



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - EE 184801**

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI *AUTOPILOT* PADA  
*UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV)* TIPE  
*MONOHULL LSS01* MENGGUNAKAN METODE *PID-  
BASED SLIDING MODE CONTROL***

M. Fatah Al Alim  
NRP 07111540007005

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

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

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - EE 184801**

**PERANCANGAN SISTEM AUTOPILOT PADA UNMANNED  
SURFACE VEHICLE (USV) TIPE MONOHULL LSS01  
MENGUNAKAN METODE PID-BASED SLIDING MODE  
CONTROL**

M. Fatah Al Alim  
NRP 07111540007005

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

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

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - EE 184801**

***DESIGN AUTOPILOT ON MONOHULL LSS01  
UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV) USING PID-  
BASED SLIDING MODE CONTROL METHOD***

M. Fatah Al Alim  
NRP 07111540007005

*Supervisor*  
Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.  
Nurlita Gamayanti, ST., MT.

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

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

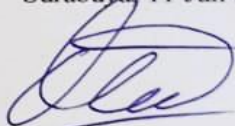
## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**Perancangan Sistem Kendali Autopilot Pada Unmanned Surface Vehicle (USV) Tipe Monohull LSS01 Menggunakan Metode PID-Based-Sliding Mode Control**" merupakan hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan – bahan yang tidak diijinkan dan buka merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 11 Juli 2019



M. Fatah Al Alim  
NRP 07111745007005

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



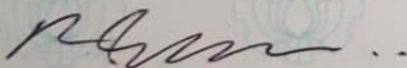
**PERANCANGAN SISTEM KENDALI *AUTOPILOT* PADA  
*UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV)* TIPE *MONOHULL*  
LSS01 MENGGUNAKAN METODE *PID-BASED SLIDING MODE*  
*CONTROL***

**TUGAS AKHIR**

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

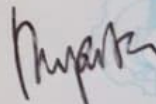
**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**



**Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT**  
**NIP.195704241985021001**

**Dosen Pembimbing II**



**Nurlita Gamayanti, ST., MT.**  
**NIP.197812012002122002**



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI *AUTOPILOT* PADA  
*UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV)* TIPE *MONOHULL*  
LSS01 MENGGUNAKAN *METODE PID-BASED SLIDING MODE*  
*CONTROL***

**Nama** : M. Fatah Al Alim  
**Dosen** : 1. Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT.  
2. Nurlita Gamayanti ST., MT.

**ABSTRAK**

*Unmanned Surface Vehicle (USV)* atau kapal tanpa awak, merupakan kapal yang mempunyai kemampuan bergerak secara otomatis. Untuk pergerakan otomatis diperlukan algoritma sistem *autopilot*. Sistem *autopilot* merupakan pengendalian suatu kapal untuk menuju *waypoint*. Untuk mencapai *waypoint* diperlukan gaya dorong dan sudut belok tertentu pada kapal. Oleh karena itu dibutuhkan suatu metode kendali *autopilot* untuk membuat kapal mencapai *waypoint* yang telah ditentukan. *Sliding Mode Control* merupakan metode kontrol berbasis *switching* berfrekuensi tinggi dan memiliki aksi kontrol yang sifatnya diskontinyu. Namun, *Sliding Mode Control* dapat menimbulkan *chattering* pada sistem. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan metode kendali *autopilot* menggunakan *Sliding Mode Control* dengan sinyal kontrol natural berupa struktur kontroler PID pada *plant* kapal tanpa awak. Dengan menggunakan metode ini, diharapkan kapal tanpa awak dapat melakukan pergerakan dengan akurat dari *waypoint* yang diharapkan tanpa adanya *chattering*. Kestabilan dari keseluruhan *loop* pengaturan sistem dipastikan menggunakan fungsi kestabilan *Ljapunov*. Kontroler hasil desain diaplikasikan pada sistem kapal tanpa awak. Hasil simulasi menunjukkan bahwa parameter kontrol yang mampu memenuhi spesifikasi desain yang diharapkan adalah untuk respon kecepatan translasi dibutuhkan kontrol natural PID dengan *gain*  $K_p=15$ ,  $K_i=0.0001$ , dan  $K_d=4$  dan untuk respon sudut *heading* dibutuhkan  $K_p=1.5$ ,  $K_i=0.0001$ , dan  $K_d=0.001$ .

**Kata Kunci:** *Sliding Mode Control, chattering, heading.*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **DESIGN AUTOPILOT ON MONOHULL LSS01 UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV) USING PID-BASED *SLIDING MODE CONTROL METHOD***

**Name** : M. Fatah Al Alim

**Supervisor** : 1. Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT.  
2. Nurlita Gamayanti ST., MT.

## **ABSTRACT**

*Unmanned Surface Vehicle (USV) is a marine vehicle that has the ability to move automatically. For automatic movement the autopilot system algorithm is required. The autopilot system is the control of marine vehicles to get to a particular waypoint. To reach the waypoint required a certain force and turning angle on marine vehicles. Therefore an autopilot control method is needed to make the ship reach a predetermined waypoint. Sliding Mode Control is a high frequency switching based control method and has discontinuous control actions. However, Sliding Mode Control can cause chattering on the system. Therefore, in this study used the autopilot control method using Sliding Mode Control with natural control signals in the form of PID controller structures on Unmanned Surface Vehicle plants. By using this method, it is expected that the Unmanned Surface Vehicle can move accurately from the expected waypoint without any chattering on the system. The stability of the whole loop of system regulation is ensured using the Lyapunov stability function. The design controller is applied to Unmanned Surface Vehicle. The simulation results show that the control parameters that are able to meet the expected design specifications are for translational speed responses that require gain  $K_p = 15$ ,  $K_i = 0,0001$ , and  $K_d = 4$  and for heading angle responses  $K_p = 1.5$ ,  $K_i = 0,0001$ , and  $K_d = 0,001$ .*

**Keywords:** *Sliding Mode Control, chattering, heading.*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

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

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI *AUTOPILOT* PADA  
*UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV) TIPE MONOHULL  
LSS01 MENGGUNAKAN METODE PID-BASE SLIDING MODE  
CONTROL***

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

1. Allah SWT yang telah memberi rahmat-Nya dalam pembuatan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua dan keluarga yang telah memberikan dukungan penuh dan teladan bagi penulis.
3. Bapak Rusdhianto Effendi dan Ibu Nurlita Gamayanti selaku pembimbing.
4. Rekan – rekan Teknik Elektro (e55), terutama mahasiswa Teknik Sistem Pengaturan yang selalu menyemangati dan menemani.
5. Pihak lain yang ikut membantu penulis tidak dapat disebutkan namanya satu-persatu.

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

Surabaya, Juli 2019

M. Fatah Al Alim  
NRP 07111745007005

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR .....	v
LEMBAR PENGESAHAN .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ABSTRAK.....	ix
KATA PENGANTAR .....	xiii
DAFTAR ISI .....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL .....	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan .....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Metodologi .....	3
1.6 Sistematika .....	4
1.7 Relevansi .....	4
BAB II DASAR TEORI .....	7
2.1 Sistem Umum Kendali <i>Autopilot</i> Kapal Tanpa Awak.....	7
2.2 Unmanned Surface Vehicle (USV) Tipe LSS01 .....	7
2.3 Model Matematis Kapal Tanpa Awak [2] .....	9
2.3.1 Kinematika .....	9
2.3.2 Kinetika .....	10
2.4 PID(Proporsional Integral Derivatif) [8] .....	11
2.5 Sliding Mode Control .....	12
2.5.1 Pengenalan <i>Sliding Mode Control</i> .....	12
2.5.2 Analisa Kestabilan <i>Lyapunov</i> [8], [11].....	14
2.5.3 Permukaan Luncur .....	15
2.5.4 Sinyal Kontrol [4].....	17
2.5.5 <i>Sliding Mode Control</i> Berbasis PID[4] .....	18
2.6 Trajectory Planning .....	18
2.7 <i>Waypoint Control</i> [14].....	19
BAB III PERANCANGAN SISTEM.....	21
3.1 Desain Sistem <i>Autopilot</i> Kapal Tanpa Awak .....	21

3.2 Perancangan Plant Kapal Tanpa Awak.....	22
3.3 Perancangan Metode <i>Sliding Mode</i> .....	29
3.3.1 Pengaturan Kecepatan Sumbu <i>Surge</i> .....	31
3.3.2 Pengaturan <i>Heading</i> pada Sumbu $\psi$ .....	35
3.4 Perancangan Navigasi <i>Waypoint</i> .....	37
BAB IV HASIL DAN ANALISA .....	39
4.1 Respon Open Loop .....	39
4.2 Pengujian <i>Autopilot</i> dengan Metode <i>Sliding Mode Control</i>	41
4.1.2 Pengujian Respon Kecepatan Translasi.....	41
4.1.3 Pengujian Respon Sudut <i>Heading</i> Kapal Tanpa Awak	47
4.2 Pengujian Kapal Tanpa Awak dengan <i>Guidance</i> .....	52
BAB V PENUTUP .....	55
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA .....	57
LAMPIRAN .....	59
RIWAYAT HIDUP .....	63

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1:</b> Blok Diagram Sistem Kendali <i>Autopilot</i> Kapal Tanpa Awak[1] .....	7
<b>Gambar 2.2:</b> USV LSS01 .....	8
<b>Gambar 2.3:</b> Pergerakan USV pada bidang planar( <i>XEOEYE</i> merupakan acauan kapal terhadap bumi, sedangkan <i>XBOBYB</i> merupakan acuan badan kapal).....	10
<b>Gambar 2.3:</b> Jalur (Garis yang Diberi Titik) dari Lintasan <i>State</i> dari Suatu Sistem dengan Kontroler Saat Diberi Gangguan Kecil[13] .....	16
<b>Gambar 2.4:</b> Penggambaran <i>Phase-Plane</i> dari Sistem yang Dikontrol dengan menggunakan <i>SMC</i> pada <i>Switching Surface</i> .....	17
<b>Gambar 2.4.</b> Blok Diagram <i>Waypoint Control</i> [11] .....	19
<b>Gambar 3.1:</b> Diagram Blok Sistem Kendali <i>Autopilot</i> .....	21
<b>Gambar 3.2:</b> Diagram Blok <i>Waypoint Control</i> .....	22
<b>Gambar 3.3:</b> Diagram Simulink Plant Kapal Tanpa Awak Tipe LSS01 .....	26
<b>Gambar 3.4:</b> Diagram simulink gangguan angin .....	28
<b>Gambar 3.5:</b> Diagram Simulink Gangguan Arus.....	28
<b>Gambar 3.6:</b> Diagram Simulink Gangguan Ombak.....	29
<b>Gambar 3.7:</b> Blok Diagram pengaturan Kecepatan Translasi .....	31
<b>Gambar 3.7:</b> Permukaan Luncur ( <i>Sliding Surface</i> ).....	32
<b>Gambar 3.8:</b> Diagram Blok Pengaturan Sumbu $\psi$ .....	35
<b>Gambar 3.9 :</b> Rancangan <i>Waypoint</i> .....	38
<b>Gambar 4.1:</b> Respon Posisi Kapal Tanpa Awak Sistem Open Loop..	39
<b>Gambar 4.2:</b> Respon Kecepatan Open Loop pada Sumbu <i>Surge, Sway, Yaw</i> .....	40
<b>Gambar 4.3:</b> Respon Open Loop Sudut <i>Heading</i> Kapal Tanpa Awak	41
<b>Gambar 4.4:</b> Respon Kecepatan Translasi dg SMC Signum .....	42
<b>Gambar 4.5:</b> Sinyal Kontrol <i>Throttlet</i> dengan SMC Signum .....	44
<b>Gambar 4.6:</b> Plot <i>Phase Plane</i> Respon Sistem Kecepatan Translasi ..	44
<b>Gambar 4.7:</b> Respon Kecepatan Translasi dengan SMC PID.....	45
<b>Gambar 4.8:</b> Sinyal Kontrol <i>Throttlet</i> dengan SMC PID.....	46
<b>Gambar 4.9:</b> Plot <i>Phase Plane Sliding Surface</i> Respon Sistem .....	46
<b>Gambar 4.10:</b> Respon Sudut <i>Heading</i> dengan SMC Signum .....	47
<b>Gambar 4.11:</b> Sinyal Kontrol <i>Rudder</i> dengan SMC Signum.....	49

<b>Gambar 4.12:</b> Plot <i>Phase Plane Sliding Surface</i> Respon Sistem .....	49
<b>Gambar 4.13:</b> Respon Sudut <i>Heading</i> dengan SMC-PID.....	50
<b>Gambar 4.14:</b> Respon Sudut <i>Heading</i> dengan SMC-PID.....	51
<b>Gambar 4.15:</b> Respon Sudut <i>Heading</i> dengan SMC-PID.....	51
<b>Gambar 4.16:</b> Perbandingan Respon Posisi Kapal Tanpa dengan Titik-titik <i>Waypoint</i> .....	53
<b>Gambar 4.17:</b> Sinyal Kontrol Kapal Tanpa Awak dengan <i>Navigation Waypoint</i> .....	53
<b>Gambar 4.18:</b> <i>Error Waypoint</i> Respon Kapal Tanpa Awak dengan Gangguan dan Tanpa Gangguan.....	54

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1.</b> Data-data Parameter Kapal Tanpa Awak LSS01.....	22
<b>Tabel 3.2.</b> Spesifikai desain Pengaturan Kecepatan Translasi .....	31
<b>Tabel 3.3.</b> Spesifikai Desain Pengaturan Sudut Heading .....	35
<b>Tabel 3.4.</b> Daftar Koordinat Waypoint Yang Akan Dilalui Kapal Tanpa Awak.....	37
<b>Tabel 4.1</b> Pengujian SMC Signum untuk Kecepatan Translasi.....	42
<b>Tabel 4.2</b> Pengujian SMC-PID untuk Kecepatan Translasi .....	45
<b>Tabel 4.3.</b> Pengujian SMC- <i>Signum</i> untuk Sudut Heading.....	48
<b>Tabel 4.4.</b> Pengujian SMC-PID untuk Sudut <i>Heading</i> dengan SMC-PID .....	50
<b>Tabel 4.5</b> Parameter Gangguan Eksternal.....	52

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB I PENDAHULUAN

Tugas akhir ini merupakan penelitian yang dilakukan oleh mahasiswa S1 Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat wajib untuk menyelesaikan studi dalam program sarjana teknik.

Pada bab ini, akan dibahas mengenai hal-hal yang mendahului pelaksanaan Tugas Akhir. Hal-hal tersebut meliputi latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, sistematika penulisan, dan relevansi.

## 1.1 Latar Belakang

*Unmanned Surface Vehicle (USV)* atau kapal tanpa awak, saat ini memiliki peranan aplikasi yang sangat berkembang pesat, diantaranya dalam bisang industri, militer dan penelitian ilmiah. Dalam pengembangannya, kapal tanpa awak membutuhkan sistem kontrol, sistem sensor, sistem komunikasi, dan sistem senjata yang canggih untuk dapat menyelesaikan beberapa misi, seperti patroli laut, monitoring lingkungan, dan penjelajah. Untuk mencapai hal tersebut dibutuhkan kemampuan kapal untuk bergerak secara otomatis tanpa pantauan operator. Untuk pergerakan otomatis diperlukan algoritma sistem *autopilot*. [1] Sistem *autopilot* merupakan pengendalian suatu kapal untuk menuju arah tertentu pada sebuah titik lintasan yang telah ditentukan. Titik lintasan tersebut diberi nama *waypoint*.

Agar Kapal Tanpa Awak dapat bermanuver diperlukan perangkat propulsi dan perangkat kemudi. Propulsi yang paling umum digunakan adalah *thruster* dengan menggunakan motor listrik tipe BLDC sebagai pendorong sedangkan perangkat kemudi menggunakan daun kemudi kapal atau disebut *rudder*. Permodelan kapal tanpa awak secara umum menggunakan pendekatan *3 degree of freedom* (derajat kebebasan) yang terdiri atas 3 sumbu, yaitu *surge sway*, dan *yaw*. [2]

Pengendalian kapal tanpa awak menuju *waypoint* yang diinginkan, membutuhkan kontrol kecepatan kapal dan arah 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 tetap bermanuver dengan baik di kedua kondisi tersebut.

Salah satu cara untuk menerapkan sistem *autopilot* yang dapat mengatasi gangguan pada kapal tanpa awak adalah dengan merancang metode kontrol *Sliding Mode Control*. Metode *Sliding Mode Control* merupakan salah satu teknik kontrol yang dapat digunakan pada plant yang nonlinear.[3] Prinsip dasar untuk *Sliding Mode Control* terdiri dari perpindahan atau pergerakan keadaan lintasan ke arah bidang geser (*sliding surface*) dan mempertahankannya sekitar bidang ini dengan sebuah fungsi geser.

Namun metode *Sliding Mode Control* ini mempunyai kelemahan yaitu timbulnya *chattering* atau switching dengan frekuensi tinggi pada sinyal kontrol yang disebabkan oleh sifat diskontinyu pada sinyal kontrol natural dari sistem. Oleh karena itu pada tugas akhir ini digunakan kontroler PID sebagai input natural sistem yang dapat meredam efek *chattering*. [4] Dengan perancangan kontrol *Sliding Mode Control* berbasis PID diharapkan dapat membuat kapal tanpa awak melaju di laut dan mampu melalui *waypoint-waypoint* yang telah ditentukan di semua kondisi baik saat tidak ada gangguan eksternal maupun saat terdapat gangguan eksternal.

## 1.2 Permasalahan

Kapal Tanpa Awak LSS01 menggunakan pendekatan 3 degree of freedom (derajat kebebasan) untuk sistem *autopilot*. Kapal mampu bergerak translasi maju pada sumbu *surge* dan *sway* serta mampu bergerak searah sumbu yaw dengan batasan sudut tertentu.

Untuk menggerakkan kapal dilakukan dengan mengatur kecepatan pada sumbu *surge*, sedangkan untuk mengarahkan kapal menuju *waypoint* dilakukan dengan mengatur sudut kapal. Namun gangguan eksternal berupa angin, arus, dan ombak dapat mempengaruhi arah laju kapal tanpa awak.

