



TUGAS AKHIR – EE 184801

**PERANCANGAN SISTEM *AUTOPILOT* DAN
GUIDANCE PADA *UNMANNED SURFACE VEHICLE*
(USV) TIPE MONOHULL LSS01 DENGAN METODE
L1 ADAPTIF**

Anang Maruf
NRP 07111745000077

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

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

[Halaman ini sengaja dikosongkan]



FINAL PROJECT – EE 184801

***DESIGN OF AUTOPILOT AND GUIDANCE ON
MONOHULL UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV)
USING L1 ADAPTIVE METHOD***

Anang Maruf
NRP 07111745000077

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

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

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Perancangan Sistem *Autopilot* dan *Guidance* pada *Unmanned Surface Vehicle* (USV) Tipe Monohull LSS01 dengan Metode L1 Adaptif”** 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

Anang Maruf
NRP 07111745000077

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

**PERANCANGAN SISTEM *AUTOPILOT* DAN *GUIDANCE* PADA
UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV) TIPE MONOHULL
LSS01 DENGAN METODE L1 ADAPTIF**

TUGAS AKHIR

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

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

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

**SURABAYA
JULI, 2019**

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

**PERANCANGAN SISTEM *AUTOPILOT* DAN *GUIDANCE* PADA
UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV) TIPE MONOHULL
LSS01 DENGAN METODE L1 ADAPTIF**

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

ABSTRAK

Unmanned Surface Vehicle (USV) merupakan kapal yang memiliki kemampuan untuk melaju tanpa adanya nakhoda. Kapal dapat beroperasi mode manual dengan pengendalian dari jarak jauh. Kapal dapat beroperasi mode semi otomatis dalam pantauan operator. Serta kapal dapat beroperasi mode otomatis tanpa pantauan operator. Agar USV dapat melaju secara otomatis, diperlukan adanya perangkat – perangkat navigasi. Perangkat navigasi memungkinkan kapal melaju melalui *waypoint – waypoint* yang diinginkan. Untuk mengendalikan sebuah USV agar dapat bergerak menuju *waypoint* yang diinginkan, diperlukan sebuah aksi kontrol mesin dan sudut kemudi kapal. Pada saat kapal berlabuh diperairan tentunya akan menemui berbagai macam gangguan eksternal. Diantaranya adalah gangguan angin, arus, dan ombak. Salah satu cara untuk mengatasi gangguan tersebut adalah dengan merancang sistem kontrol adaptif yaitu kontroler L1 adaptif. Dimana untuk mengatur perilaku plant, diperlukan sebuah referensi model yang diinginkan. Kontroler L1 adaptif akan menyesuaikan respon plant sedekat mungkin dengan respon referensi model dari *state predictor*. Kontroler L1 adaptif adalah pengembangan dari kontroler adaptif MRAC (*Model Reference Adaptive Control*). Dimana perbedaannya terletak pada pemisahan *adaptation rate* dengan property ke *robust-an*. Kelebihan dari metode L1 adaptif adalah menjamin performa respon transien dengan waktu adaptasi yang cepat. Pada penelitian ini, akan dirancang kontroler L1 adaptif untuk mengatasi gangguan USV saat melewati *waypoint*. Didapatkan performa kontroler adaptif. mampu menghasilkan respon kecepatan translasi pada sumbu x (*surge*) dan kecepatan sudut pada sumbu ψ (*yaw*) USV sesuai dengan kriteria desain yang telah ditetapkan yaitu *zero offset*, tanpa *overshoot*, dan $\tau_s = \pm 5\%$ yaitu 4.591 detik pada sumbu x dan 1.48 detik pada sumbu ψ . Respon posisi USV menggunakan kontroler L1 adaptif

saat dipengaruhi gaya dari gangguan eksternal angin, arus, dan ombak menghasilkan pergerakan lintasan *tracking* yang halus cukup dan mampu mencapai atau mendekati titik *waypoint* dengan baik. Hal ini dibuktikan pada skenario pertama pergerakan USV menghasilkan *cross track error* sebesar 0,2143 meter RMS. Sedangkan pada skenario kedua pergerakan USV menghasilkan *cross track error* sebesar 0,2974 meter RMS. Dan pada skenario ketiga pergerakan USV menghasilkan *cross track error* sebesar 0,3028 meter RMS.

Kata kunci : *Kapal Tanpa Awak, Unmanned Surface Vehicle, Waypoint, LI Adaptive, MRAC, Autopilot, Guidance*

**DESIGN AUTOPILOT AND GUIDANCE ON MONOHULL
UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV) USING L1 ADAPTIVE
METHOD**

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

ABSTRACT

Unmanned Surface Vehicle (USV) is a ship that has the ability to advance without a captain. USV can operate manual mode with remote control. The USV can operate semi-automatic mode in operator's monitoring. As well as the ship can operate automatic mode without operator's monitoring. In order for USV to progress automatically, there is a need for a navigation device. The navigation device allows the USV to go through a waypoint – the waypoint desired. To control a USV in order to move towards the desired waypoint, a machine control action is required and the steering angle of the ISV. At the time of the irrigation ship will certainly find various external interference. Among them are wind disturbances, currents and waves. One way to overcome such interference is by designing an adaptive control system that is an adaptive L1 controller. Where to regulate plant behavior, it is necessary to reference the desired model. The adaptive L1 controller will adjust the plant's response as close as possible to the model's reference response from the state predictor. The adaptive L1 Controller is the development of the MRAC Adaptive controller (Model Reference Adaptive Control). Where the difference lies in the separation of adaptation rate with the property to robust-an. The advantages of the adaptive L1 method is to ensure transient response performance with fast adaptation time. In this study, it would be designed an adaptive L1 controller to address the USV interference as it passes through the waypoint. Adaptive controller performance is achieved. Capable of generating a translation speed response on the x axis (surge) and angular velocity on the USV ψ (yaw) axis in accordance with the preset design criteria i.e. zero offset, no overshoot, and $t_s = \pm 5\%$ of 4,591 seconds on the x-axis and 1.48 seconds on the ψ axis. USV position response uses an adaptive L1 controller when influenced by the style of the wind's external disturbances, currents and waves results in a smooth tracking track

movement that is sufficiently capable of reaching or approaching the waypoints well. This is evidenced in the first scenario of USV movement resulting in a cross track error of 0.2143 meter RMS. While in the second scenario USV movements resulted in an error cross track of 0.2974 RMS. And in the third scenario of the USV movement Generate a cross track error of 0,3028 meter RMS.

Keywords : *Unmanned Vessels, Unmanned Surface Vehicle, Waypoint, LI Adaptive, MRAC, Autopilot, Guidance*

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 *AUTOPILOT* DAN *GUIDANCE* PADA *UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV)* TIPE MONOHULL LSS01 DENGAN METODE L1 ADAPTIF

Dengan terselesaikannya Tugas Akhir ini, Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar - besarnya kepada kedua orang tua yang senantiasa mendoakan dan memberikan dukungan dengan tulus tiada henti. Bapak Rusdhianton Effendi AK., M.T dan Ibu Nurlita Gamayanti, S.T., M.T selaku dosen pembimbing. Bapak Achmad Syaichu Buchori, S.Ag. dan Ibu Ijemiatik selaku guru Madrasah Al Anwar yang selalu memberikan doa dan restu. Al Habib Idrus bin Muhammad Alaydrus yang senantiasa memberikan doa dan restu. Teman – teman UKM Cinta Rebana, Komunitas Remaja Muslim, PAC IPNU Mulyorejo, dan Abdi Glewo yang selalu memberikan semangat dan dukungan. Serta semua pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari dan memohon maaf atas segala kekurangan pada Tugas Akhir ini. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dalam pengembangan keilmuan di kemudian hari.

Surabaya, Juli 2019

Anang Maruf
NRP 07111745000077

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 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	5
1.7. Relevansi atau Manfaat	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 <i>Unmanned Surface Vehicle</i>	7
2.2 Pemodelan Matematis USV	8
2.3 Linierisasi Umpan Balik Loop Tertutup	15
2.4 Sistem Pengaturan Adaptif	17
2.5 Kontroler L1 Adaptif	20
2.5.1 <i>Control Law</i>	21
2.5.2 <i>State Predictor</i>	21
2.5.3 <i>Adaptation Law</i>	22
2.6 Kontrol Navigasi <i>Waypoint</i>	23
2.7 <i>Root Mean Square Error (RMSE)</i>	25
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM	27
3.1 Rancangan Umum Sistem	27
3.1.1 Perancangan Umum Sistem <i>Autopilot</i>	28
3.1.2 Perancangan Umum Sistem <i>Guidance</i>	28
3.2 Model Matematika USV Monohull LSS01	29
3.3 Perancangan <i>Feedback Linearization</i>	36
3.4 Perancangan Kontroler L1 Adaptif.....	39
3.4.1 Perancangan <i>Control Law</i>	41
3.4.2 Perancangan <i>State Predictor</i>	42

3.4.3	Perancangan <i>Adaptive Law</i>	42
3.5	Perancangan Navigasi Trayektori <i>Waypoint</i>	45
BAB 4	PENGUJIAN DAN ANALISIS	47
4.1	Gambaran Umum Pengujian Sistem	47
4.2	Pengujian Model Matematika USV	47
4.3	Pengujian Sistem <i>Autopilot</i> USV dengan Kontroler L1 Adaptif	50
4.4	Pengujian Sistem <i>Guidance</i> dengan Kontroler L1 Adaptif Tanpa Gangguan	54
4.5	Pengujian Sistem <i>Guidance</i> dengan Kontroler L1 Adaptif Dengan Gangguan.....	62
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN.....	69
4.1.	Kesimpulan	69
4.2.	Saran.....	69
DAFTAR PUSTAKA.....		71
LAMPIRAN		73
A.1	Blok Diagram <i>All System</i> Simulink MatLab	73
A.2	Pemrograman <i>Waypoint Planner</i> MatLab.....	74
A.3	Pemrograman <i>Control Parameter</i> MatLab	77
A.3	Pemrograman <i>Root Mean Square Error</i> MatLab	78
RIWAYAT HIDUP.....		79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram Blok Sistem Pengaturan Adaptif	17
Gambar 2.2	Diagram Blok Model MRAC	18
Gambar 2.3	Diagram Blok <i>Gain Scheduling</i>	19
Gambar 2.4	Diagram Blok <i>Self Tuning Regulators</i>	20
Gambar 2.5	Diagram Blok Kontroler L1 Adaptif.....	21
Gambar 2.6	Ilustrasi <i>Operator Projection</i>	23
Gambar 2.7	Ilustrasi <i>Waypoint Control</i>	24
Gambar 3.1	Blok Diagram Rancangan Umum Sistem	27
Gambar 3.2	Diagram Blok Rancangan Sistem <i>Autopilot</i>	28
Gambar 3.3	Diagram Blok Sistem <i>Guidance</i>	29
Gambar 3.4	Diagram Simulink <i>Plant USV</i>	31
Gambar 3.5	Diagram Simulink Gangguan Angin	35
Gambar 3.6	Diagram Simulink Gangguan Arus.....	36
Gambar 3.7	Diagram Simulink Gangguan Ombak.....	36
Gambar 3.8	Diagram Simulink <i>Feedback Linearization</i>	39
Gambar 3.9	Diagram Simulink Kontroler L1 Adaptif.....	39
Gambar 3.10	Diagram Simulink <i>Control Law</i>	41
Gambar 3.11	Diagram Simulink <i>State Predictor</i>	42
Gambar 3.12	Diagram Simulink <i>Adaptive Law</i>	43
Gambar 3.13	Diagram Simulink <i>Projection Operator</i>	44
Gambar 3.14	Referensi Trayektori Gerak Lurus	45
Gambar 3.15	Referensi Trayektori Gerak Setengah Melingkar	45
Gambar 3.16	Referensi Trayektori Gerak Lingkaran Penuh	46
Gambar 4.1	Respon Kecepatan Translasi <i>Open Loop Plant USV</i> . ..	48
Gambar 4.2	Respon Kecepatan Sudut Pengujian <i>Open Loop Plant USV</i>	49
Gambar 4.3	Respon Posisi Pengujian <i>Open Loop Plant USV</i>	49
Gambar 4.4	Respon Kecepatan Sudut <i>Heading</i> dengan kontroler L1 Adaptif	50
Gambar 4.5	Respon Kecepatan Translasi USV dengan Kontroler L1 Adaptif	51
Gambar 4.6	Respon Kecepatan Sudut USV dengan Kontroler L1 Adaptif	52
Gambar 4.7	Respon Posisi USV dengan Kontroler L1 Adaptif	52
Gambar 4.8	Perbandingan Respon Kecepatan Sudut <i>Heading</i> dengan <i>State Predictor</i> menggunakan Kontroler L1 Adaptif .	53

Gambar 4.9	Respon Perubahan Theta Estimasi dengan Kontroler L1 Adaptif	54
Gambar 4.10	Respon Posisi USV dengan Kontroler L1 Adaptif Tanpa Gangguan (Skenario 1)	55
Gambar 4.11	Respon Sudut Kemudi dengan Kontroler L1 Adaptif Tanpa Gangguan (Skenario 1)	56
Gambar 4.12	<i>Error Waypoint Sistem Guidance</i> (Skenario 1)	56
Gambar 4.13	Respon Posisi USV dengan Kontroler L1 Adaptif Tanpa Gangguan (Skenario 2)	58
Gambar 4.14	Respon Sudut Kemudi dengan Kontroler L1 Adaptif Tanpa Gangguan (Skenario 2)	58
Gambar 4.15	<i>Error Waypoint Sistem Guidance</i> (Skenario 2)	59
Gambar 4.16	Respon Posisi USV dengan Kontroler L1 Adaptif Tanpa Gangguan (Skenario 3)	61
Gambar 4.17	Respon Sudut Kemudi dengan Kontroler L1 Adaptif Tanpa Gangguan (Skenario 3)	61
Gambar 4.18	<i>Error Waypoint Sistem Guidance</i> (Skenario 3)	62
Gambar 4.19	Respon Posisi USV Menggunakan Kontroler L1 Adaptif dengan Gangguan (Skenario 1)	63
Gambar 4.20	Respon Sudut Kemudi Menggunakan Kontroler L1 Adaptif dengan Gangguan (Skenario 1)	63
Gambar 4.21	<i>Error Waypoint Sistem Guidance</i> dengan Gangguan (Skenario 1)	64
Gambar 4.22	Respon Posisi USV Menggunakan Kontroler L1 Adaptif dengan Gangguan (Skenario 2)	65
Gambar 4.23	Respon Sudut Kemudi Menggunakan Kontroler L1 Adaptif dengan Gangguan (Skenario 2)	65
Gambar 4.24	<i>Error Waypoint Sistem Guidance</i> dengan Gangguan (Skenario 2)	66
Gambar 4.25	Respon Posisi USV Menggunakan Kontroler L1 Adaptif dengan Gangguan (Skenario 3)	67
Gambar 4.26	Respon Sudut Kemudi Menggunakan Kontroler L1 Adaptif dengan Gangguan (Skenario 3)	67
Gambar 4.27	<i>Error Waypoint Sistem Guidance</i> dengan Gangguan (Skenario 3)	68

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter <i>Plant</i> USV Monohull LSS01.....	31
Tabel 4.1	Data Respon Pengujian <i>Open Loop Plant</i> USV	48
Tabel 4.2	Data Respon Pengujian USV dengan Menggunakan Kontroler L1 Adaptif.....	51
Tabel 4.3	Referensi Titik <i>Waypoint</i> Gerak Lurus (Skenario 1).....	54
Tabel 4.4	Referensi Titik <i>Waypoint</i> Gerak Setengah Melingkar (Skenario 2).....	57
Tabel 4.5	Referensi Titik <i>Waypoint</i> Gerak Melingkar (Skenario 3)	59
Tabel 4.5	Parameter Besaran dan Arah Gangguan.....	62

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Unmanned Surface Vehicle (USV) merupakan kapal yang memiliki kemampuan untuk melaju tanpa adanya nakhoda. Kapal dapat beroperasi mode manual dengan pengendalian dari jarak jauh. Kapal dapat beroperasi mode semi otomatis dalam pantauan operator. Serta kapal dapat beroperasi mode otomatis tanpa pantauan operator. Pada penggunaannya USV telah merambah di berbagai bidang industri dan militer, seperti untuk pembelajaran atau riset, pemantauan area, misi penyelamatan dan pertahanan wilayah.

USV dapat digunakan di perairan yang tidak dapat dilalui oleh kapal biasa seperti perairan yang memiliki tingkat ancaman yang tinggi seperti di area pertempuran atau area yang telah terkontaminasi nuklir, biologi atau bahan kimia. Selain itu, USV juga dapat digunakan untuk survei perairan dangkal, militer untuk mengantar senjata, dan pengumpulan data lingkungan perairan. Untuk menyelesaikan misi – misi tersebut, dibutuhkan USV yang bisa beroperasi secara otomatis penuh tanpa pantauan operator.

Umumnya sebuah kapal beroperasi dengan kendali seorang nakhoda yang sudah terlatih untuk mengoperasikan kapal serta memiliki pengalaman terhadap penentuan jalur perairan yang aman dari gangguan eksternal seperti arus, angin, dan gelombang ombak. Namun pada USV yang beroperasi dalam mode otomatis tidak ada nakhoda yang menjalankan kapal, melainkan sistem komputer yang mengoperasikan kapal tanpa awak.

Agar USV dapat melaju secara otomatis, diperlukan adanya perangkat – perangkat navigasi. Perangkat navigasi memungkinkan kapal melaju melalui *waypoint – waypoint* yang diinginkan. *Waypoint* adalah sebuah titik koordinat pada bidang planar yang merupakan titik tujuan dilaluinya sebuah kapal. Sudut arah tujuan *waypoint* dapat dihitung sehingga memungkinkan USV dapat dikendalikan untuk melalui jalur koordinat *waypoint* tersebut.

Untuk mengendalikan sebuah USV agar dapat bergerak menuju *waypoint* yang diinginkan, diperlukan sebuah aksi kontrol mesin dan sudut kemudi kapal. Pada saat kapal berlabuh diperairan tentunya akan menemui berbagai macam gangguan eksternal. Diantaranya adalah

gangguan angin, arus, dan ombak. Aksi kontrol yang diperlukan pada saat mendapat gangguan dan tanpa ada gangguan tentunya pasti berbeda. Namun yang diinginkan USV harus dapat menyesuaikan diri dengan dua kondisi tersebut.

