



TUGAS AKHIR - EE 184801

PEMODELAN DINAMIK DAN PENGATURAN *UNMANNED SURFACE VEHICLE*

Fachruddin Ari S.
NRP 07111540000093

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

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



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

PEMODELAN DINAMIK DAN PENGATURAN *UNMANNED SURFACE VEHICLE*

Fachruddin Ari S.
NRP 0711154000093

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

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



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE 184801

***DYNAMIC MODELLING AND CONTROLLING
UNMANNED SURFACE VEHICLE***

Fachruddin Ari S.
NRP 0711154000093

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

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

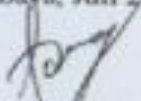
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**PEMODELAN DINAMIK DAN PENGATURAN UNMANNED SURFACE VEHICLE**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

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

Surabaya, Juli 2019



Fachrudin Ari S
0711154000093

**PEMODELAN DINAMIK DAN PENGATURAN
UNMANNED SURFACE VEHICLE**

TUGAS AKHIR


**Diajukan Guna 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. Rudhianto Effendi AK, MT
NIP. 195704241985021001


Nurlita Gamavanti, ST., MT.
NIP. 197812012002122002



PEMODELAN DINAMIK DAN PENGATURAN *UNMANNED SURFACE VEHICLE*

Nama : Fachruddin Ari S.
Dosen : 1. Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT.
2. Nurlita Gamayanti, ST., MT.

ABSTRAK

Unmanned Surface Vehicle atau USV adalah kapal tanpa awak yang bisa bergerak tanpa nahkoda, bergerak akibat gaya dorong yang dihasilkan oleh mesin *thruster* dan dapat berbelok akibat adanya sudut defleksi kemudi. USV memiliki 6 *Degree of Freedom* (derajat kebebasan) yang merupakan sistem *non-linear* yang dapat didekati dengan model *non-linear* 3 derajat kebebasan. Pemodelan dinamik USV bertujuan untuk mendapatkan model dan parameter USV yang nantinya dapat dipergunakan untuk kepentingan penelitian dan penerapan metode pengaturan. Untuk dapat memodelkan USV yang merupakan sistem non-linier, digunakan metode estimasi parameter *non-linear least square* Levenberg-Marquardt. Pengaturan USV bertujuan untuk mengendalikan kecepatan pada sumbu *x* dan kecepatan rotasi pada sumbu *yaw body-frame* sehingga pergerakan USV bisa dikendalikan. Digunakan kontroler *proportional integral* untuk dapat mengendalikan pergerakan USV dan mempercepat respon kecepatan *surge* dan *yaw rate*. Hasil validasi parameter menunjukkan bahwa metode pemodelan dinamik USV menghasilkan parameter yang mendekati parameter USV sebenarnya dengan nilai RMSE 0,0789 pada percepatan sumbu *x*, 0,1742 pada percepatan sumbu *y*, dan 0,3601 pada percepatan rotasi sumbu *yaw*. Hasil pengujian kontroler menunjukkan bahwa kontroler hasil desain dapat mengatur kecepatan sumbu *x* dan kecepatan rotasi sumbu *yaw* dan sesuai dengan spesifikasi *time constant* yang diinginkan yaitu 2 detik untuk kecepatan *surge* dan 0,5 detik untuk kecepatan *yaw* dan menghasilkan nilai 0 untuk *error steady state* kedua kecepatan.

Kata Kunci: USV, Mesin *Thruster*, Kemudi, Pemodelan Dinamik, *Non-Linear Least Square*, Kontroler *Proportional Integral*, RMSE.

Halaman ini sengaja dikosongkan

***DYNAMIC MODELLING AND CONTROLLING
UNMANNED SURFACE VEHICLE***

Name : **Fachruddin Ari S.**

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

ABSTRACT

Unmanned Surface Vehicle or USV is ship that can moving without human to drive it, USV can moving because the thrust force from thruster machine and can turning because the deflection angle of rudder. USV has 6 degree of freedom which are non-linear system that can be approached with 3 degree of freedom non-linear system. The purpose of dynamic modeling of USV is to achieve the models and parameters of real USV that can be used for research interest or being the object of control methods application. Non-linear least square Levenberg-Marquardt method can be used to achieve the estimated parameter of USV which is non-linear system. The purpose of controlling USV are to control the surge velocity and yaw rate in the body-frame of the USV so we can control the movement of the USV. Proportional integral controller can be used to control the velocity and to speed up the response speed of the USV's velocity. Parameters validation results show that the dynamic modeling methods generate the parameters that nearly equal with the true parameters with the RMSE value of 0.0789 in x-axis acceleration, 0.1742 in y-axis acceleration, and 0.3601 in yaw-axis acceleration. The result of controller testing show that the designed controller can adjust the surge velocity and yaw rate and fit the time constant controller design specification, that 2 second for surge velocity and 0.5 second for yaw rate. And the testing show that the response have 0 steady state errors.

Keywords: *USV, Thruster Machine, Rudder, Dynamic Modelling, Non-Linear Least Square, PI Controller, RMSE.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala Puji Syukur ke Hadirat Allah Subhaanahu Wa Ta'ala yang senantiasa memberikan ridha dan inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat serta Salam kepada junjungan kita Nabi Muhammad Shallallahu Alaihi Wasallam serta para sahabat tabi' tabi'in, dengan ilmu pengetahuan yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul "**Pemodelan Dinamik dan Pengaturan *Unmanned Surface Vehicle***".

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

1. Keluarga serta orang tua penulis yang telah memberi dukungan waktu, pembelajaran dan doa kepada penulis.
2. Bapak Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT. dan ibu Nurlita Gamayanti, ST., MT. yang dengan baik dan sabar dalam mengarahkan dan membimbing selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. Teman-teman Sistem Pengaturan 2015 Reguler maupun Lintas Jalur.
4. Kepada seluruh anggota Lab AJ 104, B106, B105, AJ204, dan B405 yang telah mendukung serta kerja samanya dalam proses studi maupun penelitian.
5. Kepada semua pihak, rekan, teman, para guru yang telah membantu penulis selama proses studi.

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

Surabaya, Juli 2019

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xvii
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 Penulisan.....	4
1.7 Relevansi	5
BAB 2 TEORI PENUNJANG.....	7
2.1 <i>Unmanned Surface Vehicle & LSS-01</i>	7
2.2 Model Matematis USV	8
2.3 Pemodelan Mesin Pendorong / <i>Thruster</i>	18
2.3.1 Pemodelan Motor BLDC	18
2.3.2 Pemodelan <i>Propeller</i>	21
2.4 Pemodelan Penggerak Kemudi / <i>Rudder</i>	21
2.4.1 Model Analitis Motor Servo	22
2.4.2 Model Momen Inersia <i>Rudder</i>	23
2.5 <i>Feedback Linearization Decoupler</i>	23
2.6 Metode <i>Non-Linear Least Squares</i>	24
2.7 Metode Levenberg – Marquardt	25
2.8 Root Mean Square Error (RMSE).....	26
2.9 Kontroler <i>Proportional Integral</i> (PI).....	27
2.10 <i>Pixhawk Cube</i>	28
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM.....	29
3.1 Perancangan <i>Hardware</i>	29
3.1.1 <i>Pixhawk Cube</i>	29
3.1.2 Motor BLDC (<i>Brushless DC Motor</i>).....	31
3.1.3 <i>Electronic Speed Controller</i> (ESC).....	33
3.1.4 Motor Servo.....	34

3.1.5 Kemudi / <i>Rudder</i>	34
3.1.6 Propeller.....	35
3.1.7 <i>Joint</i> dan <i>Shaft</i>	36
3.1.8 Remote Control dan Receiver Radiolink.....	36
3.1.9 <i>Body USV</i>	37
3.2 Perancangan Model Dinamika USV	38
3.2.1 Model Dinamika USV.....	38
3.2.2 Model Mesin <i>Thruster</i>	40
3.2.3 Model Penggerak Rudder	42
3.3 Perancangan <i>Feedback Linearization Decoupler</i>	42
3.4 Perancangan Metode Estimasi Parameter.....	45
3.4.1 Metode Estimasi Parameter <i>Body USV</i>	45
3.4.2 Estimasi Parameter Mesin Thruster	46
3.5 Perancangan Eksperimen.....	47
3.5.1 Eksperimen di Darat.....	48
3.5.2 Eksperimen di Air	48
3.6 Perancangan Kontroler PI.....	49
BAB 4 HASIL DAN ANALISA	53
4.1 Gambaran Umum Analisa dan Pengujian Sistem	53
4.2 Analisa Data Hasil Eksperimen	54
4.2.1 Analisa Data Eksperimen Mesin Thruster dan Gerak Lurus	54
4.2.2 Analisa Data Eksperimen Manuever USV	56
4.2.3 Analisa Data Eksperimen Penggerak Rudder	62
4.3 Validasi Dan Koreksi Parameter USV	62
4.3.1 Validasi Parameter <i>Body USV</i>	62
4.3.2 Validasi Parameter Mesin Thrust.....	68
4.4 Pengujian <i>Feedback Linearization Decoupler</i>	69
4.5 Pengujian Kontroler Kecepatan <i>Surge</i> Dan <i>Yaw Rate</i>	73
BAB 5 PENUTUP.....	77
5.1 Kesimpulan	77
5.2 Saran.....	78
DAFTAR PUSTAKA	79
LAMPIRAN.....	81
A.1 Program Matlab untuk Estimasi Parameter Body USV	81
A.2 Program Fungsi Matlab Model Dinamika USV untuk Estimasi Parameter.....	82
A.3 Program Matlab Konversi Data Hasil Eksperimen menjadi Input Validasi Parameter	83
B.1 Diagram Blok <i>Simulink</i> Model Dinamika USV	84

B.2	Diagram Blok <i>Simulink</i> Konversi Sinyal τ_u dan τ_r	84
B.3	Diagram Blok <i>Simulink Feedback Linearization Decoupler</i>	85
B.4	Diagram Blok <i>Simulink</i> Kontroler PI	85
B.5	Diagram Blok Total Pemodelan Dinamik dan Pengaturan USV	86
B.6	Diagram Blok Motor BLDC dari Sumber Referensi.....	86
BIOGRAFI PENULIS		87

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 USV LSS-01	8
Gambar 2.2 Derajat Kebebasan USV Umum	8
Gambar 2.3 <i>Pixhawk Cube / The Cube</i>	28
Gambar 3.1 <i>Pixhawk Cube</i>	30
Gambar 3.2 Modul GPS	31
Gambar 3.3 <i>Receiver Telemetry</i>	31
Gambar 3.4 Motor BLDC.....	32
Gambar 3.5 Mesin Pompa Air Sistem <i>Water Cooling</i> BLDC.....	32
Gambar 3.6 Baterai LiPo 4 Sel (kiri) dan 3 Sel (kanan).....	33
Gambar 3.7 <i>Electronic Speed Controller</i>	34
Gambar 3.8 Motor Servo MG995	34
Gambar 3.9 Kemudi / <i>Rudder</i>	35
Gambar 3.10 <i>Propeller</i>	36
Gambar 3.11 <i>Joint</i> dan <i>Shaft</i>	36
Gambar 3.12 <i>Remote Control</i>	37
Gambar 3.13 <i>Receiver Remote Control</i>	37
Gambar 3.14 Wahana USV.....	38
Gambar 3.15 Diagram Blok Plant Keseluruhan USV	38
Gambar 3.16 Respon Kecepatan Putar Motor BLDC sesuai Parameter Referensi.....	41
Gambar 3.17 Diagram Blok <i>Feedback Linearization Decoupler</i>	43
Gambar 3.18 Diagram Blok Pengaturan Kecepatan <i>Surge</i> dan <i>Yaw Rate</i>	51
Gambar 4.1 Data Kecepatan <i>Surge</i> (Sumbu X).....	56
Gambar 4.2 Data Percepatan Sumbu X	57
Gambar 4.3 Data Kecepatan <i>Sway</i> (Sumbu Y)	57
Gambar 4.4 Data Percepatan Sumbu Y	58
Gambar 4.5 Data Kecepatan Rotasi Sumbu <i>Yaw</i>	58
Gambar 4.6 Data Percepatan Rotasi Sumbu <i>Yaw</i>	59
Gambar 4.7 Data Persen <i>Throttle</i> Mesin <i>Thruster</i>	59
Gambar 4.8 Data Sudut Defleksi <i>Rudder</i>	60
Gambar 4.9 Gaya <i>Thrust</i> yang Dihasilkan Mesin <i>Thruster</i>	60
Gambar 4.10 Momen Gaya akibat Sudut Defleksi <i>Rudder</i>	61

Gambar 4.11 Perbandingan Data Percepatan Sumbu X dan Hasil Simulasi Model	63
Gambar 4.12 Perbandingan Data Percepatan Sumbu Y dan Hasil Simulasi Model	64
Gambar 4.13 Perbandingan Data Percepatan Rotasi Sumbu <i>Yaw</i> dan Hasil Simulasi Model	64
Gambar 4.14 Perbandingan Percepatan Sumbu X setelah Koreksi Parameter	66
Gambar 4.15 Perbandingan Percepatan Sumbu Y setelah Koreksi Parameter	66
Gambar 4.16 Perbandingan Percepatan Rotasi Sumbu <i>Yaw</i> setelah Koreksi Parameter	67
Gambar 4.17 Respon Kecepatan <i>Surge</i> Model USV	68
Gambar 4.18 Respon Kecepatan <i>Surge</i> Model USV setelah Koreksi Parameter	69
Gambar 4.19 Perbandingan Variasi Input u_r terhadap Kecepatan <i>Surge</i>	70
Gambar 4.20 Perbandingan Variasi r_r Input terhadap Kecepatan Rotasi <i>Yaw</i>	71
Gambar 4.21 Perbandingan Respon Kecepatan <i>Surge</i> Model Pendekatan dan Sistem USV yang Dilengkapi <i>Feedback</i>	72
Gambar 4.22 Perbandingan Respon Kecepatan <i>Yaw</i> Model Pendekatan dan Sistem USV yang Dilengkapi <i>Feedback</i>	72
Gambar 4.23 Respon Kecepatan <i>Surge</i> Model USV Terkontrol	74
Gambar 4.24 Respon Kecepatan Rotasi <i>Yaw</i> Model USV Terkontrol	74

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Notasi Derajat Kebebasan USV Umum.....	9
Tabel 2.2 Keterangan Parameter USV	16
Tabel 2.3 Hubungan Input Output <i>Electronic Commutator</i>	20
Tabel 3.1 Parameter Motor BLDC berdasarkan Referensi.....	40
Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen Mesin Thruster	54
Tabel 4.2 Perbandingan Data Sebenarnya dan Hasil Model Pendekatan Kecepatan Putar Motor BLDC	55
Tabel 4.3 Spesifikasi Data Eksperimen Gerak Lurus USV.....	55
Tabel 4.4 Parameter Hasil Estimasi	61
Tabel 4.5 Data Hasil Eksperimen Penggerak <i>Rudder</i>	62
Tabel 4.6 Nilai RMSE antara Data Eksperimen dengan Hasil Simulasi	65
Tabel 4.7 Hasil RMSE Validasi setelah Koreksi Parameter.....	67
Tabel 4.8 Parameter Kontroler PI Kecepatan <i>Surge</i> dan <i>Yaw Rate</i>	73

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

Pada bab ini akan dipaparkan tentang latar belakang penelitian ini, permasalahan yang dibahas, batasan masalah penelitian, tujuan, metodologi, sistematika penulisan serta relevansi penelitian ini terhadap penelitian sejenis atau lebih rumit di masa mendatang.