Untuk menguji sistem *autopilot* pada plant Kapal LSS01 digunakan *waypoint control* dengan masukan berupa *waypoint-waypoint* yang telah ditentukan dengan referensi kecepatan tetap.

## 1.3 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut,

1. Parameter dari *body* kapal menggunakan Kapal LSS01
2. Pemodelan fungsi alih propulsi dan kemudi tidak disertakan dalam simulasi



3. Ada dua variabel kontrol yaitu kecepatan arah sumbu *surge* dan *heading* sudut *yaw*
4. Bentuk pengaruh gangguan arus dan ombak berupa pendekatan.
5. Navigasi *waypoint* bekerja pada bidang planar.

## 1.4 Tujuan

Merancang sistem *autopilot* pada USV model *monohull* menggunakan metode *Sliding mode control* berbasis PID agar kapal tanpa awak mampu melewati *waypoint-waypoint* yang telah ditentukan dengan disertai gangguan maupun ketika tidak disertai gangguan.

## 1.5 Metodologi

Untuk meneliti tugas akhir ini, dilakukan beberapa tahapan dan metodologi, diantaranya adalah sebagai berikut:

### a) Studi Literatur

Studi literatur berguna untuk mencari informasi atau data mengenai plant, kontroler, atau sistem secara keseluruhan, studi literatur diperlukan sebagai landasan dalam mengerjakan tugas akhir agar diperoleh teori penunjang yang memadai, baik ilmu dasar, analisis, maupun metode penelitian. Hal ini dapat dilakukan dengan melihat acuan dari jurnal, buku teks, internet, dan lain-lain. Dengan adanya studi literatur, penelitian dapat dilakukan berdasarkan teori-teori yang telah ada sebelumnya

### b) Perancangan *Software*

Perancangan software dipersiapkan untuk simulasi sistem. Software tersebut berupa aktuator-aktuator dari sistem, kontroler.

### c) Pemodelan dan Identifikasi *Plant*

Pemodelan dan identifikasi plant kapal tanpa awak dilakukan dengan identifikasi parametrik berupa pengukuran input dan output, sehingga diperoleh parameter-parameter yang ada pada kapal tanpa awak untuk memperoleh model matematikanya. Dengan didapatkan model matematika, dapat dilakukan eksperimen untuk memperoleh dinamika kapal secara *open-loop* dan mengetahui karakteristik sistem kapal tanpa awak.

### d) Desain Sistem Autopilot dan Simulasi

Setelah diperoleh model matematika kapal tanpa awak, akan dilakukan perancangan autopilot dengan metode *Sliding Mode Control* berbasis PID sebagai algoritma kendali untuk memberikan respon sistem pada spesifikasi tertentu. Setelah diperoleh parameter

kontroler, kemudian dilakukan tahap simulasi dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB

e) Penulisan Buku Tugas Akhir

Buku tugas akhir ditulis secara intensif di la proses simulasi telah selesai. Pada saat proses simulasi sedang berjalan, dilakukan eksplorasi bahan-bahan untuk penulisan Buku Tugas Akhir.

## 1.6 Sistematika

Laporan Tugas Akhir ini dibagi dalam lima bab dengan susunan dan uraian singkat masing-masing babnya sebagai berikut,

### **BAB I PENDAHULUAN**

Pada bab ini, dibahas mengenai latar belakang, perumusan permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi dari Tugas Akhir.

### **BAB II TEORI DASAR**

Bab ini berisi tentang teori-teori yang berkaitan dengan topik yang diangkat dalam tugas akhir ini. Teori yang dibahas pada bab ini adalah mengenai sistem *autopilot*, pemodelan kapal tanpa awak LSS01, analisis Kestabilan *Lyapunov*, Kontroler PID, *Sliding Mode Control*, dan Trajectory Planning.

### **BAB III PERANCANGAN SISTEM**

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai perancangan algoritma kontrol kapal tanpa awak dengan metode *Sliding Mode Control* berbasis PID berdasarkan teori pada Bab II.

### **BAB IV HASIL DAN ANALISIS**

Bab ini berisi tentang hasil pengujian simulasi sistem yang telah dirancang. Pengujian terdiri dari pengujian plant kapal tanpa awak, pengujian *Sliding Mode Control* berbasis PID, dan pengujian *waypoint planner*. Hasil dan pengujian akan dianalisa selanjutnya.

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

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

## 1.7 Relevansi

Hasil dari Tugas Akhir ini diharapkan menjadi referensi desain kontroler pada kapal tanpa awak, pengembangan dan perbandingan metode kontrol yang tepat untuk sistem *autopilot* pada kapal tanpa awak. Selain itu, juga untuk mengetahui pengaruh metode kontrol dengan

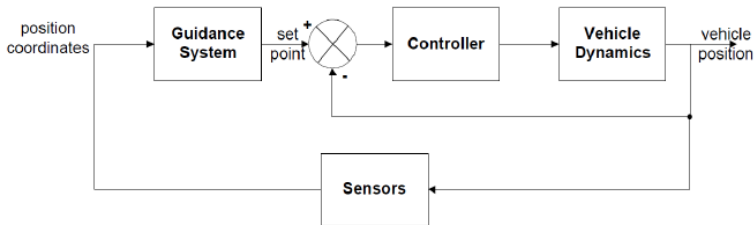
*Sliding Mode Control* berbasis PID pada sistem *autopilot* kapal tanpa awak.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB II DASAR TEORI

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini terdapat beberapa teori dasar yang menjadi acuan untuk merumuskan dan menyelesaikan masalah yang akan dibahas. Bagian ini membahas tentang teori-teori pendukung, meliputi sistem *autopilot*, pemodelan matematis, kontroler PID, *Sliding Mode Control*, analisa Kestabilan *Lyapunov*, *trajectory planning*, dan *waypoint control*.

### 2.1 Sistem Umum Kendali *Autopilot* Kapal Tanpa Awak



**Gambar 2.1:** Blok Diagram Sistem Kendali *Autopilot* Kapal Tanpa Awak[1]

Gambar 1.1 merupakan blok dasar yang memungkinkan kendaraan beroperasi secara mandiri. Gambaran umum sistem dan hubungan antara berbagai subsistem USV diilustrasikan pada Gambar 2.1. Subsistem navigasi berkaitan dengan menentukan lokasi kapal saat ini dan dicapai dengan mengumpulkan data real time dari sensornya. Sistem *guidance* memutuskan lintasan fisik terbaik yang harus diikuti oleh kapal. Sistem *guidance* mendapatkan input dari sistem navigasi dan menghasilkan judul referensi yang diperlukan. Sistem kontrol bertanggung jawab untuk `menjaga kendaraan tetap pada jalurnya sebagaimana ditentukan oleh prosesor pemandu. Dari keseluruhan subsistem pada Gambar 1, yang berlaku pada sistem *autopilot* adalah sistem navigasi dan sistem kontrol.[1]

### 2.2 Unmanned Surface Vehicle (USV) Tipe LSS01

*Unmanned surface vehicle* atau kapal tanpa awak adalah kapal yang memiliki kemampuan untuk melaju tanpa ada nahkoda pada kapal tersebut. Kapal dapat berjalan secara manual dengan kendali jarak jauh.

Kapal dapat melaju semi otomatis dalam pantauan operator. Kapal dapat melaju secara otomatis penuh tanpa pantauan operator. [5]

*Unmanned Surface Vehicle (USV)* atau kapal tanpa awak memiliki peranan aplikasi yang sangat berkembang pesat, diantaranya dalam bisang industri, militer dan penelitian ilmiah. USV diklasifikasikan sesuai jumlah lambung yang digunakan. USV Monohull untuk USV yang memiliki satu lambung, Katamaran untuk dua lambung, dan Trimaran untuk USV yang menggunakan 3 lambung kapal.[6]

Adapun LSS-01 adalah nama USV *monohull* yang dimiliki oleh Laboraturium Sistem dan Sibernetika Departemen Teknik Elektro ITS. USV ini menggunakan *thruster* sebagai propulsi atau mesin penggerak dan *rudder* sebagai mesin kemudi. Mesin *thruster* digunakan untuk memberi gaya dorong kepada kapal, dan kemudi digunakan untuk mengatur arah kapal untuk melaju. USV LSS01 digunakan untuk pengambilan data dan sebagai objek estimasi parameter pada penelitian ini. USV ini memiliki propulsi yang digerakkan oleh motor BLDC, penggerak *rudder* berupa motor servo, dan sistem penerima perintah, pemberi perintah ke penggerak kapal, dan alat untuk menyimpan data yang berupa *Pixhawk Cube*. Gambar USV LSS-01 ditunjukkan pada gambar 2.2.



**Gambar 2.2:** USV LSS01

## 2.3 Model Matematis Kapal Tanpa Awak [2]

Pada Subbab ini akan dijelaskan pemodelan matematika dari kapal tanpa awak yang dibagi berdasarkan analisis kinematika dan kinetika kapal tanpa awak.

### 2.3.1 Kinematika

Sebuah kapal secara umum dijelaskan oleh persamaan enam derajat kebebasan (DOF). Pergerakan dalam posisi tiga dimensi ditunjukkan dengan  $(x, y, z)$  yang disebut pergerakan *surge*, *sway* dan *yaw*. Sedangkan  $(\phi, \theta, \psi)$  yang disebut *roll*, *pitch*, dan *yaw* menunjukkan orientasi kapal. Dengan mengasumsikan kendaraan stabil secara longitudinal dan lateral dengan amplitudo kecil, maka dinamika *roll* and *pitch* dapat diabaikan. Demikian juga, karena kendaraan mengambang maka  $z = 0$ . Model yang dihasilkan untuk tujuan manuver kendaraan di bidang horizontal menjadi model tiga DOF.

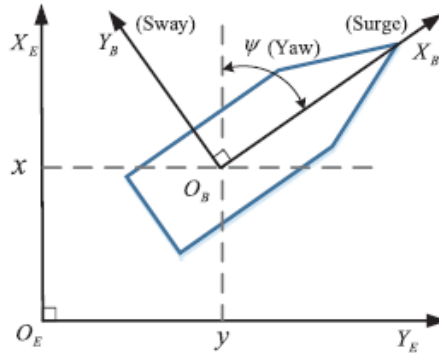
*State* kapal kemudian ditentukan sebagai  $\eta = [x \ y \ \phi]^T$  sebagai posisi  $(x, y)$  dan sudut *heading*  $\phi$  3-DOF kapal tanpa awak pada acuan kerangka bumi dan  $v = [u \ v \ r]^T$  sebagai vektor kecepatan linier dan kecepatan sudut pada kerangka acuan badan kapal[7]. Sehingga didapatkan model dinamik *state space* dari kapal tanpa awak monohull yang dihubungkan melalui hubungan kinematik sebagai berikut:

$$\dot{\eta} = R(\psi)v \quad (2.1)$$

Dimana  $R(\psi)$  merupakan merupakan matriks rotasi yang didefinisikan sebagai berikut:

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\Phi) & -\sin(\Phi) & 0 \\ \sin(\Phi) & \cos(\Phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Matriks  $R(\psi)$  berfungsi sebagai matriks transformasi antara acuan kerangka bumi dan acuan kerangka kapal.  $(x, y)$  dan  $\psi$  merupakan posisi dan oientasi (yaw/sudut *heading*) pada kapal terhadap kerangka acuan bumi, sedangkan  $u, v$ , dan  $r$  merepresentasikan kecepatan pada sumbu *surge*, *sway*, dan *yaw* terhadap kerangka acuan *body* kapal. Pergerakan kapal digambarkan pada bidang planar yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.3:** Pergerakan USV pada bidang planar( $X_E O_E Y_E$  merupakan acuan kapal terhadap bumi, sedangkan  $X_B O_B Y_B$  merupakan acuan badan kapal)

### 2.3.2 Kinetika

Menurut penelitian yang sudah ada, untuk keperluan desain sistem kontrol yang lebih baik pada model dinamika kapal, diperlukan asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Kapal tanpa awak bergerak pada *horizontal plane* pada permukaan air yang ideal
2. Massa kapal tanpa awak adalah terdistribusi uniform
3. Koordinat axis kerangka acuan *body* kapal berpacu pada center of gravity (CG)
4. Titik tengah gaya grafitasi CG dan titik tengah daya apung CB, terletak secara vertikal di sumbu-z

Berdasarkan asumsi-asumsi tersebut, model dinamika USV dapat ditentukan sebagai berikut:

$$M\dot{v} = -C(v)v - (D_n(v) + D)v - g(\eta) + \tau + \tau_E \quad (2.3)$$

Dimana  $\eta = [x \ y \ \phi]^T$  sebagai posisi  $(x, y)$  dan sudut *heading*  $\phi$  3-DOF kapal tanpa awak pada acuan kerangka bumi dan  $v = [u \ v \ w]^T$  sebagai vektor kecepatan linier dan kecepatan sudut pada kerangka acuan badan kapal.  $\tau_E = [\tau_E^{cu} \ \tau_E^{wa} \ \tau_E^{wi}]$  adalah gangguan eksternal berupa angin, arus, dan gelombang.

Matriks  $M$  merupakan penjumlahan massa rigid *body* dan massa tambahan hidrodinamik matriks inersia. Dimana matriks  $M = M^T > 0$ . Sehingga,



$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mx_g - Y_{\dot{r}} & I_x - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$C(v)$  merupakan penjumlahan matriks *centripetal*  $C_A(v)$  dan *corolis*  $C_{RB}(v)$  dari rigid *body*. Kemudian  $C(v) = -C^T(v)$  didefinisikan sebagai matriks simetris sebagai berikut:

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & m(x_g r + v) + Y_{\dot{v}} + Y_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & \mu u - X_{\dot{u}} u \\ m(x_g r + v) - Y_{\dot{v}} - Y_{\dot{r}} & -\mu u + X_{\dot{u}} u & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Kemudian matriks damping linier  $D$  dan non linier  $D_n(v)$  didefinisikan sebagai berikut:

$$D = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & N_v & N_r \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$D_n(v) = \begin{bmatrix} X_{|u|u}|u| & 0 & 0 \\ 0 & Y_{|v|v}|v| + Y_{|r|v}|r| & Y_{|v|r}|v| \\ 0 & N_{|v|v}|v| + N_{|r|v}|r| & N_{|v|r}|v| + N_{|r|r}|r| \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Selanjutnya matriks gaya dan momen yang bekerja pada USV. Didefinisikan sebagai berikut:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_u \\ 0 \\ \tau_r \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Sedangkan vektor gaya dan momen dari induksi arus laut, ombak dan angin  $\tau_E$  didefinisikan sebagai berikut:

$$\tau_E = \begin{bmatrix} \tau_{uE} \\ \tau_{vE} \\ \tau_{rE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{uE}^{cu} + \tau_{uE}^{wa} + \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_x(\gamma_w) A_F W \\ \tau_{vE}^{cv} + \tau_{vE}^{wa} + \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_y(\gamma_w) A_L W \\ \tau_{rE}^{cr} + \tau_{rE}^{wa} + \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_N(\gamma_w) A_F W L_{OA} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

## 2.4 PID(Proporsional Integral Derivatif) [8]

PID *controller* merupakan algoritma metode kendali yang terdiri dari tiga konsep matematika yaitu proporsional, integral, dan derivatif.

PID merupakan algoritma kontrol yang paling sering digunakan karena mudah dan memiliki struktur yang sederhana. PID adalah kontroler yang berbasis *negative feedback control*. Pada tugas akhir ini, digunakan sebagai sinyal kontrol natural pada kontroler *sliding mode*. Persamaan fungsi alih dari kontroler PID ditunjukkan seperti pada Persamaan 2.10

$$u(t) = Kp \left( e(t) + \int_0^t e(t) + \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.10)$$

Kontroler PID merupakan kontroler yang aksi kontrolnya merupakan kombinasi dari aksi kontrol proporsional, aksi kontrol integral dan aksi kontrol differensial. Untuk kontroler PID, sinyal kesalahan  $e(t)$  merupakan masukan kontroler sedangkan keluaran kontroler adalah sinyal kontrol  $u(t)$ . Hubungan antara masukan kontroler  $e(t)$  dan keluaran kontroler  $u(t)$  adalah

$$u(t) = Kp \left( 1 + \int_0^t e(t) + \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.10)$$

atau dalam besaran transformasi Laplace

$$U(s) = Kp \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) E(s) \quad (2.11)$$

dimana  $Kp$  adalah penguatan proporsional dan  $\tau_i$  adalah waktu integral dan  $\tau_d$  adalah waktu differensial. Parameter  $Kp$ ,  $\tau_i$ , dan  $\tau_d$  ketiganya dapat ditentukan melalui berbagai metode, contohnya metode analitik, metode trial and error, metode Ziegler Nichols dan lain lain. Sehingga fungsi alih kontroler PID adalah

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (2.12)$$

## 2.5 Sliding Mode Control

Pada Tugas Akhir ini digunakan metode *Sliding Mode Control* sebagai algoritma pengaturan kecepatan translasi pada sumbu *surge* dan sudut *heading* kapal tanpa awak pada sumbu *yaw*.

### 2.5.1 Pengenalan *Sliding Mode Control*

Didalam sejarah sistem kontrol, menciptakan dan mendesain input yang sesuai sehingga diperoleh output yang diinginkan dari sebuah sistem

dinamik sudah menjadi perhatian yang utama. Kontroler merupakan sesuatu yang sangat penting dalam menjaga kestabilan sebuah sistem. Karakteristik dari sebuah plant atau sistem harus diterima sebagaimana adanya sehingga perubahan perilaku sistem hanya dapat dilakukan melalui penambahan suatu subsistem, yaitu kontroler. Model linear dan strategi kontrol untuk bentuk yang linear sudah dikembangkan dengan cukup baik, namun dalam dunia nyata, kebanyakan sistem-sistem dalam bentuk non linear. Ketidaktepatan permodelan sistem nonlinear bisa disebabkan oleh ketidakpastian kondisi aktual plant (parameter plant yang berubah-ubah) atau bentuk dinamik yang tidak dapat dimodelkan. Contoh-contoh sistem dinamik ialah roket, industri robot, reaktor kimia, dan unit air conditioner.[9]

*Sliding Mode Control* pertama kali dipublikasikan oleh Vadim I. Utkin pada tahun 1977. *Sliding Mode Control* semakin populer beberapa tahun ini, khususnya pada aplikasinya untuk sistem nonlinear dan kemampuannya untuk mempertahankan kekokohnya di banyak bidang. *Sliding Mode Control* termasuk ke dalam kategori *robust control*. *Sliding Mode Control* mampu menyediakan pendekatan sistematis terhadap masalah mempertahankan stabilitas dan menjaga konsistensi performa dalam bentuk model yang presisi.[3]

*Sliding Mode Control* merupakan salah satu metode kontrol untuk sistem linier dan non linier. Metode yang dilakukan yaitu dengan memaksa trayektori *state* suatu sistem menuju kedalam sebuah permukaan luncur tertentu. Pergerakan ini biasa disebut *sliding mode*. Setelah sampai pada permukaan luncur, sinyal kontrol akan berusaha mempertahankan trayektori *state* tetap berada pada permukaan luncur. [4] *Sliding Mode Control* telah berhasil diaplikasikan pada robot manipulator, kapal selam, mesin dan penyebaran otomotif, motor elektrik high-performance dan sistem tenaga.