Salah satu metode untuk mengatasi gangguan eksternal tersebut adalah dengan menerapkan kontroler L1 adaptif. Kontroler L1 adaptif adalah sebuah kontroler yang mengubah parameter adaptasi sinyal kontrol terhadap perilaku *plant* yang dinamis. Kontroler L1 adaptif akan menyesuaikan respon *plant* sedekat mungkin dengan model *state predictor* agar tahan terhadap gangguan. Selain itu, kelebihan dari metode L1 adaptif adalah pemisahan adaptasi dengan kerobust-an. Sehingga ketangguhan sinyal kontrol terjamin dengan proses adaptasi yang cepat.

Di penelitian ini, penulis ingin merancang kontroler L1 adaptif untuk mengendalikan mesin dan kemudi USV. Kemudian membandingkan respon kemudi pada saat tanpa adanya gangguan dan pada saat adanya gangguan.

1.2. Permasalahan

USV berjalan secara otomatis tanpa adanya nakhoda yang mengoperasikan, melainkan sistem komputer yang menjalankan USV. Untuk mengarahkan USV agar dapat melalui suatu *waypoint*, memerlukan model mesin dan kemudi dari USV. Serta diperlukan sebuah kontroler untuk mengendalikan sistem mesin dan kemudi yang digunakan oleh USV.

Model dari USV merupakan suatu model non-linier dengan pendekatan 3 derajat kebebasan (*surge*, *sway*, dan *yaw*). Diperlukan suatu proses linierisasi untuk melinierkan model USV agar dapat dikendalikan oleh kontroler L1 adaptif. Namun adanya gangguan eksternal berupa gangguan angin, arus, dan ombak dapat mempengaruhi arah laju USV.

1.3. Batasan Masalah

Untuk memberikan arah penyelesaian, maka diberikan batasan - batasan masalah sebagai berikut:

1. Pemodelan dan pengaturan dilakukan pada USV Monohull tipe LSS-01.
2. USV memiliki 3 derajat kebebasan yaitu pada sumbu *sway*, *surge*, dan *yaw*.
3. Navigasi *waypoint* bekerja pada bidang planar.

4. Model fungsi alih kemudi dan propulsi tidak disertakan dalam sistem.
5. Kontroler yang digunakan adalah L1 adaptif untuk mengendalikan kecepatan translasi *surge* dan kecepatan sudut *yaw*.

1.4. Tujuan

Tujuan penelitian ini yaitu merancang kontroler L1 adaptif untuk mengendalikan mesin dan kemudi USV agar dapat melalui *waypoint* yang diinginkan dengan adanya gangguan eksternal angin, arus dan ombak.

1.5. Metodologi

Metodologi yang akan diterapkan untuk penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Studi literatur akan berisi pengumpulan serta pengkajian teori, data dan penelitian yang dianggap relevan dan terpercaya untuk mendukung keabsahan tugas akhir ini. Literatur yang digunakan akan memiliki batasan-batasan tertentu. Yaitu, literatur yang digunakan harus bersumber dari paper, jurnal, buku, maupun artikel yang berasal dari badan pemerintahan atau institusi akademik terpercaya.
2. Pemodelan Dinamika USV
Merupakan tahap dimana dirancang model komponen-komponen *unmanned surface vehicle* berdasarkan literature yang sudah diperoleh. Adapun komponen yang akan dimodelkan adalah badan kapal, mesin pendorong atau thruster, dan sistem kemudi atau rudder. Selain itu, juga akan dimodelkan dinamika dari *Unmanned Surface Vehicle* Monohull tipe LSS-01 secara keseluruhan.
3. Linierisasi Model USV
Tahap ini merupakan tahap linierisasi pemodelan dinamika *plant* USV. Pemodelan *plant* USV Monohull merupakan model yang non-linier. Sehingga diperlukan proses linierisasi umpan balik agar dapat dikendalikan oleh sebuah kontroler.
4. Perancangan Strategi Kontrol
Setelah model didapat dari tahap pemodelan dan informasi penting lainnya didapatkan dari tahap pengujian dan estimasi parameter, selanjutnya adalah mendesain atau merancang

kontroler agar sistem *Unmanned Surface Vehicle* bisa bekerja sesuai dengan kriteria yang kita inginkan. Pada penelitian ini akan digunakan L1 adaptif.

5. Tahap Simulasi

Merupakan tahap pengujian per unit maupun keseluruhan sistem, apabila masih terdapat kesalahan pada sistem sehingga sistem tidak dapat berjalan dengan baik dan perlu revisi pada desain kontroler yang digunakan. Beberapa tahap pengujian berupa simulasi kinerja kontroler terhadap thruster, kinerja kontroler terhadap kemudi, dan dilanjutkan dengan pengujian sistem navigasi *waypoint* dengan tanpa adanya gangguan dan dengan adanya gangguan untuk menghasilkan data final, yang merupakan tujuan dari sistem ini.

6. Analisa dan Evaluasi

Pada tahap ini, akan dilakukan Analisa terhadap data yang didapatkan. Sehingga didapatkan karakteristik dari strategi kontrol yang telah dirancang. Analisa dilakukan khususnya pada simulasi model *Unmanned Surface Vehicle*, apakah sudah memenuhi kriteria karakteristik model yang sudah ditetapkan. Lalu dilakukan Analisa terhadap data yang dihasilkan oleh keseluruhan sistem, apakah sudah dianggap memuaskan atau tidak. Lalu dilakukan evaluasi serta revisi desain apabila diperlukan.

7. Kesimpulan

Kesimpulan didapatkan berdasarkan pengujian, analisis data dan referensi terkait. Pada hal ini menunjukkan hasil penelitian yang telah dilakukan berdasarkan rumusan masalah.

8. Penyusunan Buku Tugas Akhir

Pada tahap ini akan dilakukan penyusunan laporan terkait hasil proses Tugas Akhir yang telah dilakukan selama proses penelitian. Penyusunan buku tugas akhir dilakukan sebagai bentuk laporan tertulis.

1.6. Sistematika

Sistematika penulisan yang diterapkan pada buku tugas akhir ini terbagi menjadi lima bab, yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan membahas tentang latar belakang, permasalahan yang ada, batasan masalah, tujuan pelaksanaan tugas akhir, metodologi pelaksanaan, sistematika penulisan laporan tugas akhir, dan relevansi.

BAB II DASAR TEORI

Menjelaskan tentang tinjauan pustaka, konsep dasar dari USV, model dan parameter USV, teknik linearisasi umpan balik, kontroler L1 adaptif, dan sistem navigasi *waypoint* yang merupakan acuan atau landasan untuk dapat melaksanakan penelitian ini.

BAB III PERANCANGAN SISTEM

Bab ini membahas perancangan model USV, mesin dan kemudi, perancangan kontroler L1 adaptif untuk mengatur kecepatan translasi *surge* dan kecepatan sudut *yaw* USV, dan perancangan sistem *waypoint guidance*.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab ini berisi hasil simulasi pengaturan USV serta analisa tentang hasil yang didapatkan.

BAB V PENUTUP

Kesimpulan dari seluruh pengerjaan tugas akhir dan saran untuk perbaikan dan pengembangan selanjutnya disajikan pada bab penutup.

1.7. Relevansi atau Manfaat

Hasil dari pelaksanaan tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai salah satu referensi untuk penelitian – penelitian selanjutnya terutama membahas tentang kontroler L1 adaptif pada sistem otonom.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

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

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

2.1 *Unmanned Surface Vehicle*

Yang dimaksud dengan *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.

USV memiliki banyak manfaat untuk manusia, antara lain bisa digunakan untuk mengintai teritorial air musuh, bisa digunakan untuk pemetaan kontur bumi dibawah air, dan masih banyak manfaat yang lain. Untuk tujuan yang berbeda, maka USV perlu dilengkapi peralatan yang berbeda juga. Contohnya, USV yang digunakan untuk mengintai memerlukan warna yang tidak mencolok, kamera, dan lapisan luar yang bisa membuat USV tembus pandang jika diperlukan. Sedangkan untuk pemetaan kontur bawah air diperlukan USV yang menggunakan sonar untuk mengidentifikasi kontur bawah air.

Dalam kenyataannya, nama 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.

Sama halnya dengan kapal pada umumnya, USV digerakkan dengan mesin thruster dan kemudi. Mesin thruster digunakan untuk memberi gaya dorong kepada kapal, dan kemudi digunakan untuk mengatur arah kapal melaju. Karena USV harus bisa dikendalikan dari jarak jauh ataupun otomatis, maka diperlukan pengaturan pada mesin thrust dan kemudi. Sedangkan supaya bisa mendesain kontroler untuk penggerak

USV, maka harus diketahui model dan parameter yang ada pada USV yang akan dikendalikan.

2.2 Pemodelan Matematis USV

Pergerakan *unmanned surface vehicle* umum dinyatakan dalam 6 derajat kebebasan. Tiga koordiant pertama (x, y, z) dan turunan pertamanya untuk menyatakan posisi dan pergerakan translasi USV umum, sedangkan tiga koordinat terakhir (ϕ, θ, ψ) dan turunan pertamanya untuk menyatakan arah dan pergerakan rotasi USV umum.

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

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

dimana,

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

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

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

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

Model matematika USV dinyatakan sebagai berikut

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

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

dimana

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

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

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

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

dengan

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

$J_1(\eta_2)$ dan $J_2(\eta_2)$ adalah matrix transformasi yang berhubungan dengan fungsi sudut euler: *Roll*(Φ), *Pitch* (θ), dan *Yaw* (ψ) yang didefinisikan sebagai berikut,

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

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

M_{RB} dan M_A masing – masing adalah matriks inersia dari sistem *rigid body* dan matrik massa tambahan yang didefinisikan sebagai berikut,

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

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

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

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

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

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

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

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

$$b_1 = K_u u + K_v v + K_w w + K_p p + K_q q + K_r r \quad (2.17)$$

$$b_2 = M_u u + M_v v + M_w w + M_p p + M_q q + M_r r \quad (2.18)$$

$$b_3 = N_u u + N_v v + N_w w + N_p p + N_q q + N_r r \quad (2.19)$$

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

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

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

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

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

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

Gaya dan momen dari arus laut ($\boldsymbol{\tau}_E^{cu}$)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dengan 3 asumsi diatas, maka pemodelan USV menjadi sebagai berikut

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

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

Dengan,

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

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

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

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

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

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

$$D = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & N_v & N_r \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

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

$$\begin{bmatrix} 0 \\ Y_{|v|v}|v| \\ N_{|v|v}|v| + N_{|r|v}|r| \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

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

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

Dimana,

- η : Vektor posisi dan orientasi pada kerangka acuan bumi
- v : Vektor kecepatan translasi dan kecepatan sudut pada kerangka acuan badan kapal
- $J(\eta)$: Matrik transformasi
- M : Penjumlahan matrik massa rigid body dan massa tambahan

- $C(v)$: Penjumlahan matriks centripetal dan coriolis dari rigid body dan hidrodinamik
 D : Matrik damper linier
 $D_n(v)$: Matrik damper nonlinier
 τ : Matrik gaya dan momen yang bekerja USV Trimaran
 τ_E : Vektor gaya dan momen dari induksi arus laut, ombak dan angin

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

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

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

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

Persamaan diatas dapat ditulis sebagai berikut

$$f1 = A(1)vr - A(2)u - A(3)|u|u + A(4)\tau_u \quad (2.42)$$

$$f2 = A(5)ur - A(6)v - A(7)|v|v - A(8)|r|v - A(9)|v|r \quad (2.43)$$

$$f3 = -A(10)|v|v - A(11)|r|v - A(12)|v|r - A(13)|r|r - A(14)r + A(15)\tau_r + A(16)uv \quad (2.44)$$

2.3 Linierisasi Umpan Balik Loop Tertutup

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x) u \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (2.45)$$

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

$$\dot{x} = f(x) + g(x) u + Ax - Ax + Bv - Bv \quad (2.46)$$

di mana v adalah nilai masukan baru. Selanjutnya (2.46) dapat disusun ulang menjadi (2.47)

$$\dot{x} = Ax + Bv + f(x) + g(x) u + -Ax + -Bv \quad (2.47)$$

Persamaan (2.47) terdapat komponen *non-linear* yang ingin dibuat menjadi persamaan linear dan *decoupled*, maka persamaan tersebut dipaksa bernilai nol sehingga menjadi sebagai berikut

$$f(x) + g(x)u - Ax - Bv = 0 \quad (2.48)$$

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

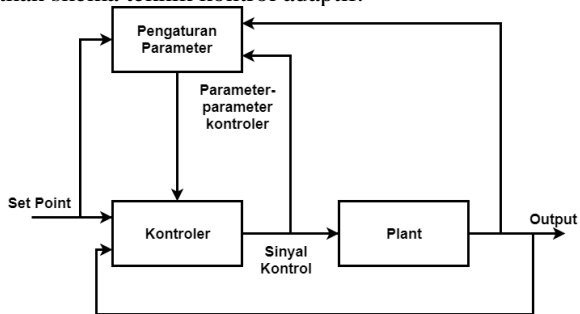
Persamaan (2.48) baru untuk input v adalah

$$u = g(x)^{-1}(Ax + Bv - f(x)) \quad (2.49)$$

Diagram *feedback linearization* dibuat dengan mengikuti *plant* sistem dengan masukan λ adalah referensi untuk sudut orientasi, kemudian matriks Q merupakan konstanta dari input sistem yaitu defleksi pada *sway*, *surge*, dan *rudder*. Kemudian terdapat vektor P yaitu adalah parameter-parameter *non-linear* dari sistem.

2.4 Sistem Pengaturan Adaptif

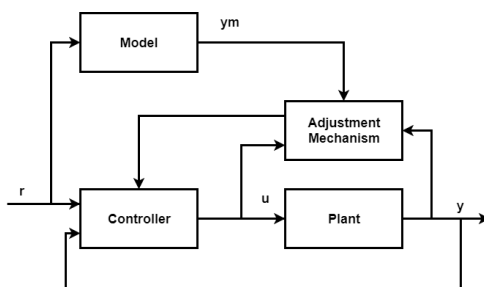
Definisi dari sistem kontrol adaptif adalah sistem kontrol dimana parameternya dapat diatur dan juga memiliki mekanisme untuk mengatur parameter tersebut, sehingga permasalahan sistem kontrol adaptif adalah bagaimana mendapatkan metode pengaturan kontroler ketika karakteristik proses dan lingkungan tidak diketahui atau berubah. Untuk skema teknik kontrol adaptif sendiri mempunyai skema yang berbeda dengan skema teknik kontrol pada umumnya. Pada Gambar 2.1 diperlihatkan skema teknik kontrol adaptif.



Gambar 2.1 Diagram Blok Sistem Pengaturan Adaptif

Loop pertama pada Gambar 2.1 adalah loop umpan balik normal antara *output* proses dengan kontroler sedangkan loop kedua adalah loop yang digunakan untuk melakukan mekanisme pengaturan parameter kontroler. Pada loop kedua ini dilakukan proses untuk update parameter – parameter kontroler maupun parameter *plant* sesuai dengan skema adaptif yg digunakan. Kelebihan dari teknik kontrol adaptif adalah terletak pada adanya estimasi dari *plant* sehingga untuk mendapatkan kontroler yang baik diperlukan suatu persamaan untuk memodelkan *plant* dengan akurat. Persamaan untuk memodelkan *plant* bisa didapat dengan menggunakan hukum – hukum fisik sehingga *plant* akan dapat dimodelkan sebagai persamaan dengan berbagai macam parameter. Tetapi, pada umumnya parameter – parameter atau nilai yang akurat parameter dari *plant* tidak diketahui. Dengan mengidentifikasi atau mengestimasi parameter – parameter tersebut baik secara on-line ataupun off-line, lalu secara eksplisit mengubah parameter – parameter tersebut pada kontroler, maka performansi sistem yang lebih baik dapat dicapai. Terdapat beberapa tipe sistem pengaturan adaptif yaitu *model reference adaptive control*, *gain scheduling*, dan *self tuning regulators*.

MRAC merupakan salah satu skema kendali adaptif dimana performansi keluaran sistem mengikuti performansi keluaran model referensinya. Parameter kontroler diatur melalui mekanisme pengaturan yang didasarkan pada *error* yang merupakan selisih antara keluaran *plant* dengan keluaran model referensi. Diagram blok dari skema MRAC diperlihatkan pada Gambar 2.2.

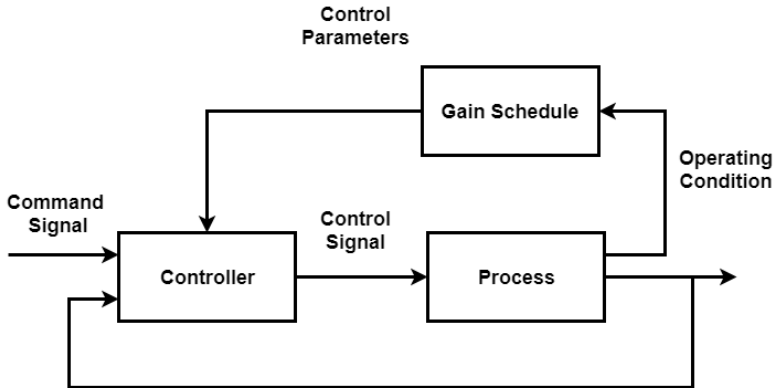


Gambar 2.2 Diagram Blok Model MRAC

Dari Gambar 2.2 dapat dilihat bahwa skema sistem MRAC terdapat dua loop, dimana loop pengaturan parameter ditempatkan paralel dengan loop sistem umpan balik dan algoritma adaptasi menggunakan sinyal

$error\ e = y - y_m$. Pengaturan dilakukan dengan meminimalkan sinyal *error*, sehingga keluaran sistem (y) sesuai dengan keluaran model referensinya (y_m). Mekanisme pengaturan pada MRAC terhadap parameternya dapat dilakukan dengan beberapa metode di antaranya dengan teori kestabilan Lyapunov.

