaptive Control (MRAC)* dan Kontroler adaptif L1. *MRAC* adalah sistem kontrol adaptif berbasis referensi model. Di mana untuk mengatur perilaku plant, diperlukan sebuah referensi model yang diinginkan. Kontroler *PID MRAC* akan menyesuaikan respon plant sedekat mungkin dengan respon referensi model yang diinginkan. Kontroler adaptif L1 adalah pengembangan dari *MRAC* di mana perbedaan kontroler adaptif L1 adalah memisahkan *adaptation rate* dengan properti ke robust-an. Kelebihan metode L1 adalah, kerobust-an terjamin dengan adaptasi cepat. Pada penelitian ini, akan dibandingkan performa *PID MRAC* dengan kontroler adaptif L1. Didapatkan performa kontroler adaptif L1 mampu memberikan *cross track error* lebih kecil yaitu sebesar 1,8965 meter *RMS* dibandingkan *PID MRAC* dengan *cross track error* sebesar 8,083 meter *RMS* pada saat kapal tanpa awak berjalan melalui titik-titik *waypoint* tanpa pengaruh lingkungan. Sementara saat dipengaruhi gaya angin, arus, dan ombak, *cross track error kapal* tanpa awak yang menggunakan kontroler adaptif L1 adalah 2,2603 meter *RMS* dan *cross track error* kontroler *PID MRAC* adalah 8,5488 meter *RMS*.

Kata kunci : kapal tanpa awak, *waypoint*, *PID MRAC*, *L1 adaptive control*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

**COMPARISON OF MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL  
PID WITH L1 ADAPTIVE CONTROL FOR UNMANNED  
SURFACE VEHICLE STEERING IN WAYPOINT CONTROL**

By : Muh Alif Farabi E.  
Student Identity Number : 07111440000195  
Supervisor(s) : 1. Ir. Rusdhianto Effendie A.K, M.T.  
2. Nurlita Gamayanti, S.T., M.T.

**ABSTRACT**

*In order for unmanned surface vehicle to go automatically, navigation devices and algorithms are required. One example of a navigation algorithm is the waypoint. To control an unmanned surface vehicle to the desired waypoint, it is necessary to control the steering angle of the ship. Unmanned surface vehicle may encounter external disturbances while ongoing like waves, winds and ocean currents. But , it's desired that unmanned surface vehicle can adapt in both conditions. One way to overcome this disturbance is to design adaptive controllers such as PID Model Reference Adaptive Control (MRAC) and L1 adaptive Controller. MRAC is a reference-based adaptive control system model. Where to regulate the behavior of the plant, a reference model is required. The MRAC PID controller will adjust the response of the plant as close as possible to the desired model reference response. The L1 adaptive controller is the development of the MRAC where the L1 adaptive controller difference is separation between the adaptation rate from the robust property. The advantages of L1 method are, robust is assured by quick adaptation. In this study, we compared the performance of the MRAC PID with the L1 adaptive controller for the unmanned ship steering angle. L1 adaptive controller performance was able to provide a smaller cross track error of 1.8965 meter RMS compared to the MRAC PID resulting in a cross track error of 8.083 meters RMS at the time the unmanned vessel goes through waypoint points without environmental influence. While when influenced by wind, waves, and waves, cross track error unmanned ship using L1 adaptive controller is 2.2603 meter RMS and cross track error unmanned ship using MRAC PID controller is 8,5488 meters RMS.*

*Keyword : unmanned surface vehicle, PID MRAC, L1 adaptive control*

**[Halaman ini sengaja dikosongkan]**

## KATA PENGANTAR

Segala Puji Syukur ke Hadirat Allah SWT yang senantiasa memberikan ridha dan inayah Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Perbandingan *PID Model Reference Adaptive Control* dengan *L1 Adaptive Control* untuk Kemudi Kapal Tanpa Awak dalam Kontrol *Waypoint*”**.

Banyak pihak telah berperan dalam membantu selama proses studi maupun penelitian ini. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Keluarga serta orang tua penulis yang telah memberi dukungan waktu, pembelajaran dan doa kepada penulis.
2. Bapak Ir. Rusdhianto Effendie A.K.,M.T. dan ibu Nurlita Gamayanti, S.T., M.T. sebagai dosen pembimbing yang telah memberi bimbingan, kejelasan, nasehat, dan kemudahan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
3. Dosen-dosen Laboraturium Teknik Sistem dan Sibernetika AJ204 yang juga memberi nasehat dan dukungan selama proses studi.
4. Mba Iim, Mba Farida, Mas Khoiron yang telah membantu proses penelitian pada Tugas Akhir ini.
5. Mas Ericza dari Departemen Teknik Perkapalan yang telah membantu memberi wawasan mengenai kapal pada Tugas Akhir ini.
6. Dhyaksa, Nardi, Cut, serta teman-teman Sistem Pengaturan 2014 Reguler maupun Lintas Jalur.
7. Seluruh anggota Lab AJ 104, B106, B105, serta A204 yang telah mendukung serta kerja samanya dalam proses studi maupun penelitian.
8. Teman-teman Tim Barunastra Roboboat ITS atas segala bantuan, pengalaman, dan dukungan selama proses studi.
9. Teman-teman UKM Robotika ITS atas dukungan moril selama proses studi.

Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan rekan-rekan mahasiswa Departemen Teknik Elektro ITS pada khususnya. Saran dan kritik membangun selalu penulis harapkan untuk kelengkapan pengetahuan penulis terkait Tugas Akhir ini.

Surabaya, Juli 2018

Muh Alif Farabi E.  
NRP. 07111440000195



## DAFTAR ISI

|   |      |
|---|------|
| <b>HALAMAN JUDUL</b> .....  | i    |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....  | v    |
| <b>PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR</b> .....  | vii  |
| <b>ABSTRAK</b> .....  | ix   |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | xi   |
| <b>KATA PENGANTAR</b> .....   | xiii |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....   | xv   |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....  | xvii |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....   | xix  |
| <b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....  | 1    |
| 1.1 Latar Belakang.....   | 1    |
| 1.2 Permasalahan .....  | 2    |
| 1.3 Permasalahan .....  | 2    |
| 1.4 Tujuan.....   | 2    |
| 1.5 Metodologi.....   | 3    |
| 1.6 Sistematika.....  | 3    |
| 1.7 Relevansi .....   | 4    |
| <b>BAB 2 TEORI PENUNJANG DAN DASAR TEORI</b> .....  | 5    |
| 2.1 Tinjauan Pustaka.....   | 5    |
| 2.1.1 <i>Control of Ships and Underwater Vehicles : Modeling of Ocean Vessels</i> .....   | 5    |
| 2.1.2 <i>Control of Ships and Underwater Vehicles : Modeling of Ocean Vessels : Three Degrees of Freedom Horizontal Model</i> ..... | 9    |
| 2.1.3 <i>Design and Simulation of Auto Tuning of PID Controller using MRAC Technique for Coupled Tanks System</i> .....             | 10   |
| 2.1.4 <i>L1 Adaptive Control Theory : L1 Adaptive Output Feedback Controller for First-Order Reference Systems</i> .....            | 12   |
| 2.1.5 <i>Guidance, Navigation and Control of Unmanned Airships under Time-Varying Wind for Extended Surveillance</i> .....          | 13   |
| 2.2 Teori Dasar .....   | 15   |
| 2.2.1 Model Matematis Kapal Tanpa Awak .....  | 15   |
| 2.2.1.1 Matriks Transformasi <i>Bodyframe</i> ke <i>Earthframe</i> ....   | 15   |
| 2.2.1.2 Matriks Inersia <i>Rigid Body</i> dan Massa Tambahan ...  | 15   |
| 2.2.1.3 Matriks <i>Centripetal</i> dan <i>Coriolis</i> dari <i>Rigid Body</i> ....  | 16   |
| 2.2.1.4 Matriks Damper .....  | 16   |
| 2.2.1.5 Vektor Gaya Masukan .....   | 16   |

|                        |   |           |
|------------------------|---|-----------|
| 2.2.1.6                | Vektor Gaya Pengaruh Lingkungan .....   | 16        |
| 2.2.2                  | Kontroler <i>PID MRAC</i> .....   | 17        |
| 2.2.3                  | Kontroler Adaptif L1 .....  | 18        |
| 2.2.3.1                | <i>State Predictor</i> .....  | 18        |
| 2.2.3.2                | <i>Control Law</i> .....  | 19        |
| 2.2.3.3                | <i>Adaptation Law</i> .....   | 19        |
| <b>BAB 3</b>           | <b>METODOLOGI PENELITIAN</b> .....  | <b>21</b> |
| 3.1                    | Rancangan umum sistem .....   | 21        |
| 3.2                    | Perancangan <i>Plant</i> Kapal Tanpa Awak .....   | 22        |
| 3.3                    | Perancangan Kontroler <i>PID MRAC</i> .....   | 27        |
| 3.4                    | Perancangan Kontroler Adaptif L1 .....  | 28        |
| 3.4.1                  | Perancangan <i>State Predictor</i> .....  | 28        |
| 3.4.2                  | Perancangan <i>Low Pass Filter</i> Orde Satu .....  | 28        |
| 3.4.3                  | Skema Kontroler Adaptif L1 .....  | 29        |
| 3.5                    | Perancangan Navigasi <i>Waypoint</i> .....  | 29        |
| <b>BAB 4</b>           | <b>HASIL SIMULASI DAN ANALISA</b> .....   | <b>31</b> |
| 4.1                    | Pengujian <i>Plant</i> kapal tanpa awak .....   | 31        |
| 4.2                    | Pengujian Manuver Kapal Tanpa Awak menggunakan kontroler <i>PID MRAC</i> .....  | 34        |
| 4.3                    | Pengujian Manuver Kapal Tanpa Awak dengan Kontroler Adaptif L1 .....  | 37        |
| 4.4                    | Pengujian Perbandingan Kontrol <i>Waypoint</i> antara <i>PID MRAC</i> dan Kontroler Adaptif L1 dengan Kondisi Tanpa Gangguan Eksternal .....  | 39        |
| 4.5                    | Pengujian Perbandingan Kontrol <i>Waypoint</i> antara <i>PID MRAC</i> dan Kontroler Adaptif L1 dengan Kondisi Adanya Gangguan Eksternal ..... | 42        |
| <b>BAB 5</b>           | <b>KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....   | <b>47</b> |
| 5.1                    | Kesimpulan .....  | 47        |
| 5.1                    | Saran .....   | 47        |
| <b>DATAR PUSTAKA</b>   | .....   | <b>49</b> |
| <b>LAMPIRAN</b>        | .....   | <b>51</b> |
| <b>BIODATA PENULIS</b> | .....   | <b>57</b> |

## DAFTAR GAMBAR

|                   |  |    |
|-------------------|--|----|
| <b>Gambar 2.1</b> | Derajat Kebebasan Kapal Tanpa Awak Umum[5] .....   | 5  |
| <b>Gambar 2.2</b> | Ilustrasi Variabel Pergerakan Kapal[6] .....   | 10 |
| <b>Gambar 2.3</b> | Diagram Blok <i>MRAC</i> .....   | 10 |
| <b>Gambar 2.4</b> | Ilustrasi <i>Waypoint Control</i> .....  | 14 |
| <b>Gambar 2.5</b> | Diagram Simulink Kontroler <i>PID MRAC</i> Berdasarkan <i>MIT Rule</i> .....                           | 18 |
| <b>Gambar 2.6</b> | Diagram Blok Kontroler Adaptif L1 .....  | 20 |
| <b>Gambar 3.1</b> | Rancangan Sistem untuk Validasi Kontroler .....  | 21 |
| <b>Gambar 3.2</b> | Rancangan Umum Sistem dengan <i>Waypoint Navigation</i> .  | 22 |
| <b>Gambar 3.3</b> | Diagram Simulink <i>Plant</i> Kapal Tanpa Awak Beserta Blok Propulsi <i>Azimuth</i> .....              | 24 |
| <b>Gambar 3.4</b> | Diagram Simulink Gangguan Angin .....  | 26 |
| <b>Gambar 3.5</b> | Diagram Simulink Gangguan Arus .....   | 26 |
| <b>Gambar 3.6</b> | Diagram Simulink Gangguan Ombak.....   | 27 |
| <b>Gambar 3.7</b> | Diagram Simulink Kontroler <i>PID MRAC</i> Hasil Perancangan .....                                     | 27 |
| <b>Gambar 3.8</b> | Diagram Simulink Kontroler Adaptif L1 Hasil Perancangan .....  | 29 |
| <b>Gambar 3.9</b> | Titik-Titik <i>Waypoint</i> yang Akan Dilalui Oleh Kapal Tanpa Awak.....                               | 30 |
| <b>Gambar 4.1</b> | Respon Posisi Kapal Tanpa Awak Tanpa Kontroler.....  | 32 |
| <b>Gambar 4.2</b> | Respon Kecepatan Translasi Searah Sumbu X Kapal Tanpa Awak Tanpa Kontroler .....                       | 33 |
| <b>Gambar 4.3</b> | Respon Sudut <i>Heading</i> Kapal Tanpa Awak Tanpa Kontroler .....                                     | 33 |
| <b>Gambar 4.4</b> | Respon Posisi Kapal Tanpa Awak dengan Kontroler <i>PID MRAC</i> .....                                  | 34 |
| <b>Gambar 4.5</b> | Respon Sudut <i>Heading</i> Kapal Tanpa Awak dengan Kontroler <i>PID MRAC</i> .....                    | 35 |
| <b>Gambar 4.6</b> | Perbandingan Respon Sudut <i>Heading</i> Kapal Tanpa Awak dengan <i>Model Reference</i> .....          | 35 |
| <b>Gambar 4.7</b> | Respon Posisi Kapal Tanpa Awak dengan Kontroler Adaptif L1 .....                                       | 37 |
| <b>Gambar 4.8</b> | Respon Sudut <i>Heading</i> Kapal Tanpa Awak dengan Kontroler Adaptif L1 .....                         | 38 |
| <b>Gambar 4.9</b> | Perbandingan Respon Sudut <i>Heading</i> Kapal Tanpa Awak dengan Keluaran <i>State Predictor</i> ..... | 39 |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Gambar 4.10</b> | Perbandingan Respon Posisi Kontrol <i>Waypoint</i> Kapal Tanpa Awak Menggunakan Kontroler <i>PID MRAC</i> dan Kontroler Adaptif L1 .....                           | 41 |
| <b>Gambar 4.11</b> | Perbandingan Respon Sudut <i>Heading</i> Kapal Tanpa Awak dengan <i>Waypoint Navigation</i> .....  | 41 |
| <b>Gambar 4.12</b> | Perbandingan Respon Sudut Kemudi Kapal Tanpa Awak dengan <i>Waypoint Navigation</i> .....  | 42 |
| <b>Gambar 4.13</b> | Perbandingan <i>Cross Track Error</i> Kapal Tanpa Awak Tanpa Gangguan .....  | 42 |
| <b>Gambar 4.14</b> | Perbandingan Respon Posisi Kontrol <i>Waypoint</i> Kapal Tanpa Awak Menggunakan Kontroler <i>PID MRAC</i> dan Kontroler Adaptif L1 Melibatkan Gangguan Eksternal . | 44 |
| <b>Gambar 4.15</b> | Perbandingan Respon Sudut <i>Heading</i> Kapal Tanpa Awak dengan <i>Waypoint Navigation</i> Melibatkan Gangguan Eksternal .....                                    | 44 |
| <b>Gambar 4.16</b> | Perbandingan Respon Sudut Kemudi Kapal Tanpa Awak dengan <i>Waypoint Navigation</i> Melibatkan Gangguan Eksternal .....  | 45 |
| <b>Gambar 4.17</b> | Perbandingan <i>Cross Track Error</i> Kapal Tanpa Awak dengan Gangguan .....   | 45 |

## DAFTAR TABEL

|                  |   |    |
|------------------|---|----|
| <b>Tabel 2.1</b> | Notasi Derajat Kebebasan Kapal Tanpa Awak Umum .....                      | 6  |
| <b>Tabel 3.1</b> | Data Parameter Sistem .....   | 22 |
| <b>Tabel 3.2</b> | Daftar Koordinat <i>Waypoint</i> yang Akan Dilalui Kapal Tanpa Awak ..... | 30 |

**[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 atau kapal dapat melaju secara otomatis penuh tanpa pantauan operator. [1]

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

Agar sebuah kapal tanpa awak dapat bergerak, diperlukan perangkat propulsi atau perangkat penggerak. Salah satu tipe propulsi adalah *azimuth*. *Azimuth* adalah tipe propulsi yang tidak menggunakan daun kemudi melainkan arah gaya dorong baling-balingnya lah yang dirubah agar kapal tanpa awak dapat bergerak maju maupun berbelok. [3]

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 dan saat mendapat gangguan pastinya berbeda. Namun diinginkan kapal tanpa awak dapat beradaptasi di kedua kondisi tersebut.