Metode *Sliding Mode Control* memiliki sifat tidak sensitif terhadap perubahan parameter plant dan gangguan eksternal. *Sliding Mode Control* merupakan suatu metode kontrol *state feedback* yang menggunakan kontrol penyaklaran berkecepatan tinggi. Hal ini mengakibatkan trayektori *state* disekitar permukaan luncur berosilasi dengan frekuensi tinggi atau yang biasa disebut dengan fenomena *chattering*. Osilasi tersebut mempengaruhi stabilitas pada sistem.[10]

Salah satu aspek yang menarik dari *Sliding Mode Control* adalah sifat diskontinuitas pada aksi kontrolnya yang memiliki fungsi utama pada setiap saluran feedback untuk melakukan *switch* pada *sliding surface*

(*manifold*) yang ada. Kelebihan dari *Sliding Mode Control* adalah kekurangan-pekaan terhadap kesalahan model, gangguan parameter, dan gangguan lainnya.

*Sliding Mode Control* bekerja untuk memaksa *state* sistem untuk menuju permukaan luncur (*sliding surface*) dan mempertahankan *state* tersebut untuk tetap berada pada permukaan luncurnya. Pada subbab ini akan dibahas mengenai analisis kestabilan *Lyapunov*, permukaan luncur, dan sinyal pengaturan pada *Sliding Mode Control*.

### 2.5.2 Analisa Kestabilan *Lyapunov*[8], [11]

Pada sistem pengaturan, kestabilan merupakan hal yang paling utama. Metode *Lyapunov* yang kedua adalah metode yang paling umum digunakan untuk menentukan stabilitas suatu sistem linear maupun nonlinear. Dengan metode ini, stabilitas suatu sistem dapat ditentukan tanpa memecahkan persamaan *state* sistem tersebut, sehingga metode ini sangat bermanfaat karena pemecahan persamaan *state* untuk sistem nonlinear sangat sulit. *Lyapunov* mengatakan bahwa apabila suatu sistem memiliki sebuah ekuilibrium *state* yang stabil  $x_e$ , maka total energi yang tersimpan pada sistem akan berangsur-angsur berkurang seiring dengan bertambahnya waktu ( $t$ ), hingga total energi mencapai nilai minimumnya di ekuilibrium *state*  $x_e$ . Fungsi *Lyapunov* dapat dibentuk dari vektor *state* sistem  $x$  yang kemudian dinyatakan dalam fungsi *Lyapunov*  $V(x)$ . Informasi mengenai kestabilan sistem dapat diperoleh hanya dengan mengamati fungsi  $V(x)$  serta turunan parsial pertamanya  $dV(x)/dt$  tanpa harus memperoleh solusi persamaan diferensial sistem.  $V(x)$  harus memenuhi kondisi berikut untuk semua nilai  $t_1 > t_0$  dan untuk semua  $x$  di sekitar titik ekuilibrium  $x = 0$ :

- a)  $V(x)$  dan turunan parsialnya dapat didefinisikan dan kontinu
- b)  $V(0) = 0$
- c)  $V(x) > 0$ , untuk semua nilai  $x \neq 0$
- d)  $\dot{V}(x) < 0$ , untuk semua nilai  $x \neq 0$

Metode kedua *Lyapunov* didasarkan pada teorema berikut:

#### **Teorema 1**

Misalkan ada suatu system

$$\dot{x} = f(x, t), f(0, t) = 0 \tag{2.13}$$

Diasumsikan  $V(x)$  pada persamaan dapat ditentukan. Oleh karena itu, ekuilibrium *state*  $x = 0$  dapat dikatakan stabil asimtotik.

## Teorema 2

Misalkan ada suatu sistem linier time invariant  $\dot{x} = Ax$  dengan  $|A| \neq 0$  dan  $x_e = 0$ . dan misalkan fungsi skalar  $V(x) = x^T P x$ , dengan  $P$  merupakan matriks simetris yang juga definit positif.  $V(x)$  merupakan fungsi *Lyapunov* jika dan hanya jika untuk setiap matriks simetris definit positif  $Q$  dapat ditentukan matriks simetris definit positif  $P$  yang memenuhi Persamaan (14)

$$A^T P + PA = -Q \quad (2.14)$$

Pembuktian dari Persamaan (2.59) adalah sebagai berikut. Turunan dari fungsi *Lyapunov*  $V(x) = x^T P x$  ditunjukkan pada Persamaan (2.59). Persamaan untuk  $x$  merupakan persamaan *state* untuk sistem *autonomous*, seperti pada Persamaan (2.60), sehingga turunan fungsi *Lyapunov*  $\dot{V}(x)$  adalah Persamaan (2.61).

$$\dot{V}(x) = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x}$$

$$\dot{x} = Ax$$

$$\dot{V}(x) = \dot{x}^T (A^T P + PA) x$$

Berdasarkan definisi yang diberikan pada awal subbab ini, dapat dilihat kondisi d, yaitu  $V(x) < 0$  untuk semua  $x \neq 0$ . Turunan fungsi *Lyapunov* dapat dibuat dalam Persamaan (2.63).

$$\dot{V}(x) = \dot{x}^T (A^T P + PA) x = -x^T Q x$$

Ruas sebelah kanan dapat dituliskan  $-x^T Q x < 0$  dengan pemilihan nilai  $Q$ . Dari Persamaan (2.62), matriks  $P$  dan  $A$  harus memenuhi Persamaan (2.63).

$$A^T P + PA = -Q$$

### 2.5.3 Permukaan Luncur

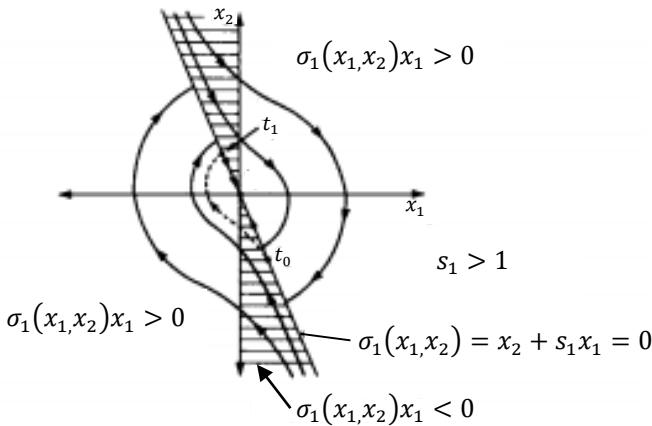
Semua *state-space* dari suatu sistem yang menyebabkan kondisi *sliding mode* dapat terjadi disebut *sliding manifold*, atau *sliding surface*

(permukaan luncur). Perilaku dinamis dari suatu sistem saat selalu menuju *surface* tertentu disebut *sliding motion* yang ideal [4]. Sebuah sistem yang mencapai sebuah *motion* (gerakan) memiliki keuntungan dua kali lipat: pertama terjadi pereduksian orde sistem dan kedua *sliding surface* tidak sensitif terhadap parameter yang mutlak pada saluran *inputnya* [10].

Permukaan luncur menyebabkan kondisi *sliding mode* dapat terjadi. Pemilihan permukaan luncur dilakukan dengan pertimbangan agar *state* sistem dapat menuju permukaan luncur dari sembarang initial condition. Hal tersebut akan menyebabkan adanya switching, yang secara umum dinotasikan  $\sigma = 0$ . [12] Ide ini dapat diilustrasikan dengan memisalkan permukaan luncur ditentukan sebagai  $\sigma = \sigma_1(x_1, x_2) = s_1x_1 + x_2 = 0$  dengan  $s_1 > 1$ . Jika *feedback* sistem di-switch menurut

$$k(x_1) = \begin{cases} -3, & \sigma_1(x_1, x_2)x_1 > 0 \\ 2, & \sigma_1(x_1, x_2)x_1 < 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

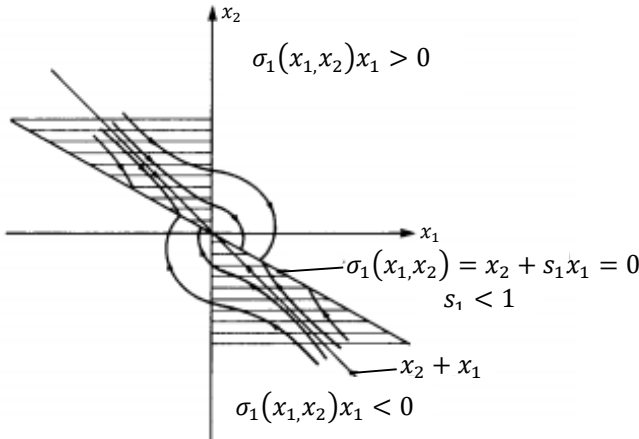
Perilaku yang diilustrasikan dalam Gambar 2.3 menunjukkan hasil plot *phase plane*.



**Gambar 2.3:** Jalur (Garis yang Diberi Titik) dari Lintasan *State* dari Suatu Sistem dengan Kontroler Saat Diberi Gangguan Kecil [13]

Dengan mengamati garis yang diberi titik dalam lintasan *state* ketika mengalami gangguan kecil,  $\sigma_1(x_1, x_2) = s_1x_1 + x_2 = 0$ , pada saat  $t_0$ , melingkar di titik  $t_1$  sebelum kembali ke permukaan luncur lagi. Sedangkan, jika permukaan *switching* adalah  $\sigma_1(x_1, x_2) = s_1x_1 + x_2 =$

0 dengan  $s < 1$ , maka gangguan yang terjadi akan dipaksa kembali pada permukaan luncur karena vektor kecepatan *phase-plane* selalu menunjuk pada permukaan. Gambar 2.4 menggambarkan fenomena ini.[12]



**Gambar 2.4:** Penggambaran *Phase-Plane* dari Sistem yang Dikontrol dengan menggunakan *SMC* pada *Switching Surface*

Kedua gambar ini menunjukkan bahwa pilihan *switching surface* yang berbeda mengakibatkan bentuk respon sistem yang sangat berbeda. Mendesain permukaan luncur merupakan hal yang penting dalam mendesain *Sliding Mode Controller*.

#### 2.5.4 Sinyal Kontrol [4]

Tujuan dari perancangan *Sliding Mode Control* adalah memaksa trayektori *state* menuju permukaan luncur dan menjaga trayektori *state* agar tetap berada di sekitar permukaan luncur. Dalam perancangan kontrol *Sliding Mode* ada dua jenis sinyal kontrol yang akan dirancang, yaitu sinyal kontrol ekuivalen  $U_{eq}$  dan sinyal kontrol  $U_N$ , untuk kontrol keseluruhan adalah penjumlahan dari keduanya.

$$U = U_{eq} + U_N \quad (2.16)$$

Metode kontrol ekivalen dapat digunakan untuk menetapkan pergerakan pada batas permukaan luncur  $\sigma(x) = 0$ . *Sliding mode* terjadi pada saat  $\sigma(x) = 0$ , untuk semua  $t \geq t_0$  dan  $\dot{\sigma}(x) = 0$ .

Sinyal kontrol ekivalen  $U_{eq}$  merupakan kontroler yang memaksa trayektori sistem agar menuju ke permukaan luncur, sedangkan sinyal kontroler natural  $U_N$  adalah sinyal kontrol yang menjaga trayektori sistem agar tetap berada di sekitar permukaan luncur.

### 2.5.5 Sliding Mode Control Berbasis PID[4]

*Sliding Mode Control* berbasis PID merupakan salah satu pengembangan dari *sliding mode control* konvensional. PID-SMC menggunakan sinyal kontrol natural berupa struktur PID, seperti pada Persamaan (2.17).

$$U_{PID} = k_p s k_i \int s dt + k_d \left( \frac{ds}{dt} \right) \quad (2.17)$$

Dimana,  $s$  merupakan *sliding surface* yang akan menjadi referensi trayektori state sistem menuju titik kestabilan. Sinyal kontrol natural yang menyerupai struktur PID ini diharapkan dapat menghilangkan *Chattering* yang ditimbulkan oleh fungsi diskontinyu. Aksi dari sinyal kontrol integral akan membuat *state* lebih cepat menuju *sliding surface* yang direncanakan. Sedangkan, aksi kontrol dari sisi derivatif akan menstabilkan sistem dengan melawan aksi kontrol berlebihan yang ditimbulkan oleh integral.

Pemilihan nilai  $K_p, K_i$ , dan  $K_d$  dilakukan sedemikian rupa sehingga memenuhi syarat kestabilan *Lyapunov* dan *Sliding Mode Control*.

## 2.6 Trajectory Planning

*Trajectory Planning* adalah rangkaian kegiatan, metode dan algoritma untuk merencanakan sebuah trajectory atau lintasan yang akan dilalui oleh sebuah USV.

Desain *trajectory planning* dilakukan dengan menggunakan metode Interpolasi Polinomial. Interpolasi polinomial digunakan untuk mencari titik-titik antara dari  $n$  titik  $P_1(x_1, x_1)$ ,  $P_2(x_2, x_2)$ ,  $P_3(x_3, x_3)$ , ...,  $P_n(x_n, x_n)$  dengan menggunakan pendekatan fungsi polinomial pangkat  $n - 1$ : [13]

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_{n-1} x^{n-1} \quad (2.18)$$

Dengan informasi  $n$  titik, sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut



$$y_1 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + a_3x_1^3 + \dots + a_{n-1}x_1^{n-1} \quad (2.19)$$

$$y_2 = a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + a_3x_2^3 + \dots + a_{n-1}x_2^{n-1} \quad (2.20)$$

$$y_3 = a_0 + a_1x_3 + a_2x_3^2 + a_3x_3^3 + \dots + a_{n-1}x_3^{n-1} \quad (2.21)$$

.....

$$y_n = a_0 + a_1x_n + a_2x_n^2 + a_3x_n^3 + \dots + a_{n-1}x_n^{n-1} \quad (2.22)$$

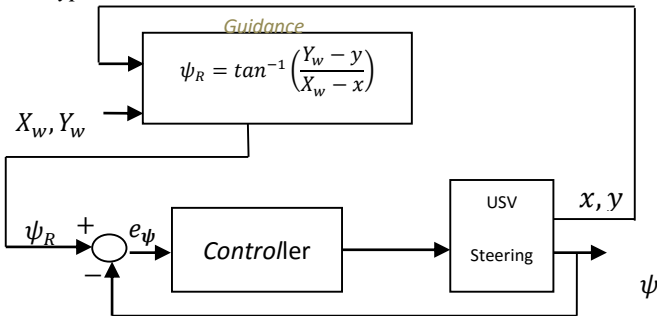
Jika Persamaan (21) ditransformasi ke dalam bentuk matriks. Maka dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & x_1^3 & \dots & x_1^{n-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & x_2^3 & \dots & x_2^{n-1} \\ 1 & x_3 & x_3^2 & x_3^3 & \dots & x_3^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & x_n^3 & \dots & x_n^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & x_1^3 & \dots & x_1^{n-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & x_2^3 & \dots & x_2^{n-1} \\ 1 & x_3 & x_3^2 & x_3^3 & \dots & x_3^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & x_n^3 & \dots & x_n^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

## 2.7 Waypoint Control[14]

Waypoint control digunakan untuk navigasi kapal tanpa awak dari suatu koordinat ke koordinat lain. Untuk mengarahkan kapal menuju titik yang diinginkan, posisi kapal perlu diketahui untuk menemukan set point heading yang diperlukan untuk menuju titik tersebut. Berikut blok diagram waypoint control,



Gambar 2.4. Blok Diagram Waypoint Control[11]

*Waypoint Control* didefinisikan sebagai titik  $[x(k), y(k)]$  dengan  $k = 1, \dots, n$  dimana setiap sudut *heading* yang diinginkan akan berubah pada *waypoint*-nya. Alternatif algoritma yang digunakan untuk menghasilkan trayektori yang sangat halus adalah metode LOS[7].

Untuk menentukan besarnya setpoint *heading* kapal tanpa awak menuju titik yang diinginkan, dapat digunakan persamaan seperti berikut,

$$\psi_R = \tan^{-1} \left( \frac{Y_w - y}{X_w - x} \right) \quad (2.25)$$

Dimana  $\psi_R$  adalah setpoint *heading* kapal,  $X_w$  dan  $Y_w$  adalah koordinat *waypoint* yang ingin dituju, sementara  $x$  dan  $y$  adalah posisi kapal secara *realtime*. [11]

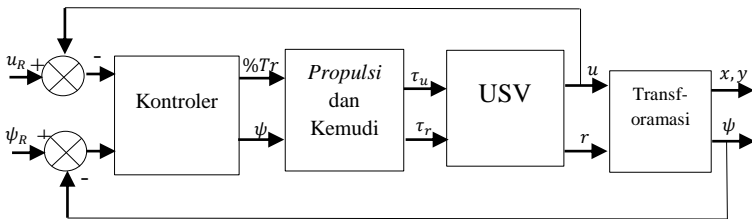
## BAB III PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini akan dibahas mengenai perancangan-perancangan sistem dari kapal tanpa awak yang terdiri atas desain sistem *autopilot* kapal tanpa awak, identifikasi kebutuhan, perancangan *plant* kapal tanpa awak, perancangan Kontroler *Sliding Mode*.