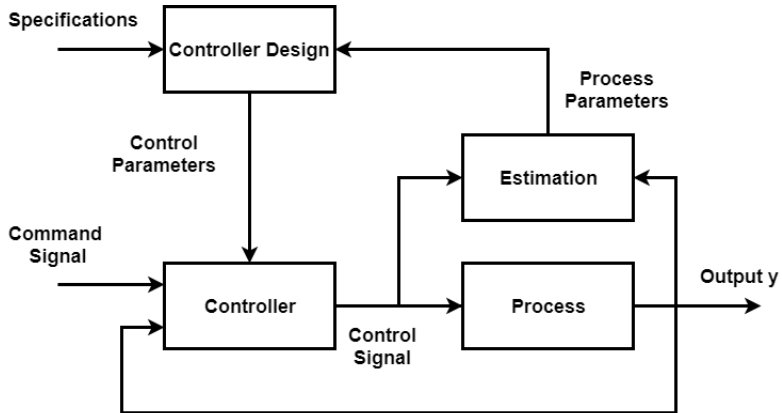
Gain scheduling adalah sebuah metode kontrol dimana besar parameter kontrol yang digunakan adalah berdasarkan titik kerja atau kondisi operasi yang dihadapi. Agar setiap saat kontroler mengetahui kondisi proses, maka dalam skema kontrol ini diperlukan pengukuran variabel tambahan yang secara teknik digunakan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



Gambar 2.3 Diagram Blok *Gain Scheduling*

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

yang telah dihitung pada blok sebelumnya. Sehingga sistem dapat dikatakan sebagai otomatisasi proses modeling (*estimation*) dan desain. Yang mana model dari proses dan desain kontrol diperbaharui setiap saat.

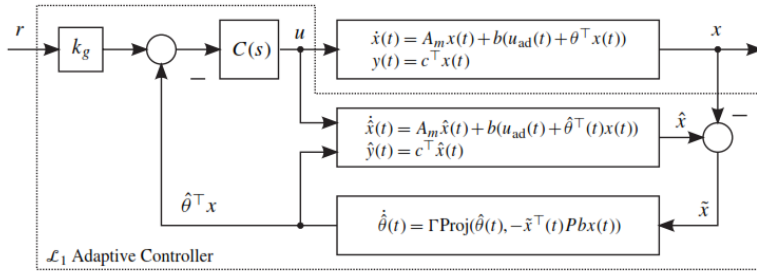


Gambar 2.4 Diagram Blok *Self-Tuning Regulators*

Estimator pada blok merepresentasikan proses estimasi parameter secara langsung dengan menggunakan metode RLS. Blok kontroler desain merepresentasikan penyelesaian langsung untuk desain problem dari parameter yang telah diidentifikasi sebelumnya untuk menghasilkan parameter kontroler terbaru sesuai kondisi objek pada saat itu. Dan terakhir pada blok kontroler adalah untuk menghitung aksi kontrol yang akan diberikan kepada objek dengan parameter kontroler yang telah dihitung pada blok sebelumnya. Sehingga sistem dapat dikatakan sebagai otomatisasi proses modeling (*estimation*) dan design. Yang mana model dari proses dan desain kontrol diperbaharui setiap saat

2.5 Kontroler L1 Adaptif

Kontrol L1 adaptif merupakan pengembangan dan modifikasi dari kontrol adaptif MRAC (*Model Reference Adaptive Control*). Di dalam arsitektur kontroler L1 adaptif, struktur referensi model dari MRAC diubah menjadi *state predictor*. Modifikasi ini tidak akan merusak dinamika sistem bahkan berhasil mengatasi gangguan sepenuhnya dalam proses adaptasi yang cepat karena penambahan *Low Pass Filter* (LPF) pada bagian arsitektur kontrol. Sistem yang digunakan dalam desain kontrol L1 adaptif ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram Blok Kontroler L1 Adaptif

Pada arsitektur L1 adaptif ini akan dijelaskan pokok bagian dari kontroler L1 adaptif meliputi *control law*, *state predictor*, dan *adaptation law*.

2.5.1 Control Law

Kontroler pada L1 adaptif ditunjukkan Gambar 2.5 diperoleh dengan melewati hasil adaptasi $\hat{\theta}^T x(s)$ dan sinyal input $k_g r(s)$ pada LPF sehingga frekuensi tinggi karena akumulasi gangguan dapat teredam.

$$u(s) = C(s)(-\hat{\theta}^T x(s) + k_g r(s)) \quad (2.50)$$

$$k_g = \frac{1}{c^T (sI - A_m)^{-1} b} \quad (2.51)$$

Tidak ada metode pasti untuk menentukan nilai LPF. Nilai LPF ditentukan dengan menggunakan metode trial and *error* sehingga nilai LPF menjadi sebagai berikut

$$C(s) = \frac{\omega_c}{1 + \omega_c s} \quad (2.52)$$

Dimana ω_c adalah frekuensi cut off kontroler. Dikarenakan bentuk persamaan filter orde 1 terpasang seri oleh sistem, maka *time constant* filter tidak boleh lebih lambat daripada *state predictor* dan *plant*. Oleh karena itu penentuan ω_c minimal 2 kali lebih besar dari *time constant* sistem terlambat.

2.5.2 State Predictor

State predictor pada kontrol L1 adaptif merupakan sebuah sistem yang diinginkan berupa state space sistem yang dirancang harus ideal dan

nantinya dapat digunakan sebagai model referensi yang didekati oleh *plant* hingga *error* terkecil. *State predictor* akan menjaga respon *plant* agar kokoh terhadap gangguan.

Dalam merancang performansi yang diinginkan digunakanlah persamaan berikut

$$\dot{\hat{x}}(t) = A_m \hat{x}(t) + b(u(t) + \hat{\theta}^T x(s)) \quad (2.54)$$

$$\hat{y}(t) = c^T \hat{x}(t) + du(t) \quad (2.55)$$

Kelebihan penggunaan *state predictor* adalah kemampuan sistem adaptif untuk melewati LPF sehingga beberapa gangguan dengan frekuensi tinggi dapat teredam dengan estimasi parameter $\hat{\theta}^T$ yang tidak diketahui dimana parameter tersebut dihasilkan dari adaptation law.

2.5.3 Adaptation Law

Adaptation law seperti yang ditunjukkan persamaan (2.56) memperkirakan parameter $\hat{\theta}^T$ yang tidak diketahui. Nilai ini berasal dari penurunan *error* fungsi lyapunov seperti yang dijelaskan pada fungsi berikut

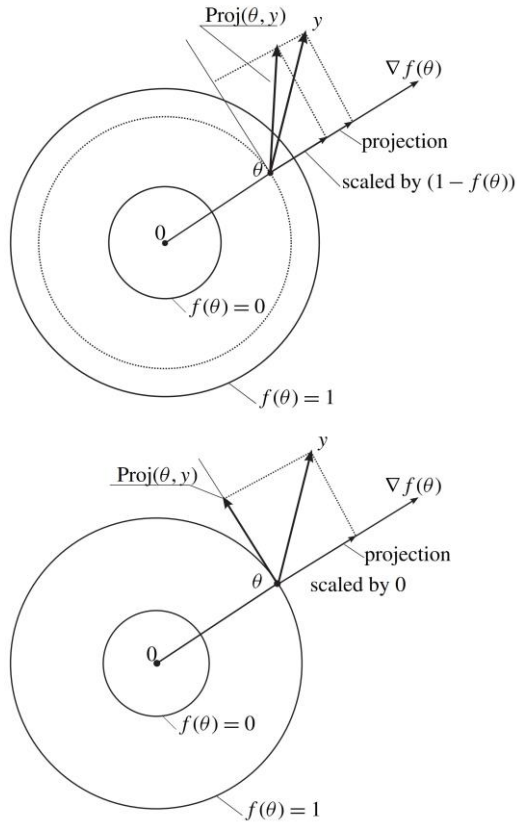
$$\dot{\hat{\theta}}(t) = \Gamma \text{Proj}(\hat{\theta}(t), -x(t)\tilde{x}^T(t)Pb) \quad (2.56)$$

$$\tilde{x}^T = \hat{x}(t) - x(t) \quad (2.57)$$

Berdasarkan persamaan (2.56) $\Gamma > 0$ adalah gain adaptasi dan $P = P^T > 0$ adalah Matriks Lyapunov. Penentuan Matriks Lyapunov dicapai dengan menggunakan fungsi Lyapunov dalam persamaan (2.58)

$$A_m^T P + P A_m = -Q \quad (2.58)$$

Algoritma adaptation law mirip dengan adaptation law MRAC dalam persamaan (2.56). Perbedaannya hanya ditemukan pada \tilde{x}^T dimana *error* dihasilkan oleh perbedaan antara *state predictor* dalam persamaan (2.54) dan persamaan (2.55)



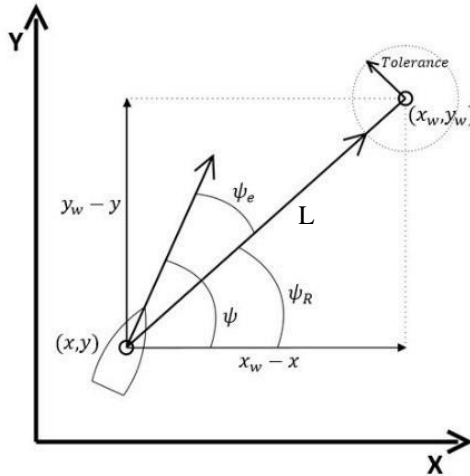
Gambar 2.6 Ilustrasi *Operator Projection*

2.6 Kontrol Navigasi *Waypoint*

Sistem pengaturan *waypoint* bertujuan agar USV mampu melalui *waypoint – waypoint* yang telah ditentukan. Variabel yang dikontrol adalah kecepatan USV dan sudut *heading yaw*.

Asumsikan sebuah kapal memiliki koordinat (x, y) . Dimana x_s dan y_s masing – masing adalah koordinat x dan koordinat y dari kapal. Sebuah *waypoint* diketahui berada pada titik (x_w, y_w) dimana x_w dan y_w masing – masing adalah koordinat x dan koordinat y dari *waypoint*. Dari koordinat posisi kapal dan koordinat *waypoint*, dapat dihitung beda jarak

x dan beda jarak y kapal ke *waypoint*. Beda jarak ini digunakan untuk menentukan sudut *heading yaw* yang diperlukan kapal untuk bias mencapai koordinat *waypoint* tersebut. Persamaan yang menghubungkan antara beda jarak kapal ke *waypoint* dengan sudut *heading yaw* yang diperlukan kapal untuk mencapai *waypoint* dijelaskan pada persamaan (2.59) hingga (2.61) dan diilustrasikan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.7 Ilustrasi *Waypoint Control*

$$\psi_R = \tan^{-1} \left(\frac{y_w - y}{x_w - x} \right) \quad (2.59)$$

$$|L| = \sqrt{(x_w - x)^2 + (y_w - y)^2} \quad (2.60)$$

$$\psi_e = \psi - \psi_R \quad (2.61)$$

Dimana ψ_R adalah sudut *heading yaw* yang diperlukan kapal untuk mencapai *waypoint*. $|L|$ adalah Panjang vector dari kapal ke *waypoint*. Persamaan (2.61) mendefinisikan *error heading* dimana ψ_e adalah selisih sudut *heading* kapal ψ dengan sudut *heading* acuan ψ_R . *tolerance* adalah toleransi *waypoint*. Apabila posisi kapal sudah berada pada radius *tolerance* atau $|L|$ lebih kecil sama dengan *tolerance*, maka *waypoint control* dapat merubah acuan *waypoint* berikutnya atau berhenti jika tidak ada *waypoint* lagi yang harus dilalui.

2.7 Root Mean Square Error (RMSE)

Kontroler pada sebuah *plant* akan memberikan performa yang baik dan mampu mencapai kestabilan dari sikap maupun *tracking waypoint* dari USV. Namun, untuk mencapai parameter sebuah nilai referensi yang dihasilkan dari sebuah USV, maka harus diperhatikan dengan seksama berupa analisa *error*.

Root Mean Square Error atau akar kesalahan kuadrat rata-rata merupakan suatu ukuran kesalahan yang didasarkan pada selisih antara dua buah nilai yang bersesuaian atau dengan kata lain merupakan selisih antara data *output* referensi dengan data *output* sebenarnya untuk menyatakan tingkat kemiripan antara nilai yang diinginkan dengan nilai fakta. Semakin kecil *error* yang dihasilkan maka semakin mendekati dengan sistem sebenarnya. Dengan kata lain RMSE merupakan standar deviasi dari residual (kesalahan prediksi). Residual adalah ukuran seberapa jauh dari titik-titik data garis regresi. Pada umumnya metode ini digunakan dalam analisis regresi untuk memverifikasi hasil eksperimen.

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{in} - Y_{out})^2}{N}} \quad (2.62)$$

di mana,

Y_{in} = Data *ouput* sinyal estimasi

Y_{out} = Data *ouput* sinyal sebenarnya

N = Banyaknya data

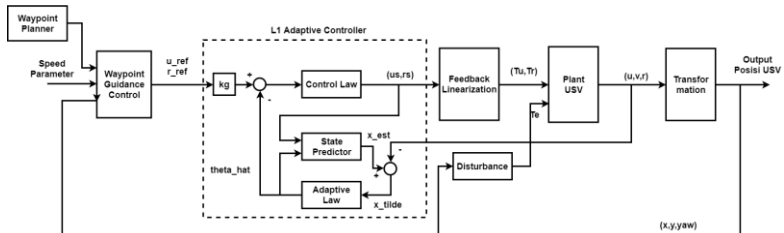
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini dibahas mengenai perancangan sistem kendali *autopilot* dan sistem *guidance* pada *unmanned surface vehicle* (usv) tipe monohull LSS01 menggunakan metode L1 adaptif akan dibagi menjadi lima tahap. Tahap pertama adalah perancangan sistem secara umum dan menyeluruh mengenai kendali *autopilot* dan kendali *guidance*. Tahap kedua merancang model dinamis dari body kapal USV monohull LSS01. Kemudian dilanjutkan tahap ketiga yakni perancangan linierisasi umpan balik dari persamaan dinamika body USV agar dapat dikendalikan. Tahap keempat adalah merancang kontroler L1 adaptif yang terbagi menjadi 3 bagian perancangan yaitu merancang *control law*, *state predictor*, dan *adaptive law*. Tahap terakhir yaitu merancang sistem *guidance* kapal usv untuk mengikuti lintasan *waypoint* yang diinginkan.

3.1 Rancangan Umum Sistem

Sistem yang dibuat merupakan sistem pengaturan pada USV rancangan sistem yang diajukan pada penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu rancangan sistem untuk validasi kontroler dan rancangan sistem untuk *waypoint guidance*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.1.



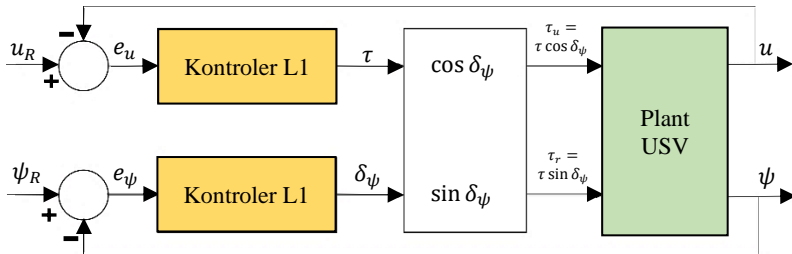
Gambar 3.1 Blok Diagram Rancangan Umum Sistem

Sistem yang dibuat akan menampilkan perubahan posisi USV dalam melewati *waypoint* yang telah ditentukan oleh *waypoint planner* baik dengan adanya gangguan maupun tanpa adanya gangguan dalam bentuk koordinat X dan koordinat Y. Kontroler L1 adaptif akan mengendalikan kecepatan *surge* dan kecepatan *yaw* agar menghasilkan respon kecepatan yang diinginkan dan mempertahankan respon dengan adanya gangguan

yang mengintervensi kecepatan dan sudut kemudi USV. Berikut adalah Simulasi dari perancangan sistem secara keseluruhan

3.1.1 Perancangan Umum Sistem *Autopilot*

Bagian pertama dari perancangan sistem *autopilot* yaitu merancang sistem pengaturan kecepatan translasi searah sumbu x (*surge*), dimana kontroler L1 Adaptif mengatur besarnya gaya motor *thruster* (τ) yang harus dihasilkan agar kecepatan translasi searah sumbu x memiliki spesifikasi performansi yang diinginkan yaitu sistem *zero offset* (*error steady state* = 0) dan *time constant* sistem hasil desain sesuai dengan nilai yang diinginkan

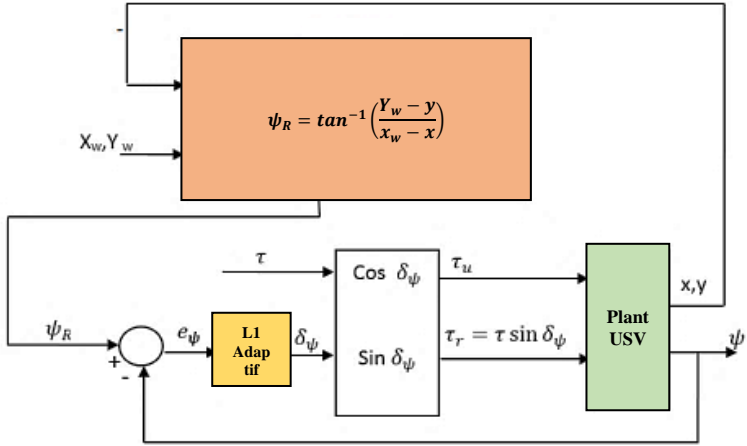


Gambar 3.2 Diagram Blok Rancangan Sistem *Autopilot*

Bagian kedua merupakan sistem pengaturan sudut yaw dimana kontroler L1 adaptif mengatur besarnya sudut blok propeller thruster yang harus dihasilkan agar USV memiliki sudut yaw yang diinginkan *zero offset* (*error steady state* = 0) dan *time constant* sistem hasil desain sesuai dengan nilai yang diinginkan.

3.1.2 Perancangan Umum Sistem *Guidance*

Desain sistem *guidance* yang dibangun merupakan sistem pengaturan *waypoint* (*waypoint control*). Dalam penelitian ini, USV harus bisa melalui *waypoint – waypoint* yang telah ditentukan dari *waypoint planner* tanpa memasukkan parameter waktu sehingga kecepatan USV dibuat konstan. Variabel yang dikontrol dalam sistem *guidance* adalah sudut yaw. Diagram blok desain sistem *guidance* tanpa memasukkan parameter waktu dapat dilihat seperti Gambar 3.3. Dimana x_w dan y_w masing – masing adalah koordinat x dan koordinat y *waypoint*.



Gambar 3.3 Diagram Blok Sistem *Guidance*

3.2 Model Matematika USV Monohull LSS01

Pada tahap ini dilakukan identifikasi model dari USV tipe monohull LSS01. Tahap ini telah dilakukan oleh tim Laboratorium Sistem dan Sibernatika Teknik Elektro ITS.