1.1 Latar Belakang

USV atau *unmanned surface vehicle* adalah wahana kapal tanpa awak yang bisa bergerak secara otomatis sesuai dengan perintah yang diberikan [1]. USV dibedakan berdasarkan bentuk lambung kapalnya, menjadi monohull, katamaran, atau trimaran. USV sendiri digerakkan dengan mengatur mesin pendorong atau *thruster* dan mengatur kemudi atau *rudder*.

Untuk mengendalikan sebuah USV, diperlukan model USV tersebut sebagai bahan acuan dalam merancang kontroler yang sesuai. USV memiliki model dinamik non-linier sehingga diperlukan suatu metode estimasi parameter untuk model non-linier.

Pada saat ini, metode untuk menyelesaikan permasalahan *non-linear least square* sudah banyak ditemukan. Antara lain metode *vector fitting*, metode Gauss-Newton, metode *gradient descent*, dan metode Levenberg-Marquardt. Penelitian terkait yang dilakukan oleh Luc Knockaert mengatakan bahwa metode Levenberg-Marquardt memiliki ketepatan/*accuracy* yang lebih bagus daripada metode *vector fitting* meskipun memerlukan waktu yang lebih lama [2]. Menurut Ananth Ranganathan, metode Levenberg-Marquardt memerlukan waktu yang lebih cepat untuk mendapatkan solusi daripada metode *gradient descent*, dan metode Levenberg-Marquardt berfungsi sangat baik untuk keperluan praktis [3]. Menurut Henri P. Gavin, metode Gauss-Newton memerlukan *initial guess*/tebakan nilai awal dikarenakan metode Gauss-Newton menggunakan asumsi bahwa fungsi yang dioptimalkan adalah *locally quadratic* dan mencari *local minimum* dari fungsi *quadratic* tersebut, sedangkan metode Levenberg-Marquardt tidak memerlukan tebakan nilai awal karena bisa melakukan perpindahan antar *local minimum* pada *global minimum* [4]. Dikarenakan kelebihan dari metode Levenberg-Marquardt yang sudah dipaparkan, pada penelitian ini

digunakanlah metode Levenberg-Marquardt untuk memodelkan model non-linier USV.

Pada penelitian ini, dilakukan pemodelan USV dengan metode identifikasi parameter *Non-Linear Least Square* Levenberg-Marquardt. Setelah didapatkan model akan dilakukan linierisasi model dan perancangan PI kontroler. dan ketika desain PI kontroler sudah didapat akan dilakukan simulasi dan analisa terkait dengan hasil simulasi *unmanned surface vehicle*.

1.2 Permasalahan

Unmanned surface vehicle menggunakan pendekatan 3 *degree of freedom* (derajat kebebasan) untuk navigasi *waypoint*. Untuk mengarahkan USV menuju suatu *waypoint* memerlukan model dari USV, model mesin dan kemudi. Dan diperlukan suatu kontroler untuk mengatur sistem mesin dan kemudi yang digunakan dalam USV.

Model dari USV adalah suatu model non-linear dengan pendekatan 3 derajat kebebasan. Diperlukan metode estimasi yang dapat menemukan parameter-parameter suatu model non-linear dengan menggunakan data input dan output sistem. Selain itu juga diperlukan metode pemodelan mesin, propulsi, dan kemudi agar bisa mendapatkan model suatu USV secara utuh dari model body, mesin, propulsi, sampai model kemudi.

Setelah didapatkan model utuh USV, dilakukan suatu linearisasi untuk melinearkan model USV sehingga bisa dilakukan pengendalian dengan PI kontroler.

1.3 Batasan Masalah

Dalam kondisi yang sebenarnya, masalah yang ada dalam pemodelan dan pengaturan USV sangat kompleks. Untuk itu diperlukan beberapa batasan untuk mencari solusi yang tepat pada masalah yang akan dibahas. Batasan yang ditetapkan antara lain:

- a. Pemodelan dan pengaturan dilakukan pada kapal USV *Monohull* LSS-01.
- b. Pemodelan didekati dengan 3 derajat kebebasan, yaitu *surge*, *sway*, dan *yaw*. *Roll*, *pitch*, dan *heave* diasumsikan sama dengan 0.
- c. Beberapa parameter non-linear akan diasumsikan sama dengan nol atau diabaikan.
- d. Metode yang digunakan untuk estimasi adalah *Non-Linear Least Square* dengan algoritma *Levenberg-Marquardt*.

- e. Kontroler yang digunakan adalah *Proportional Integral Controller* untuk mengatur kecepatan surge (sumbu X) dan kecepatan yaw USV.

1.4 Tujuan

Tujuan penelitian ini yaitu merancang dan mengestimasi parameter model USV beserta kemudi dan mesin dengan menggunakan metode identifikasi parameter. Serta merancang kontroler untuk mengatur kecepatan *surge* dan kecepatan rotasi *yaw* USV.

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 yang menggunakan motor servo. Selain itu, juga akan dimodelkan dinamika dari *unmanned surface vehicle* secara keseluruhan menggunakan metode identifikasi parameter.

3. Pengujian dan Estimasi Parameter USV

Tahap ini berfungsi untuk mendapatkan informasi-informasi penting dari komponen yang akan digunakan dalam *unmanned surface vehicle* yang tidak bisa didapatkan melalui literatur. Karena beberapa informasi memiliki nilai yang berbeda-beda tergantung dengan komponen yang bersangkutan.

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-kontroler

agar sistem *unmanned surface vehicle* bisa bekerja sesuai dengan kriteria yang kita inginkan. Pada penelitian ini akan digunakan PID Controller.

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 system secara keseluruhan 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 Penulisan

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, model mesin dan kemudi, teknik linearisasi, kontroler PI, metode estimasi *Non-Linear Least Square*, dan algoritma *Levenberg-Marquardt* yang merupakan acuan atau landasan untuk dapat melaksanakan penelitian ini.

BAB III PERANCANGAN SISTEM

Bab ini membahas perancangan model USV, mesin, dan kemudi, perancangan program estimasi parameter, dan perancangan kontroler PI untuk mengatur kecepatan surge dan kecepatan yaw USV.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Bab ini berisi hasil simulasi pemodelan dan 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

Sistem hasil tugas akhir ini diharapkan bisa diterapkan dan diaplikasikan pada USV yang nyata dan pada permasalahan riil yang ada pada saat ini atau pada saat mendatang. Penelitian ini juga diharapkan bisa menjadi referensi bagi penelitian tentang USV dan penelitian sejenis maupun penelitian yang lebih rumit di masa depan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

TEORI PENUNJANG

Pada bab ini dipaparkan tentang teori-teori penunjang yang digunakan pada penelitian ini antara lain penjelasan tentang USV, model matematik dan dinamik USV, model mesin *thruster*, pemodelan *rudder*, metode estimasi *non-linear least square*, metode Levenberg-Marquardt, *feedback linearization decoupler*, *root mean square error*, kontroler PI, dan penjelasan tentang *pixhawk cube*.

2.1 *Unmanned Surface Vehicle & LSS-01*

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 [1].

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.

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.

Adapun LSS-01 adalah nama USV *monohull* yang dimiliki oleh Laboratorium Sistem dan Sibernetika yang digunakan untuk pengambilan data dan sebagai objek estimasi parameter pada penelitian ini. USV ini memiliki propulsi yang digerakkan oleh motor BLDC, penggerak rudder berupa motor servo, dan sistem penerima perintah, pemberi perintah ke

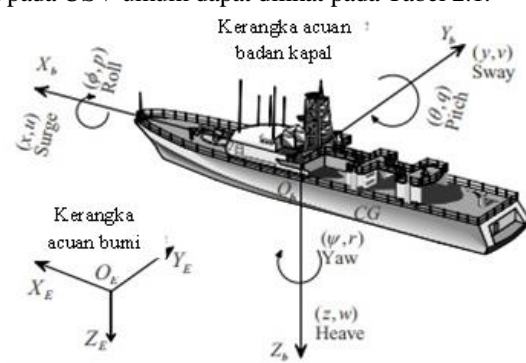
penggerak kapal, dan alat untuk menyimpan data yang berupa *Pixhawk Cube*. Gambar LSS-01 ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 USV LSS-01

2.2 Model Matematis USV

Pergerakan *unmanned surface vehicle* umum dinyatakan dalam 6 derajat kebebasan, seperti pada Gambar 2.2. 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. Notasi pada USV umum dapat dilihat pada Tabel 2.1.



Gambar 2.2 Derajat Kebebasan USV Umum

Tabel 2.1 Notasi Derajat Kebebasan USV Umum

Derajat Kebebasan	Nama	Gaya dan Momen	Kecepatan Linier dan Kecepatan Sudut	Posisi dan Sudut Euler
1	<i>Surge</i>	<i>X</i>	<i>u</i>	<i>x</i>
2	<i>Sway</i>	<i>Y</i>	<i>v</i>	<i>y</i>
3	<i>Heave</i>	<i>Z</i>	<i>w</i>	<i>z</i>
4	<i>Roll</i>	<i>K</i>	<i>p</i>	ϕ
5	<i>Pitch</i>	<i>M</i>	<i>q</i>	θ
6	<i>Yaw</i>	<i>N</i>	<i>r</i>	ψ

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

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

dimana,

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

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

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

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 :

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

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

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 :

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

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

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

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

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

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

$$\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_g q + z_g r) \\ 0 & 0 & 0 & -m(y_g p + w) \\ 0 & 0 & 0 & -m(z_g p - v) \\ -m(y_g q + z_g r) & b_1 & a_1 & 0 & \dots \\ m(x_g q - w) & b_2 & a_2 & I_{xz} q + I_{xz} p - I_z r \\ m(x q + v) & b_3 & a_3 & -I_{yz} r - I_{xy} p + I_y q \\ -m(x_g q - w) & -m(x q + v) \\ m(z_g r + x_g p) & -m(y_g r - u) \\ -m(z_g q - u) & m(x_g p + y_g q) \\ -I_{yz} q - I_{xz} p + I_z r & I_{yz} r + I_{xy} p - I_y q \\ 0 & -I_{xz} r - I_{xy} q + I_x p \\ I_{xz} r + I_{xy} q - I_x p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Dimana,

$$a_1 = m(z_g p - v) \quad (2.13)$$

$$a_2 = m(z_g q - u) \quad (2.14)$$

$$a_3 = -m(x_g p + y_g q) \quad (2.15)$$

$$b_1 = m(y_g p + w) \quad (2.16)$$

$$b_2 = -m(z_g r + x_g p) \quad (2.17)$$

$$b_3 = m(y_g r - u) \quad (2.18)$$

$$\mathbf{C}_A(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Dimana,

$$a_1 = X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r \quad (2.20)$$

$$a_2 = Y_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r \quad (2.21)$$

$$a_3 = Z_{\dot{u}}u + Z_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r \quad (2.22)$$

$$b_1 = K_{\dot{u}}u + K_{\dot{v}}v + K_{\dot{w}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r \quad (2.23)$$

$$b_2 = M_{\dot{u}}u + M_{\dot{v}}v + M_{\dot{w}}w + M_{\dot{p}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r \quad (2.24)$$

$$b_3 = N_{\dot{u}}u + N_{\dot{v}}v + N_{\dot{w}}w + N_{\dot{p}}p + N_{\dot{q}}q + N_{\dot{r}}r \quad (2.25)$$

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

$$\mathbf{D} = - \begin{bmatrix} X_u & X_v & X_w & X_p & X_q & X_r \\ Y_u & Y_v & Y_w & Y_p & Y_q & Y_r \\ Z_u & Z_v & Z_w & Z_p & Z_q & Z_r \\ K_u & K_v & K_w & K_p & K_q & K_r \\ M_u & M_v & M_w & M_p & M_q & M_r \\ N_u & N_v & N_w & N_p & N_q & N_r \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

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

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} (W - B)\sin(\theta) \\ -(W - B)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ -(W - B)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Dimana,

$$g_1 = -(y_g W - y_b B)\cos(\theta)\cos(\phi) + (z_g W - z_b B)\cos(\theta)\sin(\phi) \quad (2.28)$$

$$g_2 = (z_g W - z_b B)\sin(\theta) + (x_g W - x_b B)\cos(\theta)\cos(\phi) \quad (2.29)$$

$$g_3 = -(x_g W - x_b B) \cos(\theta) \sin(\phi) + (y_g W - y_b B) \sin(\theta) \quad (2.30)$$

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

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

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

$$\tau_E^{cu} = (M_{RB} + M_A) \dot{v}_c + C(v_r) v_r - C(v) v + D(v_r) v_r - D(v) v \quad (2.31)$$

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:

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ w_c \end{bmatrix} = J_1^T(\eta_2) \begin{bmatrix} u_c^E \\ v_c^E \\ w_c^E \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

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

$$\tau_E^{wa} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \rho g B L T \cos(\beta) s_i(t) \\ \sum_{i=1}^N -\rho g B L T \sin(\beta) s_i(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sum_{i=1}^N \frac{1}{24} \rho g B L (L^2 - B^2) \sin(2\beta) s_i^2(t) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

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

$$s_i(t) = A_i \frac{2\pi}{\lambda_i} \sin(\omega_{ei} t + \phi_i) \quad (2.34)$$

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 .