### 3.1 Desain Sistem *Autopilot* Kapal Tanpa Awak

Desain sistem *autopilot* pada penelitian ini, yaitu mengendalikan kecepatan kapal tanpa awak pada kecepatan tertentu dan mengarahkan sudut heading kapal tanpa awak menuju sudut tertentu. Untuk menguji performa sistem *autopilot*, digunakan *waypoint control* sebagai *guidance* kapal tanpa awak.

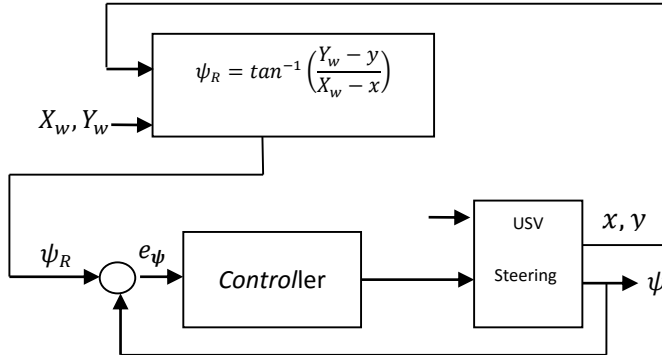
Desain sistem untuk validasi kontroler ditunjukkan oleh Gambar 3.1. Validasi kontroler dilakukan dengan uji manuver pada sistem *autopilot* untuk mengetahui apakah respon *plant* setelah mendapat sinyal *control* apakah sesuai dengan kriteria performansi yang diinginkan. Mula-mula kontroler diberikan input referensi kecepatan konstan ke arah horizontal kemudian setelah beberapa saat kapal dibelokkan ke arah yang lain.



**Gambar 3.1:** Diagram Blok Sistem Kendali *Autopilot*

Rancangan *waypoint control* ditunjukkan oleh Gambar 3.1. Kapal tanpa awak diberi nilai kecepatan referensi tetap. Titik-titik *waypoint* didefinisikan terlebih dahulu sebelum simulasi dijalankan. Ketika simulasi, apabila *waypoint control* menyatakan ada *waypoint* yang harus dituju, maka *waypoint control* akan mengirim sinyal  $\psi_R$  sebagai acuan heading kapal yang diinginkan. Apabila panjang vector kapal ke titik *waypoint* lebih kecil dari batas toleransi yang ditetapkan. Maka *waypoint control* akan mengambil titik *waypoint* selanjutnya sebagai acuan.

Apabila semua *waypoint* telah dilalui, *waypoint control* tidak mengirim ulang sinyal acuan  $\psi_R$ .



**Gambar 3.2:** Diagram Blok *Waypoint Control*

### 3.2 Perancangan Plant Kapal Tanpa Awak

Untuk melakukan simulasi, diperlukan model matematis dari kapal tanpa awak yang telah dibahas pada Subbab 2.2. Identifikasi parameter sistem Kapal Tanpa Awak LSS01 telah dilakukan oleh Tim Laboratorium *System and Cybernetic* Departemen Teknik Elektro ITS. Tabel 3.1 menyajikan data data parameter kapal tanpa awak LSS01.

**Tabel 3.1.** Data-data Parameter Kapal Tanpa Awak LSS01

Parameter	Nilai	Keterangan
$m$	8,437	Massa <i>rigid body</i>
$x_g$	67,3	Jarak antara pusat koordinat kapal dengan titik berat kapal searah sumbu $x$
$X_{\dot{u}}$	-11,26	Massa tambahan kapal searah sumbu $x$ karena percepatan kapal $\dot{u}$
$Y_{\dot{v}}$	8,136	Massa tambahan kapal searah sumbu $y$ karena percepatan kapal $\dot{v}$
$N_{\dot{r}}$	0,01	Massa tambahan kapal searah sumbu $\psi$ karena percepatan kapal $\dot{r}$

$X_u$	2,57	Konstanta damper linier $x$ karena kecepatan translasi $u$
$Y_v$	-0,0022	Konstanta damper linier $y$ karena kecepatan translasi $v$
$N_r$	0,0066	Konstanta damper linier $\psi$ karena kecepatan translasi $r$
$I_z$	0,562 Kg.m <sup>2</sup>	Momen Inersia terhadap $O_bZ_b$
$X_{ u u}$	$1,96 \times 10^3$	Konstanta damper nonlinier $x$ karena kecepatan translasi $u$
$Y_{ v v}$	$6,86 \times 10^{-4}$	Konstanta damper nonlinier $y$ karena kecepatan translasi $v$
$Y_{ v r}$	0,0042	Konstanta damper nonlinier $y$ karena kecepatan translasi $v$ dan kecepatan sudut $r$
$Y_{ r v}$	-0,0033	Konstanta damper nonlinier $y$ karena kecepatan sudut $r$ dan kecepatan translasi $v$
$N_{ v v}$	$1,82 \times 10^{-4}$	Konstanta damper nonlinier $\psi$ karena kecepatan translasi $v$
$N_{ r v}$	$4,74 \times 10^{-4}$	Konstanta damper nonlinier $\psi$ karena kecepatan sudut $r$ dan kecepatan translasi $v$
$N_{ v r}$	$2,52 \times 10^{-4}$	Konstanta damper nonlinier $\psi$ karena kecepatan translasi $v$ dan kecepatan sudut $r$

$N_{ r r}$	-0,0042	Konstanta damper nonlinier $\psi$ karena kecepatan sudut $r$
$\rho_w$	1000 kg/m <sup>3</sup>	Massa jenis air laut
$L$	1,5 m	Panjang kapal
$\rho_a$	1,2 kg/m <sup>3</sup>	Massa jenis udara
$A_{FW}$	0,0324 m <sup>2</sup>	Area proyeksi angina dari depan
$A_{LW}$	0,54 m <sup>2</sup>	Area proyeksi angin dari samping
$A_{Fc}$	0,0204 m <sup>2</sup>	Area proyeksi air dari depan
$A_{Lc}$	0,4046 m <sup>2</sup>	Area proyeksi air dari samping
$L_oA$	1,5 m	Panjang kapal keseluruhan
$C_{Xwi}(\gamma_w)$	-0,8cos( $\gamma_w$ )	Koefisien angin pada sumbu gerak $x$
$C_{Ywi}(\gamma_w)$	-0,9 sin( $\gamma_w$ )	Koefisien angin paad sumbu gerak $y$
$C_{Nwi}(\gamma_w)$	-0,18sin(2 $\gamma_w$ )	Koefisien angina paad sumbu gerak yaw
$C_{Xcu}(\gamma_w)$	-0,1453cos( $\gamma_c$ )	Koefisien arus pada sumbu gerak $x$
$C_{Ycu}(\gamma_w)$	-0,3712sin( $\gamma_c$ )	Koefisien arus pada sumbu gerak $y$
$C_{Ncu}(\gamma_w)$	-0,1036sin(2 $\gamma_c$ )	Koefisien arus pada sumbu gerak yaw
$C_{Xwa}(\gamma_w)$	-0,028244cos(2 $\gamma_{wa}$ )	Koefisien ombak pada sumbu gerak $x$
$C_{Ywa}(\gamma_w)$	-0,08374sin(2 $\gamma_{wa}$ )	Koefisien ombak pada sumbu gerak $y$
$C_{Nwa}(\gamma_w)$	-0,02094sin(2 $\gamma_{wa}$ )	Koefisien ombak pada sumbu gerak yaw

Setelah diperoleh data-data parameter sistem, maka dapat dituliskan kembali model matematika dari sistem kapal tanpa awak adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\dot{u} &= \frac{(m-Y_{\dot{v}})}{(m-X_{\dot{u}})} vr - \frac{X_u}{(m-X_{\dot{u}})} u - \frac{X_{|u|u}}{(m-X_{\dot{u}})} |u|u + \frac{1}{(m-X_{\dot{u}})} \tau_u \\
\dot{v} &= \frac{(X_{\dot{u}}-m)}{(m-Y_{\dot{v}})} ur - \frac{Y_v}{(m-Y_{\dot{v}})} v - \frac{Y_{|v|v}}{(m-Y_{\dot{v}})} |v|v - \frac{Y_{|r|v}}{(m-Y_{\dot{v}})} |r|v - \\
&\quad \frac{Y_{|v|r}}{(m-Y_{\dot{v}})} |v|r \\
\dot{r} &= \frac{(Y_{\dot{v}}-X_{\dot{u}})}{(I_z-N_{\dot{r}})} uv - \frac{N_r}{(I_z-N_{\dot{r}})} r - \frac{N_{|v|v}}{(I_z-N_{\dot{r}})} |v|v - \frac{N_{|r|v}}{(I_z-N_{\dot{r}})} |r|v - \\
&\quad \frac{N_{|v|r}}{(I_z-N_{\dot{r}})} |v|r - \frac{N_{|r|r}}{(I_z-N_{\dot{r}})} |r|r + \frac{1}{(I_z-N_{\dot{r}})} \tau_r \quad (3.1) \\
\dot{x} &= \cos(\psi) u - \sin(\psi) v \\
\dot{y} &= \sin(\psi) u + \cos(\psi) v \\
\dot{\psi} &= r
\end{aligned}$$

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

Pada perancangan plant kapal tanpa awak dibutuhkan pendorong atau propulsi. Pemodelan propulsi dan kemudi yang digunakan plant kapal tanpa awak LSS01 menggunakan mesin *thruster* sebagai pendorong dan *rudder* sebagai kemudi. Pemodelan propulsi dan kemudi telah dilakukan oleh Tim Laboratorium Sistem dan Sibernetika Teknik Elektro ITS sehingga menghasilkan formula hubungan antara gaya dorong pada sumbu *surge* ( $\tau_u$ ) dengan %*throttle* dan gaya dorong sumbu yaw ( $\tau_r$ ) dengan  $\theta_{rudder}$  yang dijelaskan sebagai berikut:

Didefinisikan kecepatan sudut putar motor pada mesin propulsi kapal tanpa awak sebagai berikut:

$$\omega = \frac{242.7027 \cdot \sqrt{\%throttle}}{2\pi} \quad (3.2)$$

Kemudian didapatkan formula gaya dorong *thruster* dan momen gaya *rudder* yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
F_{thruster} &= KT \cdot \rho \cdot D^4 \cdot n^2 \\
F_{rudder} &= \sin(\theta_{rudder}) \cdot L_{rudder} \cdot v_{surge} \quad (3.3)
\end{aligned}$$

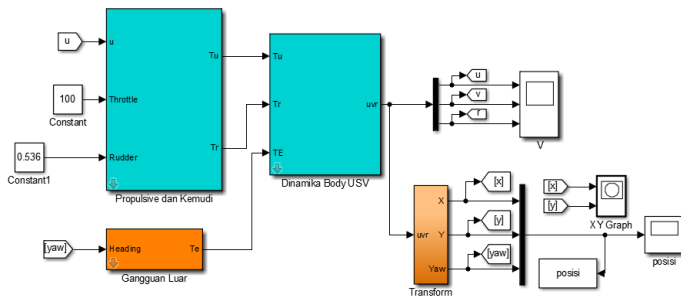
Didapatkan formula gaya dorong searah sumbu *surge* dan *yaw* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \tau_u &= KT \cdot \rho \cdot D^4 \cdot \omega^2 - |F_{rudder}| \\ \tau_v &= 0 \\ \tau_r &= F_{rudder} \cdot LG \end{aligned} \quad (3.4)$$

Dimana,

- $F_{thrust}$  : Gaya dorong *thruster* (N)
- $F_{rudder}$  : Momen gaya *rudder* (N)
- %*throttlet* : Persen gas *throttlet* (0% – 100%)
- $\theta_{rudder}$  : Sudut defleksi *rudder* (0 – 0.536 rad)
- $KT$  : Konstanta Thrust dengan nilai 0.020188
- $\rho$  : massa jenis air dengan nilai  $1025 \text{ kg/m}^3$
- $L_{rudder}$  : Luas permukaan *rudder* dengan nilai  $6.75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
- $LG$  : Lengan gaya *rudder* dengan nilai 0.673 meter
- $\omega$  : Kecepatan sudut putar motor(rad/s)
- $n$  : Kecepatan putar motor (*round/s*)
- $v_{surge}$  : Kecepatan USV pada sumbu X *body-frame*
- $\tau_u$  : Gaya dorong pada sumbu *surge* (N)
- $\tau_r$  : Gaya dorong pada sumbu *yaw* (N.m)

Gambar 3.3 menunjukkan Diagram Simulink plant kapal tanpa awak beserta blok propulsi dan kemudi.



**Gambar 3.3:** Diagram Simulink Plant Kapal Tanpa Awak Tipe LSS01

Model gangguan eksternal bekerja pada sumbu *surge*, *sway*, dan *yaw* dijelaskan pada Persamaan(2.9). 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 (3.3).

$$\boldsymbol{\tau}_E^{cu} = \frac{1}{2} \rho_w V_c^2 \begin{bmatrix} C_x(\gamma_c) A_{Fc} \\ C_y(\gamma_c) A_{Lc} \\ C_N(\gamma_c) A_{Lw} L_{OA} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

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

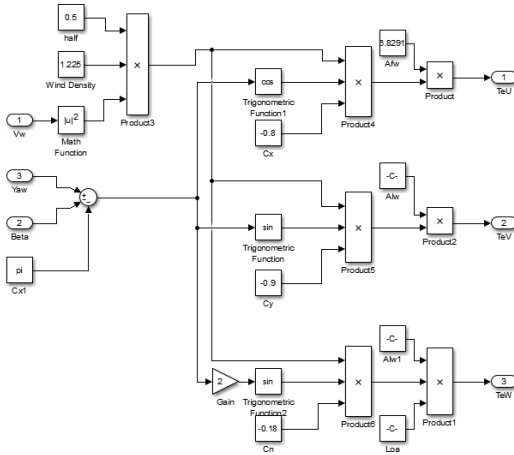
Besarnya gaya dan momen dari induksiombak diambil dar Persamaan (3.3) kemudian dimodifikasi untuk memasukkan komponen gelombang sinusoidal menjadi seperti Persamaan (3.4).

$$\boldsymbol{\tau}_E^{wa} = \frac{1}{2} \rho_w (A_{wa})^2 \sin(\omega t + \theta) \begin{bmatrix} C_x(\gamma_{wa}) A_{Fc} \\ C_y(\gamma_{wa}) A_{Lc} \\ C_N(\gamma_{wa}) A_{Lw} L_{OA} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

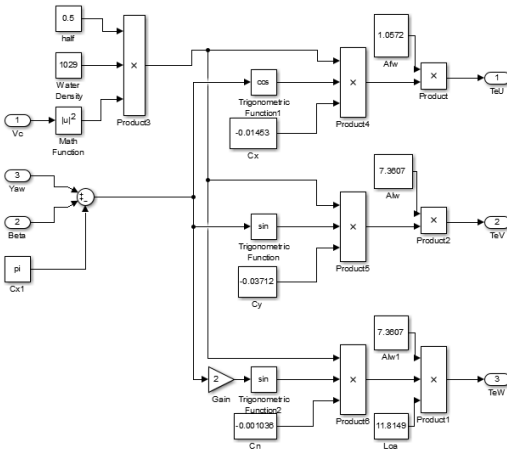
Dimana  $A_{wa}$  adalah amplitudo ombak,  $\rho_w$  adalah kerapatan air,  $\omega$  adalah frekuensi ombak,  $\theta$  adalah sudut fasa ombak,  $A_{Fc}$  adalah area proyeksi dari depan yang terendam air,  $A_{Lc}$  area proyeksi dari samping yang terendam air,  $L_{OA}$  adalah panjang keseluruhan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

Dengan menggabungkan Persamaan (2.9), Persamaan (3.4), dan Persamaan (3.5), didapatkan 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

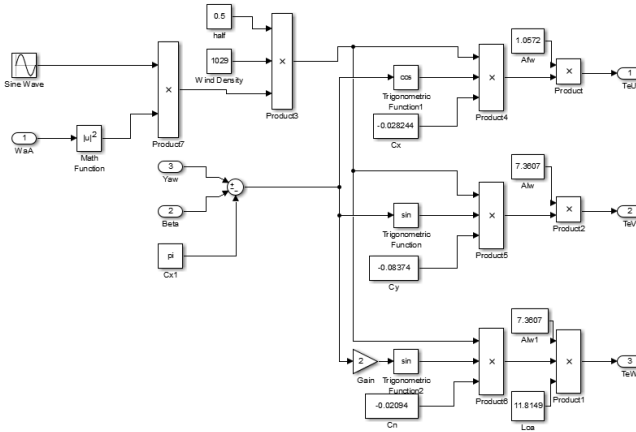
$$\boldsymbol{\tau}_E = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_{uE} \\ \boldsymbol{\tau}_{vE} \\ \boldsymbol{\tau}_{rE} \end{bmatrix} = \boldsymbol{\tau}_E^{cu} + \boldsymbol{\tau}_E^{wa} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_x(\gamma_w) A_{Fw} \\ \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_y(\gamma_{wa}) A_{Lw} \\ \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_N(\gamma_{wa}) A_{Lw} L_{OA} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$



**Gambar 3.4:** Diagram simulink gangguan angin



**Gambar 3.5:** Diagram Simulink Gangguan Arus



**Gambar 3.6:** Diagram Simulink Gangguan Ombak

### 3.3 Perancangan Metode *Sliding Mode*

Setelah diperoleh model matematika dan konstanta maka dapat dilakukan perancangan kontroler dengan mencari parameter-parameter kontroler yang diperlukan.

Pada perancangan *Sliding Mode Control* berbasis PID, diperlukan prosedur untuk memperoleh struktur dan parameter kontroler. Prosedur perancangan *Sliding Mode Control* dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu perancangan permukaan luncur, perancangan kontroler ekuivalen, perancangan kontroler natural, dan sinyal kontrol total. Tujuan atau *objective control* pada Tugas akhir ini adalah Kapal tanpa awak dapat bermanuver melalui *waypoint-waypoint* yang telah ditentukan dengan disertai gangguan maupun tidak disertai gangguan.