Model matematis USV didapatkan dari analisa fisis kinematika dan dinamika yang mencari hubungan antara kecepatan dan posisi serta hubungan antar gaya dan momen gaya model tersebut dinyatakan dalam persamaan

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

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

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

Dalam mencari parameter – parameter sistem, model gangguan sementara diabaikan. Bentuk matriks dipisah menjadi persamaan yang berada pada satu sumbu x, y dan ψ . Bentuk polinomial untuk estimasi terhimpun dalam persamaan

$$\dot{u} = A(1)vr - A(2)u - A(3)|u|u + A(4)\tau_u \tag{3.4}$$

$$\dot{v} = A(5)ur - A(6)v - A(7)|v|v - A(8)|r|v - A(9)|v|r \tag{3.5}$$

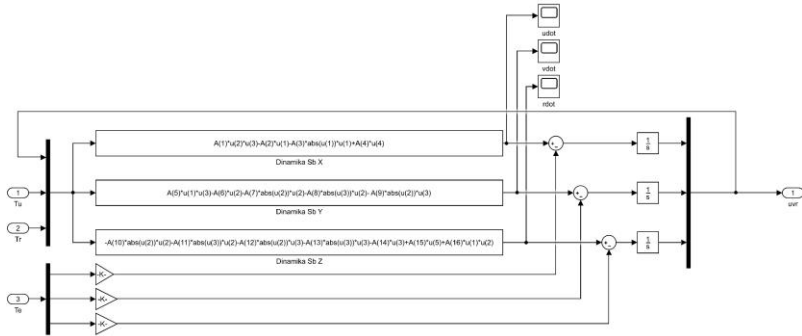
$$\dot{r} = -A(10)|v|v - A(11)r|v| - A(12)|v|r - A(14)r + A(15)\tau_r + A(16)uv \tag{3.6}$$

Selanjutnya dengan menyelesaikan persamaan model (3.4) hingga persamaan (3.6) di atas, maka diperoleh bentuk persamaan ruang atau *state space* sebagai berikut

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -A(2) - A(3)|u| & A(1)r & 0 \\ A(5)r & -A(6) - A(7)|v| - A(8)|r| & -A(9)|v| \\ A(16)v & -A(10)|v| - A(11)|r| & -A(12)|v| - A(14) \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} &+ \begin{bmatrix} A(4) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & A(15) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_u \\ \tau_r \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Dan dengan mengambil keluaran sistem kecepatan translasi *surge*, *sway* dan kecepatan sudut *yaw* maka keluaran sistem adalah

$$\begin{bmatrix} Yu \\ Yv \\ Yr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \quad (3.8)$$



Gambar 3.4 Diagram Simulink *Plant* USV

Untuk melakukan simulasi tentunya memerlukan nilai parameter USV monohull LSS01 dimana data – data parameter disajikan dalam Tabel 3.1

Tabel 3.1 Parameter *Plant* USV Monohull LSS01

Parameter	Nilai	Keterangan
m	8.437 kg	Massa <i>rigid body</i>
x_g	67,3 m	Jarak antara pusat koordinat kapal dengan titik berat kapal searah sumbu x
$X_{\dot{u}}$	-11,26 kg	Massa tambahan kapal searah sumbu x karena percepatan kapal \dot{u}
$Y_{\dot{v}}$	8,136 kg	Massa tambahan kapal searah sumbu y karena percepatan kapal \dot{v}
$N_{\dot{r}}$	14,3 kg	Massa tambahan kapal searah sumbu ψ karena percepatan kapal \dot{r}

X_u	2,57	Konstanta damper linier x karena kecepatan translasi u
Y_v	-0,0022	Konstanta damper linier y karena kecepatan translasi v
N_r	0,0066	Konstanta damper linier ψ karena kecepatan translasi r
I_z	12,38 Kg.m ²	Momen Inersia terhadap $O_b Z_b$
$X_{ u u}$	$1,96 \times 10^3$	Konstanta damper nonlinier x karena kecepatan translasi u
$Y_{ v v}$	$6,86 \times 10^{-4}$	Konstanta damper nonlinier y karena kecepatan translasi v
$Y_{ v r}$	0,0042	Konstanta damper nonlinier y karena kecepatan translasi v dan kecepatan sudut r
$Y_{ r v}$	-0,0033	Konstanta damper nonlinier y karena kecepatan sudut r dan kecepatan translasi v
$N_{ v v}$	$1,82 \times 10^{-4}$	Konstanta damper nonlinier ψ karena kecepatan translasi v
$N_{ r v}$	$4,74 \times 10^{-4}$	Konstanta damper nonlinier ψ karena kecepatan sudut r dan kecepatan translasi v
$N_{ v r}$	$2,52 \times 10^{-4}$	Konstanta damper nonlinier ψ karena kecepatan translasi v dan kecepatan sudut r

$N_{ r r}$	-0,0042	Konstanta damper nonlinier ψ karena kecepatan sudut r
ρ_w	1000 kg/m ³	Massa jenis air laut
L	1,5 m	Panjang kapal
B	1,5 x 0,54 m ²	Luas draft kapal
T	33 cm	Tinggi kapal
ρ_a	1,2 kg/m ³	Massa jenis udara
A_{FW}	0,0324 m ²	Area proyeksi angina dari depan
A_{LW}	0,54 m ²	Area proyeksi angin dari samping
A_{FC}	0,0204 m ²	Area proyeksi air dari depan
A_{LC}	0,4046 m ³	Area proyeksi air dari samping
L_oA	1,5 m	Panjang kapal keseluruhan
$C_{Xwi}(\gamma_w)$	-0,8 cos(γ_w)	Koefisien angin pada sumbu gerak x
$C_{Ywi}(\gamma_w)$	-0,9 sin(γ_w)	Koefisien angin paad sumbu gerak y
$C_{Nwi}(\gamma_w)$	-0,18 sin(2 γ_w)	Koefisien angina paad sumbu gerak yaw
$C_{Xcu}(\gamma_w)$	-0,1453 cos(γ_c)	Koefisien arus pada sumbu gerak x
$C_{Ycu}(\gamma_w)$	-0,3712 sin(γ_c)	Koefisien arus pada sumbu gerak y
$C_{Ncu}(\gamma_w)$	-0,1036 sin(2 γ_c)	Koefisien arus pada sumbu gerak yaw
$C_{Xwa}(\gamma_w)$	-0,028244 cos(2 γ_{wa})	Koefisien ombak pada sumbu gerak x
$C_{Ywa}(\gamma_w)$	-0,08374 sin(2 γ_{wa})	Koefisien ombak pada sumbu gerak y
$C_{Nwa}(\gamma_w)$	-0,02094 sin(2 γ_{wa})	Koefisien ombak pada sumbu gerak yaw

Denga mengabaikan *roll*, *pitch*, dan *heave*. Gaya – gaya pengaruh lingkuga terhadap kapal hanya bekerja pada sumbu *surge*, *sway*, dan *yaw*. Vektor gaya pengaruh lingkungan didefinisikan sebagai berikut

$$\boldsymbol{\tau}_E = \begin{bmatrix} \tau_{uE} \\ \tau_{vE} \\ \tau_{rE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{uE}^{cu} + \tau_{uE}^{wa} + \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_x(\gamma_w) A_{FW} \\ \tau_{vE}^{cu} + \tau_{vE}^{wa} + \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_y(\gamma_{wa}) A_{LW} \\ \tau_{rE}^{cu} + \tau_{rE}^{wa} + \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_N(\gamma_{wa}) A_{LW} L_{OA} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Model gangguan eksternal berkerja pada sumbu *surge*, *sway* dan *yaw* dijelaskan pada persamaan. Gaya –gaya yang disebabkan oleh pengaruh arus dimisalkan sama dengan pengaruh angin, namun kepadatan jenis udara ρ_a digantikan dengan kepadatan jenis air ρ_w . Luas proyeksi permukaan kapal yang semula berada di atas air dirubah menjadi luasan pryeksi permukaan kapal dibawah air. Dan kecepatan angin V_w diubah menjadi V_c . Model matematis gangguan arus terhadap kapal dijelaskan pada Persamaan (3.10).

$$\boldsymbol{\tau}_E^{cu} = \frac{1}{2} \rho_w V_c^2 \begin{bmatrix} C_x(\gamma_c) A_{Fc} \\ C_y(\gamma_c) A_{Lc} \\ C_N(\gamma_c) A_{Lw} L_{OA} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

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

Besarnya gaya dan momen dari induksi ombak diambil dari Persamaan (3.11) kemudian dimodifikasi untuk memasukkan komponen gelombang sinusoidal menjadi seperti Persamaan (3.10).

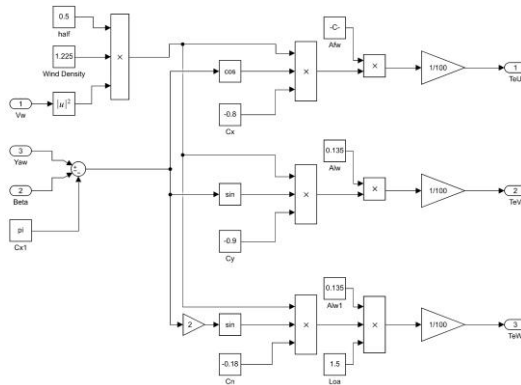
$$\boldsymbol{\tau}_E^{wa} = \frac{1}{2} \rho_w (A_{wa})^2 \sin(\omega t + \theta) \begin{bmatrix} C_x(\gamma_{wa}) A_{Fc} \\ C_y(\gamma_{wa}) A_{Lc} \\ C_N(\gamma_{wa}) A_{Lw} L_{OA} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Dimana A_{wa} adalah amplitudo ombak, ρ_w adalah kerapatan air, ω adalah frekuensi ombak, θ adalah sudut fasa ombak, A_{Fc} adalah area proyeksi dari depan yang terendam air, A_{Lc} area proyeksi dari samping

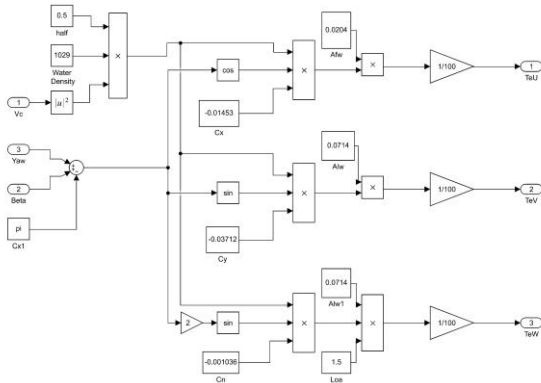
yang terendam air, L_{OA} adalah panjang keseluruhan dari kapal, dan γ_{wa} adalah sudut relatif ombak yang menghempas kapal.

Dengan menggabungkan Persamaan (3.9), Persamaan (3.10) dan Persamaan (3.11), didapatkan didapatkan model pengaruh lingkungan seperti pada Persamaan (3.11). Gambar 3.5, Gambar 3.6, dan Gambar 3.7 masing-masing menunjukkan diagram blok gangguan angin, arus, dan, ombak dengan parameter sesuai dengan Tabel 3.1

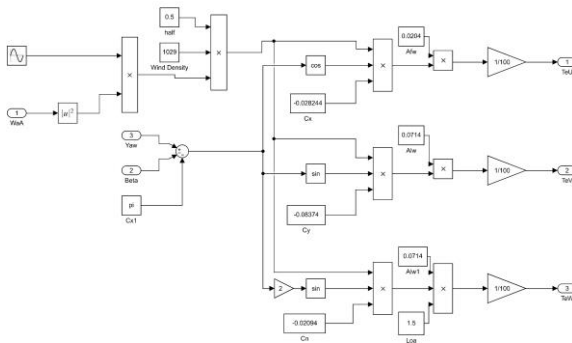
$$\tau_E = \begin{bmatrix} \tau_{uE} \\ \tau_{vE} \\ \tau_{rE} \end{bmatrix} = \tau_E^{cu} + \tau_E^{wa} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_x(\gamma_w) A_F W \\ \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_y(\gamma_{wa}) A_L W \\ \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_N(\gamma_{wa}) A_{LW} L_{OA} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$



Gambar 3.5 Diagram Simulink Gangguan Angin



Gambar 3.6 Diagram Simulink Gangguan Arus



Gambar 3.7 Diagram Simulink Gangguan Angin

3.3 Perancangan *Feedback Linearization*

Pada subbab ini akan dibahas mengenai perancangan *Feedback Linearization*, yaitu metode kontrol untuk me-linierisasi model *plant* dari USV dengan menghilangkan keterkaitan antar persamaan. Metode ini difokuskan untuk kestabilan pada model dinamika USV yaitu pada pengaturan kecepatan *surge* dan *yaw*. Pada persamaan model matematika

USV pada sub bab 3.2 di atas, terlihat bahwa model matematika tersebut bersifat *non-linear* dan *ter-coupled* di mana terdapat keterkaitan antar persamaan model matematika. Untuk itu dirancang metode kontrol *Feedback Linearization* agar keterkaitan tersebut dapat dihilangkan dengan menambahkan variabel baru.

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

Akan dibuat suatu *state feedback* agar sistem menjadi SISO (*single input single output*) yang terpisah. Pada pengendalian *autopilot* USV, parameter yang dikendalikan adalah kecepatan *surge* pada sumbu x dan kecepatan *yaw* pada sumbu ψ . Sedangkan kecepatan *sway* pada sumbu y diabaikan. Maka didefinisikan terlebih dahulu persamaan *state space* dari percepatan *surge* dan percepatan *yaw* sebagai berikut.

$$\dot{u} = A(1)vr - A(2)u - A(3)|u|u + A(4)\tau_u \quad (3.13)$$

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

Pada sumbu x, dimisalkan percepatan *surge* menjadi bentuk persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \dot{u} = & -\lambda u + \tau_u + A(1)vr - A(2)u - A(3)|u|u + A(4)\tau_u \\ & + \tau_u - \lambda u \end{aligned} \quad (3.15)$$

Pada permisalan diatas terdapat komponen *non-linear* yang ingin dibuat menjadi persamaan linier. Maka sebagian persamaan diberi nilai sama dengan nol untuk menghilangkan keterkaitan antar persamaan.

$$A(1)vr - A(2)u - A(3)|u|u + A(4)\tau_u + \tau_u - \lambda u = 0 \quad (3.16)$$

Sehingga keluaran persamaan yang diinginkan adalah

$$\dot{u} = A(2)u - \lambda u + \tau_u \quad (3.17)$$

Didapatkan persamaan linierisasi baru yang akan dikalikan pada sumbu x sebagai berikut.

$$\tau_u = 1/A(4)(-A(1)vr - A(3)|u|u + \tau_u + \lambda u \quad (3.18)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{r} = & -\lambda r + \tau_r - A(10)|v|v - A(11)|r|v - A(12)|v|r \\ & - A(13)|r|r - A(14)r + A(15)\tau_r \\ & + A(16)uv - \tau_r + \lambda r \end{aligned} \quad (3.19)$$

Pada permasalahan diatas terdapat komponen non-linear yang ingin dibuat menjadi persamaan linear, maka persamaan tersebut dipaksakan bernilai nol sehingga menjadi berikut

$$\begin{aligned} -A(10)|v|v - A(11)|r|v - A(12)|v|r - A(13)|r|r \\ - A(14)r + A(15)\tau_r + A(16)uv - \tau_r \\ + \lambda r = 0 \end{aligned} \quad (3.20)$$

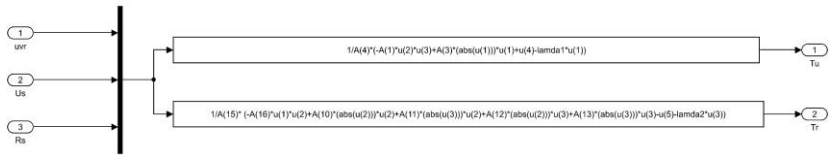
Sehingga keluaran persamaan yang diinginkan adalah

$$\dot{r} = A(14)r - \lambda r + \tau_r \quad (3.21)$$

Didapat persamaan linierisasi baru yang akan dikalikan dengan *plant* adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} \tau_r = 1/A(15)(-A(16)uv + A(10)|v|v + A(11)|r|v \\ + A(12)|v|r + A(13)|r|r - \tau_r + \lambda r \end{aligned} \quad (3.22)$$

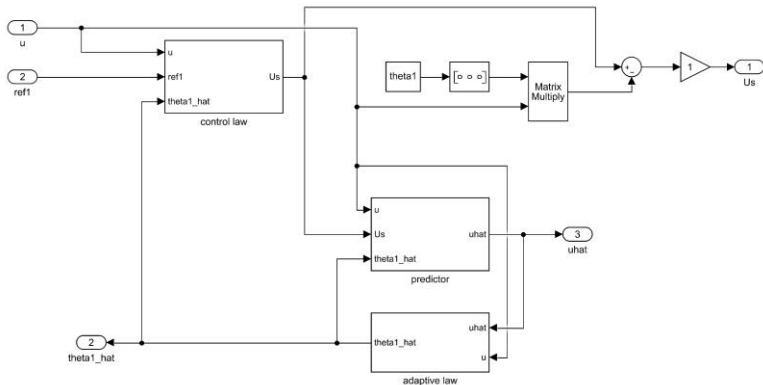
Setelah mendapatkan persamaan τ_r dan τ_u maka selanjutnya adalah membuat *function* sistem untuk melinierisasikan *plant* USV. Berikut blok diagram linierisasi umpan balik



Gambar 3.8 Diagram Simulink *Feedback Linearization*

3.4 Perancangan Kontroler L1 Adaptif

Pada tahap ini akan dibahas mengenai perancangan kontroler L1 adaptif yang meliputi menjadi 3 bagian, yakni perancangan *Control Law*, *State Predictor*, dan *Adaptive Law*. Setelah dilakukan linearisasi dengan metode *Feedback Linearization* sebagaimana telah dijelaskan pada sub bab 3.3, maka selanjutnya dirancang kontroler L1 adaptif yang bertujuan agar keluaran dapat mengikuti referensi *state predictor* yang diinginkan. Fungsi kontroler L1 adaptif juga dapat memenuhi kestabilan ketika adanya gangguan luar berupa angin, ombak, dan arus laut. Berikut blok diagram perancangan kontroler L1 adaptif sebagaimana ditunjukkan pada Bab 2 mengenai kontroler L1 adaptif