Salah satu cara untuk mengatasi gangguan ini adalah dengan merancang kontroler adaptif seperti *PID Model reference Adaptive Control (MRAC)* dan kontroler adaptif L1. *MRAC* adalah sistem kontrol adaptif berbasis referensi model. Di mana untuk mengatur perilaku *plant*, diperlukan sebuah referensi model yang diinginkan. Kontroler PID MRAC akan menyesuaikan respon *plant* sedekat mungkin dengan respon referensi model yang diinginkan [6]. Kontroler adaptif L1 adalah pengembangan dari *MRAC* di mana Perbedaan Kontroler adaptif L1 adalah memisahkan *adaptation rate* dengan properti ke robust-an.

Kelebihan metode L1 adalah, kerobust-an terjamin dengan adaptasi cepat, pemisahan adaptasi dengan kerobust-an, respon *transient* terjamin, dan lebar *time-delay* terjamin. [4]

Di penelitian ini, penulis ingin merancang kontrol adaptif untuk kendali kemudi kapal tanpa awak dengan metode *PID Model reference Adaptive Control(MRAC)* dan Kontroler adaptif L1 kemudian membandingkan hasil kontrol kedua metode tersebut untuk kemudi kapal tanpa awak.

## 1.2 Permasalahan

Kapal tanpa awak menggunakan pendekatan *3 degree of freedom*(derajat kebebasan) untuk navigasi *waypoint*. 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 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut,

1. Kapal tanpa awak memiliki 3 derajat kebebasan yaitu pada sumbu gerak *surge, sway, dan yaw*.
2. Navigasi *waypoint* bekerja pada bidang planar.
3. Bentuk pengaruh gangguan arus dan ombak berupa pendekatan.
4. Model fungsi alih motor propulsi tidak disertakan dalam sistem yang akan disimulasi.
5. Kecepatan bukan merupakan variabel yang di kontrol.

## 1.4 Tujuan

Membandingkan kontrol adaptif berbasis *PID MRAC* dan Kontroler adaptif L1 untuk kontrol kemudi kapal tanpa awak saat menuju suatu *waypoint* dengan gangguan eksternal dan mencari metode yang terbaik untuk kapal tanpa awak.



## 1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada pengerjaan tugas akhir ini diawali dengan studi literatur. 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 memodelkan dinamika gerak kapal tanpa awak dan merancang kontroler yang diperlukan.

Setelah mendapatkan model matematis dari dinamika gerak kapal tanpa awak, dilakukan eksperimen untuk memperoleh dinamika kapal secara open-loop dan mengetahui karakteristik sistem kapal tanpa awak. Respon open-loop ini yang akan menjadi acuan dalam merancang kontroler dengan kriteria performansi tertentu dengan metode *PID MRAC* dan Kontroler adaptif L1.

Setelah metode *PID MRAC* dan Kontroler adaptif L1 telah dirancang, tahap berikutnya adalah pengujian kedua kontroler untuk melakukan aksi kontrol kemudi kapal tanpa awak untuk tugas yang sama. Setelah dilakukan pengujian, hasil simulasi dibandingkan untuk melihat perbandingan dari *PID MRAC* dan Kontroler adaptif L1 dan melihat mana dari kedua kontroler tersebut yang memberikan performa lebih baik pada kapal tanpa awak.

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

## 1.6 Sistematika

Laporan tugas akhir ini dibagi dalam lima bab dengan susunan dan uraian singkat masing-masing bab nya seperti berikut,

### **BAB 1 Pendahuluan**

Pendahuluan menguraikan latar belakang dari pelaksanaan tugas akhir, penegasan dan alasan pemilihan judul. Permasalahan yang ada, tujuan pelaksanaan tugas akhir, metodologi penelitian, sistematika penulisan laporan tugas akhir, dan relevansi tugas akhir ini.

### **BAB 2 Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori**

Pada bab ini, dijabarkan teori-teori penunjang dan teori-teori dasar yang akan menjadi acuan dalam melaksanakan tugas akhir ini. Isi

bab ini meliputi tinjauan pustaka dan dasar teori mengenai kapal tanpa awak, kontroler *PID MRAC*, kontroler adaptif L1, dan navigasi *waypoint*.

### **BAB 3 Metodologi Penelitian**

Dalam bab ini dijelaskan langkah-langkah merancang model matematis kapal tanpa awak, perancangan kontroler *PID MRAC*, perancangan kontroler adaptif L1, dan perancangan navigasi *waypoint*.

### **BAB 4 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 *PID MRAC*, pengujian kontroler adaptif L1, dan pengujian perbandingan kontroler *PID MRAC* dan kontroler adaptif L1 dalam hal navigasi *waypoint*. Hasil dari pengujian akan di analisa selanjutnya.

### **BAB 5 Kesimpulan dan Saran**

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

## **1.7 Relevansi**

Hasil dari pelaksanaan tugas akhir ini diharapkan dapat membri manfaat sebagai salah satu referensi untuk penelitian-penelitian yang akan datang mengenai perbandingan antara kontroler *PID MRAC* dan kontroler adaptif L1.

## BAB 2

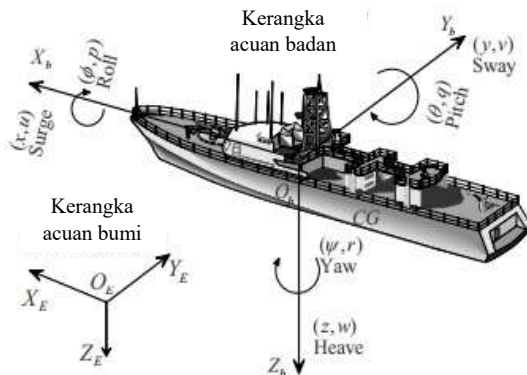
### TEORI PENUNJANG DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Pada bagian ini akan dijelaskan beberapa kajian yang digunakan sebagai ide awal, penunjang maupun acuan dari penelitian ini.

##### 2.1.1 *Control of Ships and Underwater Vehicles : Modeling of Ocean Vessels*

Pergerakan kapal tanpa awak umum dinyatakan dalam 6 derajat kebebasan, seperti pada Gambar 2.1 . Tiga koordiant pertama ( $x, y, z$ ) dan turunan pertamanya untuk menyatakan posisi dan pergerakan translasi kapal tanpa awak umum, sedangkan tiga koordinat terakhir ( $\phi, \theta, \psi$ ) dan turunan pertamanya untuk menyatakan arah dan pergerakan rotasi kapal tanpa awak umum [5]. Notasi pada kapal tanpa awak umum dapat dilihat pada Tabel 2.1.



**Gambar 2.1.**Derajat Kebebasan Kapal Tanpa Awak Umum[5]

**Tabel 2.1** .Notasi Derajat Kebebasan Kapal Tanpa Awak Umum

| Derajat Kebebasan | Nama Gerak   | Gaya dan Momen | Kecepatan Linier dan Kecepatan Sudut | Posisi dan Sudut Euler |
|-------------------|--------------|----------------|--------------------------------------|------------------------|
| 1                 | <i>Surge</i> | <i>X</i>       | <i>u</i>                             | <i>x</i>               |
| 2                 | <i>Sway</i>  | <i>Y</i>       | <i>v</i>                             | <i>y</i>               |
| 3                 | <i>Heave</i> | <i>Z</i>       | <i>w</i>                             | <i>z</i>               |
| 4                 | <i>Roll</i>  | <i>K</i>       | <i>p</i>                             | $\emptyset$            |
| 5                 | <i>Pitch</i> | <i>M</i>       | <i>q</i>                             | $\theta$               |
| 6                 | <i>Yaw</i>   | <i>N</i>       | <i>r</i>                             | $\psi$                 |

Variabel derajat kebebasan kapal tanpa awak umum dapat dinyatakan dengan vektor – vektor berikut :

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

di mana,

$\boldsymbol{\eta}$  : 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 kapal tanpa awak pada kerangka acuan badan kapal (*body-fixed*)

Dalam menurunkan model matematika kapal tanpa awak umum, dinamika kapal tanpa awak dibagi mejadi dua bagian yaitu bagian kinematika yang hanya memperhatikan aspek gerak geometris dan bagian kinetika berupa analisa gaya yang menghasilkan gerak.

Model matematika kapal tanpa awak dinyatakan sebagai berikut :

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

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

Di mana komponen-komponen pada Persamaan (2.1) dan (2.2) di definisikan oleh Persamaan (2.3) hingga (2.6).

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}_{RB} + \boldsymbol{M}_A \quad (2.3)$$

$$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{v}) = \boldsymbol{C}_{RB}(\boldsymbol{v}) + \boldsymbol{C}_A(\boldsymbol{v}) \quad (2.4)$$

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

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

$$J = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Komponen  $J_1(\eta_2)$  dan  $J_2(\eta_2)$  adalah matrix transformasi yang berhubungan dengan fungsi sudut euler : Roll ( $\Phi$ ), Pitch ( $\theta$ ), dan Yaw ( $\psi$ ) yang didefinisikan pada Persamaan (2.8) dan Persamaan (2.9).

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) \cos(\theta) & -\cos(\psi) \cos(\Phi) + \sin(\Phi) \sin(\theta) \cos(\psi) \\ \sin(\psi) \cos(\theta) & \cos(\psi) \cos(\Phi) + \sin(\Phi) \sin(\theta) \sin(\psi) \\ -\sin(\theta) & \sin(\Phi) \cos(\theta) \\ & \sin(\psi) \sin(\Phi) + \sin(\theta) \cos(\psi) \cos(\Phi) \\ & -\cos(\psi) \sin(\Phi) + \sin(\theta) \sin(\psi) \cos(\Phi) \\ & \cos(\Phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\Phi) \tan(\theta) & \cos(\Phi) \tan(\psi) \\ 0 & \cos(\Phi) & -\sin(\Phi) \\ 0 & \frac{\sin(\Phi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\Phi)}{\cos(\theta)} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Matriks inersia dari sistem *rigid body*  $M_{RB}$  dan matrik massa tambahan  $M_A$  didefinisikan pada Persamaan (2.10) dan Persamaan (2.11).

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

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

Matriks *centripetal*  $\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})$  didefinisikan pada Persamaan (2.12) dan *coriolis* dari *rigid body* dan hidrodinamik  $\mathbf{C}_A(\mathbf{v})$  didefinisikan pada Persamaan (2.13) beserta komponen-komponennya pada Persamaan (2.14) hingga Persamaan (2.19).

$$\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_g q + z_g r) & m(y_g p + w) & m(z_g p - v) \\ m(x_g q - w) & -m(z_g r + x_g p) & m(z_g q - u) \\ m(x q + v) & m(y_g r - u) & -m(x_g p + y_g q) \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{array}{lll} m(y_g q + z_g r) & -m(x_g q - w) & -m(x q + v) \\ -m(y_g p + w) & m(z_g r + x_g p) & -m(y_g r - u) \\ -m(z_g p - v) & -m(z_g q - u) & m(x_g p + y_g q) \\ 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_z r & I_{yz}r + I_{xy}p - I_y q \\ I_{xz}q + I_{xz}p - I_z r & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_x p \\ -I_{yz}r - I_{xy}p + I_y q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_x p & 0 \end{array} \right\} (2.12)$$

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

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

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

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

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

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

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

$\mathbf{D}$  dan  $\mathbf{D}_n(\mathbf{v})$  masing – masing adalah matriks damper linier dan matriks damper nonlinier. Matriks damper nonlinier  $\mathbf{D}_n(\mathbf{v})$  biasanya dimodelkan menggunakan ekspansi seri *taylor* orde tiga atau fungsi modulus. Matriks  $\mathbf{D}$  ditulis seperti pada Persamaan (2.20)

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

Matriks  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$  adalah gaya dan momen yang diakibatkan oleh grafitasi dan daya apung, dapat ditulis seperti Persamaan (2.21)

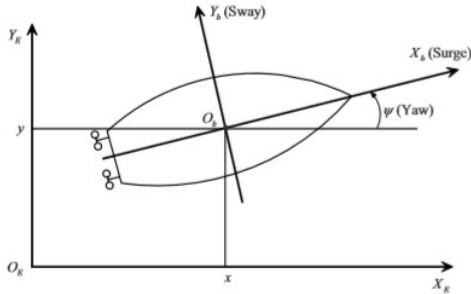
$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} (W - B)\sin(\theta) \\ -(W - B)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ -(W - B)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ -(y_g W - y_b B)\cos(\theta)\cos(\phi) + (z_g W - z_b B)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ (z_g W - z_b B)\sin(\theta) + (x_g W - x_b B)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ -(x_g W - x_b B)\cos(\theta)\sin(\phi) + (y_g W - y_b B)\sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

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

### 2.1.2 Control of Ships and Underwater Vehicles : Modeling of Ocean Vessels : Three Degrees of Freedom Horizontal Model

Pergerakan mendatar dari sebuah kapal yang bergerak pada bidang mendatar umumnya di deskripsikan dengan komponen pergerakan *surge*, *sway*, dan *yaw* [6]. Ilustrasi variabel pergerakan ditunjukkan oleh Gambar 2.2 dengan asumsi-asumsi seperti berikut,

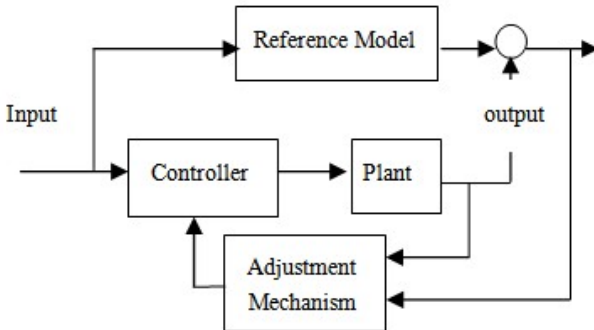
1. Gerakan pada *roll*, *pitch*, dan *heave* diabaikan. Sehingga  $z = 0$ ,  $w = 0$ ,  $\phi = 0$ ,  $p = 0$ ,  $\theta = 0$  dan  $q = 0$ .
2. Kapal memiliki distribusi massa yang homogen dan bidang-xz simetri sehingga  $I_{xy} = I_{yz} = 0$ .
3. Titik tengah gaya grafitasi *CG* dan titik tengah daya apung *CB*, terletak secara vertikal di sumbu-z.