Berdasarkan model yang telah diperoleh pada BAB II, akan dilakukan perancangan *PID-Based Sliding Mode Control* sebagai kontroler kecepatan pada sumbu *surge* dan arah sudut heading *yaw*.

Untuk mempermudah perhitungan, model kapal tanpa awak dapat disusun dalam bentuk *state space*:

$$\dot{x} = f(x) + g(x, u) + d(t); x = [x_1, \dots, x_3]^T \quad (3.5)$$

Karena kapal tanpa awak menggunakan pengaturan kecepatan terhadap kerangka acuan *body* kapal, maka *state variable* yang digunakan

adalah posisi dan kecepatan terhadap *body* kapal yang ditunjukkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= x_B \\
 x_2 &= \dot{x}_1 = u \\
 x_3 &= y_B \\
 x_4 &= \dot{x}_3 = v \\
 x_5 &= \psi \\
 x_6 &= r
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Representasi *state* pada Persamaan 3.6 dapat diperoleh dari persamaan model kapal tanpa awak dan kapal Persamaan 3.7.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= u \\
 \dot{x}_2 &= \frac{(m-Y_{\dot{v}})}{(m-X_{\dot{u}})} x_2 x_3 - \frac{X_u}{(m-X_{\dot{u}})} x_1 - \frac{X_{|u|u}}{(m-X_{\dot{u}})} |x_1| x_1 + \frac{1}{(m-X_{\dot{u}})} \tau_u \\
 \dot{x}_3 &= v \\
 \dot{x}_4 &= \frac{(X_{\dot{u}}-m)}{(m-Y_{\dot{v}})} x_1 x_3 - \frac{Y_v}{(m-Y_{\dot{v}})} x_2 - \frac{Y_{|v|v}}{(m-Y_{\dot{v}})} |x_2| x_2 - \frac{Y_{|r|v}}{(m-Y_{\dot{v}})} |x_3| - \\
 &\quad \frac{Y_{|v|r}}{(m-Y_{\dot{v}})} |v| x_3 \\
 \dot{x}_5 &= r \\
 \dot{x}_6 &= \frac{(Y_{\dot{v}}-X_{\dot{u}})}{(I_z-N_{\dot{r}})} x_1 x_2 - \frac{N_r}{(I_z-N_{\dot{r}})} x_3 - \frac{N_{|v|v}}{(I_z-N_{\dot{r}})} |x_2| x_2 - \frac{N_{|r|v}}{(I_z-N_{\dot{r}})} |x_3| x_3 - \\
 &\quad \frac{Y_{|r|v}}{(m-Y_{\dot{v}})} |x_3| x_2 - \frac{N_{|v|r}}{(I_z-N_{\dot{r}})} |v| x_3 - \frac{N_{|r|r}}{(I_z-N_{\dot{r}})} |x_3| x_3 + \frac{1}{(I_z-N_{\dot{r}})} \tau_r
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Kemudian Persamaan (3.7) dapat ditulis menjadi Persamaan (3.8)

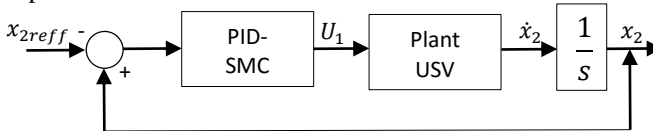
$$\begin{cases}
 \dot{x}_1 = u \\
 \dot{x}_2 = A(1)x_2 x_3 - A(2)x_1 - A(3)|x_1| x_1 + A(4)U_1 \\
 \dot{x}_3 = v \\
 \dot{x}_4 = A(5)x_1 x_3 - A(6)x_2 - A(7)|x_2| x_2 - A(8)|x_3| - A(9)|x_2| x_3 \\
 \dot{x}_5 = r \\
 \dot{x}_6 = A(10)x_1 x_2 - A(11)x_3 - A(12)|x_2| x_2 - A(13)|x_3| x_3 \\
 \quad - A(14)|x_2| x_3 - A(15)|x_3| x_3 + A(16)U_3
 \end{cases} \tag{3.8}$$

Dimana:

$$\begin{aligned}
 A(1) &= \frac{(m-Y_{\dot{v}})}{(m-X_{\dot{u}})}, A(2) = \frac{X_u}{(m-X_{\dot{u}})}, A(3) = \frac{X_{|u|u}}{(m-X_{\dot{u}})}, A(4) = \frac{1}{(m-X_{\dot{u}})}, \\
 A(5) &= \frac{(X_{\dot{u}}-m)}{(m-Y_{\dot{v}})}, A(6) = \frac{Y_v}{(m-Y_{\dot{v}})}, A(7) = \frac{Y_{|v|v}}{(m-Y_{\dot{v}})}, A(8) = \frac{Y_{|r|v}}{(m-Y_{\dot{v}})}, A(9) = \frac{Y_{|v|r}}{(m-Y_{\dot{v}})}, \\
 A(10) &= \frac{(Y_{\dot{v}}-X_{\dot{u}})}{(I_z-N_{\dot{r}})}, A(11) = \frac{N_r}{(I_z-N_{\dot{r}})}, A(12) = \frac{N_{|v|v}}{(I_z-N_{\dot{r}})}, A(13) = \frac{N_{|r|v}}{(I_z-N_{\dot{r}})}, A(14) = \\
 &\quad \frac{N_{|v|r}}{(I_z-N_{\dot{r}})}, A(15) = \frac{N_{|r|r}}{(I_z-N_{\dot{r}})}, A(16) = \frac{1}{(I_z-N_{\dot{r}})}
 \end{aligned}$$

### 3.3.1 Pengaturan Kecepatan Sumbu *Surge*

Kecepatan translasi pada kapal tanpa awak berhubungan dengan sumbu  $x_B$ , *state*  $\dot{x}_2$  merepresentasikan persamaan untuk percepatan kapal tanpa awak dari kerangka *body*, diambil dari model kapal tanpa awak pada Persamaan (3.1). Blok diagram pengaturan kecepatan translasi dapat dilihat pada Gambar 3.7.



**Gambar 3.7:** Blok Diagram pengaturan Kecepatan Translasi

Persamaan *state* kapal tanpa awak untuk kecepatan translasi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{x}_2 = A(1)x_2x_3 - A(2)x_1 - A(3)|x_1|x_1 + A(4)U_1 \quad (3.9)$$

Langkah selanjutnya adalah mendesain permukaan luncur di mana *Sliding Mode* akan terjadi. Sebelum mendesain permukaan luncur, perlu ditentukan terlebih dahulu trayektori *state* yang akan dijadikan permukaan luncur, dalam hal ini berupa fungsi dari *error* sistem.

Spesifikasi Respon sistem yang diinginkan adalah orde pertama. Persamaan (3.10) merupakan persamaan respon sistem untuk orde pertama

$$Y_c(s) = \frac{1}{\tau s + 1} Y_r(s) \quad (3.10)$$

Dengan spesifikasi desain pengaturan kecepatan translasi yang ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 3.2.** Spesifikasi desain Pengaturan Kecepatan Translasi

Spesifikasi Desain	Nilai
<i>Time constant</i>	2 detik
<i>Error steady state</i>	0%
<i>%Overshoot</i>	0%

Untuk mendapatkan sinyal kontrol ekuivalen ( $U_{eq}$ ), maka didefinisikan *error tracking* yang merupakan perbedaan antara nilai kecepatan dengan kecepatan referensi sebagai berikut:

$$e_1 = x_{1ref} - x_1 \quad (3.11)$$

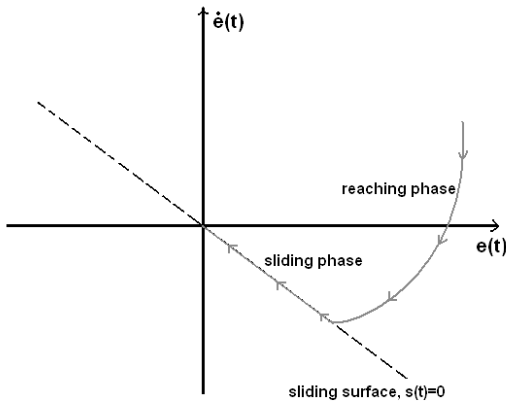
Jika referensi ( $s$ ) merupakan step dan turunannya sama dengan nol ( $Y(s) = 0$ ), maka akan diperoleh persamaan *error* seperti pada Persamaan (3.12)

$$e_1 + \tau \dot{e}_1 = 0 \quad (3.12)$$

Dimana,  $\tau$  pada Persamaan (3.12) merupakan spesifikasi *time constant* respon sistem yang diinginkan.

$$(3.13)$$

Permukaan luncur yang akan digunakan adalah persamaan *error*, yang dapat digambarkan dalam bidang fasa, seperti pada Gambar 3.7



**Gambar 3.7:** Permukaan Luncur (*Sliding Surface*)

Dengan  $x_{1ref}$  adalah sinyal referensi. Selanjutnya dirancang permukaan luncur (*sliding surface*), yang didefinisikan pada Persamaan (3.13)

$$s = \lambda e_1 + \dot{e}_1 \quad (3.14)$$

Dimana,  $\lambda$  merupakan  $\frac{1}{\tau}$ . Kemudian untuk menentukan aksi kontrol yang mengendalikan trayektori *error* menuju permukaan luncur, maka sinyal kontrol harus mengarahkan variable  $s$  menuju nol pada waktu tak hingga. Sehingga  $s$  harus diturunkan terhadap waktu, maka didapatkan

$$s = \lambda \dot{e}_1 + \ddot{e}_1 = 0 \quad (3.15)$$

Substitusi  $e_1$  dengan turunan Persamaan (3,14), maka didapatkan

$$\dot{s} = \lambda \dot{e}_1 + \ddot{x}_{1ref} - \ddot{x}_1 = 0 \quad (3.16)$$

Dengan  $\dot{x}_1 = \dot{x}_2$ , maka didapatkan

$$\dot{s} = \lambda \dot{e}_1 + \ddot{x}_{1ref} - \dot{x}_2 = 0 \quad (3.17)$$

Substitusi  $\dot{x}_2$  dengan Persamaan (3.16), maka didapatkan

$$\dot{s} = \lambda \dot{e}_1 + \ddot{x}_{1ref} + A(1)x_2x_3 + A(2)x_1 + A(3)|x_1|x_1 - A(4)U_1 = 0 \quad (3.18)$$

$$U_1 = \frac{\lambda \dot{e}_1 + \ddot{x}_{1ref} - A(1)x_2x_3 - A(2)x_1 - A(3)|x_1|x_1}{A(4)} \quad (3.19)$$

Sehingga didapatkan persamaan sinyal kontrol ekivalen  $U_1$  adalah sebagai berikut:

$$U_{1eq} = \frac{\ddot{x}_{1ref} - A(1)x_2x_3 - A(2)x_1 - A(3)|x_1|x_1 + \lambda \dot{e}_1}{A(4)} \quad (3.20)$$

Persamaan (3.19) dapat ditulis seperti pada Persamaan (3.20)

$$U_{1eq} = \frac{\lambda \dot{e}_1 + \ddot{x}_{1ref} - A(1)x_2x_3 - A(2)x_1 - A(3)|x_1|x_1}{A(4)} \quad (3.21)$$

Pada pengujian akan dibuat dua jenis sinyal kontrol natural, yaitu sinyal kontrol diskontinyu dan sinyal kontrol kontinyu berupa fungsi saturasi dan struktur PID.

Pada tahapan pertama akan dilakukan desain sinyal kontrol natural diskontinyu yang mempertimbangkan kestabilan *Lyapunov* sebagai berikut. Didefinisikan fungsi *Lyapunov* pada Persamaan (3.21)

$$V_i = \frac{1}{2} s^2 \quad (3.22)$$

Dimana  $s$  merupakan permukaan luncur (*sliding surface*) yang diinginkan. Turunan pertama fungsi *Lyapunov* adalah

$$S\dot{S} < 0 \quad (3.23)$$

Pada *sliding mode control*, kondisi pada Persamaan (3.23) harus terpenuhi untuk menjamin sistem stabil. Berdasarkan syarat kestabilan *Lyapunov*, maka dipilih:

$$\dot{s} = -A(4)U_N \quad (3.24)$$

Dipilih sinyal kontrol natural pada Persamaan (3.25):

$$U_N = \frac{a \cdot \text{sign}(s)}{A(4)} \quad (3.25)$$

Dimana konstanta  $a > 0$ , sehingga untuk nilai  $s > 0$ , maka  $\dot{s} < 0$ , dan sebaliknya.

Persamaan sinyal kontrol natural pada Persamaan (3.25) akan menghasilkan fenomena *switching* berfrekuensi tinggi yang disebut *chattering*. Fenomena ini akan menyebabkan kerusakan pada elemen kontroler, terutama elemen mekanik. Oleh karena itu untuk mengurangi efek dari *chattering*, maka fungsi signum pada Persamaan (3.25) diganti dengan menggunakan struktur kontroler PID.

Pada tahapan kedua, akan dirancang sinyal kontrol natural dengan mengikuti struktur kontroler PID. Sinyal kontrol ini, selain dapat mengurangi *chattering*, juga dapat mencapai *sliding surface* lebih cepat, dan dapat mengurangi *overshoot*.

Berdasarkan Persamaan (3.21), dipilih sinyal kontrol natural sebagai berikut:

$$U_N = (k_p s + k_i \int s dt + k_d \frac{ds}{dt}) \quad (3.26)$$

Dimana nilai  $k_p, k_i, k_d > 0$ , sehingga untuk mencapai kestabilan *Lyapunov* seperti pada Persamaan (3.21), maka kondisi berikut harus terpenuhi:

$$s \dot{s} < 0 \quad (3.27)$$

$$-s \left( k_p s + k_i \int s dt + k_d \frac{ds}{dt} \right) < 0 \quad (3.28)$$

Dimana nilai  $k_p, k_i, k_d$  di-*tuning* secara manual untuk memenuhi kondisi kestabilan *Lyapunov*, dengan syarat  $k_p, k_i, k_d > 0$

Dari persamaan sinyal kontrol ekuivalen dan sinyal kontrol natural yang merepresentasikan kecepatan translasi kapal tanpa awak, diperoleh persamaan  $U_1$  seperti pada Persamaan (3.28)

$$U_1 = U_{1eq} + U_{1N} \quad (3.28)$$

Untuk sinyal kontrol natural menggunakan fungsi signum, didapatkan sinyal kontrol seperti pada Persamaan (3.29)

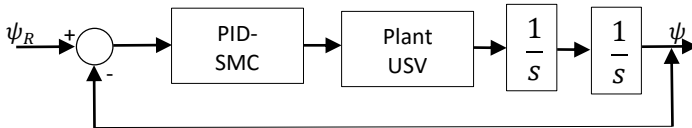
$$U_1 = \frac{\lambda \dot{e}_1 + \dot{x}_{1ref} - A(1)x_2 x_3 - A(2)x_1 - A(3)|x_1|x_1 + a \cdot \text{sign}(s)}{A(4)} \quad (3.29)$$



Untuk sinyal kontrol natural menggunakan struktur PID, didapatkan sinyal kontrol seperti pada Persamaan (3.30)

$$U_1 = \frac{\lambda \dot{e}_1 + \dot{x}_{1ref} - A(1)x_2x_3 - A(2)x_1 - A(3)|x_1|x_1 + (k_p s + k_i \int s dt + k_d \frac{ds}{dt})}{A(4)} \quad (3.30)$$

### 3.3.2 Pengaturan *Heading* pada Sumbu $\psi$



**Gambar 3.8:** Diagram Blok Pengaturan Sumbu  $\psi$

Desain kontroler pengaturan *heading* kapal tanpa awak pada sumbu  $\psi$  menggunakan cara yang sama dengan desain kontroler kecepatan translasi pada state  $x_1$ . Untuk mendapatkan sinyal kontrol ekuivalen ( $U_{eq}$ ), maka didefinisikan *error tracking* yang merupakan perbedaan antara nilai kecepatan yaw kapal tanpa awak dengan kecepatan referensi. Untuk memudahkan proses perhitungan, langkah pertama didefinisikan *error tracking* antara sudut yaw referensi dengan sudut yaw kapal tanpa awak seperti pada Persamaan (3.31).

$$e_5 = x_{5ref} - x_5 \quad (3.31)$$

Dengan spesifikasi desain pengaturan sudut *heading* yang ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 3.3.** Spesifikasi Desain Pengaturan Sudut Heading

Spesifikasi Desain	Nilai
<i>Time constant</i>	2 detik
<i>Error steady state</i>	0%
<i>%Overshoot</i>	0%

Dengan  $x_{5ref}$  merupakan sinyal referensi, selanjutnya akan dirancang permukaan luncur (*sliding surface*), yang ditunjukkan pada Persamaan (3.32)

$$s = \lambda e_5 + \dot{e}_5 \quad (3.32)$$

Untuk membuat permukaan luncur pada waktu tak hingga, maka  $s$  diturunkan terhadap waktu, sehingga didapatkan Persamaan (3.33).

$$\dot{s} = \lambda \dot{e}_5 + \ddot{x}_{5ref} - \ddot{x}_5 = 0 \quad (3.33)$$

Dengan  $\ddot{x}_5 = \dot{x}_6$ , maka didapatkan

$$\dot{s} = \lambda \dot{e}_5 + \ddot{x}_{5ref} - \dot{x}_6 = 0 \quad (3.34)$$

Substitusi  $\dot{x}_6$  dengan Persamaan (3.35), maka didapatkan

$$\begin{aligned} \dot{s} = \lambda \dot{e}_5 + \ddot{x}_{5ref} + A(10)x_1x_2 + A(11)x_3 + A(12)|x_2|x_2 + \\ A(13)|x_3|x_2 + A(14)|x_2|x_3 + A(15)|x_3|x_3 - A(16)U_2 = 0 \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$U_{2eq} = \frac{\lambda \dot{e}_5 + \ddot{x}_{5ref} + A(10)x_1x_2 + A(11)x_3 + A(12)|x_2|x_2 + A(13)|x_3|x_2 + A(14)|x_2|x_3 + A(15)|x_3|x_3}{A(16)} \quad (3.36)$$

Selanjutnya akan dirancang sinyal kontrol natural  $U_N$ . Prosedur perancangan adalah sama dengan perancangan sinyal kontrol natural untuk mengatur kecepatan translasi di sumbu  $x_B$ .