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

$$\tau_E^{wi} = \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 \begin{bmatrix} C_x(\gamma_w) A_{Fw} \\ C_y(\gamma_w) A_{Lw} \\ C_z(\gamma_w) A_{Fw} \\ C_K(\gamma_w) A_{Lw} H_{Lw} \\ C_M(\gamma_w) A_{Fw} H_{Fw} \\ C_N(\gamma_w) A_{Lw} H_{Lw} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

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.

$$\gamma_w = \psi - \beta_w - \pi \quad (2.36)$$

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 [5].

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 :

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (2.37)$$

$$M\dot{v} = -C(v)v - (D + D_n(v))v + \tau + \tau_E \quad (2.38)$$

Dengan,

$$\eta = [x \ y \ \psi]^T \quad (2.39)$$

$$v = [u \ v \ r]^T \quad (2.40)$$

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & 0 & I_z - N_r \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ m(x_g r + v) - Y_{\dot{v}} v - Y_{\dot{r}} r & -mu + X_{\dot{u}} u & \dots \\ -m(x_g r + v) + Y_{\dot{v}} v + Y_{\dot{r}} r & & \\ mu - X_{\dot{u}} u & & \\ 0 & & \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$D = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & N_v & N_r \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$D_n(v) = - \begin{bmatrix} X_{|u|u}|u| & 0 & 0 \\ 0 & Y_{|v|v}|v| + Y_{|r|r}|r| & \dots \\ 0 & N_{|v|v}|v| + N_{|r|r}|r| & \\ 0 & & \\ Y_{|v|r}|v| & & \\ N_{|v|r}|v| + N_{|r|r}|r| & & \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_u \\ 0 \\ \tau_r \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$\tau_E = \begin{bmatrix} \tau_{uE} \\ \tau_{vE} \\ \tau_{rE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{uE}^{cu} + \tau_{uE}^{wa} + \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_x(\gamma_w) A_F w \\ \tau_{vE}^{cu} + \tau_{vE}^{wa} + \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_y(\gamma_w) A_L w \\ \tau_{rE}^{cu} + \tau_{rE}^{wa} + \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_N(\gamma_w) A_L w L_{OA} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Dimana,

- v : Vektor kecepatan translasi dan kecepatan sudut pada kerangka acuan badan kapal
- J(η) : 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

Tabel 2.2 Keterangan Parameter USV

Parameter	Keterangan
m	Massa <i>rigid body</i>
x_g	Jarak antara pusat koordinat kapal dengan titik berat kapal searah sumbu x
$X_{\ddot{u}}$	Massa tambahan kapal searah sumbu x karena percepatan kapal \ddot{u}
$Y_{\ddot{v}}$	Massa tambahan kapal searah sumbu y karena percepatan kapal \ddot{v}
$N_{\ddot{r}}$	Massa tambahan kapal searah sumbu ψ karena percepatan kapal \ddot{r}
X_u	Konstanta damper linier x karena kecepatan translasi u
Y_v	Konstanta damper linier y karena kecepatan translasi v
N_r	Konstanta damper linier ψ karena kecepatan translasi r
I_z	Momen Inersia terhadap $O_b Z_b$
$X_{ u u}$	Konstanta damper nonlinier x karena kecepatan translasi u
$Y_{ v v}$	Konstanta damper nonlinier y karena kecepatan translasi v
$Y_{ v r}$	Konstanta damper nonlinier y karena kecepatan translasi v dan kecepatan sudut r
$Y_{ r v}$	Konstanta damper nonlinier y karena kecepatan sudut r dan kecepatan translasi v
$N_{ v v}$	Konstanta damper nonlinier ψ karena kecepatan translasi v
$N_{ r v}$	Konstanta damper nonlinier ψ karena kecepatan sudut r dan kecepatan translasi v
$N_{ v r}$	Konstanta damper nonlinier ψ karena kecepatan translasi v dan kecepatan sudut r

Parameter	Keterangan
$N_{ r r}$	Konstanta damper nonlinier ψ karena kecepatan sudut r
ρ_w	Massa jenis air laut
L	Panjang kapal
B	Luas draft kapal
T	Tinggi kapal
ρ_a	Massa jenis udara
A_{FW}	Area proyeksi angin dari depan
A_{LW}	Area proyeksi angin dari samping
A_{Fc}	Area proyeksi air dari depan
A_{Lc}	Area proyeksi air dari samping
L_oA	Panjang kapal keseluruhan
$C_{Xwi}(\gamma W)$	Koefisien angin pada sumbu gerak x
$C_{Ywi}(\gamma W)$	Koefisien angin pada sumbu gerak y
$C_{Nwi}(\gamma W)$	Koefisien angin pada sumbu gerak yaw
$C_{Xcu}(\gamma W)$	Koefisien arus pada sumbu gerak x
$C_{Ycu}(\gamma W)$	Koefisien arus pada sumbu gerak y
$C_{Ncu}(\gamma W)$	Koefisien arus pada sumbu gerak yaw
$C_{Xwa}(\gamma W)$	Koefisien ombak pada sumbu gerak x
$C_{Ywa}(\gamma W)$	Koefisien ombak pada sumbu gerak y
$C_{Nwa}(\gamma W)$	Koefisien ombak pada sumbu gerak yaw

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

$$\dot{u} = \frac{(m - Y_{\dot{v}})}{(m - X_{\dot{u}})} vr - \frac{X_u}{(m - X_{\dot{u}})} u - \frac{X_{|u|u}}{(m - X_{\dot{u}})} |u|u + \frac{1}{(m - X_{\dot{u}})} \tau_u \quad (2.48)$$

$$\dot{v} = \frac{(X_{\dot{u}} - m)}{(m - Y_{\dot{v}})} ur - \frac{Y_v}{(m - Y_{\dot{v}})} v - \frac{Y_{|v|v}}{(m - Y_{\dot{v}})} |v|v - \frac{Y_{|r|v}}{(m - Y_{\dot{v}})} |r|v - \frac{Y_{|v|r}}{(m - Y_{\dot{v}})} |v|r \quad (2.49)$$

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

$$\begin{aligned}
& -\frac{N_{|r|v}}{(I_z - N_{\dot{r}})} |r|v - \frac{N_{|v|r}}{(I_z - N_{\dot{r}})} |v|r \\
& -\frac{N_{|r|r}}{(I_z - N_{\dot{r}})} |r|r + \frac{1}{(I_z - N_{\dot{r}})} \tau_r
\end{aligned} \tag{2.50}$$

Persamaan diatas dapat ditulis sebagai berikut :

$$f1 = A(1)vr - A(2)u - A(3)|u|u + A(4)\tau_u \tag{2.51}$$

$$\begin{aligned}
f2 = A(5)ur - A(6)v - A(7)|v|v \\
-A(8)|r|v - A(9)|v|r
\end{aligned} \tag{2.52}$$

$$\begin{aligned}
f3 = -A(10)|v|v - A(11)|r|v - A(12)|v|r \\
-A(13)|r|r - A(14)r + A(15)\tau_r + A(16)uv
\end{aligned} \tag{2.53}$$

Dengan $f1$ adalah \dot{u} , $f2$ adalah \dot{v} , dan $f3$ adalah \dot{r} [3].

2.3 Pemodelan Mesin Pendorong / Thruster

Gaya thrust yang dibutuhkan untuk menggerakkan USV dihasilkan oleh propeller yang berputar. Sedangkan untuk memutar propeller tersebut diperlukan sebuah motor atau mesin, diasumsikan bahwa mesin thruster menggunakan motor BLDC. Maka dari itu, diperlukan pemodelan mesin thrust yang berisi pemodelan motor BLDC, Electronic Commutator, dan juga pemodelan propeller.

2.3.1 Pemodelan Motor BLDC

Motor BLDC terdiri dari bagian Current Generation, Back EMF Generation, dan bagian Mechanical. Selain itu pula diperlukan pemodelan electronic Commutator untuk mengubah sumber listrik satu fasa menjadi tiga fasa untuk di transfer ke motor BLDC.

Persamaan matematis pembentukan arus dari motor BLDC 3 Fasa terkoneksi star adalah sebagai berikut:

$$V_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \tag{2.54}$$

$$V_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c \tag{2.55}$$

$$V_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a \tag{2.56}$$

Dan memiliki hubungan sebagai berikut:

$$V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0 \quad (2.57)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.58)$$

Sehingga permodelan bisa disederhanakan dan dibutuhkan dua persamaan tegangan. Persamaan tegangan menjadi sebagai berikut :

$$2V_{ab} + V_{bc} = 3Ri_a + 3L \frac{d}{dt} i_a + 2e_a - e_b - e_c \quad (2.59)$$

$$-V_{ab} + V_{bc} = 3Ri_b + 3L \frac{d}{dt} i_b + 2e_b - e_a - e_c \quad (2.60)$$

Dan didapatkan model pembentukan arus sebagai berikut :

$$\frac{d}{dt} i_a = \frac{(2V_{ab} + V_{bc} - 2e_a + e_b + e_c - 3Ri_a)}{3L} \quad (2.61)$$

$$\frac{d}{dt} i_b = \frac{(-V_{ab} + V_{bc} - 2e_b + e_a + e_c - 3Ri_b)}{3L} \quad (2.62)$$

Setelah memodelkan pembentukan arus maka diperlukan pemodelan back EMF. Back EMF atau tegangan balik adalah tegangan yang muncul akibat berputarnya rotor pada motor BLDC. Back EMF bisa dimodelkan dengan beberapa bentuk, salah satunya sebagai gelombang trapezium atau trapezoidal wave.

Model matematis trapezoidal back EMF adalah seperti berikut :

$$e_a = \frac{k_e}{2} \dot{\theta}_m \text{Tra}(\theta_e) \quad (2.63)$$

$$e_b = \frac{k_e}{2} \dot{\theta}_m \text{Tra}(\theta_e - \frac{2}{3}\pi) \quad (2.64)$$

$$e_c = \frac{k_e}{2} \dot{\theta}_m \text{Tra}(\theta_e - \frac{4}{3}\pi) \quad (2.65)$$

$$\theta_e = p\theta_m \quad (2.66)$$

Dimana $\text{Tra}(\theta_e)$ adalah fungsi gelombang trapezoidal yang dalam satu periode fungsinya memiliki persamaan sebagai berikut :

$$Tra(\theta_e) = \left\{ \begin{array}{l} 1, 0 \leq \theta_e < \frac{2}{3}\pi \\ 1 - \frac{6}{\pi} \left(\theta_e - \frac{2}{3}\pi \right), \frac{2}{3} \leq \theta_e < \pi \\ -1, \pi \leq \theta_e < \frac{5}{3}\pi \\ -1 + \frac{6}{\pi} \left(\theta_e - \frac{5}{3}\pi \right), \frac{5}{3} \leq \theta_e < 2\pi \end{array} \right\} \quad (2.67)$$

Bagian selanjutnya adalah pemodelan mekanik dari motor BLDC. Model mekanik motor BLDC memiliki persamaan sebagai berikut :

$$\ddot{\theta}_m = \frac{(T_e - T_L - b\dot{\theta}_m)}{J} \quad (2.68)$$

Dimana T_e memiliki persamaan sebagai berikut :

$$T_e = \frac{(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)}{\dot{\theta}_m} \quad (2.69)$$

Dengan substitusi persamaan trapezoidal back EMF pada persamaan diatas, didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$T_e = \frac{k_e}{2} \left(Tra(\theta_e) i_a + Tra \left(\theta_e - \frac{2}{3}\pi \right) i_b + Tra \left(\theta_e - \frac{4}{3}\pi \right) i_c \right) \quad (2.70)$$

Motor BLDC memerlukan input berupa tegangan 3 fasa, maka dari itu diperlukan *Electronic Commutator* atau *Electronic Speed Controller* dengan input tegangan DC, arus tiap fasa, back EMF tiap fasa, dan sudut. Hubungan dari input output akan dijelaskan pada Tabel 2.3 sebagai berikut :

Tabel 2.3 Hubungan Input Output *Electronic Commutator*

Sudut	Arus	State Output
0°-60°	$i_c < 0$	$V_{ab} = V_s$ & $V_{bc} = -V_s$
	$i_c \geq 0$	$V_{ab} = V_s$ & $V_{bc} = \frac{1}{2}(-V_s + e_a + e_b - 2e_c)$
60°-120°	$i_b > 0$	$V_{ab} = V_s$ & $V_{bc} = 0$
	$i_b \leq 0$	$V_{ab} = \frac{1}{2}(V_s + e_a - 2e_b + e_c)$ & $V_{bc} = \frac{1}{2}(V_s - e_a + 2e_b - e_c)$

Sudut	Arus	State Output
120°-180°	$i_a < 0$	$V_{ab} = 0 \text{ \& } V_{bc} = V_s$
	$i_a \geq 0$	$V_{ab} = \frac{1}{2}(-V_s + 2e_a - e_b - e_c) \text{ \& } V_{bc} = V_s$
180°-240°	$i_c > 0$	$V_{ab} = -V_s \text{ \& } V_{bc} = V_s$
	$i_c \leq 0$	$V_{ab} = -V_s \text{ \& } V_{bc} = \frac{1}{2}(V_s + e_a + e_b - 2e_c)$
240°-300°	$i_b < 0$	$V_{ab} = -V_s \text{ \& } V_{bc} = 0$
	$i_b \geq 0$	$V_{ab} = \frac{1}{2}(-V_s + e_a - 2e_b + e_c) \text{ \& } V_{bc} = \frac{1}{2}(-V_s - e_a + 2e_b - e_c)$
300°-360°	$i_a > 0$	$V_{ab} = 0 \text{ \& } V_{bc} = -V_s$
	$i_a \leq 0$	$V_{ab} = \frac{1}{2}(V_s + 2e_a - e_b - e_c) \text{ \& } V_{bc} = -V_s$

Pada bab III akan ditunjukkan respon dari simulasi motor BLDC yang menunjukkan bahwa respon kecepatan sudut motor BLDC merupakan respon orde satu dan didapatkan *time settling*-nya sehingga bisa digunakan model pendekatan pada saat simulasi total [7].

Selain itu, dengan menggunakan eksperimen yang dirancang pada sub bab 3.5, akan didapatkan persamaan matematika yang mewakili hubungan persen *throttle* dan kecepatan sudut motor BLDC.

2.3.2 Pemodelan *Propeller*

Pada bagian ini, diberikan model dinamik dari propeller sesuai dengan referensi jurnal yang didapatkan. Berikut model dinamik dari gaya thrust yang dihasilkan oleh propeller.

$$T_u = KT \cdot \rho \cdot D^4 \cdot n^2 \quad (2.71)$$

Dimana KT adalah koefisien *thrust*. Dan n adalah kecepatan sudut shaft (revolution-per-second), D adalah diameter propeller, dan ρ adalah massa jenis air [8].