**Gambar 2.2** Ilustrasi Variabel Pergerakan Kapal[6]

### 2.1.3 Design and Simulation of Auto Tuning of PID Controller using MRAC Technique for Coupled Tanks System

MRAC adalah sistem kontrol adaptif berbasis referensi model [7]. Mekanisme penyetelan didesain menggunakan aturan MIT. Diagram blok dari MRAC ditunjukkan oleh Gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Blok Diagram MRAC

Strategi kendali MRAC diperoleh menggunakan pendekatan *gradient* dari aturan MIT. Berdasarkan pendekatan *gradient*, sebuah *cost function* ( $\Psi(\Phi)$ ) diputuskan dalam hal eror *tracking* ( $e$ ). Seperti ditunjukkan dibawah, eror *tracking* didefinisikan sebagai Persamaan (2.28) eror antara *output* referensi model dan *output* dari *plant*.

$$e = y(t) - y_m(t) \quad (2.28)$$

$$\Psi(\Phi) = \frac{1}{2} e^2(\Phi) \quad (2.29)$$



Berdasarkan aturan MIT, *rate* perubahan  $\Phi$  secara langsung proporsional terhadap *negative gradient* dari *cost function*, seperti ditunjukkan pada Persamaan (2.30) dan (2.31)

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\gamma \frac{\partial \Psi}{\partial \Phi} \quad (2.30)$$

$$\frac{d\Phi}{dx} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \Phi} \quad (2.31)$$

di mana  $\Phi$  = vektor parameter kontroler,  $e$  = *error tracking*,  $\gamma$  = *Gain* adaptif dan  $\frac{\partial e}{\partial \Phi}$  adalah *sensitivity derivative*.

Mari asumsikan sebuah *plant* orde satu ( $G(s)$ ) memiliki Persamaan seperti (2.32)

$$G(s) = \frac{b}{s + a} \quad (2.32)$$

sinyal kendali di deskripsikan sebagai (2.33)

$$u(t) = K_p [u_e - y_m] + \frac{K_i}{s} [u_e - y_m] - K_d s y_m \quad (2.33)$$

Setelah beberapa kalkulasi matematis, diperoleh Persamaan (2.34)

$$\frac{y(s)}{u_e(s)} = \frac{b(K_p s + K_i)}{(1 + bK_d)s^2 + (a + bK_p)s + bK_i} \quad (2.34)$$

Untuk menghitung parameter persamaan kontroler PID, pendekatan (2.35) dapat dibuat

$$s^2 + \frac{(a + bK_p)}{(1 + bK_d)}s + \frac{bK_i}{(1 + bK_d)} \approx s^2 + a_{m1}s + a_{m2} \quad (2.35)$$

Dengan begitu, referensi model dapat diperoleh menjadi

$$\frac{y_m(s)}{u_m(s)} = \frac{b_{m1}s + b_{m2}}{s^2 + a_{m1}s + a_{m2}} \quad (2.36)$$

Untuk menghitung persamaan *tuning* parameter PID dengan aturan MIT, Persamaan dapat ditulis sebagai (2.37), (2.38), dan (2.39)

$$\begin{aligned}\frac{dK_p}{dt} &= -\gamma_p \frac{\partial \Psi}{\partial K_p} = -\gamma_p \frac{\partial \Psi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial K_p} \\ &= -\gamma_p e \frac{bs[u_e - y]}{(1 + bK_d)s^2 + (a + bK_p)s + bK_i}\end{aligned}\quad (2.37)$$

$$\begin{aligned}\frac{dK_i}{dt} &= -\gamma_i \frac{\partial \Psi}{\partial K_i} = -\gamma_i \frac{\partial \Psi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial K_i} \\ &= -\gamma_i e \frac{b[u_e - y]}{(1 + bK_d)s^2 + (a + bK_p)s + bK_i}\end{aligned}\quad (2.38)$$

$$\begin{aligned}\frac{dK_d}{dt} &= -\gamma_d \frac{\partial \Psi}{\partial K_d} = -\gamma_d \frac{\partial \Psi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial K_d} \\ &= -\gamma_d e \frac{bs^2[y]}{(1 + bK_d)s^2 + (a + bK_p)s + bK_i}\end{aligned}\quad (2.39)$$

Ketiga persamaan diatas menunjukkan perubahan parameter PID terhadap waktu.

#### 2.1.4 *L1 Adaptive Control Theory : L1 Adaptive Output Feedback Controller for First-Order Reference Systems*

Pada bagian ini dijelaskan kontroler adaptif *output feedback* L1 untuk sistem *SISO* dengan dimensi dan dinamika yang tidak diketahui disertai gangguan yang berubah terhadap waktu. metodologi memastikan respon transien yang dibatasi secara seragam untuk kedua sinyal sistem, *input* dan *output*, secara bersamaan, dibandingkan dengan sinyal yang sama dari sistem referensi stabil orde pertama [8]. Batas  $L_\infty$ -norm untuk sinyal *error* antara *closed-loop* sistem adaptif dan *closed-loop* LTI sistem *reference* secara sistematis dapat di reduksi dengan cara memperbesar *gain* adaptif.

Dimisalkan sebuah sistem *SISO* seperti (2.40)

$$y(s) = A(s)(u(s) + d(s)) \quad (2.40)$$

di mana  $u(s)$  adalah transformasi laplace dari *input* sistem  $u(t)$ ;  $y(s)$  adalah transformasi laplace dari *output* sistem  $y(t)$ ;  $A(s)$  adalah fungsi alih yang belum diketahui;  $d(s)$  adalah transformasi *laplace* dari ketidakpastian dan gangguan bersifat *time-varying nonlinear*.

Tujuan kontrol adalah mendesain kontroler adaptif *output-feedback*  $u(t)$  sedemikian rupa  $y(t)$  mengikuti respon  $M(s)$  yang diberi *input* referensi  $r(t)$ .

$$M(s) = \frac{m}{s + m} \quad (2.41)$$

Komponen-komponen yang diperlukan untuk membuat kontroler adaptif L1 dijabarkan sebagai berikut,

1. *Output Predictor*

$$\dot{\hat{y}}(s) = -m\hat{y} + m(u(t) + \hat{\sigma}(t)) \quad (2.42)$$

Di mana  $\hat{\sigma}(t)$  adalah estimasi adaptif

2. *Adaptation Law*

$$\dot{\hat{\sigma}}(s) = \Gamma \text{Proj}(\hat{\sigma}(t), -\tilde{y}(t)), \hat{\sigma}(0) = 0 \quad (2.43)$$

$$\tilde{y}(t) = \hat{y}(t) - y(t) \quad (2.44)$$

Di mana  $\tilde{y}(t)$  adalah sinyal *error* antara *output* sistem dengan *output predictor* dan  $\Gamma$  adalah *rate* adaptasi.

3. *Control Law*

$$u(s) = C(s)(r(s) - \hat{\sigma}(s)) \quad (2.45)$$

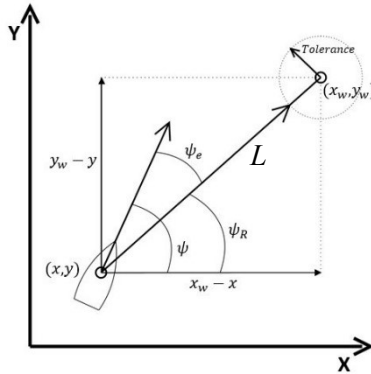
$$C(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (2.46)$$

Di mana  $C(s)$  adalah *Low-Pass Filter* orde 1 dengan frekuensi *cut-off*  $\omega_c$ .

### 2.1.5 *Guidance, Navigation and Control of Unmanned Airships under Time-Varying Wind for Extended Surveillance*

Sistem pengaturan *waypoint* bertujuan agar kapal tanpa awak mampu melalui *waypoint – waypoint* yang telah ditentukan. Apabila kecepatan kapal tanpa awak dibuat konstan, maka variabel yang dikontrol hanya sudut *heading yaw*.

Asumsikan sebuah kapal memiliki koordinat  $(x, y)$ . Di mana  $x_s$  dan  $y_s$  masing – masing adalah koordinat x dan koordinat y dari kapal. Sebuah *waypoint* diketahui berada pada titik  $(x_w, y_w)$  Di mana  $x_w$  dan  $y_w$  masing – masing adalah koordinat x dan koordinat y dari *waypoint*. Dari koordinat posisi kapal dan koordinat *waypoint*, dapat dihitung beda jarak x dan beda jarak y kapal ke *waypoint*. Beda jarak ini digunakan untuk menentukan sudut *heading yaw* yang diperlukan kapal untuk bisa mencapai koordinat *waypoint* tersebut [9]. Persamaan yang menghubungkan antara beda jarak kapal ke *waypoint* dengan sudut *heading yaw* yang diperlukan kapal untuk mencapai *waypoint* di jelaskan pada Persamaan (2.47) hingga (2.49) dan diilustrasikan pada Gambar 2.4



**Gambar 2.4** Ilustrasi *Waypoint Control*

$$\psi_R = \tan^{-1} \left( \frac{y_w - y}{x_w - x} \right) \quad (2.47)$$

$$|L| = \sqrt{(x_w - x)^2 + (y_w - y)^2} \quad (2.48)$$

$$\psi_e = \psi - \psi_R \quad (2.49)$$

di mana  $\psi_R$  adalah sudut *heading yaw* yang diperlukan kapal untuk mencapai *waypoint*.  $|L|$  adalah panjang vektor dari kapal ke *waypoint*. Persamaan (2.49) mendefinisikan eror *heading* di mana  $\psi_e$  adalah selisih sudut *heading* kapal  $\psi$  dengan sudut *heading* acuan  $\psi_R$ . *Tolerance* adalah toleransi *waypoint*. Apabila posisi kapal sudah berada pada radius *Tolerance* atau  $|L|$  lebih kecil sama dengan *Tolerance*, maka *waypoint*

*control* dapat merubah acuan *waypoint* berikutnya atau berhenti jika tidak ada *waypoint* lagi yang harus dilalui.

## 2.2 Teori Dasar

Untuk mendukung penelitian yang akan dilakukan, dibutuhkan beberapa dasar teori yang akan dipergunakan. Pembahasan pada dasar teori ini meliputi model matematis kapal, perancangan kontroler PID MRAC, perancangan kontroler adaptif L1, dan navigasi *waypoint*.

### 2.2.1 Model Matematis Kapal Tanpa Awak

Model matematika kapal tanpa awak diturunkan dari model matematika kapal tanpa awak umum seperti pada 2.1.1. dengan menggunakan beberapa asumsi bahwa kapal tanpa awak yang digunakan dalam penelitian ini cenderung sangat stabil terhadap gelombang.

Dengan karakter kapal yang lebih stabil terhadap gaya *roll*, *heave*, dan *pitch*, dan navigasi yang digunakan pada kapal tanpa awak hanya berbentuk koordinat pada bidang planar, maka penyederhanaan model matematis kapal seperti pada Subsubbab 2.1.2 dapat dilakukan. Dengan begitu model matematis kapal tanpa awak bekerja hanya pada 3 derajat kebebasan. Vektor posisi dan *heading*  $\eta = [x \ y \ \psi]^T$  dan vektor kecepatan  $v = [u \ v \ r]^T$ . Komponen model matematis setelah disederhanakan menjadi seperti berikut,

#### 2.2.1.1 Matriks Transformasi *Bodyframe* ke *Earthframe*

Dengan mengabaikan *roll*, *pitch*, dan *heave*, maka komponen-komponen yang bekerja pada sumbu-sumbu tersebut  $z = 0, w = 0, \phi = 0, p = 0, \theta = 0$  dan  $q = 0$ . Dengan di nol kannya komponen-komponen pada sumbu *roll*, *pitch*, dan *heave*, matriks transformasi koordinat *bodyframe* ke *earthframe* tersisa seperti (2.50),

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.50)$$

di mana  $\psi$  adalah sudut *yaw*.

#### 2.2.1.2 Matriks Inersia *Rigid Body* dan Massa Tambahan

Dengan menggunakan asumsi-asumsi yang ada pada Subsubbab 2.1.3, komponen matriks inersia *rigid body* dan massa tambahan yang tersisa adalah (2.51)

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{u}} & 0 \\ 0 & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \quad (2.51)$$

### 2.2.1.3 Matriks *Centripetal* dan *Coriolis* dari *Rigid Body*

Dengan menggunakan asumsi-asumsi yang ada pada Subsubbab 2.1.3, komponen matriks *centripetal* dan *coriolis* dari *rigid body* yang tersisa adalah (2.52)

$$\mathbf{C}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_g r + v) + Y_v v + Y_r r \\ 0 & 0 & m u - X_{\dot{u}} u \\ m(x_g r + v) - Y_v v - Y_r r & -m u + X_{\dot{u}} u & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.52)$$

### 2.2.1.4 Matriks *Damper*

Dengan menggunakan asumsi-asumsi yang ada pada Subsubbab 2.1.3, komponen matriks *damper* tambahan yang tersisa adalah (2.53)

$$\mathbf{D} = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 \\ 0 & 0 & N_r \end{bmatrix}, \quad (2.53)$$

### 2.2.1.5 Vektor Gaya Masukan

Dengan menggunakan asumsi kapal tanpa awak menggunakan propulsi tipe *azimuth* di mana kapal tidak memiliki daun kemudi, sehingga untuk membelokkan arah kapal mesin *outboard* yang dibelokkan. Dengan begitu gaya masukan untuk sistem kapal tanpa awak hanya ada dua yaitu masukan gaya searah gaya *surge* dan *yaw* saja. Vektor gaya masukan di definisikan sebagai (2.55),

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_u \\ 0 \\ \tau_r \end{bmatrix}. \quad (2.55)$$

### 2.2.1.6 Vektor Gaya Pengaruh Lingkungan

Dengan mengabaikan *roll*, *pitch*, dan *heave*. Gaya-gaya pengaruh lingkungan terhadap kapal hanya bekerja pada sumbu *surge*, *sway*, dan *yaw*. Vektor gaya pengaruh lingkungan didefinisikan sebagai (2.56).

$$\boldsymbol{\tau}_E = \begin{bmatrix} \tau_{uE} \\ \tau_{vE} \\ \tau_{rE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{uE}^{cu} + \boldsymbol{\tau}_{uE}^{wa} + \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_x(\gamma_w) A_{FW} \\ \tau_{vE}^{cu} + \boldsymbol{\tau}_{vE}^{wa} + \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_y(\gamma_w) A_{LW} \\ \tau_{rE}^{cu} + \boldsymbol{\tau}_{rE}^{wa} + \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_N(\gamma_w) A_{LW} L_{OA} \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

### 2.2.2 Kontroler *PID MRAC*

Desain sistem pengaturan menggunakan *PID MRAC* dengan pendekatan gradient dari aturan MIT. Berdasarkan pendekatan gradient, sebuah *cost function* ( $\Psi(\Phi)$ ) merupakan fungsi *error tracking* ( $e_\psi$ ). Besarnya *error tracking* ( $e_\psi$ ) didefinisikan sbb :

$$e_\psi = u(t) - y_{m\psi}(t) \quad (2.57)$$

$$\Psi(\Phi) = \frac{1}{2} e_\psi^2(\Phi) \quad (2.58)$$

Berdasarkan aturan MIT, *rate* perubahan  $\Phi$  secara langsung proporsional terhadap *negative gradient* dari *cost function*, seperti ditunjukkan pada persamaan berikut ,

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\gamma \frac{\partial \Psi}{\partial \Phi} = -\gamma e_\psi \frac{\partial e_\psi}{\partial \Phi} \quad (2.59)$$

di mana  $\Phi$  = vektor parameter controller,  $e_\psi$  = *error tracking*  $u$ ,  $\gamma$  = *gain* adaptif dan  $\frac{\partial e_\psi}{\partial \Phi}$  adalah perubahan *error tracking* terhadap vektor parameter.