Gambar 3.9 Diagram Simulink Kontroler L1 Adaptif

Merujuk pada perancangan *feedback linearization*, untuk mendapatkan keluaran yang diinginkan pada sumbu x (*surge*) dan sumbu y (*sway*) seperti yang ditunjukkan pada persamaan (3.18) dan persamaan (3.22), maka respon *output* dibuat agar memiliki respon yang lebih cepat dibandingkan dengan respon *output plant* dengan pendekatan respon orde

pertama. Respon *output* pada sumbu x (*surge*) dibuat memiliki *time constant* 1.5 detik yang memiliki transfer function sebagai berikut

$$\frac{y_u(s)}{u(s)} = \frac{1}{1.5s + 1} \quad (3.23)$$

Sehingga untuk membuat keluaran seperti persamaan diatas adalah dengan memasukkan nilai parameter λu adalah:

$$\lambda u = \frac{1}{\tau^*} \quad (3.24)$$

$$\lambda u = \frac{1}{1.5} = 0.6667 \quad (3.25)$$

Selanjutnya untuk mendapatkan respon keluaran sumbu ψ (*yaw*) juga dibuat memiliki respon yang lebih cepat dari *plant* dimana karakteristik respon yang diinginkan memiliki *time constant* sebesar 0.5 detik yang memiliki *transfer function* sebagai berikut

$$\frac{y_r(s)}{r(s)} = \frac{1}{0.5s + 1} \quad (3.26)$$

Sama seperti halnya pengaturan respon keluaran sumbu x, untuk mengendalikan kecepatan sudut *yaw* diperlukan nilai λr yang didapatkan dengan persamaan

$$\lambda r = \frac{1}{\tau^*} \quad (3.27)$$

$$\lambda r = \frac{1}{0.5} = 2 \quad (3.28)$$

Pemilihan respon sistem *time constant* sumbu x (*surge*) sebesar 1.5 dan sumbu ψ (*yaw*) sebesar 0.5 lebih cepat dari respon *plant* USV adalah apabila respon *plant* lebih cepat maka akan terjadi ketidakstabilan pada manuver USV. Sedangkan dengan respon *plant* yang lebih lambat, maka kontroler L1 adaptif akan bisa menyesuaikan respon keluaran agar mengikuti referensi. *Error* didapatkan dari selisih antara *output plant* dengan *output state predictor* yang selanjutnya akan menjadi masukan bagi kontroler L1 adaptif akan diatur dengan mengubah gain kontroler k_g

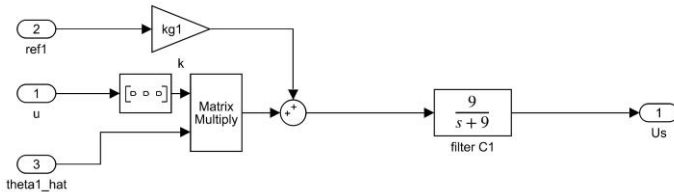
pada blok *control law* dan gain adaptif Γ pada blok *adaptation law* untuk mengatur kecepatan adaptasi kontroler.

3.4.1 Perancangan *Control Law*

Pada dasarnya bagian blok diagram *control law* pada L1 adaptif merupakan komponen robust yang terpisah dari komponen adaptif law sebagai perkembangan dari kontroler MRAC. Fungsi pemisahan ini bertujuan untuk mengurangi osilasi pada saat terjadi adaptasi yang cepat. Pada bagian ini dirancang sebuah *control law* dimana didalamnya merupakan *low pass filter* orde satu. Dalam perancangan ini, penentuan filter *cut-off low pass filter* (ω_c) dilakukan berdasarkan metode *trial and error* pada saat sistem dijalankan. Jadi, nilai LPF yang dipilih adalah

$$C(s) = \frac{9}{s + 9} \quad (3.29)$$

Berikut blok diagram *control law*



Gambar 3.10 Diagram Simulink *Control Law*

Respon sistem dikehendaki memiliki *error steady state* nol, maka dirancang nilai gain k_g sesuai persamaan 3.30 adalah sebagai berikut

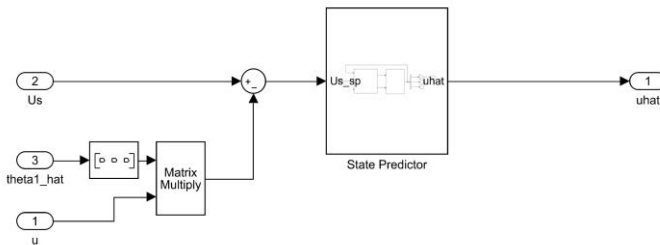
$$k_g(u, r) = \frac{1}{c^T(sI - A_m)^{-1}b} + \lambda(u, r) \quad (3.30)$$

Didapatkan nilai gain k_g untuk sumbu x (*surge*) adalah 0.7972 dan untuk sumbu ψ (*yaw*) adalah 2.7005. Blok *control law* akan mengevaluasi nilai estimasi parameter kontroler ($\hat{\theta}$) yang diperoleh dari *state predictor*.

3.4.2 Perancangan *State Predictor*

State Predictor pada sistem kontrol L1 adaptif merupakan sebuah sistem yang menjadi referensi respon keluaran yang diinginkan. Sistem yang dirancang pada *state predictor* merupakan sistem ideal yang akan diikuti *plant* pada sampai *error* terkecil. Bentuk *State predictor* adalah persamaan *state space*.

Berdasarkan teori pada sub bab 2.5.2 bahwa untuk merancang *state predictor*, nilai A_m , b , dan c adalah sama dengan parameter *plant*. Perbedaannya terletak pada variabel *input*, *output*, dan θ *state predictor* berupa nilai estimasi. Berikut blok diagram *state predictor*

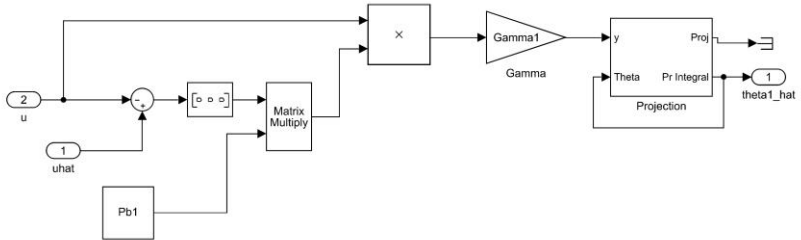


Gambar 3.11 Diagram Simulink *State Predictor*

Keluaran dari *state predictor* berupa estimasi parameter kontroler ($\hat{\theta}$) yang merubah perilaku kontroler sehingga *plant* akan beradaptasi untuk mendekati respon *state predictor* yang ideal. Karakteristik respon keluaran yang diinginkan berupa respon orde satu, tanpa *overshoot*, *zero offset*, *settling time* ($\pm 5\%$) dan memiliki *time constant* 1.5 detik untuk sumbu x (*surge*) dan *time constant* 0.5 detik pada sumbu ψ (*yaw*).

3.4.3 Perancangan *Adaptive Law*

Pada bagian ini dibagi menjadi dua tahap yakni menentukan gain adaptasi (Γ) dengan 3 macam kecepatan adaptasi yang berbeda - beda yaitu $\Gamma = 10, 100, \text{ dan } 1000$. Keluaran dari respon kemudian akan dibandingkan. Nilai P didapatkan dari penyelesaian Lyapunov dimana $A_m^T P + P A_m = -Q$. Berikut blok diagram *adaptive law*



Gambar 3.12 Diagram Simulink *Adaptive Law*

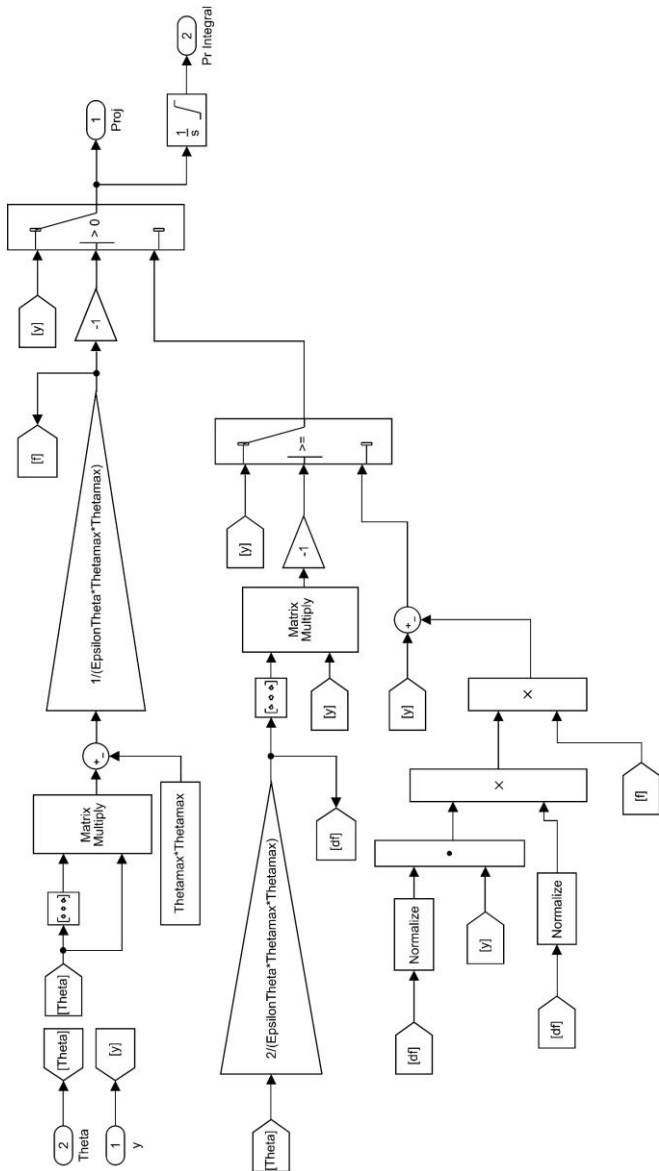
Selanjutnya adalah merancang *Operator Projection* dimana fungsinya adalah untuk mencegah penyimpangan parameter dari skema adaptasi. *Operator Projection* akan memilih skema adaptasi berdasarkan parameter kontroler (θ) terhadap keluaran *adaptive law*. Dimana terdapat 3 kasus dari fungsi θ adalah

$$Proj(\theta, y) \triangleq \begin{cases} y & \text{if } f(\theta) < 0 \\ y & \text{if } f(\theta) \geq 0 \text{ and } \nabla f^T y \leq 0 \\ y - \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \left\langle \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|}, y \right\rangle f(\theta) & \text{if } f(\theta) \geq 0 \text{ and } \nabla f^T y > 0 \end{cases} \quad (3.31)$$

Dimana $f(\theta)$ merupakan fungsi convex dan $\nabla f(\theta)$ adalah vector gradien dari fungsi yang mengevaluasi θ .

$$f(\theta) \triangleq \frac{(\epsilon_\theta + 1)\theta^T \theta - \theta_{max}^2}{\epsilon_\theta \theta_{max}^2} \quad (3.32)$$

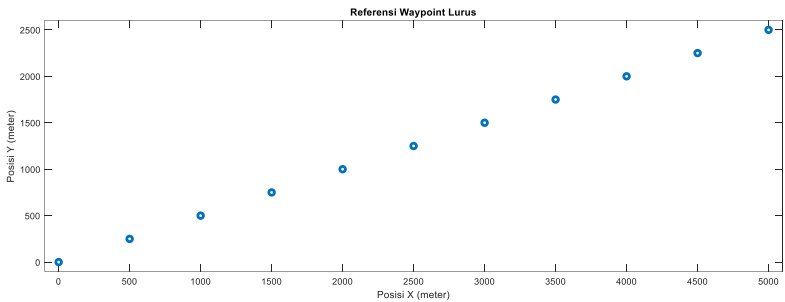
Dari persamaan diatas didapatkan perancangan *Operator Projection* seperti blok diagram berikut



Gambar 3.13 Diagram Simulink Projection Operator

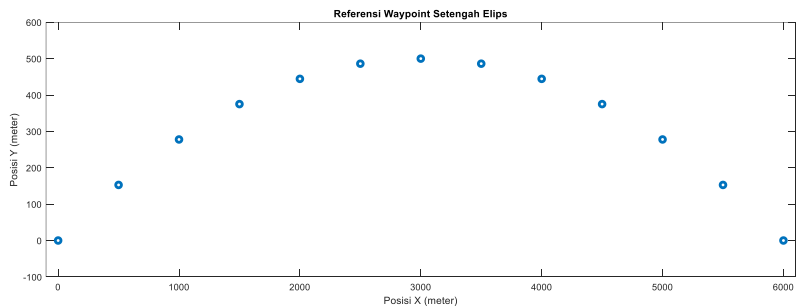
3.5 Perancangan Navigasi Trayektori *Waypoint*

Tujuan utama dalam penelitian ini adalah menganalisis pergerakan kapal USV dalam melalui *waypoint – waypoint* yang telah ditentukan. Pada sub bab ini, dilakukan perancangan titik – titik *waypoint* yang akan dilewati oleh kapal USV. Penentuan koordinat *waypoint* yang akan digunakan pada penelitian ini digunakan 3 skenario sebagai referensi trayektori kapal USV. Skenario pertama adalah gerak lurus.



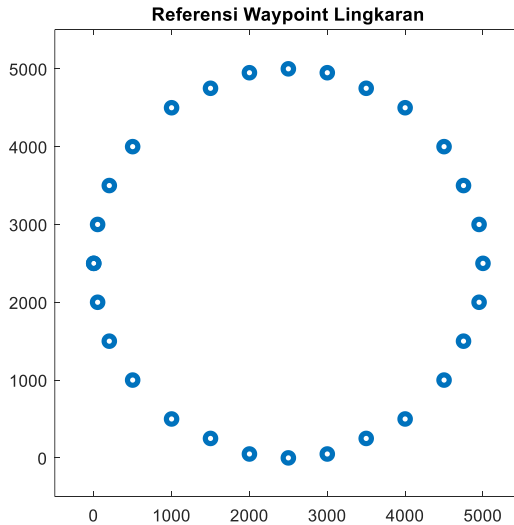
Gambar 3.14 Referensi Trayektori Gerak Lurus

Skenario kedua adalah gerak setengah melingkar bentuk elips.



Gambar 3.15 Referensi Trayektori Gerak Setengah Melingkar

Skenario ketiga adalah gerak setengah lingkaran.



Gambar 3.16 Referensi Trayektori Gerak Lingkaran Penuh

Titik-titik *waypoint* yang akan dilalui oleh USV memiliki toleransi sebesar 5 meter. Apabila USV telah berada di radius toleransi, maka *waypoint navigation* akan merubah acuan titik *waypoint* ke *waypoint* selanjutnya. Dan apabila tidak ada lagi *waypoint* yang dituju maka simulasi akan berhenti secara otomatis.

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISIS

4.1 Gambaran Umum Pengujian Sistem

Sebelum melakukan Simulasi USV, komponen simulasi yang telah dirancang sebelumnya harus dilakukan validasi atau pengujian terlebih dahulu. Tahapan pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Pengujian Model Matematika USV
Pengujian model ini dilakukan dengan memberi *input* untuk masing-masing elemen *input* yaitu kecepatan *surge* dan kecepatan *rudder* dengan nilai tertentu dan melihat keluaran USV tanpa tambahan kontroler.
2. Pengujian Sistem *Autopilot* dengan Kontroler L1 Adaptif
Selanjutnya ditambahkan kontroler L1 adaptif dengan nilai referensi yang telah ditentukan sebelumnya dan melihat respon keluaran dari USV tersebut.
3. Pengujian *Waypoint Planner*
Pada pengujian ini dilakukan simulasi terhadap trayektori atau lintasan yang sudah dibuat terlebih dahulu dalam m-file MATLAB, kemudian hasil *waypoint* ini akan menjadi masukan bagi kontroler L1 Adaptif.
4. Pengujian Sistem *Guidance*
Setelah dilakukan validasi terhadap seluruh parameter yang dibutuhkan maka dilakukan simulasi untuk sistem *guidance*. Pada simulasi ini akan dianalisis pergerakan USV dalam melewati *waypoint* yang ditentukan. Tahapan dalam pengujian pada bagian ini dibagi menjadi dua, yaitu pengujian sistem *guidance* tanpa adanya gangguan dan pengujian sistem *guidance* dengan adanya gangguan.

4.2 Pengujian Model Matematika USV

Pada sub bab ini akan dijelaskan hasil pengujian sistem USV dengan 3 derajat kebebasan tanpa adanya kontroler. Hal ini dilakukan untuk mempermudah dalam merencanakan kontroler serta membandingkan bagaimana hasil sebelum dan sesudah dikontrol.

Pada pengujian mode matematika USV secara *open loop*, pada *input plant* USV diberikan referensi berupa kecepatan searah sumbu x dan kecepatan sudut sumbu ψ untuk melihat respon keluaran dari USV.

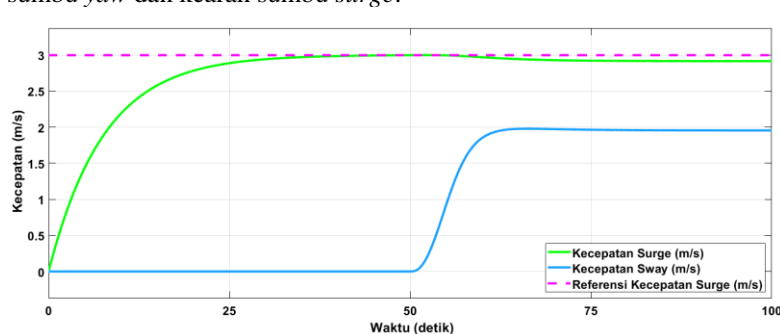
Skenario yang dijalankan mula – mula *plant* USV pada sumbu x (*surge*) diberikan *input* referensi gaya dorong sebesar 7.7 Newton. Kemudian kemudi USV dibuat lurus hingga 50 detik pertama, lalu dibelokkan sebesar 0.3 radian atau 17.18 derajat pada saat detik ke 51 hingga waktu simulasi berakhir di detik 150.