2.4 Pemodelan Penggerak Kemudi / *Rudder*

Sistem kemudi adalah suatu sistem dalam USV yang bertujuan untuk mengatur pergerakan *yaw* kapal dengan cara mengatur pergerakan kemudi atau *rudder* USV. Diasumsikan bahwa USV menggunakan

motor servo untuk mengatur *rudder* kapal. Sehingga diperlukan pemodelan motor servo dalam pemodelan USV.

2.4.1 Model Analitis Motor Servo

Secara analitis, motor servo bisa dimodelkan sebagai berikut.

$$\dot{x}_1(t) = -\left(\frac{R_a}{L_a}\right)x_1(t) - \left(\frac{K_b}{L_a}\right)x_3(t) + u(t) \quad (2.72)$$

$$\dot{x}_2(t) = x_3(t) \quad (2.73)$$

$$\dot{x}_3(t) = \left(\frac{K_T}{J}\right)x_1(t) - \left(\frac{B}{J}\right)x_3(t) \quad (2.74)$$

$$y(t) = x_2(t) \quad (2.75)$$

Dengan

$u(t) = V_a(t)$ = Tegangan Jangkar

$x_1(t) = i_a(t) = \frac{T_{app}(t)}{K_T}$ = Arus jangkar

$x_2(t) = y(t) = \theta(t)$ = Posisi sudut

$x_3(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$ = Kecepatan Sudut

B = redaman motor dan beban

J = Inersia motor dan beban

R_a = Hambatan Jangkar pada motor

L_a = Induktansi Jangkar pada motor

K_b = Konstanta medan elektromagnet balik

K_T = Konstanta torsi

$T_{app}(t)$ = Torsi yang dihasilkan

Respon analitis orde dua dari motor servo sebagai berikut.

$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_T}{s[(sL_a + R_a)(sJ + B) + K_T K_b]} \quad (2.76)$$

Karena induktansi jangkar motor servo pada umumnya bernilai sangat kecil ($L_a \approx 0$) maka persamaan diatas menjadi sebagai berikut :

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_T}{s[R_a J s + (K_T K_b + R_a B)]} \quad (2.77)$$

Dari Persamaan 2.77 dapat dilihat bahwa *transfer function* memiliki orde 2 [9].

Namun pada motor servo yang dijual, biasanya sudah dilengkapi dengan gearbox dan kontroler sehingga respon posisi dari motor servo

sudah merupakan orde satu, maka pada bab III penulis merancang eksperimen untuk mencari time settling dari motor servo dengan pengujian secara langsung. Sehingga bisa digunakan model pendekatan untuk simulasi total.

2.4.2 Model Momen Inersia Rudder

Pergerakan *rudder* menghasilkan momen inersia yang dapat mempengaruhi arah *yaw* USV. Hal ini disebabkan karena adanya aliran air yang menabrak rudder yang terdefleksi, sehingga menimbulkan gaya reaksi yang memiliki arah tegak lurus dengan heading kapal dan mengubah arah heading kapal. Ketika ada gaya tegak lurus terhadap heading kapal, maka akan terjadi momen inersia yang dihasilkan gaya tersebut. Penurunan fungsi dituliskan sebagai berikut.

$$F_{Rudder} = K_{efisiensi} \cdot \sin(\theta_{Rudder}) \cdot L_{Rudder} \cdot v_{surge} \quad (2.78)$$

$$\tau_r = F_{Rudder} \cdot LG \quad (2.79)$$

Dimana,

$K_{efisiensi}$ = Konstanta efisiensi rudder

θ_{Rudder} = Sudut defleksi rudder

L_{Rudder} = Luas rudder

v_{surge} = Kecepatan USV pada sumbu X body-frame

LG = Jarak dari titik massa USV sampai rudder

2.5 Feedback Linearization Decoupler

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

Umpun 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 pada bab 2.2 juga bersifat *non-linear* dan terikat satu dengan yang lainnya (*coupled*) [10].

Metode *Feedback Linearization Decoupler* digunakan sebagai metode umpun balik yang dapat membuat suatu sistem MIMO menjadi suatu sistem yang hanya dipengaruhi satu variable input. Pada penelitian

ini, digunakan metode *Feedback Linearization Decoupler* untuk mengubah persamaan matematika pada \dot{u} dan \dot{r} sehingga output merupakan hasil dari pengaruh satu input saja, yaitu u_r mempengaruhi \dot{u} dan r_r mempengaruhi \dot{r} .

2.6 Metode *Non-Linear Least Squares*

Least-square adalah permasalahan minimisasi tanpa constrain dengan bentuk sebagai berikut :

$$\underset{x}{\text{minimize}} f(x) = \sum_{i=1}^m f_i(x)^2 \quad (2.80)$$

Dimana fungsi objektif di definisikan dalam beberapa fungsi pelengkap $\{f_i\}$. Disebut Least-square karena kita meminimalkan penjumlahan kuadrat fungsi-fungsi tersebut.

Bentuk khusus turunan dalam permasalahan least-square adalah :

$$\underset{x}{\text{minimize}} f(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m f_i(x)^2 \equiv \frac{1}{2} F(x)^T F(x) \quad (2.81)$$

Dimana F adalah fungsi bernilai vector

$$F(x) = (f_1(x) \ f_2(x) \ \dots \ f_m(x))^T \quad (2.82)$$

Komponen $\nabla f(x)$ dapat diturunkan dengan aturan rantai:

$$\nabla f(x) = \nabla F(x) F(x) \quad (2.83)$$

Sedangkan komponen $\nabla^2 f(x)$ dapat diperoleh dengan mendiferensiasikan formula ini terhadap x_j :

$$\nabla^2 f(x) = \nabla F(x) \nabla F(x)^T + \sum_{i=1}^m f_i(x) \nabla^2 f_i(x) \quad (2.84)$$

$\nabla f(x)$ dan $\nabla^2 f(x)$ masing – masing adalah formula untuk gradient dan hessian dari f .

Permasalahan *nonlinear least squares* dapat diselesaikan dengan berbagai macam metode optimasi, seperti Gauss Newton, Levenberg – Marquardt, Powell dog leg. Metode optimasi yang digunakan pada penelitian ini adalah metode Levenberg – Marquardt [11].

2.7 Metode Levenberg – Marquardt

Levenberg (1944) dan Marquardt (1963) mengusulkan untuk menggunakan metode damped Gauss-Newton,. Langkah-langkahnya ialah mendefinisikan \mathbf{h}_{lm} dengan modifikasi berikut ini :

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I}) \mathbf{h}_{lm} = -\mathbf{g} \quad (2.85)$$

dengan $\mathbf{g} = \mathbf{J}^T \mathbf{f}$ dan $\mu \geq 0$.

Disini, $\mathbf{J} = \mathbf{J}(\mathbf{x})$ dan $\mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$. Parameter damping μ memiliki beberapa efek :

- Untuk semua $\mu > 0$ koefisien matriksnya definit positif, dan ini menjamin bahwa arah \mathbf{h}_{lm} ialah kebawah
- Untuk nilai μ yang besar, didapatkan

$$\mathbf{h}_{lm} \approx -\frac{1}{\mu} \mathbf{g} = -\frac{1}{\mu} \mathbf{F}'(\mathbf{x}) \quad (2.86)$$

- Jika nilai μ sangat kecil, maka $\mathbf{h}_{lm} \approx \mathbf{h}_{gn}$, yang merupakan step baik di stage terakhir dari iterasi, ketika \mathbf{x} dekat dengan \mathbf{x}^* . Jika $F(\mathbf{x}^*) = 0$ (atau sangat kecil), maka kita bisa dapatkan (hampir) konvergensi *quadratic final*.

Jadi, parameter damping mempengaruhi baik arah dan ukuran dari step, dan hal ini menuntun kita untuk membuat metode **tanpa** sebuah *specific line search*. Pemilihan dari nilai initial μ harus berhubungan dengan ukuran elemen-elemen di $\mathbf{A}_0 = \mathbf{J}(\mathbf{x}_0)^T \mathbf{J}(\mathbf{x}_0)$, dengan membiarkan

$$\mu_0 = \tau \cdot \max_i \{a_{ii}^{(0)}\} \quad (2.87)$$

Dimana τ dipilih oleh user. Selama berjalannya iterasi, ukuran dari μ dapat diperbaharui. Pembaharuan dikontrol oleh *gain ratio*

$$\varrho = \frac{F(\mathbf{x}) - F(\mathbf{x} + \mathbf{h}_{lm})}{L(\mathbf{0}) - L(\mathbf{h}_{lm})} \quad (2.88)$$

Dimana denominator ialah gain yang diprediksi oleh model linier

$$L(\mathbf{0}) - L(\mathbf{h}_{lm}) = -\mathbf{h}_{lm}^T \mathbf{J}^T \mathbf{f} - \frac{1}{2} \mathbf{h}_{lm}^T \mathbf{J}^T \mathbf{J} \mathbf{h}_{lm} \quad (2.89)$$

$$= \frac{1}{2} \mathbf{h}_{lm}^T (2\mathbf{g} + (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I} - \mu \mathbf{I}) \mathbf{h}_{lm}) \quad (2.90)$$

$$= \frac{1}{2} \mathbf{h}_{lm}^T (\mu \mathbf{h}_{lm} - \mathbf{g}) \quad (2.91)$$

Dapat dilihat bahwa $\mathbf{h}_{lm}^T \mathbf{h}_{lm}$ dan $-\mathbf{h}_{lm}^T \mathbf{g}$ bernilai positif, jadi $L(\mathbf{0}) - L(\mathbf{h}_{lm})$ dijamin bernilai positif.

Nilai q yang besar mengindikasikan bahwa $L(\mathbf{h}_{lm})$ merupakan perkiraan yang baik terhadap $F(\mathbf{x} + \mathbf{h}_{lm})$, dan kita dapat mengurangi μ agar step Levenberg-Marquardt berikutnya lebih dekat dengan step Gauss-Newton. Jika nilai q kecil (atau mungkin negatif), maka $L(\mathbf{h}_{lm})$ memiliki perkiraan yang tidak baik, dan kita harus meningkatkan μ dengan tujuan dua kali lipat untuk mendekati arah *steepest descent* dan mengurangi panjang step.

Stopping criteria untuk algoritma harus mereleksi bahwa ketika *global minimizer* didapatkan $\mathbf{F}'(\mathbf{x}^*) = \mathbf{g}(\mathbf{x}^*) = \mathbf{0}$, agar dapat menggunakan

$$\|\mathbf{g}\|_{\infty} \leq \varepsilon_1 \quad (2.92)$$

Dimana nilai ε_1 kecil, positif, dan dipilih oleh user. Kriteria relevan lainnya ialah untuk berhenti jika perubahan nilai \mathbf{x} kecil,

$$\|\mathbf{x}_{new} - \mathbf{x}\| \leq \varepsilon_2(\|\mathbf{x}\| + \varepsilon_2) \quad (2.93)$$

Ekspresi ini memberikan perubahan yang bertahap dari ukuran step yang relatif ε_2 ketika $\|\mathbf{x}\|$ bernilai besar terhadap ukuran step absolut ε_2^2 jika \mathbf{x} dekat dengan $\mathbf{0}$. Akhirnya, seperti pada semua proses iterative kita memerlukan *safeguard* untuk *infinite loop* yaitu ditunjukkan Persamaan 2.94 sebagai berikut,

$$k \geq k_{max} \quad (2.94)$$

Dan juga ε_2 dan k_{max} dipilih oleh user.

Dua kriteria terakhir berefek jika ε_1 dipilih dengan nilai sangat kecil sehingga pengaruh dari kesalahan pembulatan memiliki pengaruh besar. Hal ini biasanya kelihatan di kesesuaian yang buruk antara gain di F dan di gain yang diprediksi oleh model linier dan akan menghasilkan μ ditambah pada setiap step. Strategi untuk menambah μ mengimplikasikan bahwa di dalam kasus ini μ bertumbuh secara cepat yang menghasilkan $\|\mathbf{h}_{lm}\|$ yang kecil, dan prosesnya akan diberhentikan oleh Persamaan 2.93 [11].

2.8 Root Mean Square Error (RMSE)

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

Root Mean Square Error atau akar dari rata-rata kesalahan kuadrat merupakan suatu ukuran kesalahan yang didasarkan pada selisih antara dua buah nilai yang bersesuaian atau dengan kata lain merupakan selisih antara data *output* sistem yang dimodelkan dengan data *output* sebenarnya untuk menyatakan seberapa mirip suatu data hasil pemodelan dengan data sebenarnya. Pada penelitian ini, metode RMSE digunakan untuk membandingkan data yang diambil melalui eksperimen dengan data keluaran sistem yang dimodelkan dimana parameternya adalah hasil estimasi dengan beberapa metode.

Nilai RMSE yang akan didapatkan untuk analisa data antara sinyal *output* system yang dimodelkan dengan sinyal aktual dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{in} - Y_{out})^2}{N}} \quad (2.95)$$

di mana,

Y_{in} = Data *ouput* sinyal sistem yang dimodelkan

Y_{out} = Data *ouput* sinyal sebenarnya

N = Banyaknya data

2.9 Kontroler *Proportional Integral* (PI)

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

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (2.96)$$

Dalam besaran transformasi Laplace dituliskan sebagai berikut :

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) E(s) \quad (2.97)$$

Dimana K_p adalah penguatan proporsional dan τ_i adalah waktu integral. Parameter K_p dan τ_i dapat ditentukan melalui berbagai metode, contohnya metode analitik, metode *trial and error*, metode *Ziegler Nichols* dan lain lain.

Sehingga fungsi alih kontroler PI adalah sebagai berikut :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(\frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \right) \quad (2.98)$$

2.10 Pixhawk Cube

Pixhawk Cube atau *The Cube* adalah perkembangan dari *Pixhawk*, yang merupakan perangkat keras untuk mengendalikan berbagai macam robot dari UAV, Robot *Mobile*, atau bahkan USV. *Pixhawk cube* memiliki banyak port yang berguna mengirimkan sinyal perintah ke perangkat penggerak robot ataupun sebagai port untuk menerima sinyal perintah yang dikirimkan *user*.