Model referensi yang digunakan pada desain *PID MRAC* adalah :

$$G(s) = \frac{b}{s + a} \quad (2.60)$$

Besarnya sinyal kontrol adalah

$$\tau(t) = K_p [u_R - y_{m\psi}] + \frac{K_i}{s} [u_R - y_{m\psi}] + K_d s [u_R - y_{m\psi}] \quad (2.61)$$

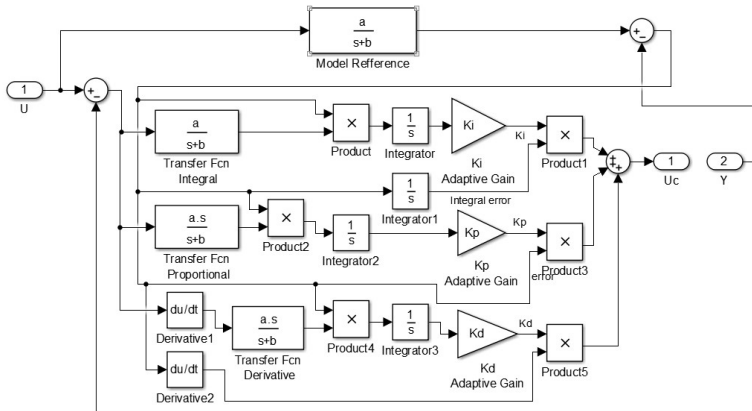
Mekanisme adaptasi untuk tuning parameter PID dengan menggunakan *MIT rule* dapat ditulis sebagai berikut

$$\frac{dK_p}{dt} = -\gamma_p \frac{\partial \Psi}{\partial K_p} = -\gamma_p \frac{\partial \Psi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial K_p} = -\gamma_p e \frac{bs [u_R - y_{m\psi}]}{as + 1} \quad (2.62)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -\gamma_i \frac{\partial \Psi}{\partial K_i} = -\gamma_p \frac{\partial \Psi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial K_i} = -\gamma_i e \frac{b [u_R - y_{m\psi}]}{as + 1} \quad (2.63)$$

$$\frac{dK_d}{dt} = -\gamma_d \frac{\partial \Psi}{\partial K_d} = -\gamma_d \frac{\partial \Psi}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial K_d} = -\gamma_d e \frac{bs^2[u_R - y_{m\psi}]}{as + 1} \quad (2.64)$$

Dari Persamaan (2.57) hingga Persamaan (2.64) dapat dibuat diagram simulink kontroler *PID MRAC* seperti pada Gambar 2.5 .



**Gambar 2.5** Diagram Simulink Kontroler *PID MRAC* berdasarkan *MIT rule*

## 2.2.3 Kontroler Adaptif L1

Pada bagian ini akan dijelaskan pokok bagian dari kontroler Adaptif L1 meliputi *state predictor*, *control law*, dan *adaptation law*. Diagram blok dari kontroler adaptif L1 dapat dilihat pada Gambar 2.6.

### 2.2.3.1 State Predictor

*State predictor* pada kontrol adaptif L1 merupakan sebuah sistem yang diinginkan berupa Transfer Function Sistem yang dirancang harus ideal yang nantinya dapat digunakan sebagai model referensi yang diikuti oleh *plant* sampai pada *error* terkecil

Dalam merancang performansi yang diinginkan digunakan spesifikasi respon orde satu. Jika ditulis dalam persamaan matematika, sistem dapat ditulis ke bentuk standar seperti pada Persamaan (2.41). Namun dalam penelitian ini membandingkan antara *PID MRAC* dan kontroler adaptif L1, akan lebih adil apabila parameter yang digunakan pada *state predictor* pada kontroler L1 sama dengan *model reference* pada (2.60). Dengan begitu *model reference* untuk *PID MRAC* dibentuk



menjadi Persamaan (2.65) dan *state predictor* untuk kontroler adaptif L1 menjadi seperti Persamaan (2.66).

$$G(s) = \frac{1/\tau}{s + 1/\tau} \quad (2.65)$$

$$M(s) = \frac{1/\tau}{s + 1/\tau} \quad (2.66)$$

di mana  $\tau$  adalah *time constant* sistem orde satu yang diinginkan.

### 2.2.3.2 Control Law

Sebelum sinyal kontrol memberikan aksi kepada *plant*, sinyal masuk ke *low pass filter* orde 1 dengan persamaan

$$C(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (2.67)$$

Di mana  $\omega_c$  adalah frekuensi *cut-off* kontroler. Dikarenakan bentuk persamaan filter orde 1 terpasang seri dengan sistem, maka *time constant* filter tidak boleh lebih lambat daripada *state predictor* dan *plant*. Oleh karena itu penentuan  $\omega_c$  sebaiknya tiga kali lebih besar dari *time constant* sistem terlambat.

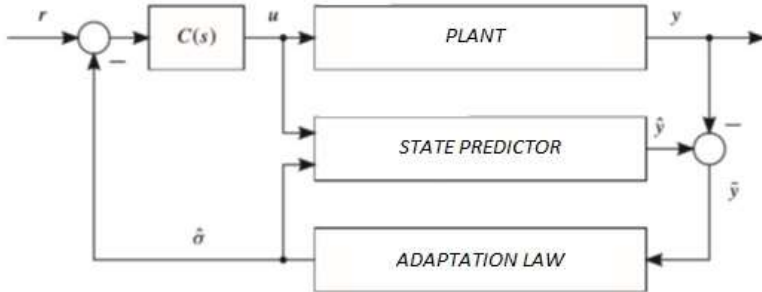
### 2.2.3.3 Adaptation Law

*Adaptation law* menghasilkan sinyal kontrol  $\hat{\sigma}$  berdasarkan selisih antara keluaran *state predictor* dengan keluaran *plant*. Persamaan *Adaptation law* dijabarkan pada Persamaan (2.68)

$$\dot{\hat{\sigma}}(s) = \Gamma \text{Proj}(\hat{\sigma}(t), -\tilde{y}(t)), \hat{\sigma}(0) = 0 \quad (2.68)$$

$$\tilde{y}(t) = \hat{y}(t) - y(t) \quad (2.44)$$

Di mana  $\tilde{y}(t)$  adalah sinyal eror antara *output* sistem dengan *output predictor* dan  $\Gamma$  adalah *rate* adaptasi. Pemilihan *rate* adaptasi disesuaikan dengan kemampuan *plant*. Semakin besar *rate* adaptasi, semakin cepat sinyal kontrol  $\hat{\sigma}$  berubah signifikan.



**Gambar 2.6** Diagram Blok Kontroler Adaptif L1

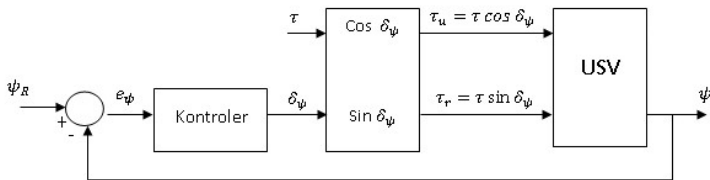
## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Rancangan Umum Sistem

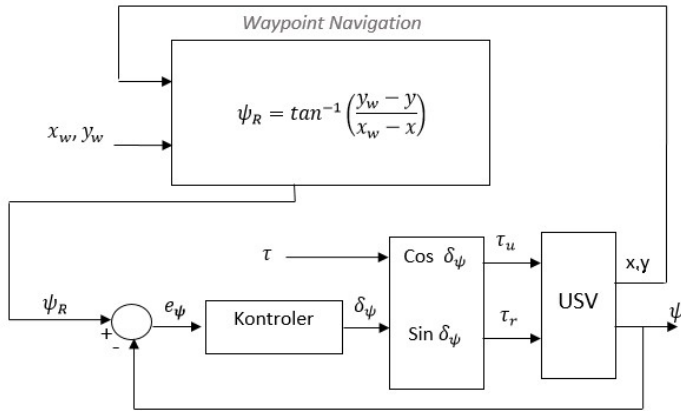
Rancangan sistem yang diajukan pada penelitian ini dibagi dua, yaitu rancangan sistem untuk validasi kontroler dan rancangan sistem untuk *waypoint control*.

Rancangan sistem untuk validasi kontroler ditunjukkan oleh Gambar 3.1. Validasi kontroler dilakukan dengan uji manuver pada rancangan sistem untuk mengetahui apakah respon *plant* setelah mendapat sinyal kontrol sudah sesuai dengan kriteria performansi yang diinginkan. Mula-mula kapal digerakkan lurus dengan torsi gaya dorong konstan kemudian setelah beberapa saat, kapal dibelokkan ke arah tertentu.



**Gambar 3.1** Rancangan Sistem untuk Validasi Kontroler

Rancangan sistem untuk *waypoint control* ditunjukkan oleh Gambar 3.2. Torsi gaya dorong kapal tanpa awak diberi nilai konstan. Titik-titik *waypoint* yang diinginkan untuk dilewati kapal di definisikan lebih dahulu sebelum simulasi dijalankan. Saat simulasi, apabila *waypoint navigation* menyatakan ada *waypoint* yang harus dituju, maka *waypoint navigation* akan mengirim sinyal  $\psi_R$  sebagai acuan heading kapal yang diinginkan. 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* tidak akan mengirim ulang sinyal acuan  $\psi_R$ .



**Gambar 3.2** Rancangan Umum Sistem dengan *Waypoint Navigation*

### 3.2 Perancangan *Plant* Kapal Tanpa Awak

Untuk menjalankan simulasi, diperlukan model matematis dari kapal tanpa awak yang sudah dibahas pada Subsubbab 2.2.1. Tabel 3.1 menyajikan data-data parameter yang diperlukan.

**Tabel 3.1** Data Parameter Sistem

| Parameter     | Nilai                   | Keterangan   |
|---------------|-------------------------|--|
| $m$           | 1500 Kg                 | Massa <i>rigid body</i>  |
| $x_g$         | 1,9 m                   | Jarak antara pusat koordinat kapal dengan titik berat kapal searah sumbu x |
| $X_{\dot{u}}$ | 90 Kg                   | Massa tambahan kapal searah sumbu x karena percepatan kapal $\dot{u}$      |
| $Y_{\dot{v}}$ | 1000 Kg                 | Massa tambahan kapal searah sumbu y karena percepatan kapal $\dot{v}$      |
| $N_{\dot{r}}$ | 58500 Kg                | Massa tambahan kapal searah sumbu $\psi$ karena percepatan kapal $\dot{r}$ |
| $X_u$         | 250                     | Konstanta damper linier x karena kecepatan translasi $u$                   |
| $Y_v$         | 1450                    | Konstanta damper linier y karena kecepatan translasi $v$                   |
| $N_r$         | 580                     | Konstanta damper linier $\psi$ karena kecepatan sudut $r$                  |
| $I_z$         | 90750 Kg.m <sup>2</sup> | Momen Inersia terhadap $O_n Z_b$   |

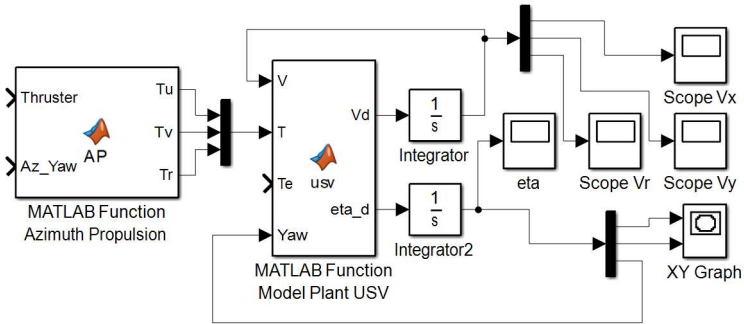
| Parameter           | Nilai                           | Keterangan   |
|---------------------|---------------------------------|--|
| $X_{ u u}$          | 0                               | Konstanta damper nonlinier $x$ karena kecepatan translasi $u$                            |
| $Y_{ v v}$          | 0                               | Konstanta damper nonlinier $y$ karena kecepatan translasi $v$                            |
| $Y_{ v r}$          | 0                               | Konstanta damper nonlinier $y$ karena kecepatan translasi $v$ dan kecepatan sudut $r$    |
| $Y_{ r v}$          | 0                               | Konstanta damper nonlinier $y$ karena kecepatan sudut $r$ dan kecepatan translasi $v$    |
| $N_{ v v}$          | 0                               | Konstanta damper nonlinier $\psi$ karena kecepatan translasi $v$                         |
| $N_{ r v}$          | 0                               | Konstanta damper nonlinier $\psi$ karena kecepatan sudut $r$ dan kecepatan translasi $v$ |
| $N_{ v r}$          | 0                               | Konstanta damper nonlinier $\psi$ karena kecepatan translasi $v$ dan kecepatan sudut $r$ |
| $N_{ r r}$          | 0                               | Konstanta damper nonlinier $\psi$ karena kecepatan sudut $r$                             |
| $\rho_w$            | 1,025 kg/m <sup>3</sup>         | Massa jenis air laut   |
| $L$                 | 11,8149 m                       | Panjang kapal  |
| $B$                 | 11,8149 X 5,2086 m <sup>2</sup> | Luas <i>draft</i> kapal  |
| $T$                 | 6,1997 m                        | Tinggi kapal   |
| $\rho_a$            | 1,1763 kg/m <sup>3</sup>        | Massa jenis udara  |
| $A_{Fw}$            | 6,8291 m <sup>2</sup>           | Area proyeksi angin dari depan   |
| $A_{Jw}$            | 25,5669 m <sup>2</sup>          | Area proyeksi angin dari samping   |
| $A_{Fc}$            | 1,0572 m <sup>2</sup>           | Area proyeksi air dari depan   |
| $A_{Jc}$            | 7,3607 m <sup>2</sup>           | Area proyeksi air dari samping   |
| $L_{QA}$            | 11,8149 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 angin pada sumbu gerak yaw   |
| $C_{Xci}(\gamma_w)$ | $-0,1453\cos(\gamma_c)$         | Koefisien arus pada sumbu gerak $x$  |
| $C_{Yci}(\gamma_w)$ | $-0,3712\sin(\gamma_c)$         | Koefisien arus pada sumbu gerak $y$  |
| $C_{Nci}(\gamma_w)$ | $-0,1036\sin(2\gamma_c)$        | Koefisien arus pada sumbu gerak yaw  |
| $C_{Xwa}(\gamma_w)$ | $-0,028244\cos(\gamma_{wa})$    | Koefisien ombak pada sumbu gerak $x$   |
| $C_{Ywa}(\gamma_w)$ | $-0,08374\sin(\gamma_{wa})$     | Koefisien ombak pada sumbu gerak $y$   |
| $C_{Nwa}(\gamma_w)$ | $-0,02094\sin(2\gamma_{wa})$    | Koefisien ombak pada sumbu gerak yaw   |