Berikut tabel data hasil pengujian respon *open loop plant* kecepatan USV pada sumbu x (*surge*), y (*sway*) dan ψ (*yaw*):

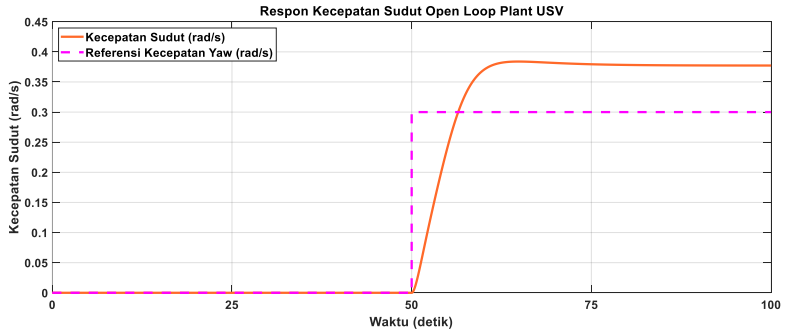
Tabel 4.1 Data Respon Pengujian *Open Loop Plant* USV

State	τ respon (detik)	t_s (detik)	Error Steady State	Overshoot
<i>Surge</i>	7,665	$\pm 23,03$	$\pm 0,085$	0 %
<i>Yaw</i>	4,89	$\pm 14,75$	$\pm 0,0773$	1,75%

Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 menunjukkan respon kecepatan *plant* USV *open loop* pada sumbu x (*surge*), sumbu y (*sway*), dan sumbu ψ (*yaw*). Diperoleh respon kecepatan translasi sumbu x mencapai nilai *settling time* saat detik ke 23,93 dari 3 m/s. Respon sumbu ψ (*yaw*) pada pengujian *open loop* USV diperoleh respon orde 2 karena mengalami *overshoot* sebesar 0.0066 rad/s atau 1,75% dari nilai steady state. Respon sudut *heading* juga mengalami *error steady state* sebesar 0.0773 rad/s atau 0.378 derajat. Pada saat detik ke 55 seiring dibelokkannya kemudi USV dengan kecepatan sudut 0.3773 rad/s terjadi penurunan kecepatan translasi searah gerak *surge* sebesar 0.085 m/s dikarenakan posisi USV tidak lurus lagi. Akibatnya terjadi perpecahan vektor gaya dorong ke arah sumbu *yaw* dan kearah sumbu *surge*.

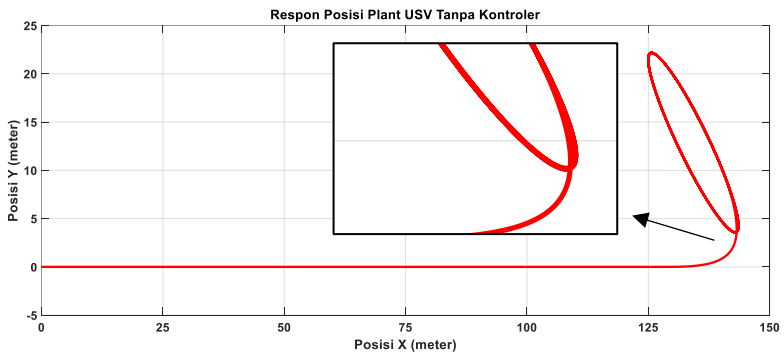


Gambar 4.1 Respon Kecepatan Translasi *Open Loop Plant* USV



Gambar 4.2 Respon Kecepatan Sudut Pengujian *Open Loop Plant* USV

Gambar 4.3 menunjukkan pergerakan posisi USV dari titik awal koordinat (0,0) membentuk garis lurus kemudian membentuk lintasan oval. Dapat dilihat bahwa pergerakan kapal USV pada saat berbelok dan membentuk lintasan oval. Karena terjadinya perpecahan vektor gaya dorong, terjadi pergeseran sudut belok USV yang menyebabkan posisi belokan USV untuk yang kedua kalinya berbeda dari lintasan awal.

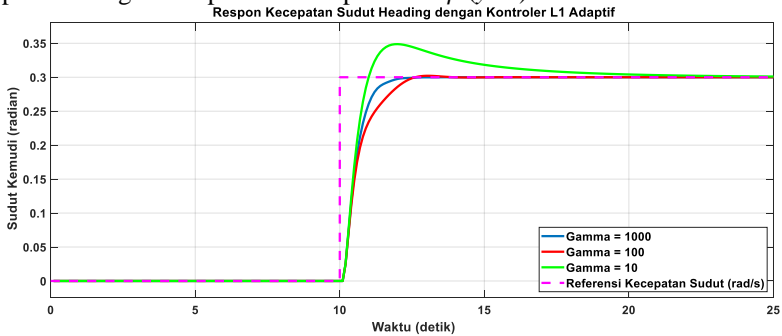


Gambar 4.3 Respon Posisi Pengujian *Open Loop Plant* USV

4.3 Pengujian Sistem *Autopilot* USV dengan Kontroler L1 Adaptif

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai pengujian sistem *autopilot* USV dengan menggunakan kontroler L1 Adaptif (validasi kontroler) yang berfungsi untuk membuat USV dapat dikendalikan untuk mengikuti respon referensi dan kriteria respon yang diberikan dengan nilai tertentu.

Dalam perancangan kontroler L1 adaptif pada sub bab 3.4 dijelaskan mengenai perancangan *adaptive law* yang mana terdapat 3 skenario. Yakni dengan membandingkan hasil pengujian dengan 3 gain adaptasi yang berbeda. Berikut hasil pengujian kontroler L1 adaptif dengan perbedaan gain adaptasi terhadap sumbu ψ (*yaw*)



Gambar 4.4 Respon Kecepatan Sudut *Heading* dengan L1 Adaptif

Pada skenario 1, *rate* adaptif diatur sebesar 10. Hasil simulasi menunjukkan respon sudut *heading* USV berupa respon sistem orde 2 dengan puncak maksimum *overshoot* sebesar 0.348 m/s. Sehingga respon dari simulasi 1 tidak cocok sebagai acuan nilai *rate* adaptif yang akan digunakan untuk mengendalikan manuver kapal USV.

Pada skenario 2, *rate* adaptif diatur sebesar 100. Hasil simulasi menunjukkan respon sudut *heading* USV berupa respon sistem orde 2. Respon sistem sedikit mengalami osilasi pada detik ke 13 sebesar 0.302 m/s dan mengalami perlambatan sampai menuju kondisi *steady state*. Namun simulasi ke 2 ini lebih baik daripada simulasi ke 1.

Pada skenario 3, *rate* adaptif diatur sebesar 1000. Hasil simulasi menunjukkan respon sudut *heading* USV berupa respon sistem orde 1 tanpa *overshoot*. Pada detik ke 14, sudut *heading* menunjukkan nilai 0.5 yang artinya sesuai dengan model *state predictor*.

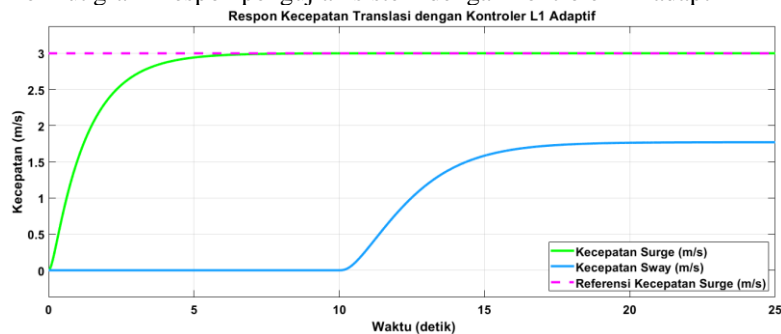
Pada pengujian sistem manuver USV, secara keseluruhan skenario sistem memiliki tidak memiliki *error steady state*. Namun kriteria sistem yang memenuhi desain kontroler yang diinginkan adalah pada skenario ke 3 yakni mengatur gain adaptasi sebesar 1000. Sehingga nilai rate adaptif ini akan diambil untuk menjadi bagian dari perancangan kontroler L1 adaptif.

Tahap selanjutnya dalam pengujian sistem *autopilot* adalah menguji respon kecepatan translasi searah sumbu x (*surge*) dan kecepatan sudut sumbu ψ (*yaw*). Skenario pengujian dilakukan dengan memberi sinyal uji *step* berupa nilai konstan sebesar 3 m/s pada sumbu x (*surge*) dan sinyal uji *step* berupa nilai konstan sebesar 0.3 rad/s atau 17.18 derajat sumbu ψ (*yaw*) pada saat detik 10 hingga simulasi berakhir pada detik ke 40. Kriteria respon keluaran *plant* USV dengan kontroler L1 adaptif yang diharapkan adalah sistem memiliki respon orde satu, tanpa *overshoot*, *zero offset*, *settling time* ($\pm 5\%$) dan memiliki *time constant* 1.5 detik untuk sumbu x dan *time constant* 0.5 detik pada sumbu ψ . Berikut data respon hasil pengujian sistem dengan kontroler L1 adaptif

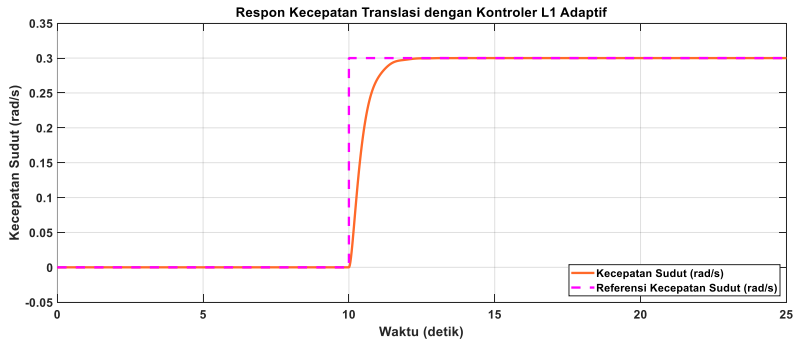
Tabel 4.2 Data Respon Pengujian USV dengan Kontroler L1 Adaptif

State	Referensi Input	τ respon (detik)	t_s (detik)	Error Steady State	Overshoot
Surge	3 m/s	1,356	± 4.591	0	0 %
Yaw	0,3 rad/s	0.49	± 1.48	0	0 %

Berikut grafik respon pengujian sistem dengan kontroler L1 adaptif



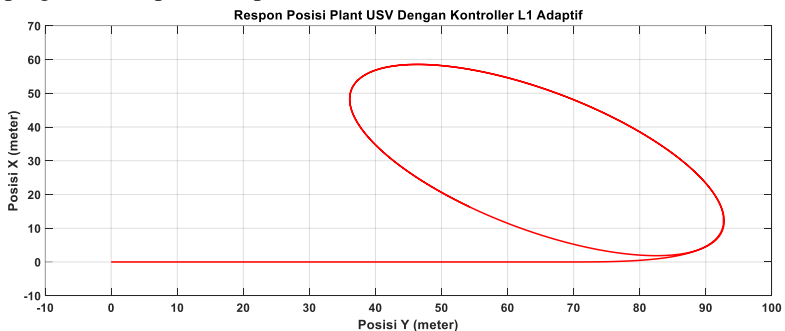
Gambar 4.5 Respon Kecepatan Translasi USV dengan Kontroler L1 Adaptif



Gambar 4.6 Respon Kecepatan Sudut USV dengan Kontroler L1 Adaptif

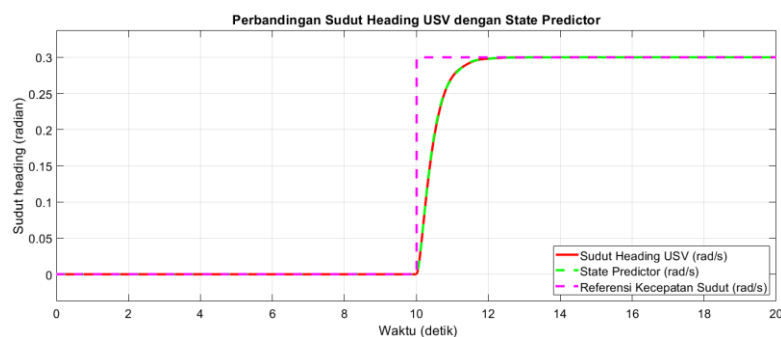
Pada pengujian sebelumnya mengenai *open loop plant* USV tanpa adanya kontroler didapatkan terjadinya perpecahan vektor gaya ke arah sumbu *yaw* dan sumbu *surge*. Pada Gambar 4.5 dan Gambar 4. dapat dilihat bahwa tidak terjadi perpecahan vektor gaya, karena kemampuan kontroler L1 adaptif dalam meng-*adjust* parameter kontroler sehingga dapat mendekati referensi *state predictor*. Dengan adanya kontroler L1 adaptif, respon sistem memiliki *time constant* sebesar 1,356 detik untuk sumbu *x* dan 0.49 detik pada sumbu ψ .

Gambar 4.7 menunjukkan pergerakan posisi USV dari titik awal koordinat (0,0) membentuk garis lurus kemudian membentuk lintasan oval saat koordinat X berada pada 80 meter. Dapat dilihat bahwa pergerakan kapal USV pada saat berbelok dan membentuk lintasan oval.



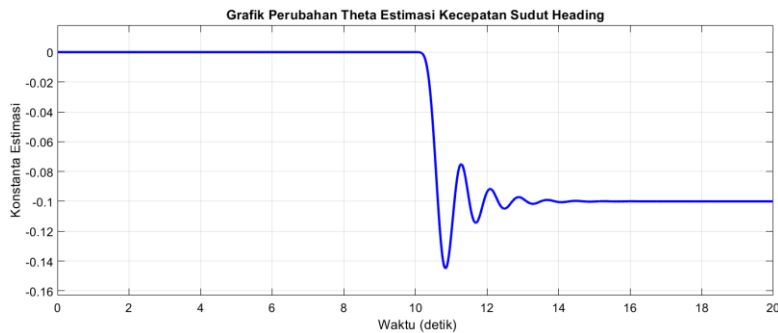
Gambar 4.7 Respon Posisi USV dengan Kontroler L1 Adaptif

Pada sub bab 2.5.2 dijelaskan mengenai *state predictor* merupakan referensi dari pendekatan respon keluaran sistem yang diinginkan, dirancang sebagai sistem yang ideal. Dalam tahapan selanjutnya, dilakukan pengujian sistem USV dengan kontroler L1 adaptif sebagaimana skenario yang telah dibuat untuk membandingkan respon *heading* USV dengan respon *state predictor*. Dimana respon *heading* USV digunakan untuk membelokkan kemudi kapal dalam melakukan manuvernya. Dari hasil pengujian tersebut, diperoleh nilai RMSE antara respon kecepatan sudut heading USV dengan Model Referensi State Predictor adalah $1,4294 \times 10^{-4} \text{ rad/s}$. Berikut grafik perbandingan sudut *heading* USV dengan referensi sistem pada *state predictor* terhadap sumbu ψ (*yaw*)



Gambar 4.8 Perbandingan Respon Kecepatan Sudut *Heading* dengan *State Predictor* menggunakan Kontroler L1 Adaptif

Pada Gambar 4.8 diatas dapat dilihat bahwa terjadi sedikit perbedaan pada saat respon transient antara sudut *heading* USV dan *state predictor*. Namun perbedaan nilai yang sangat kecil tersebut dapat diabaikan karena tidak mempengaruhi sudut kemudi USV dalam melakukan manuver. Fungsi utama dalam sistem kontroler L1 adaptif adalah mengubah parameter kontroler (θ) agar dapat merekayasa sinyal kontrol untuk menyesuaikan diri terhadap perubahan perilaku *plant* USV yang berubah – ubah. Gambar 4.9 merupakan grafik perubahan estimasi parameter kontroler yang beradaptasi dan bergerak dari nilai 0 hingga nilai - 0.1.



Gambar 4.9 Respon Perubahan Theta Estimasi dengan Kontroler L1 Adaptif

4.4 Pengujian Sistem *Guidance* dengan Kontroler L1 Adaptif Tanpa Gangguan

Pada bagian ini, akan diberikan hasil pengujian kontrol *waypoint* USV menggunakan kontroler L1 adaptif. Pengujian dilakukan tanpa melibatkan adanya gangguan eksternal berupa angin, arus, dan ombak. Kontroler L1 adaptif yang digunakan memiliki parameter yang dipilih dari hasil pengujian yang dilakukan pada sub bab 4.2 dan sub bab 4.3. Simulasi dilakukan dalam 3 skenario yang telah dirancang pada sub bab 4. Skenario yang dijalankan adalah kapal USV harus mampu melewati gerak *waypoint* berupa gerak lurus, gerak setengah oval, dan gerak lingkaran penuh.

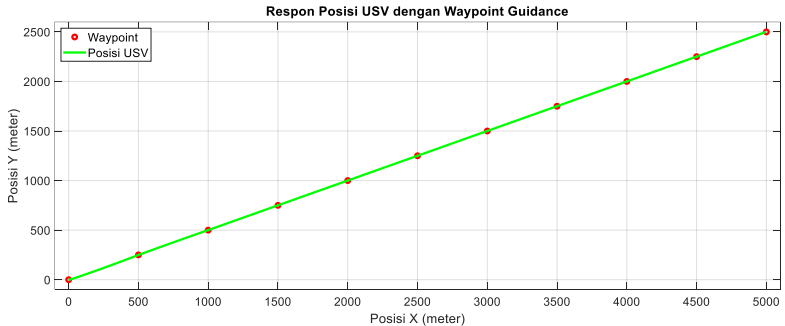
Pengujian sistem *guidance* pada skenario ke 1, USV diuji untuk bergerak lurus melewati 11 titik *waypoint* yang dapat dilihat pada Tabel 4.3. Referensi *input* kecepatan konstan sebesar 3 m/s. Sedangkan set point *heading* USV berubah-ubah sesuai dengan koordinat kapal dan titik *waypoint* yang akan dituju. Batas toleransi *waypoint* yang diatur adalah sebesar 5 m.