Sinyal kontrol natural yang mengatur kecepatan  $r$ , diperoleh persamaan  $U_2$  seperti pada Persamaan (3.37)

$$U_3 = U_{3eq} + U_{3N} \quad (3.37)$$

Untuk sinyal kontrol natural menggunakan fungsi signum, didapatkan sinyal kontrol seperti pada Persamaan (3.38)

$$\begin{aligned} U_3 = \frac{1}{A(16)} \lambda \dot{e}_5 + \frac{1}{A(16)} \ddot{x}_{5ref} + \frac{A(10)}{A(16)} x_1x_2 + \frac{A(11)}{A(16)} x_3 + \frac{A(12)}{A(16)} |x_2|x_2 + \\ \frac{A(13)}{A(16)} |x_3|x_2 + \frac{A(14)}{A(16)} |x_2|x_3 + \frac{A(15)}{A(16)} |x_3|x_3 + a \cdot \text{sign}(s) \end{aligned} \quad (3.38)$$

Untuk sinyal kontrol natural menggunakan struktur PID, didapatkan sinyal kontrol seperti pada Persamaan (3.39)

$$U_3 = \frac{1}{A(16)} \lambda \dot{e}_5 + \frac{1}{A(16)} \ddot{x}_{5ref} + \frac{A(10)}{A(16)} x_1 x_2 + \frac{A(11)}{A(16)} x_3 + \frac{A(12)}{A(16)} |x_2| x_2 + \frac{A(13)}{A(16)} |x_3| x_2 + \frac{A(14)}{A(16)} |x_2| x_3 + \frac{A(15)}{A(16)} |x_3| x_3 + k_p s + k_i \int s dt + k_d \frac{ds}{dt} \quad (3.39)$$

### 3.4 Perancangan Navigasi Waypoint

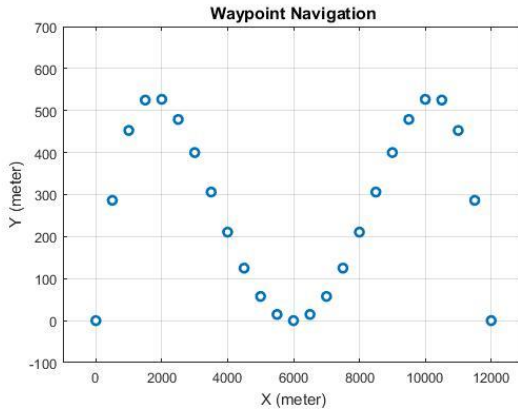
Perancangan dan metode perhitungan sudut *heading* acuan yang harus dicapai oleh kapal untuk menuju *waypoint* yang diinginkan telah dijabarkan pada Subsubab. Penentuan koordinat *waypoint* menggunakan metode Interpolasi polinomial dengan 3 titik input koordinat  $(x, y)$ , kemudian diinterpolasi sebanyak 5 titik diantara titik-titik input koordinat  $(x, y)$ , sehingga menghasilkan koordinat-koordinat yang semakin banyak dan berdekatan. Koordianat *waypoint* ditunjukkan pada Tabel 3.1

Gambar 3.9 menunjukkan titik-titik *waypoint* yang akan dilalui oleh kapal tanpa awak. Setiap titik-titik *waypoint* memiliki toleansi sebesar 2 meter. Apabila kapal tanpa awak telah berada di radius toleransi yang akan dituju, maka *waypoint navigation* akan merubah acuan titik *waypoint* yang akan dituju, maka simulasi secara otomatis akan berhenti.

**Tabel 3.4.** Daftar Koordinat Waypoint Yang Akan Dilalui Kapal Tanpa Awak

Index	$x_w$ (meter)	$y_w$ (meter)
1	0	0
2	500	286.3169
3	1000	452.6749
4	1500	525
5	2000	526.749
6	2500	478.9095
7	3000	400
8	3500	306.07
9	4000	210.6996
10	4500	125
11	5000	57.6132
12	5500	14.7119
13	6000	0
14	6500	14.7119
15	7000	57.6132
16	7500	125

17	8000	210.6996
18	8500	306.07
19	9000	400
20	9500	478.9095



**Gambar 3.9 :** Rancangan *Waypoint*

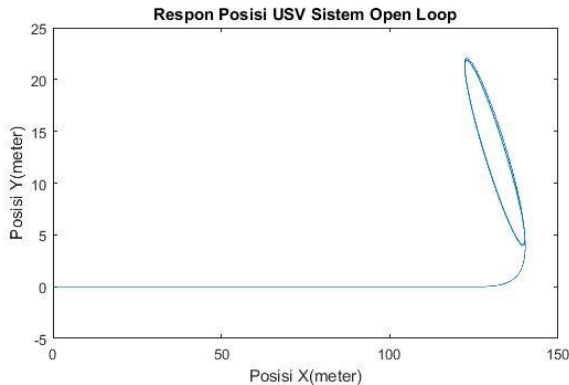
## BAB IV HASIL DAN ANALISA

Pada bab ini, hasil perancangan pada BAB III akan dipaparkan beserta 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 II akan disimulasikan menggunakan Software Matlab. Pengujian pertama adalah plant kapal tanpa awak secara *open loop* untuk mengetahui kestabilan sistem. Kedua adalah pengujian *sistem autopilot* menggunakan metode *PID-Sliding Mode Controller*. Ketiga pengujian kontrol *waypoint* dengan gangguan. Keempat pengujian kontrol *waypoint* dengan tanpa gangguan.

### 4.1 Respon Open Loop

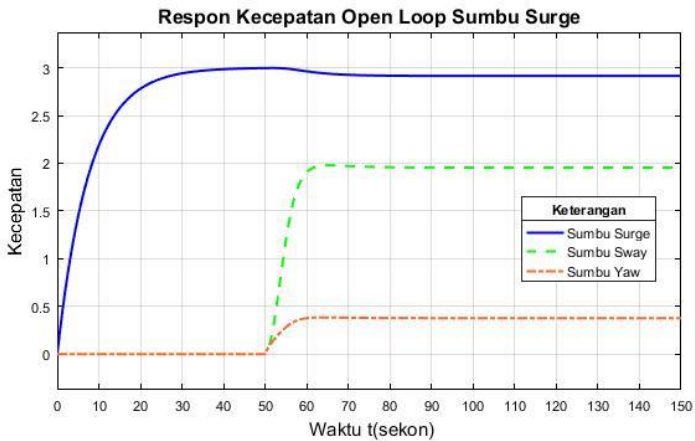
Pada Subbab ini akan diberikan hasil pengujian kapal tanpa awak dengan 3 derajat kebebasan secara open loop. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kestabilan sistem dan dapat mempermudah dalam membandingkan bagaimana hasil sebelum dan sesudah dikontrol.

Mula-mula *plant* kapal tanpa awak diberi %*throttel* tetap sebesar 40%, kemudian sudut kemudi *rudder* dibuat lurus 50 detik kemudian saat detik ke-50 hingga simulasi selesai pada detik ke-150, kapal tanpa awak dibelokkan sebesar 0,1 radian atau sebesar 5.73 derajat. Gambar 4.1 menunjukkan pergerakan kapal dari koordinat mula-mula (0,0) membentuk garis lurus kemudian berbelok membentuk lintasan *oval*

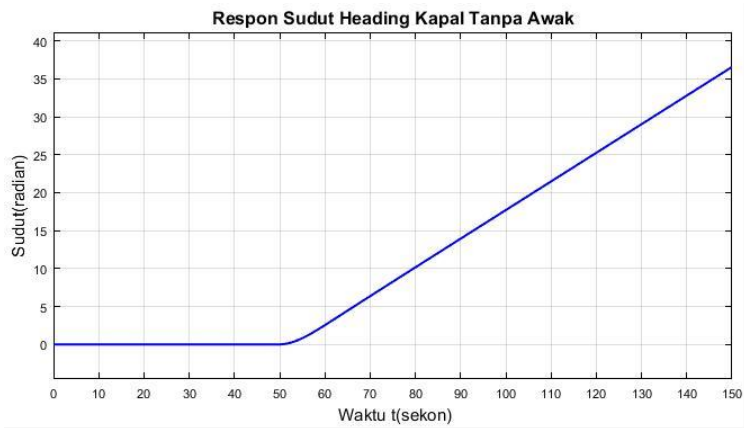


**Gambar 4.1:** Respon Posisi Kapal Tanpa Awak Sistem Open Loop

Gambar 4.2 menunjukkan respon kecepatan kapal tanpa awak searah sumbu  $x, y, \psi$  pada koordinat acuan *body* kapal tanpa awak atau searah gerak *surge, sway* dan *yaw*. Pada respon kecepatan sumbu *surge*, Diperoleh nilai *settling time* kriteria  $\pm 0,5\%$  dari 3 m/s pada saat detik ke 39,91. Kemudian saat detik ke-50 dan seterusnya diperoleh respon kecepatan sumbu *yaw* dengan *settling time* kriteria  $\pm 0,5\%$  dari 0,42 rad/s pada saat detik ke-70,33. Pada saat itu juga terjadi penurunan kecepatan pada sumbu *surge* dikarenakan mesin *rudder* yang posisinya tidak lurus lagi. Pada Akibatnya terjadi pepecahan gaya dorong ke arah sumbu *surge* dan *yaw*. Perpecahan gaya dorong tersebut dapat menghasilkan respon kecepatan kapal tanpa awak pada sumbu *sway* dengan nilai *settling time* kriteria sebesar  $\pm 0,5\%$  dari 2,2 m/s pada detik ke-70,33. Gambar 4.3 menunjukkan respon sudut *heading* kapal tanpa awak.



**Gambar 4.2:** Respon Kecepatan Open Loop pada Sumbu *Surge, Sway, Yaw*



**Gambar 4.3:** Respon Open Loop Sudut *Heading* Kapal Tanpa Awak

## 4.2 Pengujian *Autopilot* dengan Metode *Sliding Mode Control*

Pada bagian ini dilakukan pengujian terhadap sistem *aut opilot* menggunakan Metode *Sliding Mode Control* yang telah dirancang pada plant Kapal Tanpa Awak LSS01. Pengujian meliputi pengujian respon kecepatan translasi dan pengujian respon sudut *heading* kapal tanpa awak. Pengujian berdasarkan parameter kontrol yang telah ditentukan pada Metode *Sliding Mode Control*.

### 4.1.2 Pengujian Respon Kecepatan Translasi

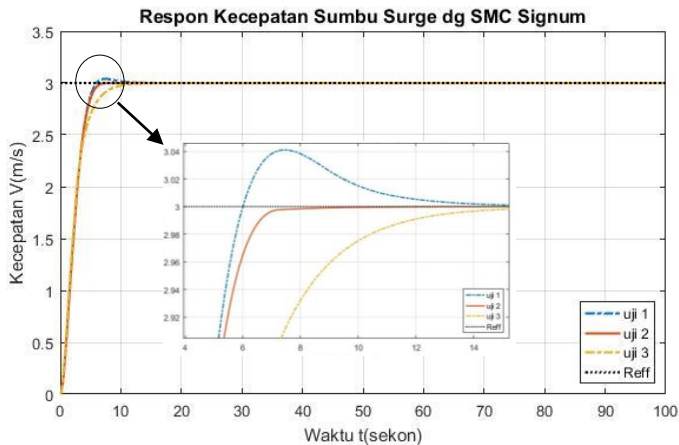
Pada subbab ini, akan dilakukan simulasi untuk menguji respon kecepatan translasi setelah diberi kontroler *Sliding Mode*. Pengujian dilakukan dengan 3 kali pengujian dimana setiap pengujian menggunakan parameter kontrol yang berbeda-beda. Referensi kecepatan diberikan sebesar 3 m/s. Spesifikasi desain yang diinginkan adalah sistem orde satu dengan *time constant* 2 detik dan *error steady state* sebesar 0%. Setiap simulasi diberikan waktu selama 100 detik waktu simulasi. Skenario yang dijalankan pada pengujian respon kecepatan kapal tanpa awak adalah %*Throttle* dibatasi sebesar 100% agar sinyal kontrol yang diberikan tidak melebihi kapasitas dan kemampuan kapal tanpa awak.

#### 4.1.2.1 Pengujian Respon Kecepatan Translasi dengan SMC Signum

Pada pengujian respon kecepatan translasi kapal tanpa awak dengan SMC Signum, Algoritma kontrol yang digunakan adalah kontroler *Sliding Mode* dengan sinyal kontrol natural  $U_N$  berupa fungsi Signum. Fungsi Signum yang digunakan adalah seperti pada Persamaan (4.1) dan Persamaan (4.2).

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} 1, & s > 0 \\ 0, & s = 0 \\ -1, & s < 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

Hasil pengujian respon kecepatan translasi dengan metode *Sliding Mode* fungsi Signum ditunjukkan pada Gambar 4.3



**Gambar 4.4:** Respon Kecepatan Translasi dg SMC Signum

Dari grafik tersebut, didapatkan nilai parameter *gain a* pada SMC Signum yang ditampilkan pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Pengujian SMC Signum untuk Kecepatan Translasi

Uji	Gain a	Settling Time ( $5\tau$ )	Error steady state ( $\epsilon$ )	%Overshoot
1	0,05	10,105 s	0	1,37%
2	0,5	6,439 s	0	0%
3	5	10,94 s	-0,1113	0%



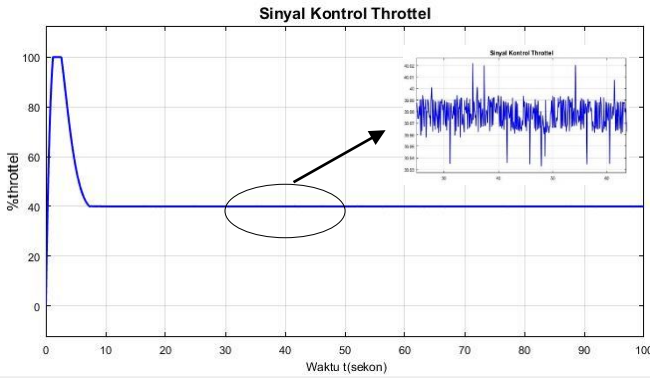
Dari ketiga hasil pengujian pada Tabel 4.1, dapat dilihat bahwa pengujian 2 menghasilkan gain yang cukup untuk membuat respon kecepatan kapal tanpa awak sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.

Pada Gambar 4.3, dapat dilihat bahwa penambahan *gain a* yang terlalu besar dapat membuat respon sistem akan semakin lambat untuk mencapai *steady state*. Sebaliknya pemilihan *gain a* yang terlalu kecil akan respon mengalami *overshoot*.

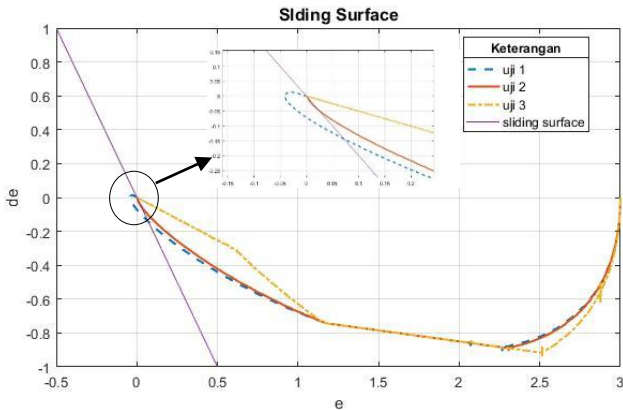
Pemilihan parameter *gain a* akan mempengaruhi cepat lambat respon sistem mencapai *steady state* yang telah ditentukan. jika pemilihan *gain a* terlalu besar maka akan terjadi osilasi bahkan ketidakstabilan pada respon sistem, maka pemilihan *gain a* harus dilakukan dengan teliti dan proporsional agar menghasilkan respon sistem yang memenuhi kestabilan *lyapunov* yang telah dirancang. Sinyal kontrol yang dihasilkan oleh kontroler dengan nilai  $a=0.5$  ditunjukkan pada Gambar 4.5

Untuk mengetahui perilaku state sistem, ditunjukkan plot *phase plane sliding surface* yang ditampilkan pada Gambar 4.8. Dari Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa *state error* dari sistem dapat mengikuti *sliding surface* yang telah direncanakan. Namun, dari 3 hasil pengujian yang telah dijalankan, Pengujian 2 adalah yang paling cepat untuk mengikuti trayektori dari *sliding surface* yang direncanakan dan menghasilkan osilasi paling kecil di sekitar nilai 0.

Dari Gambar 4.4, dapat dilihat bahwa sinyal kontrol mengalami *chattering* atau *switching* dengan frekuensi tinggi. Fenomena *chattering* ini disebabkan oleh unsur diskontinyu dari sistem. Hal ini dapat merusak perangkat yang digunakan, karena mengalami perubahan dalam waktu yang sangat cepat. Oleh karena itu, pada pengujian selanjutnya fungsi diskontinyu pada fungsi signum diganti dengan fungsi diskontinyu pada struktur PID.



**Gambar 4.5:** Sinyal Kontrol *Throttel* dengan SMC Signum



**Gambar 4.6:** Plot Phase Plane Respon Sistem Kecepatan Translasi

#### 4.1.2.2 Pengujian Respon Kecepatan Translasi dengan SMC PID

Pada pengujian respon kecepatan translasi kapal tanpa awak dengan SMC PID, Algoritma kontrol yang digunakan adalah kontroler *Sliding Mode* dengan sinyal kontrol natural  $U_N$  berupa struktur kontrol PID. Fungsi Signum yang digunakan adalah seperti pada Persamaan (4.2).