*Plant* kapal tanpa awak dibuat dalam *Embedded MATLAB Function*. Propulsi *azimuth* kapal tanpa awak juga dibuat dalam *Embedded MATLAB Function* dengan blok terpisah. Di mana isi dari blok propulsi *azimuth* terdapat Persamaan (3.1), Persamaan (3.2), dan Persamaan (3.3). Gambar 3.3 menunjukkan diagram simulink *plant* kapal tanpa awak beserta blok propulsi *azimuth*.

$$\tau_u = \tau \cos(\delta_\psi) \quad (3.1)$$

$$\tau_v = 0 \quad (3.2)$$

$$\tau_r = \tau \sin(\delta_\psi) \quad (3.3)$$



**Gambar 3.3** Diagram Simulink *Plant* Kapal Tanpa Awak Beserta Blok Propulsi *Azimuth*

Model gangguan eksternal yang bekerja pada sumbu *surge*, *sway*, dan *yaw* dijelaskan pada Persamaan (2.56). Gaya-gaya yang disebabkan oleh pengaruh arus dimisalkan sama dengan pengaruh angin, namun kepadatan jenis udara  $\rho_a$  diganti dengan kepadatan jenis air  $\rho_w$ . Luas proyeksi permukaan kapal yang semula berada di atas air dirubah menjadi luasan proyeksi permukaan kapal dibawah air. Dan kecepatan angin  $V_w$  diubah menjadi  $V_c$ . Model matematis gangguan arus terhadap kapal dijelaskan pada Persamaan (3.4) .

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

Di mana  $A_{Fc}$  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  $\gamma_c$  adalah sudut relatif arus yang menghempas kapal.

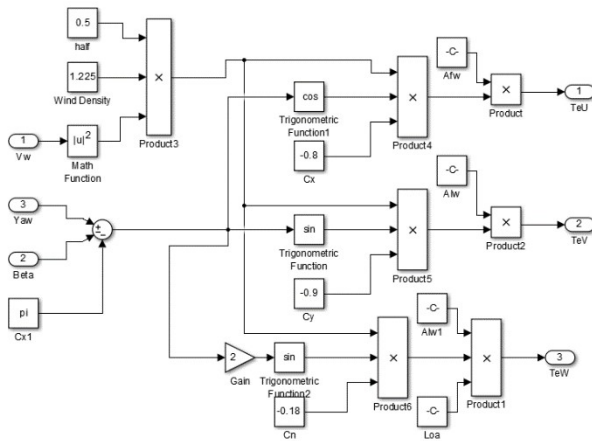
Besarnya gaya dan momen dari induksi ombak diambil dari Persamaan (3.4) kemudian dimodifikasi untuk memasukan komponen gelombang sinusoidal menjadi seperti Persamaan (3.5).

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

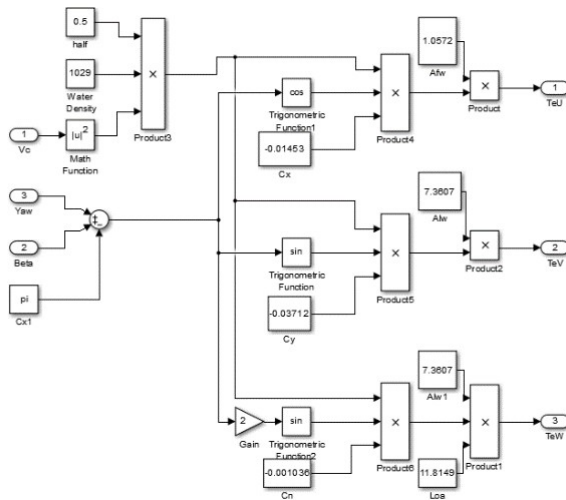
Di mana  $A_{wa}$  adalah Amplitudo Ombak,  $\rho_w$  adalah kerapatan air,  $\omega$  adalah frekuensi ombak,  $\theta$  adalah sudut fasa ombak,  $A_{Fc}$  adalah area proyeksi dari depan yang terendam air,  $A_{Lc}$  area proyeksi dari samping yang terendam air,  $L_{OA}$  adalah panjang keseluruhan dari kapal, dan  $\gamma_{wa}$  adalah sudut relatif arus yang menghempas kapal.

Dengan menggabungkan Persamaan (2.56), Persamaan (3.4), dan Persamaan (3.5), didapatkan model pengaruh lingkungan seperti pada Persamaan (3.6). Gambar 3.4, Gambar 3.5, dan Gambar 3.6 masing-masing menunjukkan diagram blok gangguan angin, arus, dan ombak dengan parameter sesuai dengan Tabel 3.1.

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

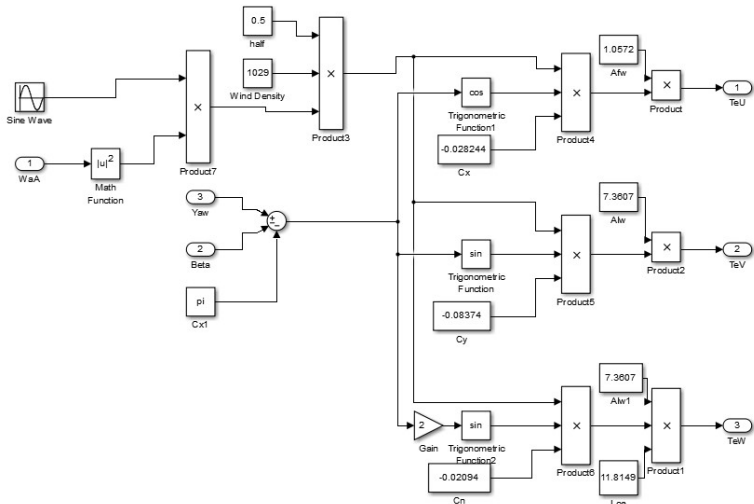


**Gambar 3.4** Diagram Simulink Gangguan Angin



**Gambar 3.5** Diagram Simulink Gangguan Arus

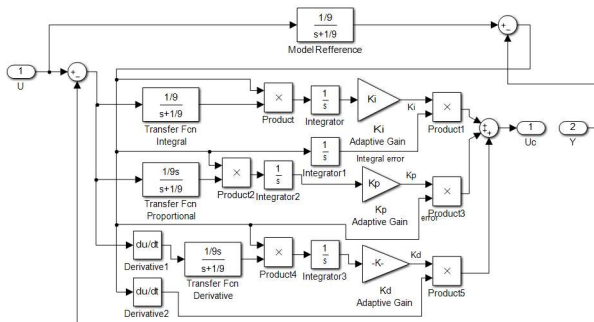




Gambar 3.6 Diagram Simulink Gangguan Ombak

### 3.3 Perancangan Kontroler *PID MRAC*

Berdasarkan teori yang telah dibahas pada Subsubbab 2.1.4 dan Subsubsubbab 2.2.3.1, diinginkan respon sudut *heading* kapal tanpa awak berupa respon orde satu, tanpa *overshoot*, *zero offset*, dan memiliki *settling time*  $\pm 0,5\%$  sebesar 45 detik. Respon *model reference* menjadi seperti Persamaan (3.4) dan diagram simulink kontroler *PID MRAC* ditunjukkan oleh Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Diagram Simulink Kontroler *PID MRAC* Hasil Perancangan

$$G(s) = \frac{1/9}{s + 1/9} \quad (3.4)$$

### 3.4 Perancangan Kontroler Adaptif L1

Pada tahap perancangan ini, akan dibahas mengenai perancangan *state predictor* dan perancangan filter orde satu

#### 3.4.1 Perancangan *State Predictor*

*State predictor* pada kontrol adaptif L1 merupakan sebuah sistem yang diinginkan berupa *transfer function*. Sistem yang dirancang harus ideal yang nantinya dapat digunakan sebagai model referensi yang diikuti oleh *plant* sampai pada eror terkecil

Berdasarkan teori yang telah dibahas pada Subsubbab 2.1.5 dan Subsubsubbab 2.2.3.1, diinginkan respon sudut *heading* kapal tanpa awak berupa respon orde satu, tanpa *overshoot*, *zero offset*, dan memiliki *settling time*  $\pm 0,5\%$  sebesar 45 detik untuk Persamaan (3.5) yang sama dengan sistem respon orde satu pada Persamaan (3.1),

$$M(s) = \frac{1/9}{s + 1/9} \quad (3.5)$$

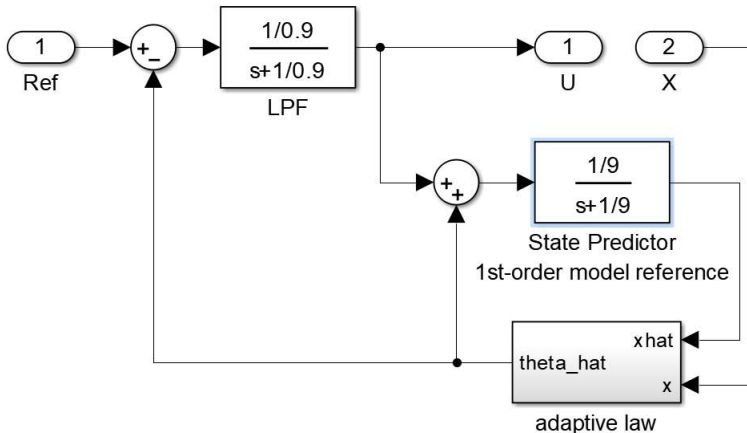
#### 3.4.2 Perancangan *Low Pass Filter* Orde Satu

Berdasarkan gambar skema kontroler adaptif L1, komponen *state predictor* memiliki *time constant* paling lambat yaitu 9 detik. frekuensi *cut-off* dari *low pass filter* minimal 10 kali lebih cepat dari *time constant state predictor*. Dipilih frekuensi *cut-off low pass filter* 1/0.9. Maka Persamaan low pass filter dapat di tulis menurut Persamaan (3.6).

$$C(s) = \frac{1/0,9}{s + 1/0,9} \quad (3.6)$$

### 3.4.3 Skema Kontroler Adaptif L1

Diagram Simulink Adaptif L1 ditunjukkan oleh Gambar 3.8.



**Gambar 3.8** Diagram Simulink Kontroler Adaptif L1 Hasil Perancangan

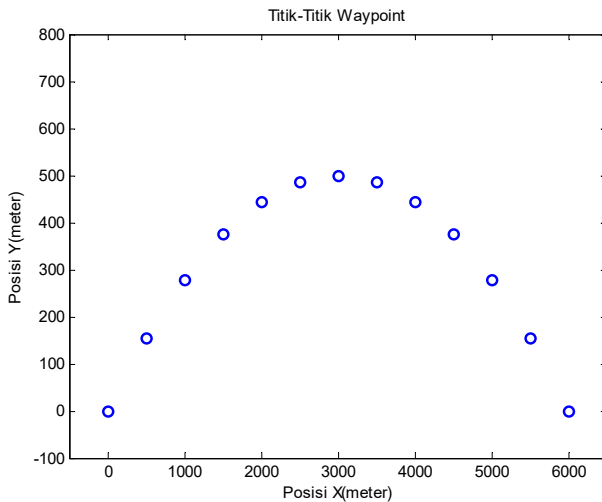
### 3.5 Perancangan Navigasi *Waypoint*

Perancangan dan metode perhitungan sudut *heading* acuan yang harus dicapai oleh kapal untuk menuju *waypoint* yang diinginkan telah dijabarkan pada Subsubbab 2.1.5. Penentuan koordinat *waypoint* yang dikehendaki untuk dilalui oleh kapal tanpa awak di tentukan sebelum kapal tanpa awak di jalankan. Koordinat *waypoint* yang akan digunakan pada penelitian ini di sajikan pada Tabel 3.2.

Gambar 3.9 menunjukkan titik-titik *waypoint* yang akan di lalui oleh kapal tanpa awak. Setiap titik-titik *waypoint* memiliki toleransi sebesar 8 meter. Apabila kapal tanpa awak telah berada di radius toleransi yang akan dituju, maka *waypoint navigation* akan merubah acuan titik *waypoint* ke *waypoint* selanjutnya. Apabila tidak ada lagi *waypoint* yang akan dituju, maka simulasi secara otomatis akan berhenti.

**Tabel 3.2** Daftar Koordinat *Waypoint* Yang Akan Dilalui Kapal Tanpa Awak

| Index | $x_w(\text{meter})$ | $y_w(\text{meter})$ |
|-------|---------------------|---------------------|
| 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 3.9** Titik-Titik *Waypoint* yang Akan Dilalui oleh Kapal Tanpa Awak

## **BAB 4**

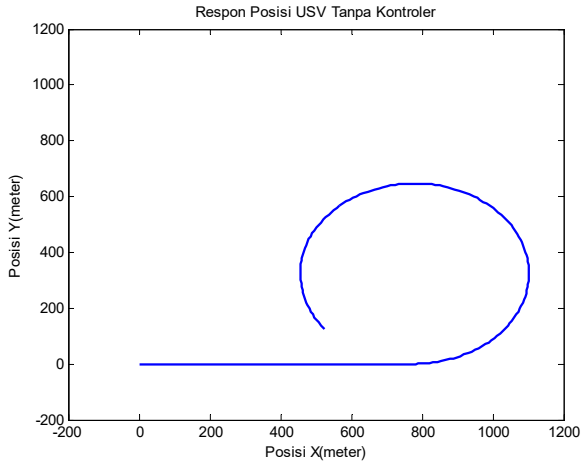
### **HASIL SIMULASI DAN ANALISA**

Pada bab ini, hasil dari perancangan pada Bab III akan diberikan, beserta dengan pembahasan yang diperlukan. Dengan adanya pengujian, akan diketahui apakah perancangan telah berhasil dilakukan atau masih memiliki kekurangan sekaligus analisa dari keduanya. Rancangan penelitian pada Bab III akan diaplikasikan pada *plant* berupa kapal tanpa awak dengan 3 derajat kebebasan dan akan disimulasikan dengan Simulink pada Matlab. Pengujian pertama adalah *plant* tanpa kontroler, yang kedua pengujian manuver menggunakan *PID MRAC*, ketiga pengujian manuver dengan kontroler adaptif L1, keempat pengujian perbandingan kontrol *waypoint* antara *PID MRAC* dan kontroler adaptif L1 dengan kondisi tanpa gangguan eksternal, dan kelima pengujian perbandingan kontrol dengan gangguan eksternal.