Tabel 4.3 Referensi Titik *Waypoint* Gerak Lurus (Skenario 1)

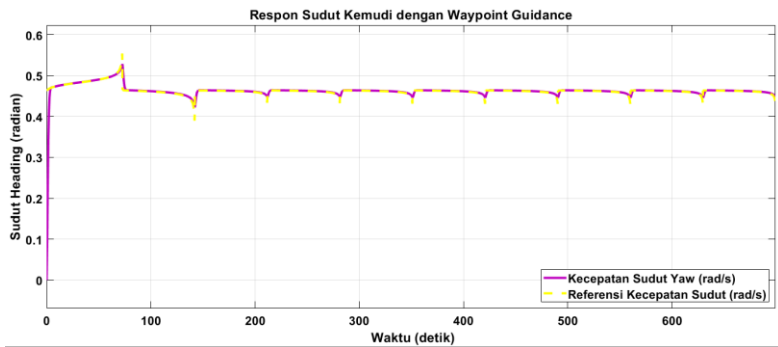
Index	X_w (meter)	Y_w (meter)
1	0	0
2	500	250
3	1000	500
4	1500	750

5	2000	1000
6	2500	1250
7	3000	1500
8	3500	1750
9	4000	2000
10	4500	2250
11	5000	2500

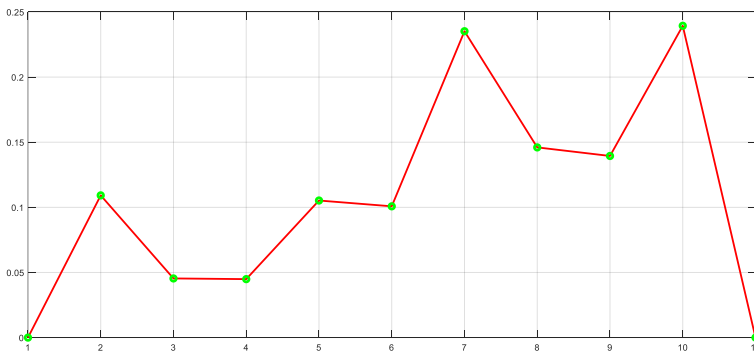
Gambar 4.10 menunjukkan hasil simulasi posisi USV saat melewati *waypoint* yang telah ditentukan dengan menggunakan kontroler L1 adaptif. Sementara Gambar 4.11 menunjukkan hasil simulasi respon sudut *heading* USV dengan sistem *waypoint guidance*. Dari gambar 4.10 dan 4.11 dapat dilihat hasil respon posisi USV pada saat melalui *waypoint* gerak lurus menghasilkan lintasan *tracking* yang halus dan mampu mencapai atau mendekati titik *waypoint* dengan baik. Respon sudut kemudi USV saat melewati *waypoint* juga tidak mengalami osilasi. Sistem *guidance* dengan kontroler L1 adaptif yang bekerja pada skenario 1 memiliki *cross track error* sebesar 0.1060 m.



Gambar 4.10 Respon Posisi USV dengan Kontroler L1 Adaptif Tanpa Gangguan (Skenario 1)



Gambar 4.11 Respon Sudut Kemudi dengan Kontroler L1 Adaptif Tanpa Gangguan (Skenario 1)



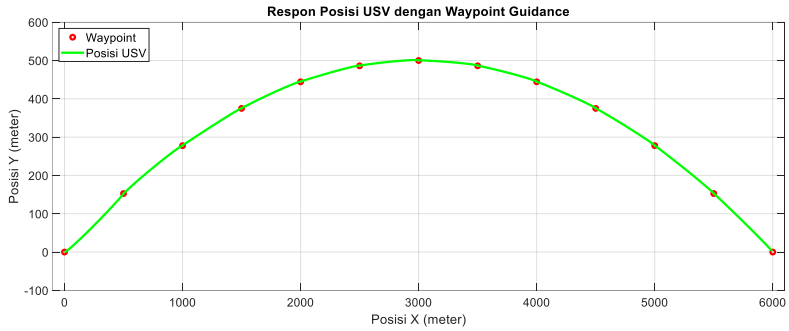
Gambar 4.12 Error Waypoint Sistem Guidance (Skenario 1)

Pengujian sistem *guidance* pada skenario ke 2, USV diuji untuk bergerak melengkung melewati 13 titik *waypoint* yang dapat dilihat pada tabel 4.4. Referensi *input* kecepatan konstan sebesar 3 m/s. Sedangkan set *point heading* USV berubah-ubah sesuai dengan koordinat kapal dan titik *waypoint* yang akan dituju. Batas toleransi *waypoint* yang diatur adalah sebesar 5 m.

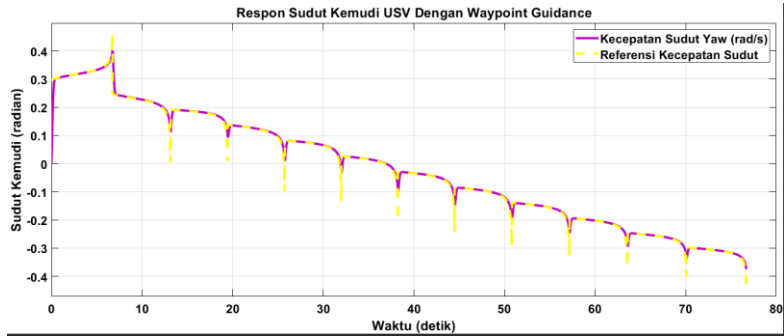
Tabel 4.4 Referensi Titik *Waypoint* untuk Gerak Setengah Melingkar (Skenario 2)

Index	X_w (meter)	Y_w (meter)
1	0	0
2	500	152.78
3	1000	277.78
4	1500	375
5	2000	444.4
6	2500	486.11
7	3000	500
8	3500	486.11
9	4000	444.4
10	4500	375
11	5000	277.78
12	5500	152.78
13	6000	0

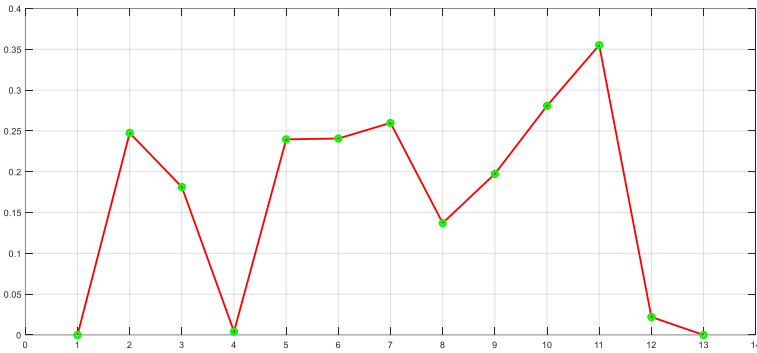
Gambar 4.13 menunjukkan hasil simulasi posisi USV saat melewati *waypoint* yang telah ditentukan dengan menggunakan kontroler L1 adaptif. Sementara Gambar 4.14 menunjukkan hasil simulasi respon sudut *heading* USV dengan sistem *waypoint guidance*. Dari Gambar 4.13 dan 4.14 dapat dilihat hasil respon posisi USV pada saat melalui *waypoint* gerak lurus menghasilkan lintasan *tracking* yang halus cukup dan mampu mencapai atau mendekati titik *waypoint* dengan baik. Respon sudut kemudi USV saat melewati *waypoint* juga tidak mengalami osilasi. Sistem *guidance* dengan kontroler L1 adaptif yang bekerja pada skenario 2 memiliki *cross track error* sebesar 0.1665 meter.



Gambar 4.13 Respon Posisi USV dengan Kontroler L1 Adaptif Tanpa Gangguan (Skenario 2)



Gambar 4.14 Respon Sudut Kemudi dengan Kontroler L1 Adaptif Tanpa Gangguan (Skenario 2)



Gambar 4.15 Error Waypoint Sistem Guidance (Skenario 2)

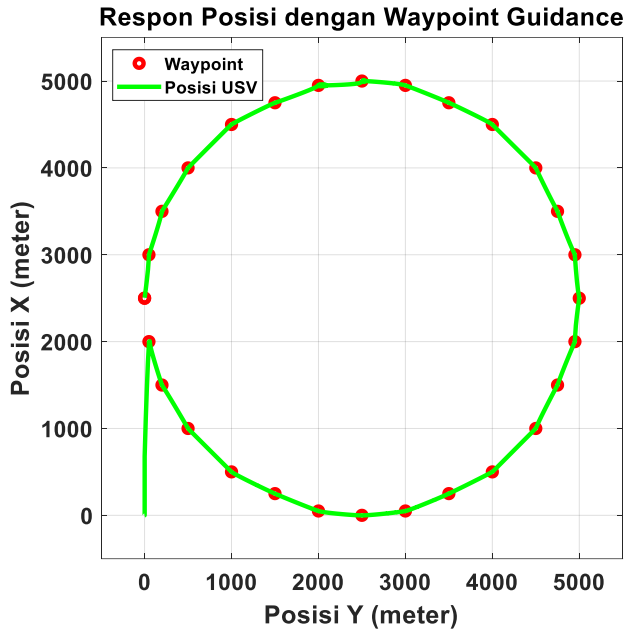
Pengujian sistem *guidance* pada skenario ke 3, USV diuji untuk bergerak melingkar penuh melewati 2 titik *waypoint* yang dapat dilihat pada tabel 4.5. Referensi *input* kecepatan konstan sebesar 3 m/s. Sedangkan set point *heading* USV berubah-ubah sesuai dengan koordinat kapal dan titik *waypoint* yang akan dituju. Batas toleransi *waypoint* yang diatur adalah sebesar 5 m.

Tabel 4.5 Referensi Titik *Waypoint* Melingkar (Skenario 3)

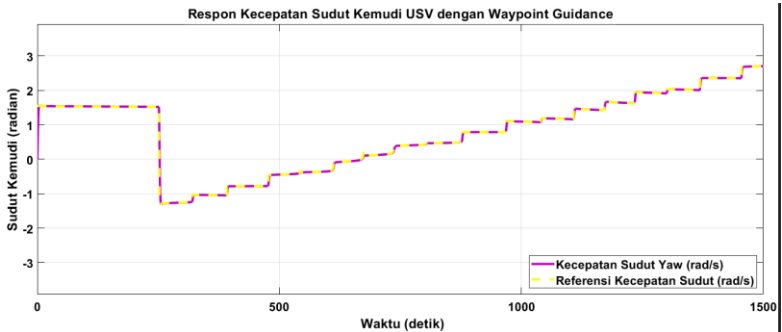
Index	X_w (meter)	Y_w (meter)
1	50	2000
2	200	1500
3	500	1000
4	1000	500
5	1500	250
6	2000	50
7	2500	0
8	3000	50
9	3500	250
10	4000	500

11	4500	1000
12	4750	1500
13	4950	2000
14	5000	2500
15	4950	3000
16	4750	3500
17	4500	4000
18	4000	4500
19	3500	4750
20	3000	4950
21	2500	5000
22	2000	4950
23	1500	4750
24	1000	4500
25	500	4000
26	200	3500
27	50	3000
28	0	2500

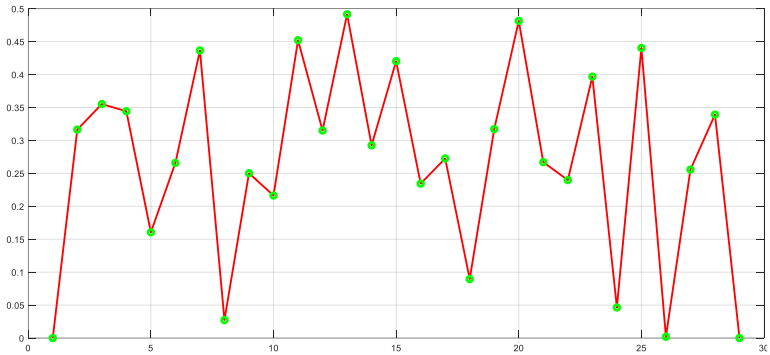
Gambar 4.16 menunjukkan hasil simulasi posisi USV saat melewati *waypoint* yang telah ditentukan dengan menggunakan kontroler L1 adaptif. Sementara Gambar 4.17 menunjukkan hasil simulasi respon sudut *heading* USV dengan sistem *waypoint guidance*. Dari Gambar 4.16 dan 4.17 dapat dilihat hasil respon posisi USV pada saat melalui *waypoint* gerak lurus menghasilkan lintasan *tracking* yang halus dan mampu mencapai atau mendekati titik *waypoint* dengan baik. Respon sudut kemudi USV saat melewati *waypoint* tidak mengalami osilasi. Sistem *guidance* dengan kontroler L1 adaptif yang bekerja pada skenario 3 memiliki *cross track error* sebesar 0.2665 m.



Gambar 4.16 Respon Posisi USV dengan Kontroler L1 Adaptif Tanpa Gangguan (Skenario 3)



Gambar 4.17 Respon Sudut Kemudi dengan Kontroler L1 Adaptif Tanpa Gangguan (Skenario 3)



Gambar 4.18 *Error Waypoint Sistem Guidance* (Skenario 3)

4.5 Pengujian Sistem *Guidance* dengan Kontroler L1 Adaptif Dengan Gangguan

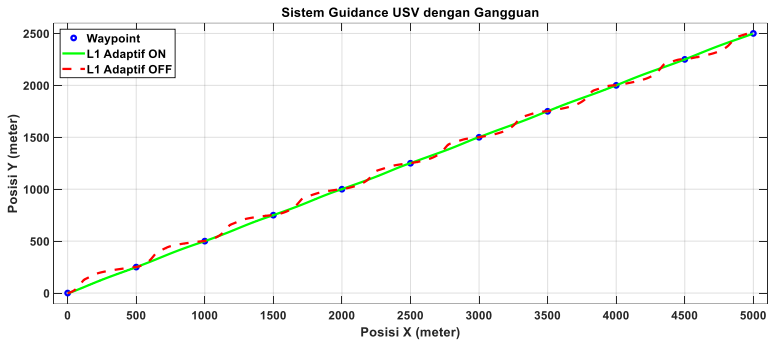
Pada bagian ini, akan diberikan hasil pengujian kontrol *waypoint* USV menggunakan kontroler L1 adaptif. Pengujian dilakukan dengan melibatkan adanya gangguan eksternal berupa angin, arus, dan ombak. Kontroler L1 adaptif yang digunakan memiliki parameter yang dipilih dari hasil pengujian yang dilakukan pada sub bab 4.2 dan sub bab 4.3. Simulasi dilakukan dalam 3 skenario yang telah dirancang pada sub bab 4. Skenario yang dijalankan sama dengan subbab 4.4 yaitu kapal USV harus mampu melewati gerak *waypoint* berupa gerak lurus, gerak setengah oval, dan gerak lingkaran penuh. Besaran dan arah gangguan disajikan pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Parameter Besaran dan Arah Gangguan

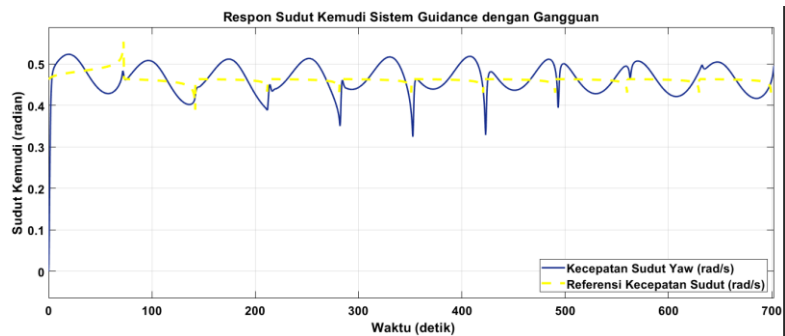
Gangguan	Besaran	Arah
Angin	2 m/s	-0.1 rad
Arus	0.5 m/s	0.1 rad
Ombak	1 m	0.1 rad

Gambar 4.19 menunjukkan hasil simulasi perbandingan respon sistem *guidance* USV dengan adanya gangguan pada saat kontroler L1 adaptif aktif dan kontroler L1 adaptif tidak aktif. Gambar 4.20 menunjukkan hasil respon sudut *heading* USV dengan *waypoint*

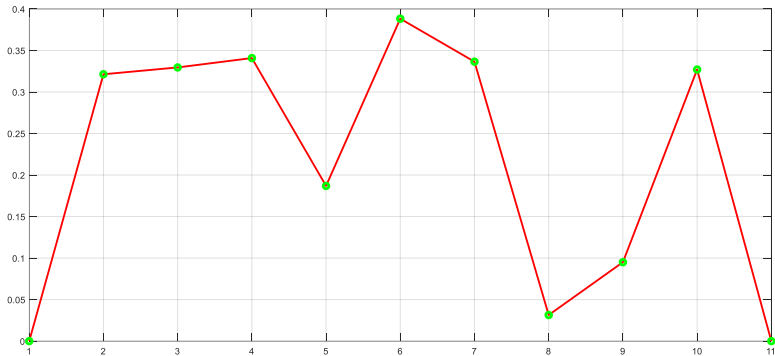
guidance. Pada skenario 1 gerak lurus dapat dilihat bahwa hasil dari USV yang menggunakan kontroler L1 adaptif tetap memberikan hasil yang tidak jauh berbeda dibandingkan hasil simulasi pada subbab 4.4. Kemampuan adaptasi yang cepat dan kemampuan *robust* membuat respon sudut kemudi tidak beresilasi dan menghasilkan perubahan sudut yang tajam dan respon *heading* juga tidak beresilasi. *Waypoint* yang dilewati kapal meskipun diberi gangguan menghasilkan lintasan yang cukup halus dan mampu mendekati titik – titik *waypoint* yang telah ditentukan. *Cross track error* posisi USV terhadap garis yang menghubungkan antara titik – titik *waypoint* dengan kontroler L1 adaptif didapatkan adalah 0,2143 meter.