Selain itu, *pixhawk cube* juga dilengkapi dengan sensor yang bisa digunakan untuk mengetahui posisi dan arah robot. Sensor juga bisa digunakan untuk mengetahui kecepatan dan percepatan yang dialami robot. *Pixhawk cube* juga bisa menyimpan data yang diperlukan untuk keperluan pengguna dalam kartu memori ataupun langsung tersimpan ke laptop. Data yang bisa disimpan antara lain posisi, kecepatan, dan percepatan robot, bukaan *throttle* ataupun sudut referensi pada masing-masing penggerak robot, dan masih banyak lagi.

Karena manfaat dan kegunaan dari *pixhawk cube* ini, maka *pixhawk cube* digunakan pada USV yang akan dimodelkan untuk mengatur gerak USV di air, mengetahui kecepatan dan percepatan yang dialami USV tiap waktu, dan menyimpan data-data yang diperlukan untuk pemodelan antara lain bukaan *throttle* mesin pendorong, sudut referensi penggerak kemudi, *heading*, kecepatan, dan percepatan yang dialami USV setiap waktu.



Gambar 2.3 *Pixhawk Cube / The Cube*

BAB 3

PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini akan dibahas mengenai perancangan sistem yang dibagi menjadi lima tahap. Tahap pertama adalah perancangan *hardware*, karena wahana USV yang digunakan sudah terbentuk, maka pada tahap ini akan dipaparkan perangkat apa saja yang digunakan pada wahana USV. Tahap kedua yaitu perancangan model matematika USV LSS-01, pada tahap ini akan dijelaskan model matematika *body* USV yang digunakan, model mesin pendorong, model penggerak rudder, penjelasan parameter, dan pembentukan simulasi. Tahap ketiga adalah pemodelan *feedback linearization* untuk melinearkan model USV. Tahap keempat adalah perancangan program estimasi parameter *body* USV, metode estimasi parameter mesin pendorong dan penggerak rudder yang belum diketahui. Tahap kelima adalah perancangan eksperimen yang akan dilakukan untuk mendapatkan parameter-parameter yang diperlukan, yang dilanjutkan pengambilan data sesuai dengan rancangan eksperimen yang telah ditentukan. Tahap terakhir adalah perancangan kontroler PI sesuai dengan model yang sudah didapatkan parameternya dan sesuai dengan karakteristik yang ingin dipenuhi untuk mengatur kecepatan *surge* dan kecepatan *yaw* USV.

3.1 Perancangan *Hardware*

Pada sub bab ini akan dipaparkan perangkat-perangkat yang digunakan pada wahana USV yang digunakan untuk penelitian ini. Adapun perangkat yang dipaparkan pada bab ini antara lain *Pixhawk Cube*, motor BLDC, motor servo, kemudi, *propeller* dan *joint shaft*, transmitter-receiver radiolink, modul *GPS*, *remote control*, dan *body* USV.

3.1.1 *Pixhawk Cube*

Pixhawk Cube adalah perangkat keras multi fungsi yang biasanya digunakan pada berbagai jenis wahana yang dikendalikan jarak jauh. Perangkat ini memiliki banyak fungsi yang mendukung untuk dilakukannya kendali jarak jauh, salah satunya adalah perangkat ini bisa menerima sinyal dari *remote control* dengan bantuan sebuah *receiver* dan mengolah sinyal perintah tersebut menjadi sinyal perintah yang akan

dikirimkan ke perangkat motor penggerak yang berada dalam wahana yang dikendalikan, contohnya motor BLDC sebagai mesin *thruster* dalam wahana USV.

Selain untuk keperluan di atas, *pixhawk cube* juga bisa dikoneksikan dengan modul GPS sehingga bisa merekam data posisi, kecepatan, ataupun percepatan yang dialami wahana yang dikirimkan oleh satelit GPS. Meskipun tidak dikoneksikan dengan modul GPS, *pixhawk cube* tetap bisa merekam data tersebut karena dalam *pixhawk cube* sudah dilengkapi dengan system INS (*Inertial Navigation System*). Modul GPS ditunjukkan pada Gambar 3.2.

Pixhawk Cube juga bisa dikoneksikan dengan aplikasi pada komputer atau laptop yang bernama *Mission Planner*. Aplikasi ini bisa membantu pengguna robot yang terpasang *pixhawk* agar mengetahui kondisi kekinian robot seperti kondisi tegangan baterai yang digunakan untuk menggerakkan robot, *attitude* robot saat ini, dan masih banyak lagi variable yang bisa dimonitor dengan aplikasi ini. Untuk bisa menghubungkan *pixhawk* dengan *Mission Planner*, digunakan *transmitter* dan *receiver telemetry*. *Receiver telemetry* ditunjukkan pada Gambar 3.3.

Dan hal yang terpenting adalah *pixhawk cube* dapat merekam semua data yang diperlukan untuk kepentingan estimasi parameter dalam sebuah *memory card* setiap waktunya.



Gambar 3.1 *Pixhawk Cube*



Gambar 3.2 Modul GPS



Gambar 3.3 Receiver Telemetri

3.1.2 Motor BLDC (*Brushless DC Motor*)

Motor BLDC adalah motor tanpa sikat yang sering digunakan untuk keperluan robot *remote control* seperti UAV. Motor jenis ini biasa digunakan untuk hal-hal yang berhubungan dengan kecepatan putar yang tinggi. Karena motor BLDC tidak menggunakan sikat, maka ketika motor berputar dalam kecepatan tinggi tidak akan menimbulkan percikan api seperti yang terjadi pada motor DC pada umumnya yang menggunakan sikat. Karena keuntungan ini, digunakan motor BLDC sebagai pemutar *propeller* yang memerlukan kecepatan rotasi yang tinggi untuk menghasilkan gaya dorong yang maksimal. Pada penelitian ini digunakan motor BLDC *Turnigy Aquastar 3660-2050KV* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4. Motor ini nantinya akan dihubungkan dengan ESC dan disuplai dengan baterai LiPo 4 sel dengan tegangan 16,8 V. Baterai ditunjukkan pada Gambar 3.6.

Meskipun tidak menggunakan sikat, penggunaan motor BLDC dalam waktu lama tetap membuat motor BLDC menjadi panas, oleh karena itu pada motor BLDC yang dijual biasanya dilengkapi system pendingin. Motor BLDC yang digunakan untuk penelitian ini menggunakan *water cooling system* yang mengharuskan diadakannya mesin pompa untuk mengalirkan air masuk kedalam motor BLDC agar motor BLDC tidak *overheat*. Mesin Pompa Air ditunjukkan pada Gambar 3.5 dan disuplai daya dari baterai LiPo 3 sel seperti yang ditunjukkan Gambar 3.6.



Gambar 3.4 Motor BLDC



Gambar 3.5 Mesin Pompa Air Sistem *Water Cooling* BLDC



Gambar 3.6 Baterai LiPo 4 Sel (kiri) dan 3 Sel (kanan)

3.1.3 *Electronic Speed Controller (ESC)*

Motor BLDC adalah motor yang memerlukan tegangan tiga fasa sebagai inputnya. Oleh karena itu diperlukan suatu perangkat yang dapat mengubah tegangan satu fasa menjadi tegangan tiga fasa, dan perangkat itu adalah *Electronic Speed Controller* atau ESC. ESC dapat mengubah tegangan satu fasa termodulasi yang diterima dari *pixhawk cube* menjadi tegangan tiga fasa yang akan dikirimkan kepada motor BLDC sebagai masukan motor BLDC. Amplitude dan frekuensi tegangan tiga fasa yang dikirimkan akan bergantung dengan sinyal PWM (*pulse width modulation*) yang dikirimkan oleh *pixhawk* pada ESC, hal inilah yang membuat motor BLDC bisa dikendalikan melalui *pixhawk cube* dan ESC. ESC yang digunakan adalah ESC Flycolor 120A seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 *Electronic Speed Controller*

3.1.4 Motor Servo

Motor servo adalah motor DC yang telah dimodifikasi sehingga bisa dikendalikan posisi rotornya. Masukkan dari motor servo adalah tegangan satu fasa termodulasi, seperti halnya ESC. Kegunaan dari motor servo adalah sebagai penggerak kemudi/*rudder* karena motor servo bisa dikendalikan posisi akhir rotornya dengan mengendalikan masukkan dari motor servo tersebut. Dengan mengatur posisi akhir rotor, maka kita bisa mengendalikan sudut defleksi dari kemudi/*rudder*. Servo yang digunakan adalah adalah motor servo MG995 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Motor Servo MG995

3.1.5 Kemudi / *Rudder*

Kemudi/*Rudder* adalah bagian penting dari sebuah wahana air, salah satunya adalah USV. *Rudder* berfungsi untuk mengendalikan *heading* kapal sehingga kapal bisa bergerak sesuai dengan arah yang

kita inginkan. *Rudder* pada USV dikendalikan sudut defleksinya dengan menggunakan motor servo yang terhubung dengan *pixhawk cube*. Dengan mengendalikan motor servo maka sudut defleksi *rudder* bisa dikendalikan. Kemudi memiliki luasan yang tercelup air sebesar $6,75 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ dan ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Kemudi / *Rudder*

3.1.6 Propeller

Propeller adalah bagian USV yang berfungsi untuk mengubah gerakan rotasi yang dihasilkan motor BLDC menjadi gaya dorong yang menyebabkan USV dapat bergerak maju. *Propeller* yang digunakan untuk penelitian ini adalah *propeller* berdaun tiga yang memiliki diameter sepanjang 5 cm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 *Propeller*

3.1.7 *Joint dan Shaft*

Yang dimaksud *joint* disini adalah perangkat yang menghubungkan rotor motor BLDC dengan *shaft*. *Joint* dibutuhkan karena *shaft* dan rotor motor tidak berada dalam satu garis lurus. *Joint* yang digunakan ditunjukkan pada pada Gambar 3.11. Sedangkan *shaft* adalah perangkat yang menghubungkan *propeller* dengan *joint*. *Shaft* diperlukan karena jarak *propeller* yang berada di luar wahana cukup jauh dari letak *joint* dan motor BLDC. *Shaft* yang digunakan pada penelitian ini memiliki panjang 45 cm, diameter luar 8 mm, dan diameter dalam 5 mm.



Gambar 3.11 *Joint dan Shaft*

3.1.8 *Remote Control dan Receiver Radiolink*

Remote control adalah perangkat yang berfungsi untuk mengendalikan wahana USV dengan mengirimkan perintah kepada *receiver* yang ada pada wahana yang selanjutnya akan diolah oleh *pixhawk cube* dan diteruskan ke mesin penggerak wahana. *Remote control* yang digunakan menggunakan brand *Radiolink* yang

mengharuskan *receiver* juga dari *brand/merk* yang sama. *Receiver* adalah alat yang berfungsi untuk menerima sinyal perintah dari *remote control*. *Remote control* ditunjukkan pada Gambar 3.12 dan *receiver* ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.12 *Remote Control*



Gambar 3.13 *Receiver Remote Control*

3.1.9 *Body USV*

Setelah semua perangkat keras tersedia, kemudian di letakkan pada badan wahana USV. Badan wahana USV terbuat dari kayu *triplex* yang dibentuk sedemikian rupa dan ditunjukkan pada Gambar 3.14. Panjang wahana USV sekitar 1,5 meter dengan massa total 8,4367 kg.

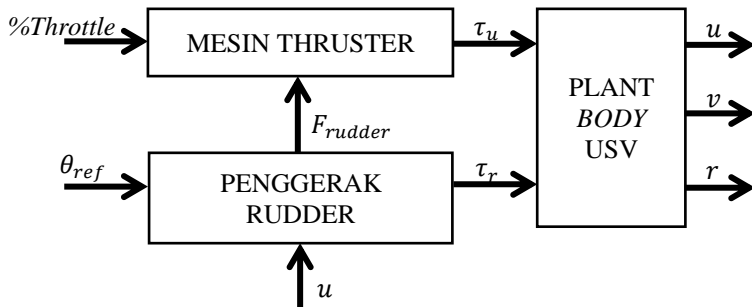


Gambar 3.14 Wahana USV

3.2 Perancangan Model Dinamika USV

Model dinamika USV yang akan dijelaskan pada bagian ini meliputi pemodelan *body* USV, mesin penggerak atau *thruster*, dan pemodelan kemudi/*rudder*. Pada bagian ini juga akan dijelaskan penyederhanaan model ataupun parameter apa saja yang perlu diestimasi.

Diagram blok dari model dinamika USV secara keseluruhan (pemodelan dinamika USV, mesin *thruster*, dan penggerak *rudder*) ditunjukkan pada Gambar 3.15 sebagai berikut :



Gambar 3.15 Diagram Blok Plant Keseluruhan USV

3.2.1 Model Dinamika USV

Model dinamika dari USV yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

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

$$\dot{v} = \frac{(X_{\dot{u}} - m)}{(m - Y_{\dot{v}})} ur - \frac{Y_v}{(m - Y_{\dot{v}})} v - \frac{Y_{|v|v}}{(m - Y_{\dot{v}})} |v|v - \frac{Y_{|r|v}}{(m - Y_{\dot{v}})} |r|v - \frac{Y_{|v|r}}{(m - Y_{\dot{v}})} |v|r + \frac{1}{(m - Y_{\dot{v}})} \tau_{vE} \quad (3.2)$$

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

Persamaan dinamika USV di atas dapat ditulis sebagai berikut :

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

$$\dot{v} = A(5)ur - A(6)v - A(7)|v|v - A(8)|r|v - A(9)|v|r + A(5)(-A(4))\tau_{vE} \quad (3.5)$$

$$\dot{r} = -A(10)|v|v - A(11)|r|v - A(12)|v|r - A(13)|r|r - A(14)r + A(15)\tau_r + A(16)uv + A(15)\tau_{rE} \quad (3.6)$$

Dikarenakan permukaan depan wahana USV yang lancip dan dapat memecah ombak, maka parameter damper *non-linear* ($A(3)$) pada sumbu x diasumsikan sangat kecil atau sama dengan nol.

3.2.2 Model Mesin Thruster

Untuk pemodelan mesin *thruster*, ada dua jenis pemodelan. Pemodelan pertama adalah pemodelan motor BLDC yang mewakili hubungan persen *throttle* dengan kecepatan putar *output* motor. Pemodelan kedua adalah pemodelan *propeller* yang mewakili hubungan kecepatan putar motor dengan gaya *thrust* yang dihasilkan mesin *thruster*.