#### **4.1 Pengujian *Plant* Kapal Tanpa Awak**

Pada subbab ini akan diberikan hasil pengujian system kapal tanpa awak dengan 3 derajat kebebasan tanpa kontroler. Hal ini akan mempermudah dalam membandingkan bagaimana hasil sebelum dan sesudah dikontrol.

Mula-mula *plant* kapal tanpa awak diberi gaya dorong tetap sebesar 2000 Newton, kemudian sudut kemudi propulsi *azimuth* dibuat lurus selama 100 detik pertama, lalu berbelok sebesar 0,5 radian atau sebesar 28,64 derajat untuk saat detik ke 100 hingga waktu simulasi berakhir di detik 350. Gambar 4.1 menunjukkan pergerakan posisi kapal tanpa awak dari titik mula (0,0) membentuk garis lurus kemudian membentuk lintasan melingkar.

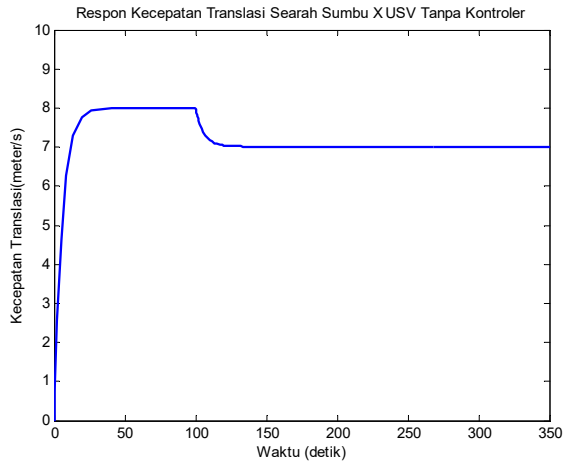


**Gambar 4.1** Respon Posisi Kapal Tanpa Awak Tanpa Kontroler

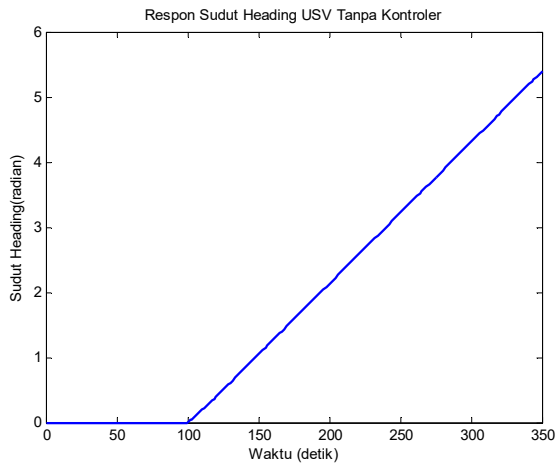
Gambar 4.2 menunjukkan kecepatan translasi kapal tanpa awak searah sumbu  $x$  acuan *bodyframe* kapal tanpa awak atau searah gerak *surge*. Diperoleh respon kecepatan translasi mencapai nilai *settling time* kriteria  $\pm 5\%$  dari 8 m/s pada saat detik ke 17,64 detik. Lalu saat detik ke 100 dan seterusnya terjadi penurunan kecepatan translasi searah gerak *surge* dikarenakan propulsi *azimuth* posisinya sudah tidak lurus lagi. Akibatnya terjadi perpecahan vektor gaya dorong ke arah sumbu *yaw* dan ke arah sumbu *surge*.

Gambar 4.3 menunjukkan sudut *heading* kapal tanpa awak tiap waktunya. Terlihat bahwa dari detik ke 0 hingga 100, 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 propulsi *azimuth*. Lalu saat detik ke 100 hingga detik ke 350, sudut kemudi propulsi *azimuth* dibelokkan sebesar 0,5 radian atau sebesar 28,64 derajat. Dengan dibelokkannya arah propulsi *azimuth*, menyebabkan vektor gaya dorong propulsi terpecah ke arah sumbu gerak *surge* dan sumbu *yaw*,

akhirnya sudut *heading* bertambah seiring kapal tanpa awak membentuk lintasan melingkar.



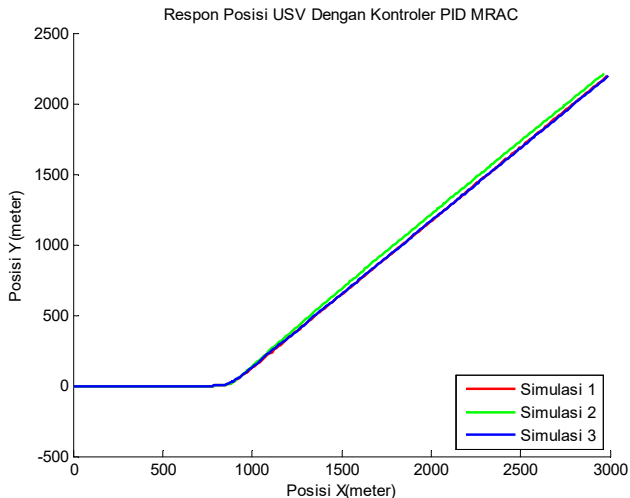
**Gambar 4.2** Respon Kecepatan Translasi Searah Sumbu x Kapal Tanpa Awak Tanpa Kontroler



**Gambar 4.3** Respon Sudut *Heading* Kapal Tanpa Awak Tanpa Kontroler

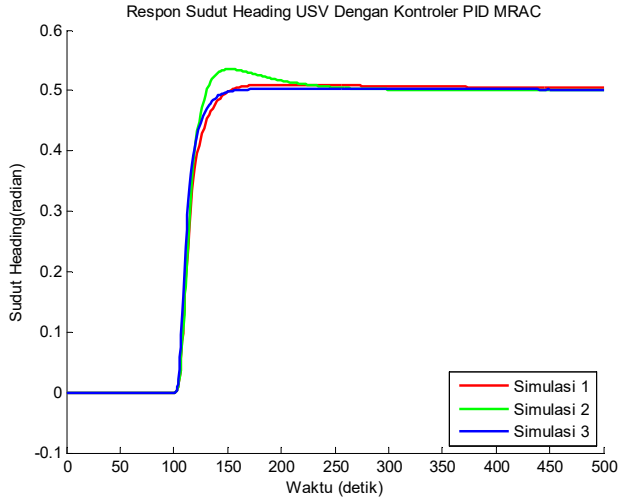
## 4.2 Pengujian Manuver Kapal Tanpa Awak Menggunakan Kontroler *PID MRAC*

Pada subbab ini akan diberikan hasil pengujian manuver kapal tanpa awak menggunakan kontroler *PID MRAC*. Pengujian dilakukan dengan 3 kali simulasi di mana setiap simulasinya menggunakan *gain* adaptif  $K_p$ , *gain* adaptif  $K_i$  yang berbeda-beda sementara *gain* adaptif  $K_d$  diberikan nilai kecil di semua simulasinya. Setiap simulasi di lakukan sepanjang 500 detik waktu simulasi. Skenario yang dijalankan pada pengujian manuver adalah gaya dorong propulsi *azimuth* di buat konstan sebesar 2000 Newton dan *setpoint heading* bernilai 0 untuk detik 0 hingga 100 lalu bernilai 0,5 untuk sisa waktu simulasi. Sudut kemudi propulsi *azimuth* juga dibatasi sebesar 45 derajat atau sebesar 0,785398163 radian untuk mencegah propulsi *azimuth* 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 bergerak berputar ditempat secara cepat bahkan berjalan mundur. Hasil respon posisi kapal tanpa awak ditunjukkan oleh Gambar 4.4 sementara respon sudut *heading* kapal tanpa awak ditunjukkan pada Gambar 4.5.

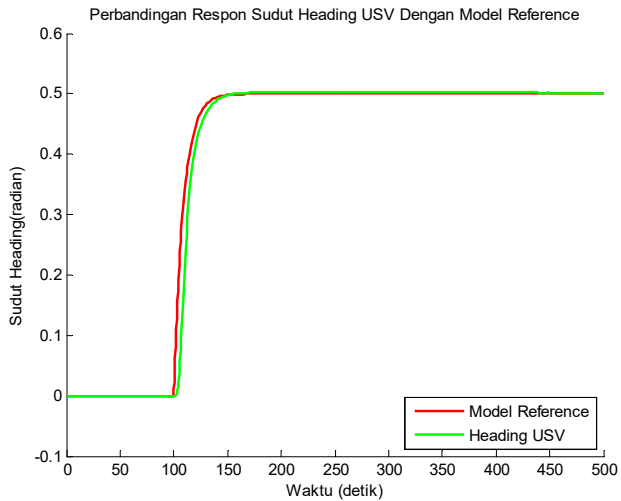


**Gambar 4.4** Respon Posisi Kapal Tanpa Awak dengan Kontroler *PID MRAC*





**Gambar 4.5** Respon Sudut *Heading* Kapal Tanpa Awak dengan Kontroler PID MRAC



**Gambar 4.6** Perbandingan Respon Sudut *Heading* Kapal Tanpa Awak dengan *Model reference*

Pada simulasi 1, *gain* adaptif  $K_p$  di atur sebesar 100, *gain* adaptif  $K_i$  diatur sebesar 0,01, dan *gain* adaptif  $K_d$  diatur sebesar 0,00000001. Hasil simulasi menunjukkan respon sudut *heading* kapal tanpa awak berupa respon sistem orde 1. Respon sudut *heading* menunjukkan nilai 0.5039 pada detik ke 145 atau 45 detik setelah terjadi berupahan *setpoint* sudut *heading*. Dengan begitu respon dari simulasi 1 mendekati dengan *model reference* yang memiliki *time constant* 9 detik. Namun saat *steady state*, terdapat *offset* sebesar + 0,0039. ini dapat terjadi karena *gain* adaptif  $K_i$  masih kurang sehingga besar nilai  $K_i$  belum cukup untuk menghilangkan *offset steady state*.

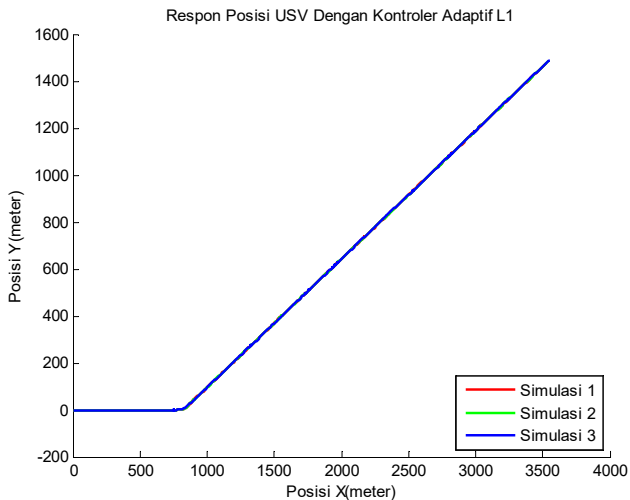
Pada simulasi 2, dicoba untuk menaikkan besar *gain* adaptif  $K_i$ . *Gain* adaptif  $K_i$  diatur sebesar 0,1, *gain* adaptif  $K_p$  di atur sebesar 100, dan *gain* adaptif  $K_d$  diatur sebesar 0,00000001. Hasil simulasi menunjukkan respon sudut *heading* kapal tanpa awak berupa respon sistem orde 1 dengan puncak *overshoot* sebesar 0,5353. Saat *steady state*, masih tidak terdapat *offset*.

Pada simulasi 3, dicoba untuk memperbesar *gain* adaptif  $K_p$ . *gain* adaptif  $K_p$  di atur sebesar 200, *Gain* adaptif  $K_i$  diatur menjadi 0,01, dan *gain* adaptif  $K_d$  diatur sebesar 0,00000001. Hasil simulasi menunjukkan respon sudut *heading* kapal tanpa awak berupa respon sistem orde 1 tanpa *overshoot*. Respon sudut *heading* menunjukkan nilai 0,5017 pada detik ke 145 atau 45 detik setelah terjadi berupahan *setpoint* sudut *heading*. Dengan begitu respon dari simulasi 1 mirip dengan *model reference* yang memiliki *time constant* 9 detik. Saat *steady state*, terdapat *offset* sebesar +0,0017. *offset* ini lebih besar dibanding hasil simulasi 2 yang tidak memiliki *offset* namun masih lebih baik dibanding dengan simulasi 1.

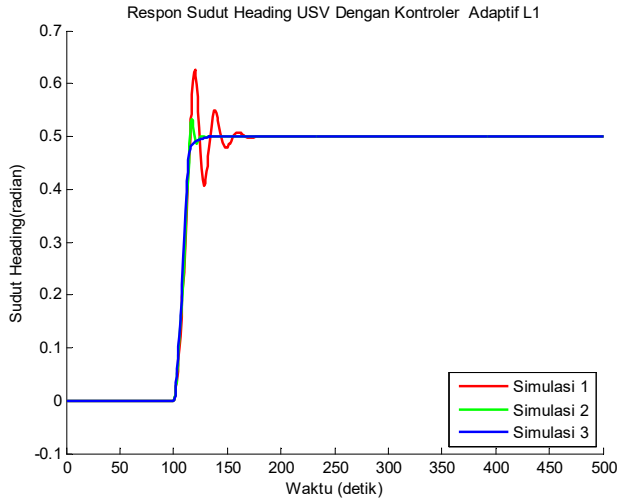
Dari ke tiga hasil simulasi yang telah dijalankan, terlihat bahwa parameter *gain* adaptif  $K_p$ , *gain* adaptif  $K_i$ , dan *gain* adaptif  $K_d$  pada simulasi 3 memiliki respon yang mendekati karakter dari *model reference* dan tanpa *overshoot*. Walaupun masih terjadi *offset* sebesar +0,0017 namun presentase *offset* ini hanya 0,034%. Sehingga parameter *gain* adaptif  $K_p$ , *gain* adaptif  $K_i$ , dan *gain* adaptif  $K_d$  yang ada di simulasi 3 dianggap memenuhi spesifikasi desain kontroler yang diinginkan dan akan diambil sebagai model kontroler *PID MRAC* yang akan dibandingkan dengan kontroler adaptif L1 nantinya. Gambar 4.6 menunjukkan kedekatan respon sudut *heading* kapal tanpa awak dengan *model reference* yang telah ditetapkan.