Gambar 4.19 Respon Posisi USV Menggunakan Kontroler L1 Adaptif dengan Gangguan (Skenario 1)

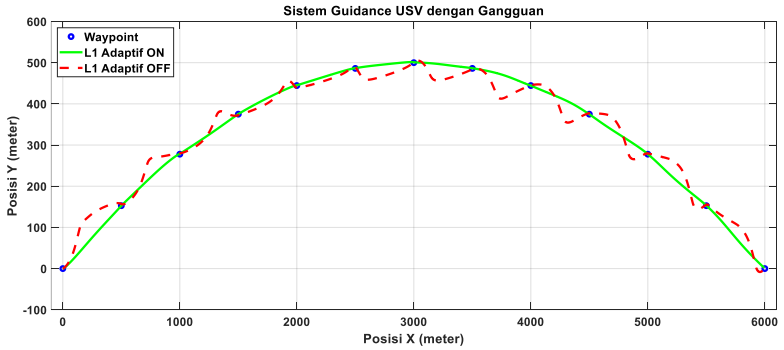


Gambar 4.20 Respon Sudut Kemudi Menggunakan Kontroler L1 Adaptif dengan Gangguan (Skenario 1)

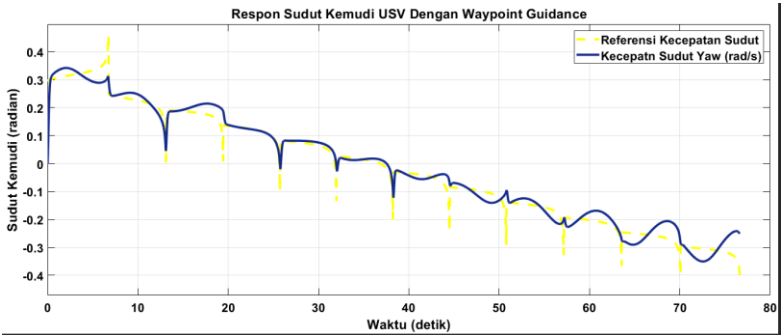


Gambar 4.21 *Error Waypoint System Guidance Dengan Gangguan (Skenario 1)*

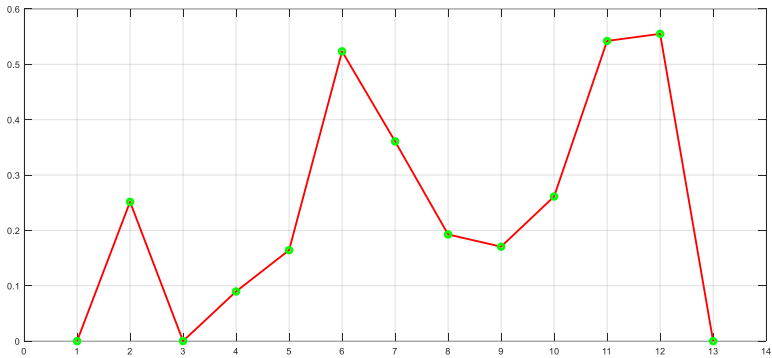
Gambar 4.22 menunjukkan hasil simulasi perbandingan respon sistem *guidance* USV dengan adanya gangguan pada saat kontroler L1 adaptif aktif dan kontroler L1 adaptif tidak aktif. Gambar 4.23 menunjukkan hasil respon sudut *heading* USV dengan *waypoint guidance*. Pada skenario 2 gerak setengah melingkar oval dapat dilihat bahwa hasil dari USV yang menggunakan kontroler L1 adaptif tetap memberikan hasil yang tidak jauh berbeda dibandingkan hasil simulasi pada subbab 4.4. Kemampuan adaptasi yang cepat dan kemampuan *robust* membuat respon sudut kemudi tidak beresilasi dan menghasilkan perubahan sudut yang tajam dan respon *heading* juga tidak beresilasi. *Waypoint* yang dilewati kapal meskipun diberi gangguan menghasilkan lintasan yang cukup halus dan mampu mendekati titik – titik *waypoint* yang telah ditentukan. *Cross track error* posisi USV terhadap garis yang menghubungkan antara titik – titik *waypoint* dengan kontroler L1 adaptif didapatkan adalah 0,2974 meter.



Gambar 4.22 Respon Posisi USV Menggunakan Kontroler L1 Adaptif dengan Gangguan (Skenario 2)

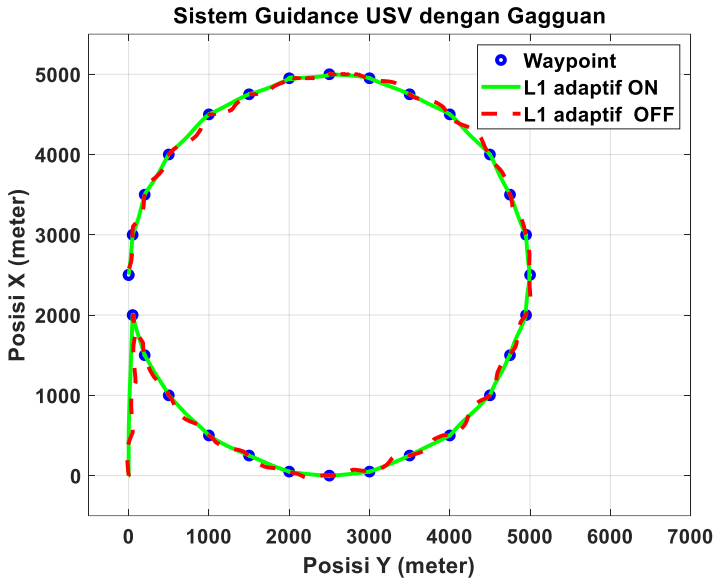


Gambar 4.23 Respon Sudut Kemudi Menggunakan Kontroler L1 Adaptif dengan Gangguan (Skenario 2)

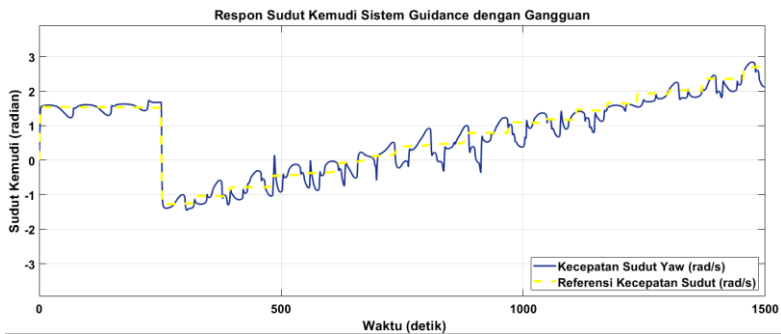


Gambar 4.24 *Error Waypoint* Sistem *Guidance* Dengan Gangguan (Skenario 2)

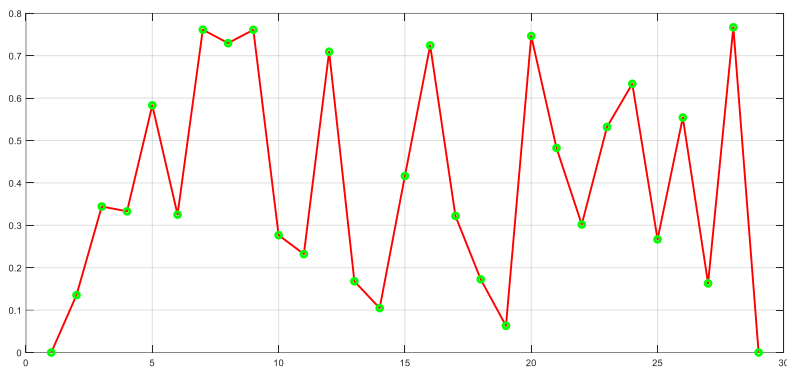
Gambar 4.25 menunjukkan hasil simulasi perbandingan respon sistem *guidance* USV dengan adanya gangguan pada saat kontroler L1 adaptif aktif dan kontroler L1 adaptif tidak aktif. Gambar 4.26 menunjukkan hasil respon sudut *heading* USV dengan *waypoint guidance*. Pada skenario 3 gerak melingkar penuh dapat dilihat bahwa hasil dari USV yang menggunakan kontroler L1 adaptif tetap memberikan hasil yang tidak jauh berbeda dibandingkan hasil simulasi pada subbab 4.4. Kemampuan adaptasi yang cepat dan kemampuan *robust* membuat respon sudut kemudi tidak beresilasi dan menghasilkan perubahan sudut yang tajam dan respon *heading* juga tidak beresilasi. *Waypoint* yang dilewati kapal meskipun diberi gangguan menghasilkan lintasan yang cukup halus dan mampu mendekati titik – titik *waypoint* yang telah ditentukan. *Cross track error* posisi USV terhadap garis yang menghubungkan antara titik – titik *waypoint* dengan kontroler L1 adaptif didapatkan adalah 0.3028 meter.



Gambar 4.25 Respon Posisi USV Menggunakan Kontroler L1 Adaptif dengan Gangguan (Skenario 3)



Gambar 4.26 Respon Sudut Kemudi Menggunakan Kontroler L1 Adaptif dengan Gangguan (Skenario 3)



Gambar 4.27 *Error Waypoint Sistem Guidance Dengan Gangguan (Skenario 3)*

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

4.1. Kesimpulan

Dari penelitian mengenai perancangan sistem pengaturan USV dengan metode L1 adaptif, kontroler L1 adaptif mampu menghasilkan respon kecepatan translasi pada sumbu x (*surge*) dan kecepatan sudut pada sumbu ψ (*yaw*) USV sesuai dengan kriteria desain yang telah ditetapkan yaitu *zero offset steady state*, tanpa *overshoot*, dan $t_s = \pm 5\%$ yaitu 4,591 detik pada sumbu x dan 1,48 detik pada sumbu ψ .

Respon sudut *heading* USV dengan kontroler L1 adaptif terhadap respon model referensi *state predictor* memiliki RMSE sebesar $1,4294 \times 10^{-4} \text{ rad/s}$.

Respon posisi USV menggunakan kontroler L1 adaptif saat dipengaruhi gaya dari gangguan eksternal angin, arus, dan ombak menghasilkan pergerakan lintasan *tracking* yang halus cukup dan mampu mencapai atau mendekati titik *waypoint* dengan baik. Hal ini dibuktikan dengan hasil rata - rata *error waypoint* yang kecil.

Pada skenario pertama pergerakan USV menghasilkan *cross track error* sebesar 0,2143 meter RMS. Sedangkan pada skenario kedua pergerakan USV menghasilkan *cross track error* sebesar 0,2974 meter RMS. Dan pada skenario ketiga pergerakan USV menghasilkan *cross track error* sebesar 0,3028 meter RMS

Hasil pengujian *autopilot* dan sistem *guidance* kapal USV Monohull LSS01 menunjukkan bahwa kontroler L1 adaptif mampu mempengaruhi respon USV dan mengatasi adanya gangguan eksternal sehingga USV dapat mengikuti *waypoint* dengan respon yang cepat dan lintasan yang halus.

4.2. Saran

Untuk penelitian selanjutnya, model gangguan eksternal seperti angin, arus, dan ombak dapat dikembangkan dalam bentuk model yang lebih realistis guna mendapatkan parameter sistem yang lebih baik apabila berasal dari data pengukuran purwarupa.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

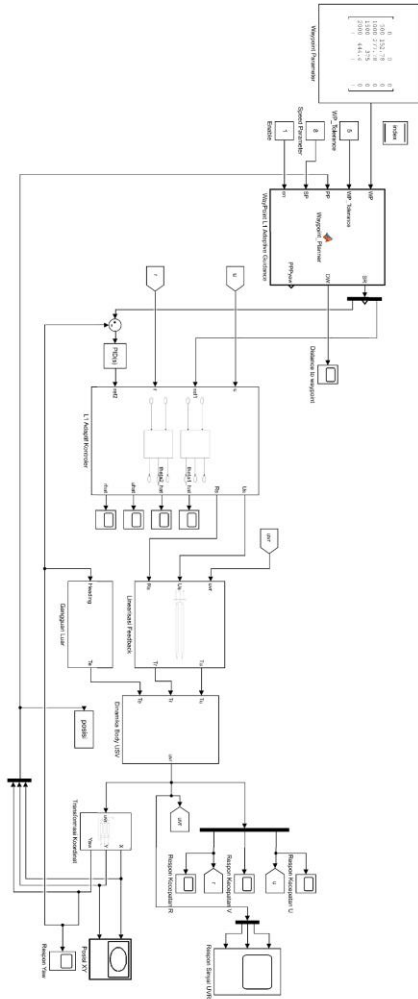
DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Cao, and N. Hovakimyan, **Design and Analysis of a Novel L1 Adaptive Control Architecture with Guaranteed Transient Performance**, IEEE Transactions on Automatic Control, vol.53, No.2, pp. 586-591, 2008
- [2] E. Kharisov, N. Hovakimyan, and K. Astrom, **Comparison of Several Adaptive Controllers According to Their Robustness Metrics**, In Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Toronto, Canada, AIAA-2010-8047, 2010.
- [3] C. Cao, and N. Hovakimyan, “**L1 Adaptive Controller for Systems with Unknown Time-varying Parameters and Disturbances in the Presence of Non-zero Trajectory Initialization Error**”, International Journal of Control, Vol. 81, No. 7, 1147–1161, July 2008
- [4] Farabi E, Muh Alif. 2018. **Perbandingan PID Model Reference Adaptive Control dengan L1 Adaptive Control untuk Kemudi Kapal Tanpa Awak dalam Kontrol waypoint**. Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- [5] N. Hovakimyan and C. Cao, **L1 Adaptive Control Theory: Guaranteed Robustness with Fast Adaptation**. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, to be published in September 2010.
- [6] M. A. Hurban, “**Adaptive Speed Controller for the SeaFox Autonomous Surface Vessel,**” Calhoun, pp. 28-32,2012.
- [7] J. Wang, C. Cao, N. Hovakimyan, R. Hindman, B. Ridgely, **L1 Adaptive Controller for a Missile Longitudinal Autopilot Design**, AIAA-2008-6282, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Honolulu, HI, 2008.
- [8] P. Aguiar, A. Pascoal, I. Kaminer, V. Dobrokhodov, E. Xargay, N. Hovakimyan, C. Cao, R. Ghabeloo, **Time-Coordinated Path Following of Multiple UAVs over Time-Varying Networks using L1 Adaptation**, AIAA-2008-7131, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Honolulu, HI, 2008.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LAMPIRAN

A.1 Blok Diagram All System Simulink MatLab



A.2 Pemrograman *Waypoint Planner* MatLab

```
function [SR, DW, PPPyaw] = Waypoint_Planner(WP,
WP_Tolerance, PP, SP, en)
% function [SR,DW,PPPyaw] =
Waypoint_Planner(WP,WP_Tolerance,PP, SP,en)
global index
%Penjelasan variabel
% Variabel Input:
% PP: Present Position : [x,y]
% WP: Waypoint : [x_target,y_target,Toleransi_waypoint]
% SP: Speed Parameter : [Speed_max,waktu_menuju_target]
% en: Enable : [Enable_bit]
% Variable Output
% SR: Ship Reference : [speed_target,0,yaw_error]
% DW: Distance to waypoint: [length_resultan,length_x,length_y]
% ST: Status : [bit_status]
A=index;
%definisi variabel
%variabel input
% PP
x=PP(1);
y=PP(2);
PPyaw=PP(3);
% WP
% x_target=WP(index+2,1);
% x_target_sebelum=WP(index+1,1);
% y_target=WP(index+2,2);
% y_target_sebelum=WP(index+1,2);
% waktu_menuju_target=WP(index+2,3);
x_target=WP(A+2,1);
x_target_sebelum=WP(A+1,1);
y_target=WP(A+2,2);
y_target_sebelum=WP(A+1,2);
waktu_menuju_target=WP(A+2,3);
% WP_Tolerance
toleransi_waypoint=WP_Tolerance;
% SP
Speed_max=SP;
% en
```

```

Enable_bit=en;

%Transformasi acuan bumi ke acuan kapal
length_x=x_target-x;
length_y=y_target-y;
length_x_sebelum=x_target-x_target_sebelum;
length_y_sebelum=y_target-y_target_sebelum;

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

% mencari yaw target
Yaw_Target=atan2(length_y,length_x);
% if Yaw_Target>pi/2
%   Yaw_Target=pi/2;
% elseif Yaw_Target<-pi/2
%   Yaw_Target=-pi/2;
% end

length_resultan_constant=sqrt(length_x_sebelum^2+length_y_sebelum^2);

% menghitung speed
% kondisi waktu tidak diperhatikan waktu_menuju_target=-1
if waktu_menuju_target===-1
    Speed_Target=Speed_max;
else
% kondisi waktu diperhatikan
    Speed_Target=length_resultan_constant /waktu_menuju_target;
    if Speed_Target>Speed_max
        Speed_Target=Speed_max;
    end
end

% menyatakan status planner
if abs(length_x)<=toleransi_waypoint &&
abs(length_y)<=toleransi_waypoint
    bit_status=1;
    Enable_Bit=0;

```

```

    index=index+1;
    A=index;
else
    bit_status=0;
end

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

%Kondisi Yaw<pi
elseif PPyaw<-pi
    B1=fix(abs(PPyaw)/pi);
    %Kondisi modulo produk ganjil
    if mod(B1,2)==1
        PPyaw=pi-mod(abs(PPyaw),pi);
    end
    %Kondisi modulo produk genap
    if mod(B1,2)==0
        PPyaw=-mod(abs(PPyaw),pi);
    end
end
PPPyaw=PPyaw;

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

```



```

%Kondisi Error<-pi
elseif Error_Yaw<-pi
    Error_Yaw=(pi-PPyaw)-(-pi-Yaw_Target);
end
if abs(Error_Yaw)==pi
    Error_Yaw=pi;
end
% if Error_Yaw>0.1
%     Error_Yaw=0.1;
% elseif Error_Yaw<-0.1
%     Error_Yaw=-0.1;
% end

%menjalankan planner berdasarkan input Enable_bit
if Enable_bit==1
    % menulis Variabel Output
    SR=[Speed_Target 0 Yaw_Target];
    DW=[length_resultan length_x length_y];
    ST=bit_status;
else
    % menulis Variabel Output
    SR=[0 0 0]; %memberhentikan controller kapal
    DW=[length_resultan length_x length_y];
    ST=bit_status;
end

```

A.3 Pemrograman *Control Parameter* MatLab

```

tau1=1.5;
lamda1=1/tau1;
tau2=0.5;
lamda2=1/tau2;
Am1=- [A (2) ];
Am2=- [A (14) ];
b=[1];
c=[1];
theta1=-0.1;
kg1=(-inv(c*inv(Am1)*b))+lamda1;
P1=lyap(Am1',eye(1));
Gamma1=1000;
Pb1=P1*b;

```

```

ref1=3;

theta2=-0.1;
kg2=(-inv(c*inv(Am2)*b))+lamda2;
Gamma2=1000;
P2=lyap(Am2',eye(1));
Pb2=P2*b;
ref2=0.3;

xhat0 = 0;
x0 = 0;

```

A.3 Pemrograman *Root Mean Square Error* MatLab

```

(y_sp - y);      % Errors
(y_sp - y).^2;  % Squared Error
mean((y_sp - y).^2); % Mean Squared Error
RMSE = sqrt(mean((y_sp - y).^2)); % Root Mean
Squared Error

```

RIWAYAT HIDUP



Anang Ma'ruf, lahir di Lamongan pada tanggal 2 Agustus 1996. Putra tunggal dari pasangan ayahanda Nawan dan ibunda Marwati. Setelah menempuh pendidikan formal di SDN Manyar Sabrangan II Surabaya, SMPN 30 Surabaya dan SMAN 20 Surabaya, penulis melanjutkan melanjutkan studi Diploma 3 jurusan Teknik Elektro Computer Control di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dan lulus tahun 2017. Kemudian melanjutkan kuliah Lintas Jalur Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan mengambil Jurusan Teknik Elektro, Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan.

Kontak: anangkormus@gmail.com

[Halaman ini sengaja dikosongkan]