Model hubungan persen *throttle* dengan kecepatan putar motor didekati dengan *transfer function* orde satu sebagai berikut :

$$\frac{\Omega_{motor}(s)}{\%Throttle(s)} = \frac{f(\%Throttle)}{\tau_{BLDC}s + 1} \quad (3.7)$$

Dimana $f(\%Throttle)$ adalah fungsi pendekatan matematika yang didapatkan dari data pengukuran eksperimen di darat kecepatan putar motor, sedangkan τ_{BLDC} adalah *time constant* kecepatan putar motor yang didapatkan dengan mendekati model motor BLDC pada paper referensi yang dipaparkan pada sub bab 2.3.1.

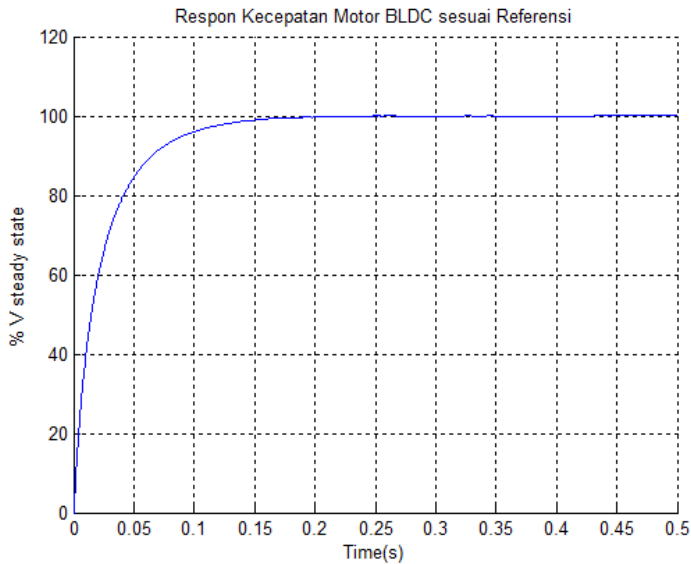
Parameter yang digunakan pada referensi ditunjukkan pada Tabel 3.1 sebagai berikut :

Tabel 3.1 Parameter Motor BLDC berdasarkan Referensi

Parameter	Nilai
R	0,6
L	0,00028
J	9,25e-06
B	7,9272e-06
K	0,0255
P	8

Dimana R adalah resistansi dalam motor, L adalah induktansi motor, J adalah momen inersia rotor, B adalah damper friksi rotor, K adalah konstanta GGL dan konstanta torsi yang memiliki nilai sama, dan P adalah jumlah *pole* motor.

Respon model motor BLDC dari paper referensi ditunjukkan pada Gambar sebagai berikut :



Gambar 3.16 Respon Kecepatan Putar Motor BLDC sesuai Parameter Referensi

Dari Gambar didapatkan nilai *time settling* sebesar 0,15 s, sehingga nilai τ_{BLDC} adalah 0,03 s. Nilai ini akan digunakan untuk simulasi mesin *thruster* pada penelitian ini.

Model hubungan kecepatan putar motor dengan gaya *thrust* adalah sebagai berikut :

$$\tau_u = K_{Thrust} \cdot \rho \cdot D^4 \cdot n^2 - F_{rudder} \quad (3.8)$$

Dimana K_{Thrust} adalah konstanta *thrust* yang akan diestimasi dengan data hasil eksperimen gerak lurus yang dirancang pada bab 3.5.2, ρ adalah massa jenis air yang bernilai 1025 kg/m^3 , D adalah diameter *propeller* yang bernilai 0,05 m, n adalah kecepatan putar *propeller* dalam satuan *Rps (Revolution – per – second)*, dan F_{rudder} adalah gaya yang dihasilkan karena adanya sudut defleksi *rudder* dan kecepatan *surge* kapal yang arahnya tegak lurus dengan *heading* kapal USV. Besar F_{rudder} ditentukan dengan Persamaan 2.78 dan parameter yang digunakan akan dibahas pada sub bab 3.2.3.

3.2.3 Model Penggerak Rudder

Rudder/kemudi digerakkan oleh motor servo sehingga sudut defleksi *rudder* bisa dikendalikan. Dengan mengatur sudut defleksi *rudder*, kita bisa mengendalikan besar momen inersia yang diberikan kepada kapal pada titik *rudder* tersebut.

Pemodelan penggerak *rudder* dibagi menjadi dua, yakni pemodelan respon posisi *rudder* dan model hubungan sudut defleksi *rudder* dengan momen inersia (τ_r) yang dihasilkan.

Pemodelan respon posisi *rudder* didekati dengan *transfer function* orde satu. Hal ini bisa dilakukan karena motor servo yang digunakan adalah motor servo seperti motor servo pada umumnya yang dilengkapi dengan *gear box* sehingga responnya merupakan respon orde satu. Berikut adalah *transfer function* dari respon posisi penggerak *rudder* dan *rudder* :

$$\frac{\Theta_{rudder}(s)}{\Theta_{ref}(s)} = \frac{1}{\tau_{rudder}s + 1} \quad (3.9)$$

Dimana τ_{rudder} akan dicari berdasarkan data hasil eksperimen di darat yang dirancang pada sub bab 3.5.

Pemodelan hubungan sudut defleksi *rudder* dan momen inersia adalah persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai momen inersia dengan memasukkan sudut defleksi *rudder*. Model hubungan sudut defleksi *rudder* dan τ_r adalah sebagai berikut :

$$F_{Rudder} = K_{efisiensi} \cdot \sin(\theta_{Rudder}) \cdot L_{Rudder} \cdot v_{surge} \quad (3.10)$$

$$\tau_r = F_{Rudder} \cdot LG \quad (3.11)$$

Dimana $K_{efisiensi}$ adalah konstanta efisiensi *rudder* yang akan diasumsikan bernilai 0,8 untuk penelitian ini. θ_{Rudder} adalah sudut defleksi *rudder* dan v_{surge} adalah kecepatan *surge* yang merupakan input persamaan ini. L_{Rudder} adalah luas permukaan *rudder* yang tercelup air yang besarnya $6,75 \times 10^{-3} m^2$ dan LG adalah panjang lengan gaya antara posisi *rudder* dan titik massa USV yang nilainya 0,673 m.

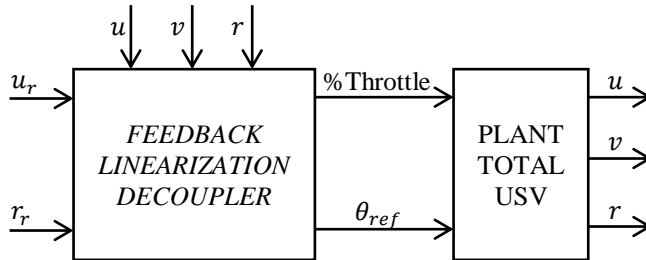
3.3 Perancangan *Feedback Linearization Decoupler*

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai perancangan *Feedback Linearization Decoupler*, yaitu metode kontrol untuk me-linierisasi model *plant* dari USV dengan menghilangkan keterkaitan antar persamaan. Metode kontrol ini difokuskan untuk kestabilan pada model

dinamika USV yaitu pada pengaturan kecepatan *surge* dan kecepatan *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. Karena itulah perlu dirancang metode kontrol *Feedback Linearization decoupler* agar keterkaitan tersebut dapat dihilangkan dengan menambahkan variabel baru.

Proses linierisasi dilakukan dengan membuat variabel persamaan selain masukan dan variabel baru yang merupakan sinyal kontrol, di mana masukan dari persamaan dinamika translasi sumbu x dan rotasi *yaw* tersebut adalah kecepatan *surge* dan kecepatan *yaw* yang nantinya merupakan sinyal kontrol yang bergantung dengan besarnya *error* antara kecepatan *surge* saat ini dengan kecepatan *surge* yang diinginkan dan kecepatan *yaw* saat ini dan kecepatan *yaw* yang diinginkan. Input baru kecepatan *surge* bertanggung jawab pada kecepatan *surge* yang akan dihasilkan oleh USV, begitu pula input baru kecepatan *yaw*. Nilai input referensi yang baru ditambahkan agar output *Feedback Linearization* berupa masukan persen *throttle* pada *thruster* dan sudut defleksi *rudder* pada USV agar dapat mengatur keluaran kecepatan *surge* dan kecepatan *yaw* untuk mengikuti sinyal referensi yang diberikan.

Diagram blok dari *feedback linearization decoupler* ditunjukkan pada Gambar 3.17 sebagai berikut :



Gambar 3.17 Diagram Blok *Feedback Linearization Decoupler*

Berikut adalah penurunan persamaan *feedback linearization decoupler* untuk sumbu x atau kecepatan *surge* :

$$\dot{u} = -A(2)u + u_r - u_r + A(1)vr + A(4)\tau_u \quad (3.12)$$

Agar kecepatan *surge* hanya dipengaruhi oleh u_r , maka :

$$-u_r + A(1)vr + A(4)\tau_u = 0 \quad (3.13)$$

$$\tau_u = F_{Thrust} - |F_{Rudder}| = \frac{1}{A(4)}(u_r - A(1)vr) \quad (3.14)$$

$$K_{Thrust}\rho_{air}d^4\omega^2 = \frac{1}{A(4)}(u_r - A(1)vr) + |F_{Rudder}| \quad (3.15)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\frac{1}{A(4)}(u_r - A(1)vr) + |F_{Rudder}|}{K_{Thrust}\rho_{air}d^4}} \quad (3.16)$$

$$\omega = f(\%throttle) \rightarrow \%throttle = f^{-1}(\omega) \quad (3.17)$$

Dimana,

$$F_{Rudder} = K_{efisiensi} \cdot \sin(\theta_{Rudder}) \cdot L_{Rudder} \cdot v_{surge} \quad (3.18)$$

$f(\%throttle)$ adalah fungsi hubungan *throttle* dan kecepatan putar motor BLDC yang didapatkan setelah dilakukan eksperimen di darat.

Selanjutnya adalah penurunan persamaan *feedback linearization decoupler* untuk sumbu *yaw* atau kecepatan rotasi *yaw*.

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

Agar kecepatan rotasi *yaw* hanya dipengaruhi r_r , maka :

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

$$\begin{aligned} \tau_r = & \frac{1}{A(15)}(r_r + A(10)|v|v + A(11)|r|v \\ & + A(12)|v|r \\ & + A(13)|r|r - A(16)uv) \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\tau_r = K_{efisiensi} \cdot \sin(\theta_{Rudder}) \cdot L_{Rudder} \cdot v_{surge} \cdot LG \quad (3.22)$$

$$\theta_{Rudder} = \sin^{-1}\left(\frac{1}{K_{pembagi}} * B\right) \quad (3.23)$$

Dimana,

$$B = (r_r + A(10)|v|v + A(11)|r|r + A(12)|v|r + A(13)|r|r - A(16)uv) \quad (3.24)$$

$$K_{pembagi} = A(15)K_{efisiensi}L_{Rudder}v_{surge}LG \quad (3.25)$$

Karena v_{surge} sebagai variable pembagi, maka nilai v_{surge} tidak boleh nol. Namun pada kenyataannya nilai v_{surge} mungkin saja nol, yaitu ketika sebelum bergerak, ataupun ketika diam di tengah perairan. Oleh karena itu, untuk kepentingan simulasi maka persamaan $K_{pembagi}$ menjadi sebagai berikut :

$$K_{pembagi} = A(15).K_{efisiensi}.L_{Rudder}.LG.(v_{surge} + 0,0001) \quad (3.26)$$

Setelah digunakan *Feedback Linearization Decoupler*, maka persamaan dinamik sumbu x dan yaw menjadi sebagai berikut :

$$\dot{u} = -A(2)u + u_r \quad (3.27)$$

$$\dot{r} = -A(14)r + r_r \quad (3.28)$$

3.4 Perancangan Metode Estimasi Parameter

Metode estimasi parameter yang digunakan akan dijelaskan pada sub bab ini, yang meliputi estimasi parameter *body* dan estimasi parameter mesin *thruster*.

3.4.1 Metode Estimasi Parameter *Body* USV

Seperti yang sudah dijelaskan pada bab 2, bahwa pada penelitian ini akan menggunakan metode *non-linear least square* dan metode Levenberg-Marquardt sebagai metode optimasi untuk estimasi parameter *body* USV.

Pada penelitian ini, untuk estimasi parameter *body* USV akan dilakukan dengan mencari parameter yang akan membuat perbedaan antara percepatan sumbu x, y, dan yaw dari data eksperimen dengan percepatan sumbu x, y, dan yaw dari model USV menjadi sangat kecil, sehingga parameter hasil bisa diasumsikan merupakan parameter sesungguhnya.

Berikut adalah persamaan *body* USV yang digunakan :

$$\dot{u} = A(1)vr - A(2)u + A(4)\tau_u \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} \dot{v} = & A(5)ur - A(6)v - A(7)|v|v - A(8)|r|v \\ & - A(9)|v|r \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} \dot{r} = & -A(10)|v|v - A(11)|r|v - A(12)|v| \\ & - A(13)|r|r - A(14)r + A(15)\tau_r \\ & + A(16)uv \end{aligned} \quad (3.31)$$

Dimana \dot{u} , \dot{v} , dan \dot{r} juga didapatkan nilainya tiap waktu pada saat eksperimen, sehingga perbedaan dari data eksperimen dan hasil persamaan adalah sebagai berikut :

$$f_1 = \dot{u} - \dot{u}_{eksperimen} \quad (3.32)$$

$$f_2 = \dot{v} - \dot{v}_{eksperimen} \quad (3.33)$$

$$f_3 = \dot{r} - \dot{r}_{eksperimen} \quad (3.34)$$

f_1 , f_2 , dan f_3 inilah yang akan diminimalisasi dengan metode *non-linear least square* sehingga didapatkan parameter $A(1)$ sampai $A(16)$ yang bisa diasumsikan sebagai parameter sebenarnya.

Agar dapat melakukan estimasi parameter *body USV*, maka perlu didapatkan data eksperimen yaitu, kecepatan sumbu x , y , dan *yaw earth frame*; percepatan x , y , dan *yaw earth frame*; sudut *heading USV* yang diperlukan untuk transformasi kecepatan dan percepatan USV pada koordinat *earth frame* menjadi kecepatan dan percepatan USV pada koordinat *body frame*; persen *throttle*; dan perintah sudut defleksi kemudi pada penggerak kemudi yang didapatkan dengan melakukan eksperimen *maneuver* yang akan dijelaskan pada bab selanjutnya. Data yang masih berada dalam koordinat *body frame* harus ditransformasikan menjadi data koordinat *body frame* untuk keperluan estimasi, karena kecepatan dan percepatan yang digunakan untuk estimasi adalah dalam koordinat *body frame*.