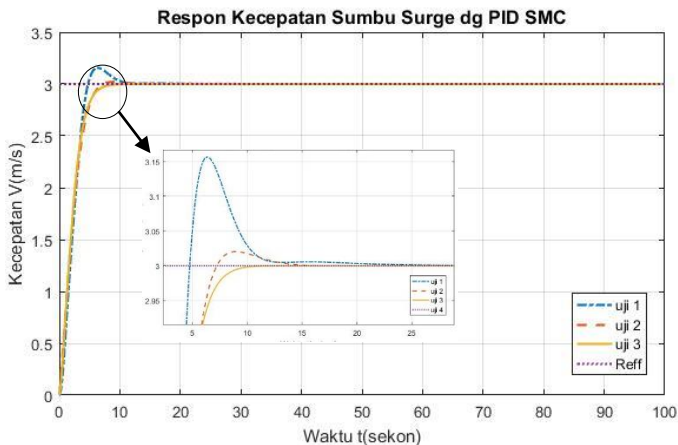
$$U_N = (k_p s + k_i \int s dt + k_d \frac{ds}{dt}) \quad (4.2)$$

Hasil pengujian respon kecepatan translasi dengan metode *Sliding Mode* berbasis struktur kontrol PID ditunjukkan pada Gambar 4.6.

Pada tiga hasil pengujian pada Tabel 4.2. Pengujian 3, berhasil membuat respon sistem kecepatan kapal tanpa awak memenuhi spesifikasi desain yang diinginkan.

**Tabel 4.2** Pengujian SMC-PID untuk Kecepatan Translasi

Uji	Kp	Ki	Kd	Settling Time( $5\tau$ )	%Error steady state ( $\epsilon$ )	%Overshoot
1	1.5	3.5	0.001	8,916 s	0	5,2%
2	6,5	0.0001	15	6,69 s	0.0067	0%
3	15	0.0001	4	7,959 s	0	0%

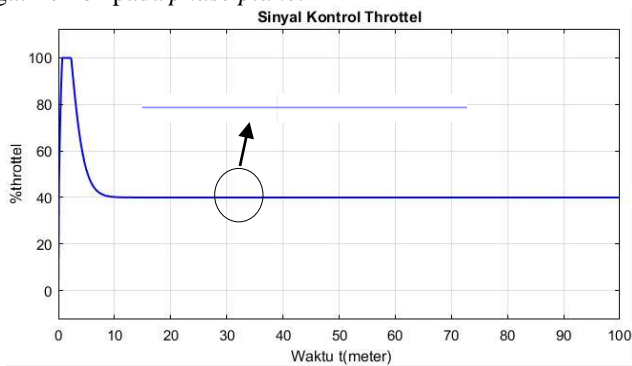


**Gambar 4.7:** Respon Kecepatan Translasi dengan SMC PID

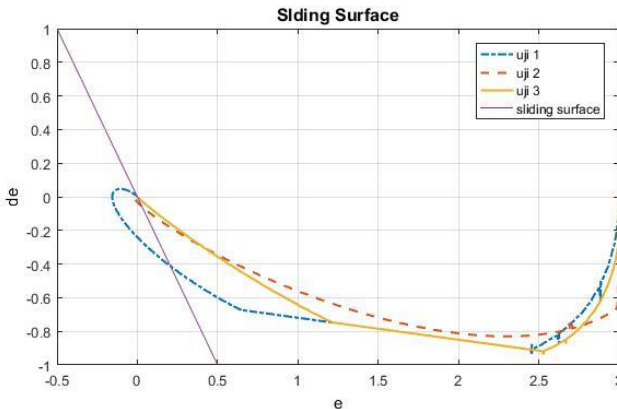
Pada Gambar 4.6, dapat dilihat bahwa pemilihan *gain* Kp yang terlalu kecil akan menyebabkan respon mengalami *overshoot*, sedangkan *gain* Kp yang terlalu besar akan menyebabkan respon sistem semakin lambat mencapai *steady state*, maka pemilihan *gain* Kp harus dipilih secara proporsional. Kemudian untuk pemilihan Ki dibuat tetap karena penambahan Ki yang terlalu besar membuat sistem mengalami *overshoot*, sedangkan pemilihan Kd dilakukan dengan mempertimbangkan nilai Ki, karena *gain* Kd berfungsi untuk meredam aksi kontrol dari integral yang

terlalu berlebihan. Sinyal kontrol yang dihasilkan oleh kontroler pada Pengujian 3 ditunjukkan pada Gambar 4.7

Untuk mengetahui perilaku state sistem, ditunjukkan plot *phase plane sliding surface* yang ditampilkan pada Gambar 4.8. Dari Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa *state error* dari sistem dapat mengikuti sliding surface yang telah direncanakan. Namun, dari 3 hasil pengujian yang telah dijalankan, *state error* Pengujian 3 adalah yang paling cepat dalam mengikuti trayektori dari *sliding surface* dan tidak menyinggung daerah negatif *error* pada *phase plane*.



**Gambar 4.8:** Sinyal Kontrol *Throttle* dengan SMC PID



**Gambar 4.9:** Plot *Phase Plane Sliding Surface* Respon Sistem

### 4.1.3 Pengujian Respon Sudut *Heading* Kapal Tanpa Awak

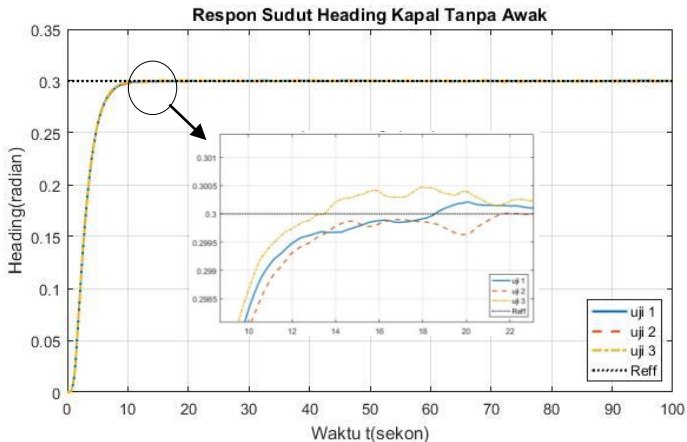
Pada subbab ini, akan dilakukan simulasi untuk menguji respon sudut *heading* kapal tanpa awak setelah diberi kontroler *Sliding Mode*.

Pengujian dilakukan dengan 3 kali simulasi dimana setiap simulasi menggunakan parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  yang berbeda-beda. Referensi sudut *heading* diberikan sebesar 0,3 radian atau setara dengan 17.2 derajat. Spesifikasi desain yang diinginkan adalah sistem orde satu dengan *time constant* sebesar 2 detik dan *error steady state* sebesar 0%. Setiap simulasi diberikan waktu selama 150 detik waktu simulasi. Skenario yang dijalankan pada pengujian respon sudut *heading* kapal tanpa awak adalah dengan membatasi sudut *rudder* sebesar 0,524 atau setara dengan 30 derajat agar sinyal kontrol yang diberikan tidak melebihi kapasitas dan kemampuan mesin *rudder* pada kapal tanpa awak.

#### 4.1.3.1 Pengujian Respon *Heading* dengan SMC Signum

Algoritma kontrol yang digunakan adalah kontroler *Sliding Mode* dengan sinyal kontrol natural  $U_N$  berupa fungsi Signum. Fungsi Signum yang digunakan adalah seperti pada Persamaan (4.1)

Hasil pengujian respon sudut *heading* dengan metode *Sliding Mode* fungsi Signum ditunjukkan pada Gambar 4.9.



**Gambar 4.10:** Respon Sudut *Heading* dengan SMC Signum

**Tabel 4.3.** Pengujian SMC-*Signum* untuk Sudut Heading

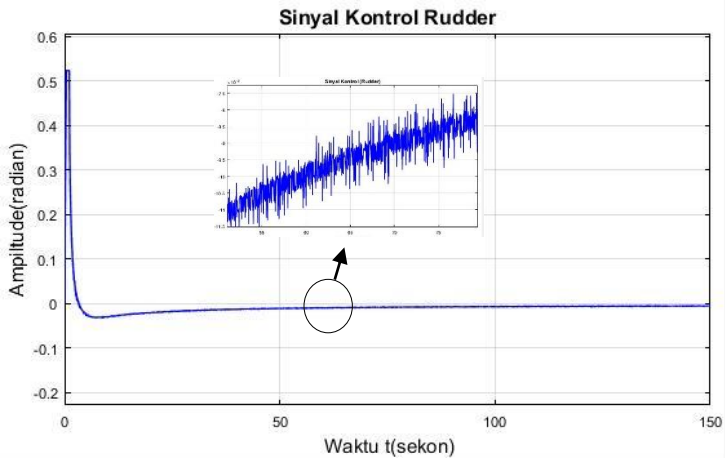
Uji	Gain $a$	Settling Time( $5\tau$ )	%Error steady state ( $\epsilon$ )	%Overshoot
1	0.006	8,93 s	0.001	0%
2	0.009	8,8 s	0.003	0%
3	0.6	7,78 s	0.003	0%

Dari ketiga hasil pengujian yang ada pada Tabel 4.3, terlihat bahwa respon sudut *heading* kapal tanpa awak mengalami osilasi yang berbeda-beda disetiap *gain* pengujianya. Namun, yang paling mendekati spesifikasi desain kapal tanpa awak adalah pengujian pertama dengan *gain a* sama dengan 0.006 karena memiliki *error steady state* yang paling kecil yaitu sebesar 0,001.

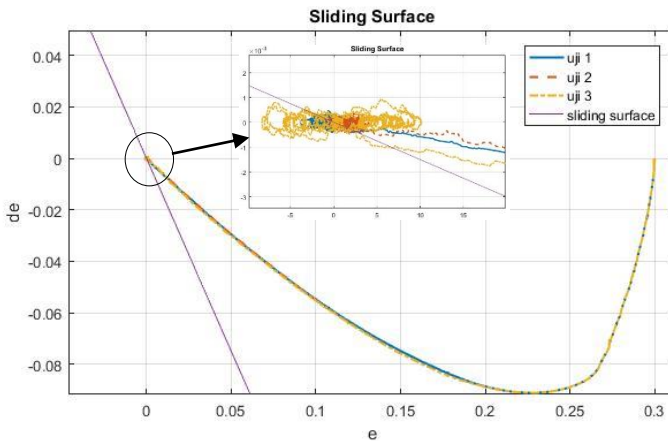
Pada Gambar 4.9, dapat dilihat bahwa penambahan *gain a* yang terlalu besar menyebabkan respon sistem mengalami osilasi. Pemilihan *gain a* harus dilakukan dengan teliti agar respon sistem selalu memenuhi kriteria Kestabilan *Lyapunov* yang telah dirancang. Gambar 4.10 menunjukkan sinyal kontrol *rudder* dengan *gain a* = 0.006.

Untuk mengetahui perilaku state sistem, ditunjukkan plot *phase plane sliding surface* yang ditampilkan pada Gambar 4.8. Dari Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa *state error* dari sistem dapat mengikuti *sliding surface* yang telah direncanakan dan menghasilkan osilasi disekitar nilai 0. Namun, dari ketiga hasil pengujian yang dijalankan, pengujian 2 adalah yang paling cepat dalam mengikuti trayektori dari *sliding surface* yang direncanakan dan menghasilkan osilasi paling kecil di sekitar nilai 0.

Dari Gambar 4.10, dapat dilihat bahwa sinyal kontrol mengalami *chattering* atau *switching* dengan frekuensi tinggi. Fenomena *chattering* ini disebabkan oleh unsur diskontinyu dari sistem. Hal ini dapat merusak perangkat yang digunakan, karena mengalami perubahan dalam waktu yang sangat cepat. Oleh karena itu, pada pengujian selanjutnya fungsi diskontinyu pada fungsi *signum* diganti dengan fungsi diskontinyu pada struktur PID.



**Gambar 4.11:** Sinyal Kontrol *Rudder* dengan SMC Signum

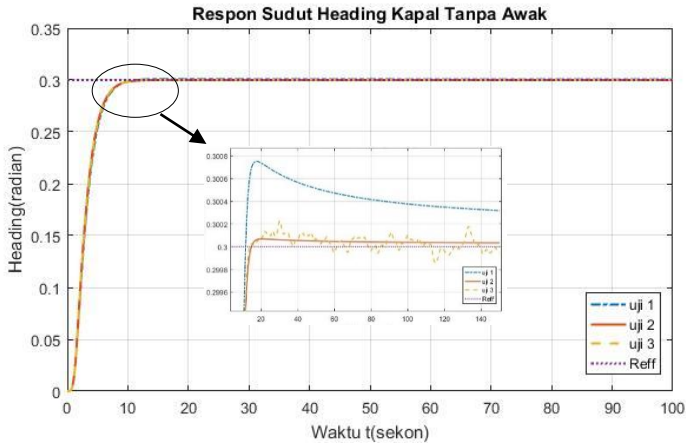


**Gambar 4.12:** Plot *Phase Plane Sliding Surface* Respon Sistem

#### 4.1.3.2 Pengujian Sudut Heading dengan PID SMC

Algoritma kontrol yang digunakan adalah kontroler *Sliding Mode* dengan sinyal kontrol natural  $U_N$  berupa struktur kontrol PID. Fungsi Signum yang digunakan adalah seperti pada Persamaan (4.1)

Hasil pengujian respon sudut *heading* dengan metode *Sliding Mode* struktur kontrol PID ditunjukkan pada Gambar 4.12.



**Gambar 4.13:** Respon Sudut *Heading* dengan SMC-PID

**Tabel 4.4.** Pengujian SMC-PID untuk Sudut *Heading* dengan SMC-PID

Uji	$K_p$	$K_i$	$K_d$	Settling Time( $5\tau$ )	Error steady state ( $\epsilon$ )	%Overshoot
1	0,15	0,0001	0,01	4,2 s	0,003	2,67%
2	1,5	0,0001	0,001	8,807 s	0	0%
3	6,5	0,001	0,001	8,849 s	0,002	0%

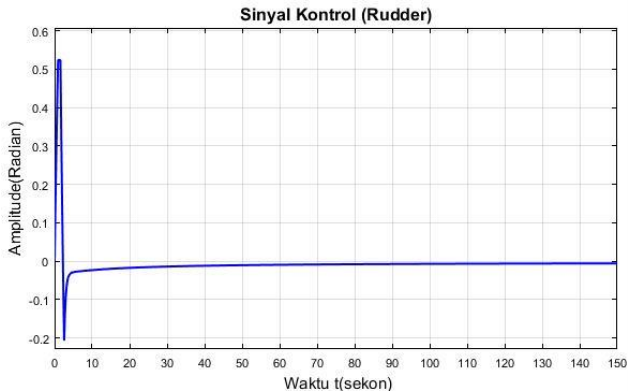
Dilihat dari tiga hasil pengujian pada Tabel 4.4, Pengujian 3 dengan parameter  $K_p = 1,5$ ,  $K_i = 0,0001$ , dan  $K_d = 0,001$ , berhasil membuat respon sistem memenuhi spesifikasi desain yang diinginkan.

Pada Gambar 4.13, dapat dilihat bahwa pemilihan *gain*  $K_p$  akan mempengaruhi besar kecil *error* yang terjadi pada respon sistem, maka pemilihan *gain*  $K_p$  harus dipilih secara proporsional. Sedangkan untuk pemilihan  $K_i$  yang lebih besar akan membuat sistem mengalami *overshoot*, sedangkan pemilihan  $K_d$  dilakukan dengan mempertimbangkan nilai  $K_i$ , karena *gain*  $K_p$  berfungsi untuk meredam aksi kontrol dari integral yang terlalu berlebihan. Karena terjadi percepatan respon awal ketika respon sistem mencapai *steady state*.

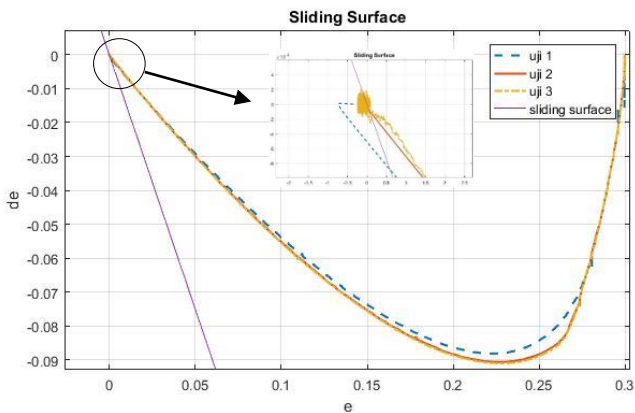


Gambar 4.14 menunjukkan sinyal kontrol dari *rudder* dengan menggunakan parameter *gain*  $K_p = 1,5$ ;  $K_i = 0,0001$ ;  $K_d = 0,001$ .

Untuk mengetahui perilaku state sistem, ditunjukkan plot *phase plane sliding surface* yang ditampilkan pada Gambar 4.15. Dari Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa *state error* dari sistem dapat mengikuti *sliding surface* yang telah direncanakan. Namun, dari 3 hasil pengujian yang telah dijalankan, *state error* Pengujian 2 adalah yang paling cepat dalam mengikuti trayektori dari *sliding surface* dan tidak menyinggung daerah negatif *error* pada *phase plane* serta tidak terjadi osilasi disekitar nilai 0.



**Gambar 4.14:** Respon Sudut *Heading* dengan SMC-PID



**Gambar 4.15:** Respon Sudut *Heading* dengan SMC-PID

## 4.2 Pengujian Kapal Tanpa Awak dengan *Guidance*

Pada bagian ini, akan diberikan hasil pengujian *guidance* menggunakan performa sistem *autopilot* kapal tanpa awak yang telah diberi Kontroler PID-Based *Sliding Mode*. Parameter kontrol yang digunakan mengambil hasil pengujian dari Subbab 4.2. Metode pengujiannya menggunakan *navigation waypoint* yang telah dirancang pada Subbab 3.4.

Simulasi dijalankan selama 5000 detik. Skenario yang dijalankan adalah kapal tanpa awak harus mampu melewati rancangan *waypoint* yang telah ditentukan baik ketika ada gangguan maupun ketika tidak ada gangguan. Parameter gangguan eksternal meliputi angin, arus, dan ombak ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Rancangan *waypoint* yang akan dilewati oleh kapal dapat dilihat pada Gambar 3.9. Kapal tanpa awak harus mampu melewati titik-titik pada rancangan *waypoint* yang tertera pada Tabel 3.1. Referensi kecepatan diatur sebesar 3 m/s dan referensi *heading* akan selalu berubah sesuai dengan koordinat kapal dan titik-titik *waypoint* yang akan dituju. %*Throttlet* dibatasi sebesar 100% atau sekitar 19 N dan sudut kemudi *rudder* dibatasi sebesar 30 derajat atau sebesar 0.532 radian.