### 4.3 Pengujian Manuver Kapal Tanpa Awak dengan Kontroler Adaptif L1

Pada subbab ini akan diberikan hasil pengujian manuver kapal tanpa awak menggunakan kontroler adaptif L1. Pengujian dilakukan dengan 3 kali simulasi di mana setiap simulasinya menggunakan *rate* adaptif yang berbeda-beda. Setiap simulasi di lakukan sepanjang 500 detik waktu simulasi. Skenario yang dijalankan sama dengan pengujian manuver yang dilakukan saat pengujian manuver menggunakan kontroler *PID MRAC*. Gaya dorong propulsi *azimuth* di buat konstan sebesar 2000 Newton dan *setpoint heading* bernilai 0 untuk detik 0 hingga 100 lalu bernilai 0,5 untuk sisa waktu simulasi. Sudut kemudi propulsi *azimuth* juga dibatasi sebesar 45 derajat atau sebesar 0,785398163 seperti pada simulasi yang dilakukan pada Subbab 4.2. Hasil respon posisi kapal tanpa awak ditunjukkan oleh Gambar 4.7 sementara respon sudut *heading* kapal tanpa awak ditunjukkan pada Gambar 4.8.



**Gambar 4.7** Respon Posisi Kapal Tanpa Awak dengan Kontroler Adaptif L1



**Gambar 4.8** Respon Sudut *Heading* Kapal Tanpa Awak dengan Kontroler Adaptif L1

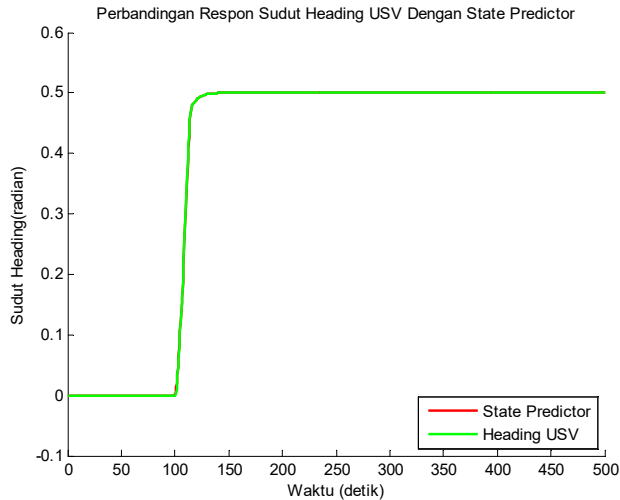
Pada simulasi 1, *rate* adaptif di atur sebesar 3. Hasil simulasi menunjukkan respon sudut *heading* kapal tanpa awak berupa respon sistem orde 2 dengan puncak *overshoot* sebesar 0,6253. Sehingga respon dari simulasi 1 tidak cocok sebagai acuan nilai *rate* adaptif yang akan dibandingkan dengan kontroler *PID MRAC*.

Pada simulasi 2, *rate* adaptif di atur sebesar 10. Hasil simulasi menunjukkan respon sudut *heading* kapal tanpa awak berupa respon sistem orde 2 dengan puncak *overshoot* 0,5323. Pada detik 145, sudut *heading* menunjukkan nilai 0,5 yang artinya sesuai dengan model *state predictor*. *Error steady state* juga tidak nampak pada hasil simulasi 2. Respon ini jauh lebih baik dibandingkan hasil simulasi 1 yang puncak *overshoot*nya 0,6253.

Pada simulasi 3, *rate* adaptif di atur sebesar 50. Hasil simulasi menunjukkan respon sudut *heading* kapal tanpa awak berupa respon sistem orde 1 tanpa *overshoot*. Pada detik 145, sudut *heading* menunjukkan nilai 0,5 yang artinya hasil simulasi 3 mirip dengan respon *state predictor* yang diinginkan. *Error steady state* juga tidak nampak pada hasil simulasi 3. Respon dari simulasi 3 telah memenuhi kriteria desain kontroler yang diinginkan. Sehingga *rate* adaptif dari simulasi 3 akan diambil untuk

menjadi *rate* adaptif kontroler adaptif L1 yang akan dibandingkan dengan kontroler *PID MRAC*.

Gambar 4.9 menunjukkan perbandingan respon sudut *heading* kapal tanpa awak dengan keluaran *state predictor* kontroler adaptif L1.



**Gambar 4.9** Perbandingan Respon Sudut *Heading* Kapal Tanpa Awak dengan Keluaran *State Predictor*

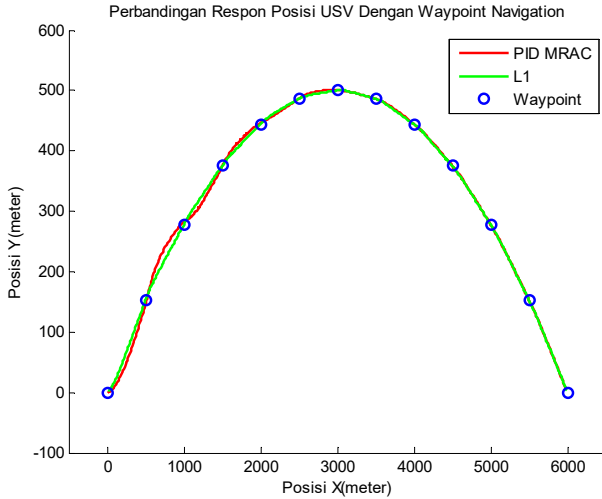
#### 4.4 Pengujian Perbandingan Kontrol *Waypoint* antara *PID MRAC* dan Kontroler Adaptif L1 dengan Kondisi Tanpa Gangguan Eksternal

Pada bagian ini, akan diberikan hasil pengujian perbandingan kontrol *waypoint* kapal tanpa awak menggunakan kontroler *PID MRAC* dan kontroler adaptif L1. Pengujian dilakukan tanpa melibatkan gangguan eksternal. Kontroler *PID MRAC* dan kontroler adaptif L1 yang dibandingkan memiliki parameter yang telah dipilih dari hasil eksperimen yang telah dilakukan pada Subbab 4.2 dan 4.3. Setiap simulasi dilakukan sepanjang 1000 detik waktu simulasi. Skenario yang dijalankan adalah kapal tanpa awak harus mampu melewati 13 titik *waypoint* yang dapat dilihat pada Tabel 3.2. Gaya dorong propulsi *azimuth* dibuat konstan sebesar 2000 Newton dan *setpoint heading* akan selalu berubah sesuai dengan koordinat kapal dan titik *waypoint* yang akan dituju. Sudut kemudi

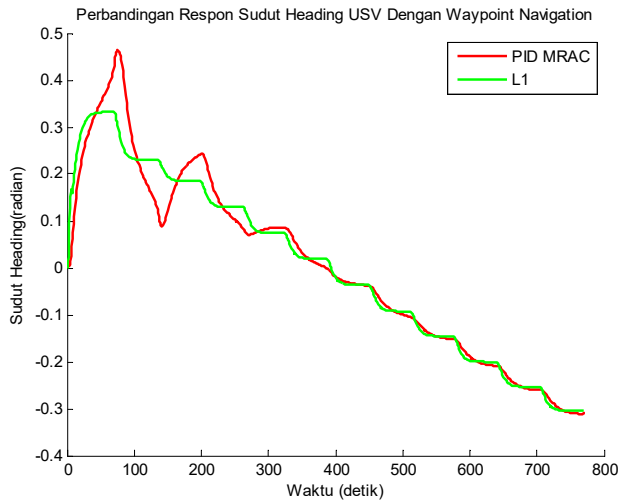
propulsi *azimuth* juga dibatasi sebesar 45 derajat atau sebesar 0,785398163 radian.

Gambar 4.10 menunjukkan hasil simulasi perbandingan respon posisi kontrol *waypoint* kapal tanpa awak menggunakan kontroler *PID MRAC* dan kontroler adaptif L1. Gambar 4.12 menunjukkan perbandingan respon sudut *heading* kapal tanpa awak dengan *waypoint navigation*. Sementara Gambar 4.13 menunjukkan perbandingan sinyal kemudi propulsi *azimuth* untuk mengarahkan kapal tanpa awak ke titik-titik *waypoint* yang telah ditetapkan.

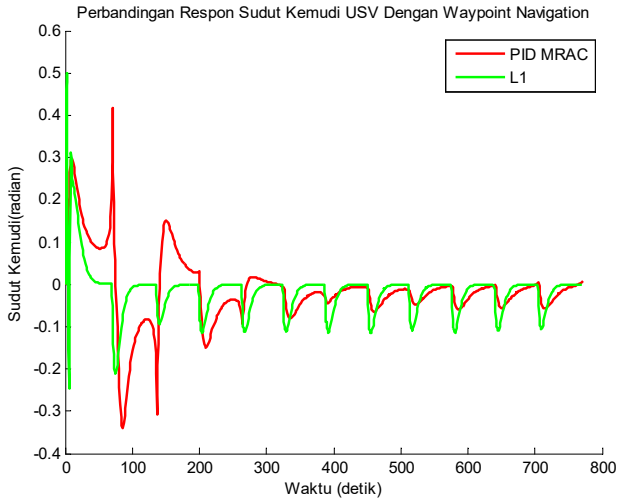
Dari Gambar 4.10, Gambar 4.11, dan Gambar 4.12. dapat dilihat bahwa hasil dari kapal tanpa awak yang menggunakan *PID MRAC* melalui *waypoint-waypoint* berkelok-kelok pada awalnya. Ini dikarenakan respon sudut kemudi yang dihasilkan cenderung berosilasi di awal kapal tanpa awak dijalankan, namun setelah berjalan lebih lama, kapal tanpa awak yang menggunakan *PID MRAC* menghasilkan belok yang lebih sedikit dikarenakan respon sudut kemudi sudah tidak berosilasi seperti ketika awal dijalankan. Sementara kapal tanpa awak yang menggunakan kontroler adaptif L1 cenderung lebih cepat beradaptasi dan sinyal sudut kemudi tidak berosilasi seperti *PID MRAC*. sehingga saat diperintahkan untuk melalui *waypoint-waypoint* yang ditetapkan tidak menghasilkan gerakan berkelok-kelok. Perbandingan *cross track error* posisi kapal tanpa awak terhadap garis yang menghubungkan anatara titik-titik *waypoint* ditunjukkan pada Gambar 4.13. dari hasil perhitungan *RMS*, didapat *cross track error RMS* dari *PID MRAC* adalah 8,083 meter sementara *cross track error RMS* dari kontroler adaptif L1 adalah 1,8965 meter.



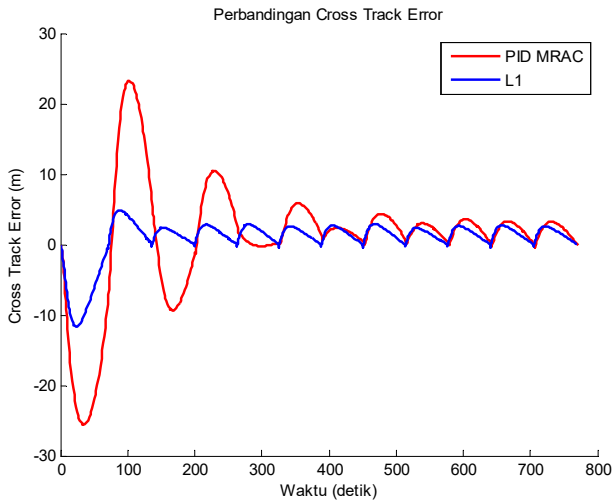
**Gambar 4.10** Perbandingan Respon Posisi Kontrol *Waypoint* Kapal Tanpa Awak Menggunakan Kontroler *PID MRAC* dan Kontroler Adaptif *L1*.



**Gambar 4.11** Perbandingan Respon Sudut *Heading* Kapal Tanpa Awak dengan *Waypoint Navigation*



**Gambar 4.12** Perbandingan Respon Sudut Kemudi Kapal Tanpa Awak dengan *Waypoint Navigation*



**Gambar 4.13** Perbandingan *Cross Track Error* Kapal Tanpa Awak Tanpa Gangguan



#### 4.5 Pengujian Perbandingan Kontrol *Waypoint* antara *PID MRAC* dan Kontroler Adaptif L1 dengan Kondisi Adanya Gangguan Eksternal

Pada bagian ini, akan diberikan hasil pengujian perbandingan kontrol *waypoint* kapal tanpa awak menggunakan kontroler *PID MRAC* dan kontroler adaptif L1. Pengujian dilakukan melibatkan gangguan eksternal . Gangguan eksternal berupa gangguan angin, arus, dan ombak frekuensi 0.08 radian/s. Besaran dan arah gangguan disajikan pada Tabel 4.1. Setiap simulasi dilakukan sepanjang 1000 detik waktu simulasi. Skenario yang dijalankan adalah kapal tanpa awak harus mampu melewati 13 titik *waypoint* yang dapat dilihat pada Tabel 3.2. Gaya dorong propulsi *azimuth* dibuat konstan sebesar 2000 Newton dan *setpoint heading* akan selalu berubah sesuai dengan koordinat kapal dan titik *waypoint* yang akan dituju. Sudut kemudi propulsi *azimuth* juga dibatasi sebesar 45 derajat atau sebesar 0,785398163 radian.

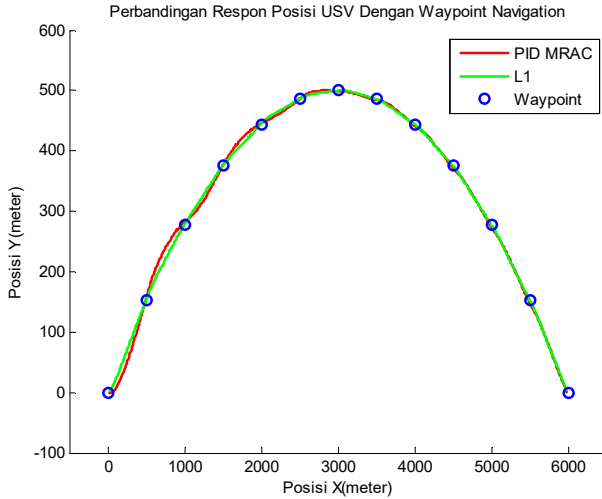
**Tabel 4.1** Besaran dan Arah Gangguan Pengaruh Lingkungan

| Gangguan | Besaran | Arah        |
|----------|---------|-------------|
| Angin    | 2 m/s   | -0,1 radian |
| Arus     | 1 m/s   | -0,1 radian |
| Ombak    | 1 m     | -0,1 radian |

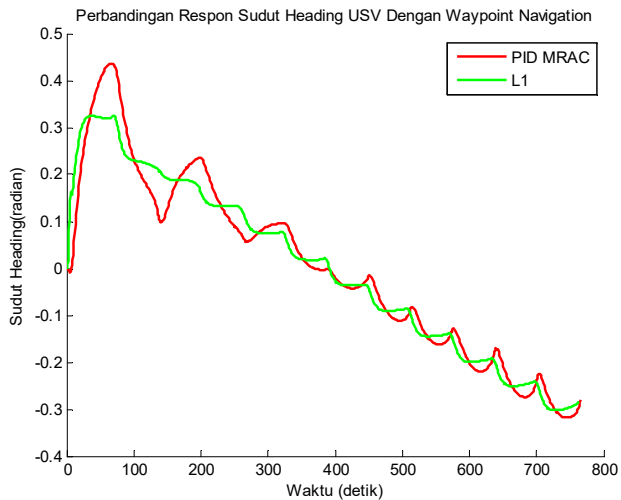
Gambar 4.13 menunjukkan hasil simulasi perbandingan respon posisi kontrol *waypoint* kapal tanpa awak menggunakan kontroler *PID MRAC* dan kontroler adaptif L1. Gambar 4.15 menunjukkan Perbandingan respon sudut *heading* kapal tanpa awak dengan *waypoint navigation*. Sementara Gambar 4.16 menunjukkan perbandingan sinyal kemudi propulsi *azimuth* untuk mengarahkan kapal tanpa awak ke titik-titik *waypoint* yang telah ditetapkan.