3.4.2 Estimasi Parameter Mesin Thruster

Pada sub bab ini akan dijelaskan metode untuk mendapatkan konstanta *thrust* berdasarkan data eksperimen gerak lurus USV di perairan. Data eksperimen yang diperlukan untuk pemodelan konstanta *thrust* adalah *time settling* dari respon kecepatan *surge*.

Untuk memodelkan konstanta *thrust*, diturunkan dari persamaan gerak kapal sebagai berikut :

$$F = m \cdot \frac{du}{dt} + B \cdot u \quad (3.35)$$

Persamaan diatas diturunkan ke domain *laplace* menjadi sebagai berikut :

$$\frac{U(s)}{F(s)} = \frac{1}{m \cdot s + B} = \frac{\frac{1}{B}}{\frac{m}{B} \cdot s + 1} = \frac{K}{\tau_{surge} \cdot s + 1} \quad (3.36)$$

Dari persamaan diatas, didapatkan bahwa nilai *time constant* kecepatan *surge* sama dengan nilai massa kapal dibagi nilai B yang merupakan *dampner linear* kapal. Dari persamaan itu didapatkan persamaan untuk menentukan nilai *dampner linear* USV.

Ketika kecepatan kapal sudah dalam kondisi *steady state*, maka nilai percepatan kedepan kapal (dv/dt) adalah nol, sehingga gaya yang diberikan pada kapal saat kecepatan *surge* sudah dalam kondisi *steady state* adalah sebagai berikut :

$$F = B \cdot u = K_{Thrust} \cdot \rho \cdot D^4 \cdot n^2 \quad (3.37)$$

Sehingga untuk estimasi konstanta *thrust* bisa menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$K_{Thrust} = \frac{B \cdot u}{\rho \cdot D^4 \cdot n^2} \quad (3.38)$$

Dimana B adalah *dampner linear* USV, ρ adalah massa jenis air, D adalah diameter *propeller*, u adalah kecepatan *surge* USV, dan n adalah kecepatan putar *propeller*. Nilai ρ dan D sudah dituliskan pada bab 3.2.2, nilai n bergantung dari besarnya *throttle* mesin *thruster* dan bersatuan *revolution-per-second*, nilai B diestimasi dengan data *time constant* kecepatan *surge* gerak lurus USV, dan u adalah kecepatan *surge steady state* yang dialami kapal saat eksperimen gerak lurus.

Sehingga data yang digunakan untuk estimasi parameter motor *thruster* dari eksperimen gerak lurus adalah *time settling* kecepatan *surge*, data persen *throttle* dan data kecepatan *surge* USV saat *steady state*.

3.5 Perancangan Eksperimen

Pada bagian ini akan dijelaskan tentang hal-hal yang akan dilakukan untuk mendapatkan data untuk penelitian. Eksperimen yang akan dilakukan dibagi menjadi dua, yaitu eksperimen di darat dan eksperimen di air.

3.5.1 Eksperimen di Darat

Eksperimen di darat adalah eksperimen yang dilakukan di darat untuk mendapatkan data-data yang diinginkan. Ada dua eksperimen di darat yang akan dilakukan.

Eksperimen pertama adalah eksperimen untuk mendapatkan persamaan matematika hubungan antara *throttle* mesin dan kecepatan sudut motor BLDC yang dihasilkan. Langkah pertama adalah pastikan sistem USV sudah terkoneksi dengan *remote control* sehingga kecepatan motor bisa diatur melalui *remote control*. Selanjutnya adalah gerakkan *throttle* pada *remote control* sehingga motor bergerak dengan kecepatan tertentu, ukur persen *throttle* yang dilakukan (persen *throttle* bisa dilihat pada data yang tersimpan pada *pixhawk cube*) dan ukur kecepatan putar motor BLDC yang terjadi dengan menggunakan *tachometer*. Ulangi langkah tersebut dengan menggerakkan *throttle* sehingga persen *throttle* berbeda dengan persen *throttle* sebelumnya, lakukan pengulangan sampai tercatat beberapa data hubungan persen *throttle* dan kecepatan putar motor BLDC. Catat semua data yang sudah diukur, berupa persen *throttle* dan kecepatan putar motor BLDC. Lalu dilakukan analisa sehingga didapatkan model matematika hubungan antara persen *throttle* dan kecepatan putar motor BLDC.

Eksperimen kedua adalah eksperimen untuk mendapatkan *time settling* sudut defleksi *rudder*. Langkah pertama adalah pastikan sistem USV terkoneksi dengan *remote control* sehingga motor penggerak kemudi bisa dikendalikan melalui *remote control*. Selanjutnya gerakkan kemudi melalui *remote control* sehingga kemudi mengalami defleksi maksimum ke kanan. Kemudian dari defleksi maksimum ke kanan, gerakkan kemudi ke kiri sampai mengalami defleksi maksimum ke kiri, catat waktu yang diperlukan kemudi untuk bergerak dari keadaan defleksi maksimum ke kanan menjadi defleksi maksimum ke kiri dengan menggunakan *stopwatch*. Ulangi langkah di atas sehingga didapatkan beberapa data waktu yang diperlukan kemudi untuk bergerak dari defleksi maksimum ke kanan menjadi defleksi maksimum ke kiri ataupun sebaliknya. Rata-rata data waktu tersebut adalah *time settling* motor penggerak kemudi.

3.5.2 Eksperimen di Air

Eksperimen di air adalah eksperimen yang dilakukan dengan menggerakkan wahana USV di perairan untuk mendapatkan data-data

yang diperlukan. Eksperimen di air dibagi menjadi dua, yakni eksperimen gerak lurus dan eksperimen *maneuver*.

Eksperimen gerak lurus adalah eksperimen yang dilakukan untuk mendapatkan parameter konstanta *thrust* dari mesin *thruster*. Langkah pertama adalah pastikan wahana USV sudah terkoneksi dengan *remote control* sehingga mesin *thruster* dan penggerak *rudder* bisa dikendalikan dengan *remote control*, kemudian letakkan wahana USV pada wilayah perairan. Lalu gerakkan *throttle* pada *remote control* sehingga wahana USV bergerak maju, dan kendalikan penggerak *rudder* sebisa mungkin sehingga USV bergerak lurus kedepan (tidak berbelok). Kemudian diambil data yang tersimpan pada *memory card pixhawk cube* untuk selanjutnya dianalisa sehingga didapatkan konstanta *thrust* mesin *thruster*.

Eksperimen *maneuver* adalah eksperimen yang dilakukan untuk mendapatkan data yang nantinya digunakan sebagai data untuk melakukan estimasi parameter *body* USV. Langkah pertama adalah pastikan wahana USV sudah terkoneksi dengan *remote control* sehingga mesin *thruster* dan penggerak *rudder* bisa dikendalikan dengan *remote control*, kemudian letakkan wahana USV pada wilayah perairan. Gerakkan *throttle* sehingga USV bergerak maju, dan kendalikan penggerak *rudder* sehingga USV bisa melakukan *maneuver* dari *maneuver* belok ke kanan, *maneuver* belok ke kiri, *maneuver* gerak memutar, dan *maneuver* gerakan berkelok-kelok. Selanjutnya diambil data yang tersimpan di *memory card pixhawk cube* yang berupa data kecepatan sumbu x, y, dan *yaw earth frame*; percepatan x, y, dan *yaw earth frame*; sudut *heading* USV yang diperlukan untuk transformasi kecepatan dan percepatan USV pada koordinat *earth frame* menjadi kecepatan dan percepatan USV pada koordinat *body frame*; persen *throttle*; dan perintah sudut defleksi kemudi pada penggerak kemudi.

3.6 Perancangan Kontroler PI

Kontroler PI digunakan untuk mengatur respon kecepatan *surge* dan kecepatan *yaw* sehingga sesuai dengan karakteristik yang diinginkan. Seperti yang dijelaskan pada bab 3.3, setelah dilakukan linearisasi maka persamaan ekuivalen dari percepatan *surge* dan percepatan *yaw* menjadi sebagai berikut :

$$\dot{u} = -A(2)u + u_r \quad (3.39)$$

$$\dot{r} = -A(14)r + r_r \quad (3.40)$$

Dimana u_r dan r_r adalah input referensi *feedback linearization decoupler* dan merupakan keluaran dari kontroler PI masing-masing sumbu, yakni sumbu x dan sumbu yaw . Jika persamaan di atas ditransformasikan ke dalam bentuk *laplace*, maka akan menjadi sebagai berikut :

$$\frac{U(s)}{U_r(s)} = \frac{\frac{1}{A(2)}}{\frac{1}{A(2)}s + 1} \quad (3.41)$$

$$\frac{R(s)}{R_r(s)} = \frac{\frac{1}{A(14)}}{\frac{1}{A(14)}s + 1} \quad (3.42)$$

Untuk desain kontroler PI, digunakan metode analitik. *Transfer function* dari kontroler PI adalah sebagai berikut :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(\frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \right) \quad (2.43)$$

Diperlukan *transfer function* penyederhanaan *feedback* untuk melakukan metode analitik. Berikut ini akan dituliskan penggunaan metode analitik untuk mendapatkan konstanta K_p dan τ_i untuk pengaturan kecepatan *surge*.

Transfer function penyederhanaan *feedback* negatif dari kontroler dan *plant* adalah sebagai berikut :

$$\frac{U(s)}{U_{ref}(s)} = \frac{K_p \left(\frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \right) \left(\frac{K_{plant}}{K_{plant}s + 1} \right)}{K_p \left(\frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \right) \left(\frac{K_{plant}}{K_{plant}s + 1} \right) + 1} \quad (2.44)$$

Dimana K_{plant} pada persamaan di atas bernilai $\frac{1}{A(2)}$. Selanjutnya nilai τ_i dan K_{plant} dianggap sama sehingga persamaan di atas bisa menjadi sebagai berikut :

$$\frac{U(s)}{U_{ref}(s)} = \frac{\left(\frac{K_p K_{plant}}{\tau_i s} \right)}{\left(\frac{K_p K_{plant}}{\tau_i s} \right) + 1} \quad (2.45)$$

Dari persamaan di atas kemudian diubah bentuk menjadi *transfer function* orde satu menjadi sebagai berikut :

$$\frac{U(s)}{U_{ref}(s)} = \frac{1}{\frac{\tau_i}{K_p K_{plant}} s + 1} \quad (2.46)$$

Persamaan tersebut adalah persamaan *transfer function* ekuivalen dengan input kecepatan *surge* yang diinginkan dan output kecepatan *surge* yang dihasilkan USV. Dan didapat parameter kontroler sebagai berikut :

$$\tau_i = K_{plant} = \frac{1}{A(2)} \quad (2.47)$$

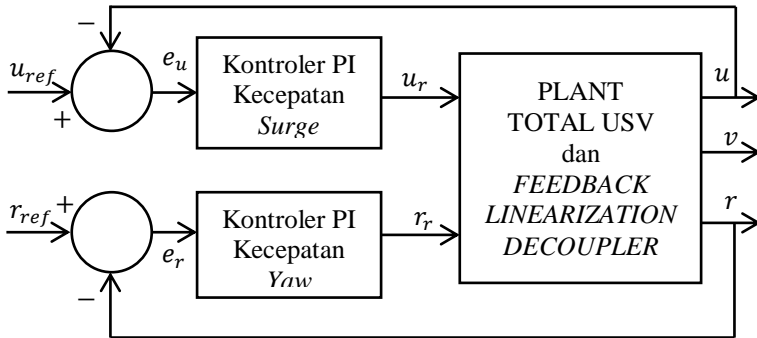
$$\frac{\tau_i}{K_p K_{plant}} = \tau_{desain} \quad (2.48)$$

$$K_p = \frac{\tau_i}{\tau_{desain} K_{plant}} = \frac{1}{\tau_{desain}} \quad (2.49)$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} = \frac{A(2)}{\tau_{desain}} \quad (2.50)$$

Dimana τ_{desain} adalah *time constant* yang ingin dihasilkan ketika *plant* sudah dikontrol dengan kontroler PI. Pada penelitian ini digunakan τ_{desain} sebesar 2 detik untuk kecepatan *surge* dan 0,5 untuk kecepatan *yaw*.

Diagram blok dari perancangan pengaturan kecepatan *surge* dan kecepatan *yaw* yang ditunjukkan pada Gambar 3.18 sebagai berikut :



Gambar 3.18 Diagram Blok Pengaturan Kecepatan *Surge* dan *Yaw Rate*

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4 HASIL DAN ANALISA

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil dan analisa yang didapatkan dari eksperimen dan pengujian simulasi sistem kontrol yang telah dirancang pada bab 3. Linierisasi dinamika USV dilakukan dengan menggunakan metode *Feedback Linearization Decoupler* dan kecepatan *surge* serta kecepatan *yaw* dikendalikan dengan menggunakan kontroler *Proportional Integral* (PI).

4.1 Gambaran Umum Analisa dan Pengujian Sistem

Sebelum melakukan Simulasi USV, harus dilakukan analisa data eksperimen terlebih dahulu, baik eksperimen di darat ataupun air. Analisa data menghasilkan parameter estimasi yang akan digunakan untuk simulasi model USV, *Feedback Linearization Decoupler*, dan kontroler yang akan digunakan. Tahapan analisa dan pengujian pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Analisa data hasil eksperimen
Analisa data eksperimen berisi tentang hasil estimasi parameter *body* USV, analisa parameter *thruster* berdasarkan eksperimen gerak lurus dan eksperimen di darat pertama, dan analisa *time settling* motor servo berdasarkan data eksperimen di darat kedua.
- b. Validasi dan koreksi parameter USV
Setelah didapatkan parameter, perlu dilakukan validasi untuk memastikan parameter yang didapat sudah memenuhi kriteria untuk diasumsikan sebagai parameter sesungguhnya. Validasi memerlukan pengujian *open loop* untuk membandingkan data hasil simulasi dengan data eksperimen. Selain itu perlu dilakukan pengujian *open loop* untuk mengetahui apakah parameter perlu dikoreksi manual atau tidak. Jika diperlukan akan dilakukan koreksi manual terhadap parameter yang kurang tepat dan dilakukan validasi ulang.
- c. Pengujian *feedback linearization decoupler*
Setelah parameter sudah divalidasi, selanjutnya adalah melakukan pengujian terhadap *feedback linearization decoupler*. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa *feedback* sudah berfungsi sebagaimana mestinya.

- d. Pengujian kontroler kecepatan *surge* dan *yaw rate*
 Tahap terakhir adalah dilakukan pengujian kontroler PI yang sudah dirancang untuk mengetahui hasil kinerja kontroler terhadap model USV yang dikendalikan.