**Tabel 4.5** Parameter Gangguan Eksternal

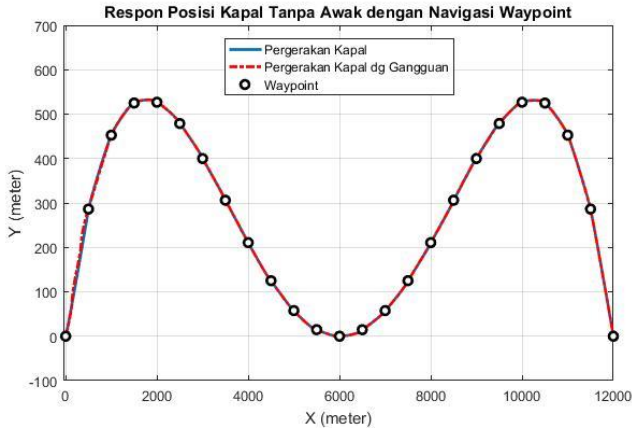
Gangguan	Besaran	Arah
Angin	1 m/s	-0,1
Arus	0,5 m/s	-0,1
Ombak	1 m	-0,1

Gambar 4.16 menunjukkan hasil perbandingan respon posisi kapal tanpa awak dengan *waypoint navigation*. Pada Gambar 4.16, dapat dilihat bahwa respon posisi kapal tanpa awak ketika terdapat gangguan maupun ketika terdapat gangguan mengalami perbedaan yang tidak terlalu signifikan sehingga dapat dikatakan bahwa sistem *autopilot* yang telah dirancang dapat bekerja dengan baik.

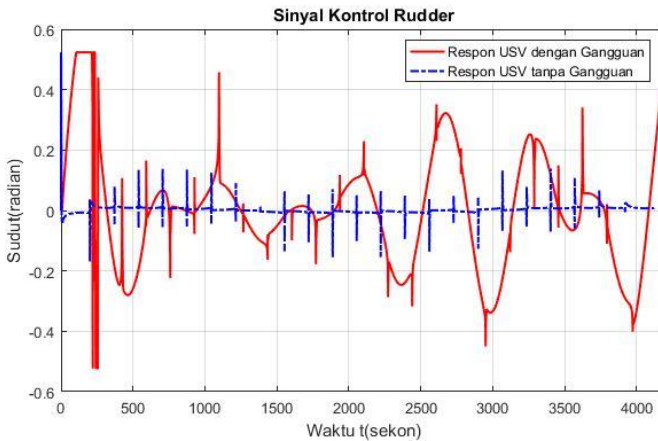
Pada gambar 4.17, dapat dilihat bahwa sinyal kontrol *rudder* mengalami perubahan yang cepat pada detik tertentu. Perubahan tersebut terjadi karena sinyal kontrol *rudder* mengarahkan sudut *heading* kapal tanpa awak menuju titik *waypoint* yang akan dituju. Sinyal kontrol *rudder* dengan gangguan mengalami kondisi naik dan turun. Hal ini dikarenakan Sinyal kontrol *rudder* menyesuaikan karakteristik gangguan yang ada.

Perbandingan *error waypoint* antara Respon Kapal Tanpa Awak dengan Gangguan dan tanpa Gangguan ditunjukkan pada Gambar 4.18.

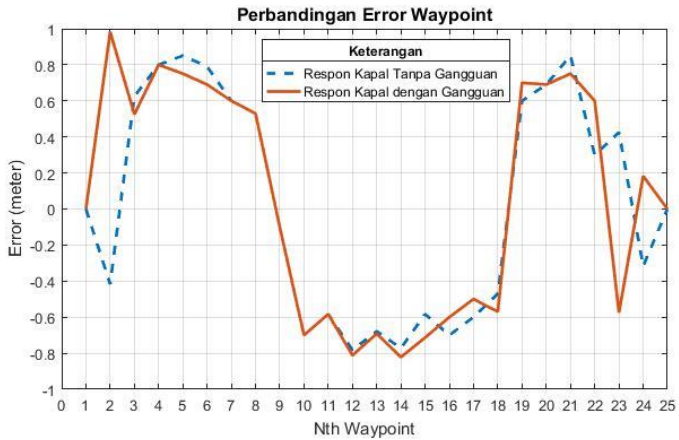
Dengan menggunakan perhitungan *RMSE* (Root Mean Square Error) didapatkan *error waypoint* tanpa gangguan sebesar 0,0146 meter, sementara *error waypoint* respon kapal tanpa awak dengan gangguan sebesar 0,0467 meter.



**Gambar 4.16:** Perbandingan Respon Posisi Kapal Tanpa dengan Titik-titik *Waypoint*



**Gambar 4.17:** Sinyal Kontrol Kapal Tanpa Awak dengan *Navigation Waypoint*



**Gambar 4.18:** *Error Waypoint* Respon Kapal Tanpa Awak dengan Gangguan dan Tanpa Gangguan

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Desain sistem autopilot dengan metode *Sliding Mode control* mampu menghasilkan respon kecepatan translasi dan respon sudut *heading* kapal tanpa awak yang sesuai dengan spesifikasi desain yang diinginkan. Dengan masing-masing parameter  $a=0,5$  untuk respon kecepatan translasi dan  $a=0,06$  untuk respon sudut *heading*. Namun sinyal kontrol sistem menghasilkan *chattering* sehingga kontrol natural *signum* diganti dengan struktur PID.
2. Desain sistem autopilot dengan metode PID-Based *Sliding Mode* mampu menghasilkan respon kecepatan translasi dan respon sudut *heading* kapal tanpa awak yang sesuai dengan spesifikasi desain yang diinginkan. Dengan masing-masing parameter *gain*  $K_p=15$   $K_i=0,0001$  dan  $K_d=4$  untuk respon kecepatan translasi dan  $K_p=1,5$   $K_i=0,0001$  dan  $K_d=0,001$  untuk respon sudut *heading*.
3. Desain *guidance* dengan metode *Navigation Waypoint* menggunakan sistem *autopilot* dengan metode PID-Based *Sliding Mode* dapat mengarahkan kapal tanpa awak menuju *waypoint* yang diinginkan baik ketika disertai gangguan maupun tidak disertai gangguan dengan RMSE *waypoint* yang relatif kecil yaitu sebesar 0,0146 meter dan 0,0413 meter.

### 5.2 Saran

Dari Penelitian yang dilakuakn, untuk pengembangan berikutnya, disarankan beberapa hal berikut ini:

1. Pemodelan dan pemahaman tentang kapal tanpa awak akan membantu perancangan sistem yang lebih baik.
2. Nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  sebaiknya dituning secara adaptif supaya kestabilan sistem selalu terjaga.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

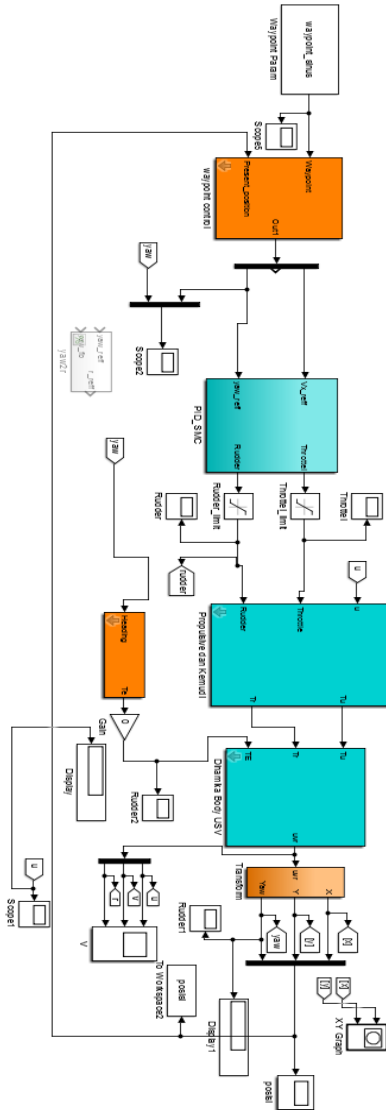
- [1] P. H. Heins, B. L. Jones, and D. J. Taunton, "Design and validation of an unmanned surface vehicle simulation model," *Appl. Math. Model.*, vol. 48, pp. 749–774, 2017.
- [2] Z. Liu, Y. Zhang, X. Yu, and C. Yuan, "Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges," *Annu. Rev. Control*, vol. 41, pp. 71–93, 2016.
- [3] K. D. Young, V. I. Utkin, and Ü. Özgüner, "A control engineer's guide to *sliding mode control*," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 328–342, 1999.
- [4] M. Li, F. Wang, and F. Gao, "PID-Based *Sliding Mode Controller* for Nonlinear Processes," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 40, no. 12, pp. 2660–2667, Jun. 2001.
- [5] T. W. VANECK, C. D. RODRIGUEZ-ORTIZ, M. C. SCHMIDT, and J. E. MANLEY, "Automated Bathymetry Using an Autonomous Surface Craft," *Navigation*, vol. 43, no. 4, pp. 407–419, 1996.
- [6] B. A. Adietya and E. D. Gustiarini, "Studi Perbandingan Performa Kapal Trimaran, Katamaran, dan Monohull Sebagai Kapal Penyeberangan di Kepulauan Karimunjawa," *Kapal*, vol. 15, no. 1, p. 18, 2018.
- [7] I. Zelinka, V. H. Duy, and J. Cha, *AETA 2013: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences*. 2013.
- [8] K. Ogata, *Modern Control Engineering K Ogata 5Th Edition*, vol. 4, no. 3. 1970.
- [9] Y. E. Nugraha, M. Ir. Rusdhianto Effendie AK., and M. Eka Iskandar, ST., "Waypoint Tracking Control Pada Quadcopter Menggunakan Pid-Based *Sliding Mode Control*," 2016.
- [10] Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman, and A. Levant, *Sliding Mode Control and Observation (Control Engineering)*. 2013.
- [11] R. L. W. Ii and D. A. Lawrence, *LINEAR STATE-SPACE CONTROL SYSTEMS*. .
- [12] R. A. Decarlo, S. H. Zak, and G. P. Matthews, "Structure Control of Nonlinear Multivariable System Variable: A Tutorial," in *Control of Nonlinear Multivariable Systems*, 1988, vol. 76, p. 21.
- [13] Erwin Kreyzig, *Advanced Engineering Mathematics 9e BW*, vol.

9. 2006.
- [14] A. Al-Farabi, R. Effendie, and N. Gamayanti, "Perbandingan PID Model Reference Adaptive *Control* dengan L1 Adaptif *Control* untuk Kemudi Kapal Tanpa Awak Dalam Kontrol *Waypoint*." p. 72, 2018.

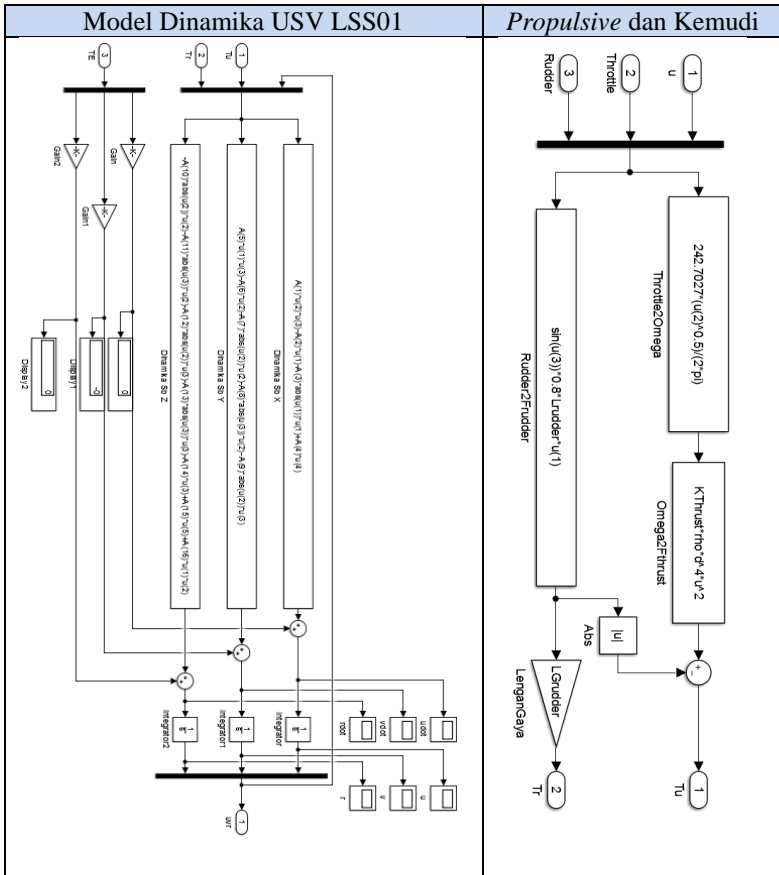


# LAMPIRAN

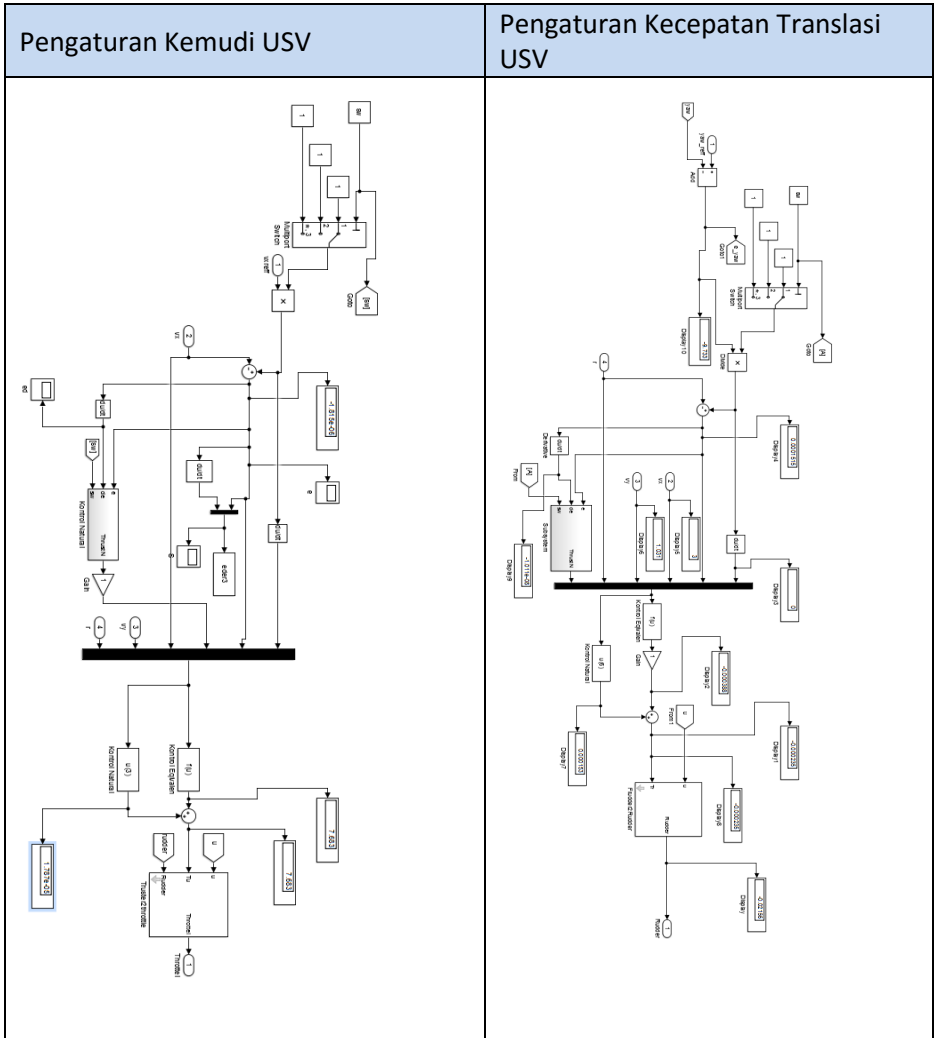
## A. Diagram Simulink Desain Sistem *Autopilot dan Guidance*



## B. Diagram Simulink Model Dinamika dan *Propulsive* dan kemudi USV LSS01



## D. Diagram Simulink Kontroller Sliding Mode



## E. Penurunan rumus Sliding Mode Control

Didefinisikan sistem orde 1 sebagai berikut:

$$Y_c(s) = \frac{1}{\tau s + 1} Y_r(s) \quad (1)$$

Kemudian didefinisikan error tracking sebagai berikut:

$$e(s) = Y_r(s) - Y_c(s) \quad (2)$$

Substitusi Persamaan (2) dengan Persamaan (1) didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$e(s) = Y_r(s) - \frac{1}{\tau s + 1} Y_r(s) \quad (3)$$

$$e(s) = \frac{\tau s Y_r(s) + 1 - 1}{\tau s + 1} \quad (4)$$

Didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$(\tau s + 1)e(s) = \tau s Y_r(s) \quad (5)$$

$$\tau e(\dot{t}) + e(t) = \tau \dot{Y}_r(t) = 0 \quad (6)$$

Setelah dilakukan penurunan didapatkan Persamaan Sliding Mode sebagai berikut:

$$\tau e(\dot{t}) + e(t) = 0 \quad (7)$$

## RIWAYAT HIDUP



M. Fatah Al Alim, lahir di Mojokerto pada tanggal 8 Desember 1996. Anak (putra) ketiga dari pasangan Muhaimain dan Siti Fatimah. Penulis telah menempuh pendidikan di RA SAS Klinterejo Sooko Mojokerto. Kemudian memasuki MI SAS Klinterejo pada tahun 2003. Pada tahun 2009 penulis melanjutkan pendidikannya di SMP Islam Plus *Al-Azhar* dan selanjutnya melanjutkan pendidikannya di MA Darussalam Sengon Jombang pada tahun 2013.

Pada tahun 2015 setelah lulus dari SMA penulis melanjutkan kuliahnya di Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan mengambil Bidang Studi Sistem Pengaturan. Untuk menghubungi penulis, dapat melalui surat elektronik pada alamat email [fatah.arektektro@gmail.com](mailto:fatah.arektektro@gmail.com)