Dari Gambar 4.14, Gambar 4.15, dan Gambar 4.16. dapat dilihat bahwa hasil dari kapal tanpa awak yang menggunakan *PID MRAC* melalui *waypoint-waypoint* tetap berkelok-kelok pada awalnya seperti yang terjadi di hasil simulasi pada Subbab 4.4. Ini dikarenakan respon sudut kemudi yang dihasilkan cenderung berosilasi di awal kapal tanpa awak dijalankan, setelah berjalan lebih lama, kapal tanpa awak yang menggunakan *PID MRAC* menghasilkan belok yang lebih sedikit namun masih lebih besar dibanding saat tanpa diberi gangguan. Apabila dilihat

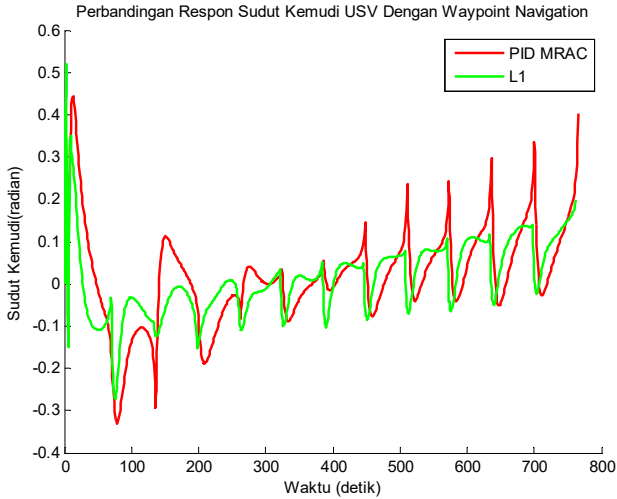
dari respon sudut kemudi, kapal tanpa awak yang menggunakan *PID MRAC* cenderung memberikan respon sudut kemudi dengan sudut yang besar dan perubahan yang cepat. Sementara kapal tanpa awak yang menggunakan kontroler adaptif L1 tetap memberikan hasil yang tidak jauh berbeda dibanding hasil simulasi pada Subbab 4.4. Kemampuan adaptasi yang cepat membuat respon sudut kemudi tidak beresilasi dan menghasilkan perubahan sudut yang tajam, sehingga respon sudut *heading* tidak beresilasi juga, sehingga respon posisi kapal tanpa awak tidak menghasilkan lintasan yang berkelok-kelok seperti kapal tanpa awak yang menggunakan kontroler *PID MRAC*. Perbandingan *cross track error* posisi kapal tanpa awak terhadap garis yang menghubungkan anatara titik-titik *waypoint* ditunjukkan pada Gambar 4.17. dari hasil perhitungan *RMS*, didapat *cross track error RMS* dari *PID MRAC* adalah 8,5488 meter sementara *cross track error RMS* dari kontroler adaptif L1 adalah 2,2603 meter.



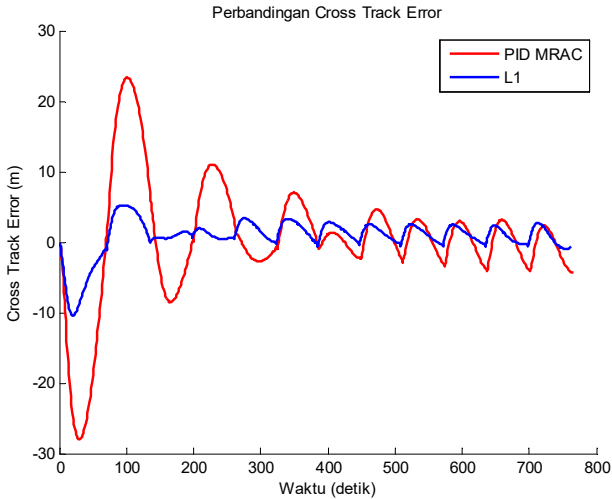
**Gambar 4.14** Perbandingan Respon Posisi Kontrol *Waypoint* Kapal Tanpa Awak Menggunakan Kontroler *PID MRAC* dan Kontroler Adaptif *L1* Melibatkan Gangguan Eksternal



**Gambar 4.15** Perbandingan Respon Sudut *Heading* Kapal Tanpa Awak dengan *Waypoint Navigation* Melibatkan Gangguan Eksternal



**Gambar 4.16** Perbandingan Respon Sudut Kemudi Kapal Tanpa Awak dengan *Waypoint Navigation* Melibatkan Gangguan Eksternal



**Gambar 4.17** Perbandingan *Cross Track Error* Kapal Tanpa Awak dengan Gangguan

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Kontroler *PID MRAC* dan kontroler adaptif L1 mampu menghasilkan respon sudut *heading* kapal tanpa awak sesuai dengan kriteria desain yang diinginkan melalui penentuan *model reference* dan *state predictor*.

Kapal tanpa awak yang menggunakan kontroler adaptif L1 menghasilkan *cross track error* terhadap garis antar *waypoint* lebih kecil yaitu sebesar 1,8965 meter *RMS* dibandingkan dengan *PID MRAC* yang menghasilkan *cross track error* sebesar 8,083 meter *RMS* pada saat kapal tanpa awak berjalan melalui titik-titik *waypoint* tanpa pengaruh lingkungan. Sementara saat dipengaruhi gaya angin, arus, dan ombak, *cross track error kapal* tanpa awak yang menggunakan kontroler adaptif L1 adalah 2,2603 meter *RMS* dan *cross track error kapal* tanpa awak yang menggunakan kontroler *PID MRAC* adalah 8,5488 meter *RMS*.

#### 5.2 Saran

Pada penelitian selanjutnya, model gangguan lingkungan angin, arus, dan ombak dapat dikembangkan ke model yang lebih realistik maupun *real-time data*. Parameter sistem akan lebih baik apabila didapat dari data hasil pengukuran purwarupa.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonim, "The NAVY Unmanned Surface," *Department of The Navy United States of America*, 23 Juli 2007. [Online]. Tersedia: <http://www.navy.mil/navydata/technology/usvmppr.pdf>. [Diakses 10 Desember 2017].
- [2] S. M. Rajesh, S. Bhargava, S. B dan K. Sivanathan, "Mission Planning and Waypoint Navigation of a Micro Quad Copter by Selectable GPS Co-Ordinates," *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, p. 143, 2014.
- [3] M. Zaky, "Jurnal Teknik Propulsi," *Biro Klasifikasi Indonesia*, p. 8, 2014.
- [4] M. A. Hurban, "Adaptive Speed Controller for the SeaFox Autonomous Surface Vessel," *Calhoun*, pp. 28-32, 2012.
- [5] K. D. Do dan J. Pan, "Modeling of Ocean Vessels," dalam *Control of Ships and Underwater Vehicles*, London: Springer-Verlag, 2009, pp. 39-53.
- [6] K. D. Do dan J. Pan, "Three Degrees of Freedom Horizontal Model," dalam *Control of Ships and Underwater Vehicles*, London: Springer-Verlag, 2009, pp. 54-56.
- [7] B. Singh dan K. Vijay, "Design and Simulation of Auto Tuning of PID Controller using MRAC Technique for Coupled Tanks System," *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2015.
- [8] N. Hovamkiyan dan C. Cao, "L1 Adaptive Output Feedback Controller for First-Order Reference Systems," dalam *L1 Adaptive Control Theory*, Urbana: SIAM, 2010, pp. 179-190.
- [9] S. G. Atmeh dan K. , "Guidance, Navigation and Control of Unmanned Airships under Time-Varying Wind for Extended Surveillance," *MDPI*, p. 8, 2016.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]



## LAMPIRAN

### A1.Script MATLAB Function USV

```
function [Vd,eta_d] = usv(V,T,Te,Yaw)

%vektor kecepatan searah sumbu x, y dan yaw
u=V(1);
v=V(2);
r=V(3);
m=1500;

eta_d=[cos(Yaw) -sin(Yaw) 0; sin(Yaw) cos(Yaw)
0; 0 0 1]*V;

%Konstanta massa tambahan
Xud=90;
Yvd=1000;
Nrd=58500;

xg=1.9; %5.5-3.6

%Konstanta damper linier
Xu=250;
Yv=1450;
Nr=580;
%

%Inersia z
Iz=(1500/2)*11^2;

% M=[m-Xud 0 0;
% 0 m-Yvd m*xg-Yrd;
% 0 m*xg-Yrd Iz-Nrd ];
%Penyederhanaan Matriks M
% Karena Kapal mendekati Simetris pada bagian
fore dan aft
% Komponen non diagonal memiliki nilai kecil dan
dapat diabaikan
M=[m-Xud 0 0;
```

```

0      m-Yvd      0;
0      0 Iz-Nrd ];

%Matrik centripetal dan coriolis rigid body dan
hidrodinamik
% Cv=[0                                     0      -
m*(xg*r+v)+Yvd*v+Yrd*r;
%      0                                     0      m*u-
Xud*u;
%      m*(xg*r+v)-Yvd*v-Yrd*r      -m*u+Xud*u  0];
%Penyederhanaan Matriks Cv
Cv=[0                                     0      -
m*v+Yvd*v;
      0                                     0      m*u-
Xud*u;
      m*v-Yvd*v      -m*u+Xud*u  0];
%Matrik Damper Linier
% D=[Xu  0  0;
%     0   Yv Yr;
%     0   Nv Nr];
%Penyederhanaan Damper Linear
% Karena Komponen Yr dan Nv lebih kecil dari
komponen diagonal, maka di
% nolkan
D=[Xu  0  0;
   0   Yv 0;
   0   0  Nr];

%Matrik Damper Nonlinier
Dnv=-[0 0 0;
      0 0 0;
      0 0 0];

%Output
Vd=inv(M) * (-Cv*V- (D+Dnv) *V+T+Te );

A=inv(M) *D;
eA= eig(A);
einvM=eig(inv(M));

```

## **A2.Script MATLAB Function Azimuth Propulsion**

```
function [Tu,Tv,Tr] = AP(Thruster,Az_Yaw)
Tu=Thruster*cos(Az_Yaw);
Tv=0;
Tr=Thruster*sin(Az_Yaw);
```

## **A3.Script MATLAB Function Waypoint**

```
function [SR,DW] =
Waypoint_Planner(WP,WP_Tolerance,PP)
global Index
%Penjelasan variabel
%Variabel Input:
%   PP: Present Position : [x,y]
%   WP: Waypoint         :
[x_target,y_target,Toleransi_waypoint]
%Variable Output
%   SR: Ship Refference : [yaw_error]
%   DW: Distance to waypoint:
[length_resultan,length_x,length_y]
%   ST: Status           : [bit_status]
A=Index;
%definisi variabel
%variabel input
%   PP
x=PP(1);
y=PP(2);
PPyaw=PP(3);
%   WP
x_target=WP(A+2,1);
x_target_sebelum=WP(A+1,1);
y_target=WP(A+2,2);
y_target_sebelum=WP(A+1,2);

%   WP_Tolerance
toleransi_waypoint=WP_Tolerance;

%Transformasi acuan bumi ke acuan kapal
length_x=x_target-x;
length_y=y_target-y;
```

```

length_x_sebelum=x_target-x_target_sebelum;
length_y_sebelum=y_target-y_target_sebelum;

%men cari panjang lintasan
length_resultan=sqrt(length_x^2+length_y^2);

%men cari yaw target
Yaw_Target=atan2(length_y,length_x);

%menyatakan status planner
if abs(length_x)<=toleransi_waypoint &&
abs(length_y)<=toleransi_waypoint
    bit_status=1
    Enable_Bit=0;
    Index=A+1;
    A=Index;
else
    bit_status=0;
end

%normalisasi Heading
%Kondisi Yaw>pi
if PPyaw>pi
    %Kondisi modulo produk ganjil
    B=fix(PPyaw/pi);
    if mod(B,2)==1
        PPyaw=mod(PPyaw,pi)-pi;
    end
    %Kondisi modulo produk genap
    if mod(B,2)==0
        PPyaw=mod(PPyaw,pi);
    end

%Kondisi Yaw<pi
elseif PPyaw<-pi
    B1=fix(abs(PPyaw)/pi)
    %Kondisi modulo produk ganjil
    if mod(B1,2)==1
        PPyaw=pi-mod(abs(PPyaw),pi);

```

```

end
%Kondisi modulo produk genap
if mod(B1,2)==0
    PPyaw=-mod(abs(PPyaw),pi);
end
end

%Menyatakan error heading
Error_Yaw=Yaw_Target-PPyaw;
%Kondisi Error>pi
if Error_Yaw>pi
    Error_Yaw=(-pi-PPyaw)-(pi-Yaw_Target);

%Kondisi Error<-pi
elseif Error_Yaw<-pi
    Error_Yaw=(pi-PPyaw)-(-pi-Yaw_Target);
end
if abs(Error_Yaw)==pi
    Error_Yaw=pi;
End

% menulis Variabel Output
SR=Yaw_Target;
DW=[length_resultan ;length_x ;length_y];
ST=bit_status;

```

#### A4.Operator *Projection*

Pertimbangkan satu set kompak konveks dengan batas halus yang diberikan oleh

$$\Omega_c \triangleq \{\theta \in \mathbb{R}^n | f(\theta) \leq c\}, 0 \leq c \leq 1$$

Dimana  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  adalah fungsi konveks halus

$$f(\theta) \triangleq \frac{(\epsilon_\theta + 1)\theta^T \theta - \theta_{max}^2}{\epsilon_\theta \theta_{max}^2}$$

di mana  $\theta_{max}$  adalah batas norma vektor parameter  $\theta$  dan  $\epsilon_\theta$  adalah toleransi konvergensi. Operator *Projection* dinyatakan sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
 & \text{Proj}(\theta, y) \\
 \triangleq & \begin{cases} y, & \text{jika } f(\theta) < 0 \\ y, & \text{jika } f(\theta) \geq 0 \text{ dan } \nabla f^T y \leq 0 \\ y - \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \left\langle \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|}, y \right\rangle f(\theta), & \text{jika } f(\theta) \geq 0 \text{ dan } \nabla f^T y > 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Muhamad Alif Farabi Eranugroho, lahir di Surabaya pada tanggal 16 Oktober 1996. Menempuh pendidikan formal di SD Al-Hikmah Surabaya, SMPN 12 Kota Bekasi, SMAN 5 Kota Bekasi dan melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama masa studi, penulis aktif sebagai ketua di organisasi UKM Robotika ITS dan divisi *electronic-programming* tim robot kapal tanpa awak Barunastra ITS.

*Email* = farabialif@gmail.com

**[Halaman ini sengaja dikosongkan]**