4.2 Analisa Data Hasil Eksperimen

Analisa data dibagi menjadi tiga, yaitu analisa data untuk estimasi parameter mesin *thruster* (eksperimen mesin *thruster* dan gerak lurus USV), analisa data untuk estimasi parameter *body* USV (eksperimen *manuever* USV), dan analisa data untuk estimasi parameter mesin penggerak *rudder* (eksperimen respon penggerak *rudder*).

4.2.1 Analisa Data Eksperimen Mesin Thruster dan Gerak Lurus

Eksperimen mesin *thruster* adalah eksperimen untuk mendapatkan persamaan matematika hubungan antara persentase *throttle* dan kecepatan putar yang dihasilkan mesin *thruster*. Data yang didapatkan dari eksperimen mesin *thruster* adalah sebagai berikut :

Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen Mesin Thruster

Throtle	Kecepatan Putar
25,9615%	1248,6784 rad/s
28,2692%	1312,6621 rad/s
32,6923%	1423,2462 rad/s
38,4615%	1469,6370 rad/s

Dari data tersebut digunakan model matematika yang dapat mempresentasikan hubungan persen *throttle* dan kecepatan putar mesin *thruster*. Penulis menggunakan persamaan matematika sebagai berikut untuk mendekati data tersebut :

$$\omega = a_1(\%Throttle)^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

Didapatkan nilai a_1 adalah 242,7027, nilai a_1 didapatkan dengan mencari nilai yang menghasilkan RMSE terkecil. Perbandingan data sebenarnya dengan hasil model matematika pendekatan ditunjukkan oleh Tabel 4.2 sebagai berikut :

Tabel 4.2 Perbandingan Data Sebenarnya dan Hasil Model Pendekatan Kecepatan Putar Motor BLDC

Throttle	Data Sebenarnya	Hasil Model	Error
25,9615%	1248,6784	1236,6292	12,0492
28,2692%	1312,6621	1290,4208	22,2413
32,6923%	1423,2462	1387,7056	35,5406
38,4615%	1469,6370	1505,1774	-35,5405
RMSE			28,1341

Dengan RMSE yang bernilai kecil (dilihat dari data yang dibandingkan berada di kisaran ribuan) , maka penulis berkesimpulan bahwa model matematika yang telah didapatkan bisa digunakan untuk mempresentasikan hubungan persen *throttle* dan kecepatan putar mesin *thruster*.

Berikutnya adalah mendapatkan konstanta *thrust* dari mesin *thruster* dengan menggunakan data eksperimen gerak lurus. Dari eksperimen tegak lurus didapatkan data respon kecepatan *surge* yang memiliki spesifikasi respon ditunjukkan Tabel 4.3 sebagai berikut :

Tabel 4.3 Spesifikasi Data Eksperimen Gerak Lurus USV

Spesifikasi	Nilai
<i>Settling Time</i>	13,5797 s
<i>V_{surge} Steady State</i>	2,2778 m/s
<i>Input Throttle</i>	38,4615%

Dari spesifikasi data di atas, bisa didapatkan nilai konstanta *thrust* dengan metode yang sudah dijelaskan pada sub bab 3.4.2. Berikut adalah perhitungan konstanta *thrust* dari spesifikasi data yang didapatkan :

$$B = \frac{m}{\tau_{surge}} = \frac{8,4367}{\left(\frac{13,5797}{5}\right)} = 3,10636 \quad (4.2)$$

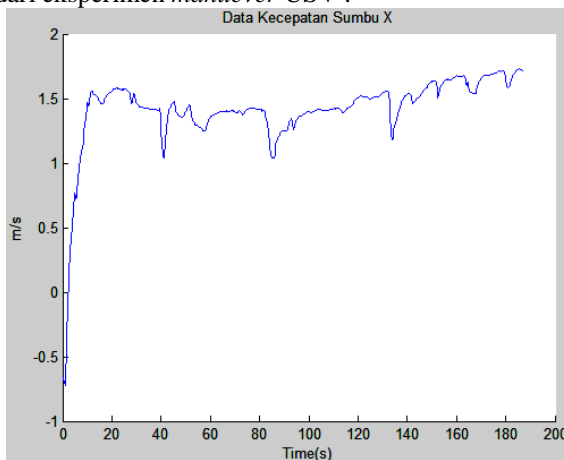
$$K_{Thrust} = \frac{B \cdot u}{\rho \cdot D^4 \cdot n^2} = 0,020188 \quad (4.3)$$

Dimana *u* adalah kecepatan *surge* yang bernilai 2,2778 m/s, dan *n* adalah kecepatan putar mesin yang bernilai 233,8999 *revolution/s* yang

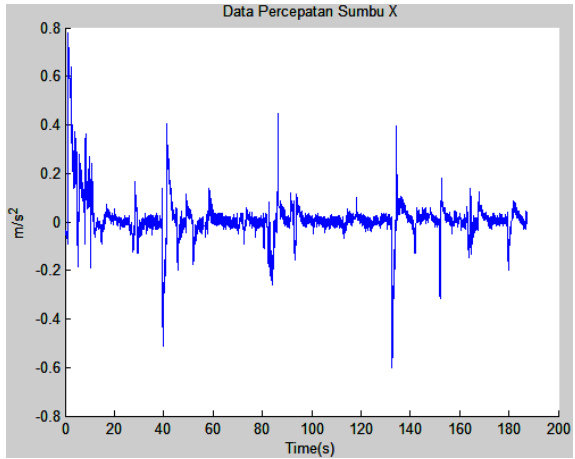
didapat dari data eksperimen mesin *thruster* yang menggunakan input persen *throttle* yang sama, yaitu 38,4615%.

4.2.2 Analisa Data Eksperimen Manuever USV

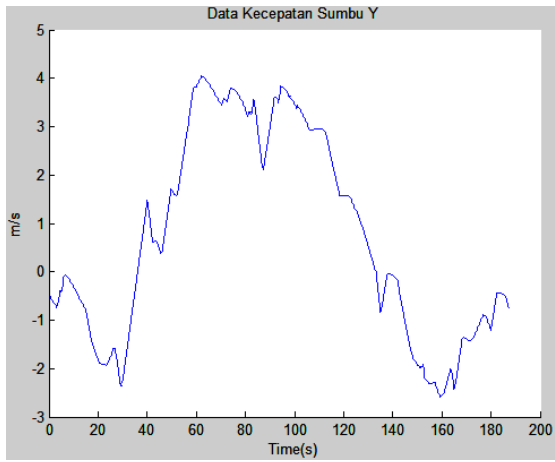
Analisa data eksperimen *manuever* USV digunakan untuk mendapatkan nilai estimasi dari parameter *body* USV. Berikut adalah data yang diperlukan untuk estimasi parameter *body* USV yang didapatkan dari eksperimen *manuever* USV :



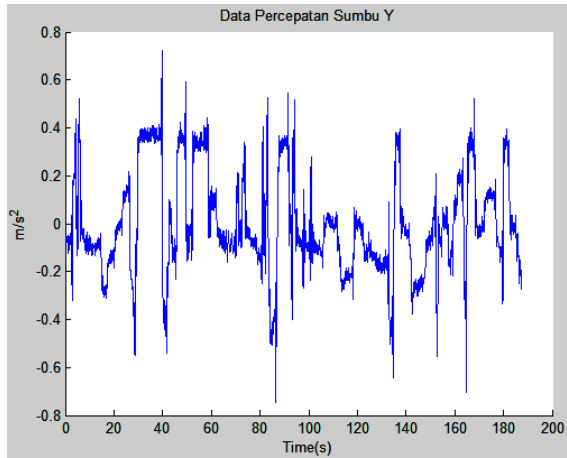
Gambar 4.1 Data Kecepatan *Surge* (Sumbu X)



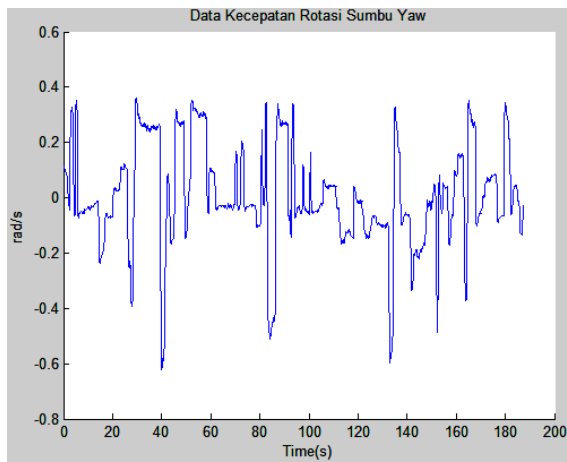
Gambar 4.2 Data Percepatan Sumbu X



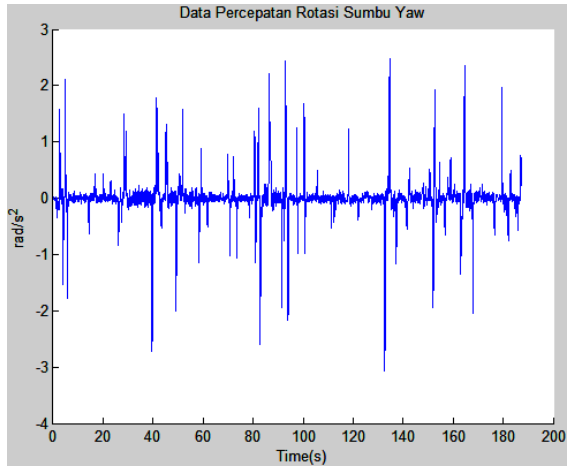
Gambar 4.3 Data Kecepatan *Sway* (Sumbu Y)



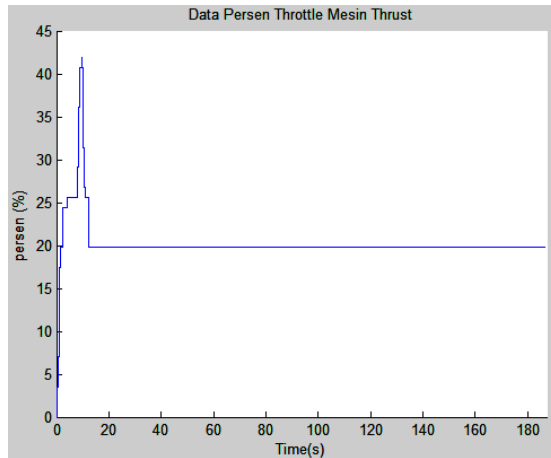
Gambar 4.4 Data Percepatan Sumbu Y



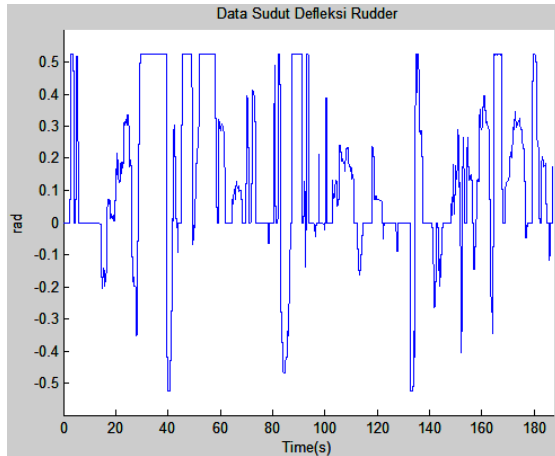
Gambar 4.5 Data Kecepatan Rotasi Sumbu Yaw



Gambar 4.6 Data Percepatan Rotasi Sumbu *Yaw*

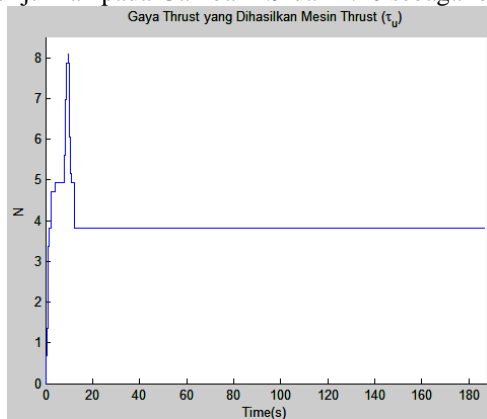


Gambar 4.7 Data Persen *Throttle* Mesin *Thruster*

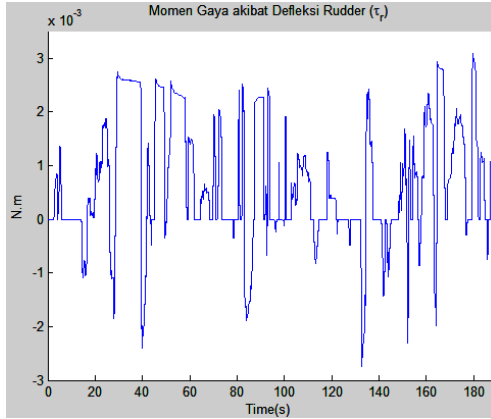


Gambar 4.8 Data Sudut Defleksi Rudder

Pertama penulis menghitung gaya dorong *thruster* (τ_u) dan momen gaya akibat defleksi *rudder* (τ_r) tiap waktu dari data persen *throttle* dan sudut defleksi *rudder* dengan menggunakan persamaan matematika *thruster* dan penggerak *rudder*. Data τ_u dan τ_r yang didapatkan dari perhitungan ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan 4.10 sebagai berikut :



Gambar 4.9 Gaya Thrust yang Dihasilkan Mesin Thruster



Gambar 4.10 Momen Gaya akrobat Sudut Defleksi *Rudder*

Setelah dihitung data τ_u dan τ_r , maka penulis menggunakan program yang telah dirancang untuk mengestimasi parameter *body* USV dengan menggunakan data $\tau_u, \tau_r, u, v, r, \dot{u}, \dot{v}$, dan \dot{r} sebagai masukan program yang didapatkan dari eksperimen *maneuver* USV di perairan. Asumsi yang telah dijelaskan pada sub bab 3.2.1 yaitu tentang parameter $A(3)$ yang diasumsikan bernilai nol juga diaplikasikan pada program yang digunakan.

Berikut hasil parameter yang didapatkan dengan menggunakan program yang dirancang dan dari data yang sudah didapatkan :

Tabel 4.4 Parameter Hasil Estimasi

Parameter	Nilai
$A(1)$	0,0152
$A(2)$	0,1305
$A(3)$	0
$A(4)$	0,0508
$A(5)$	0,6245
$A(6)$	-0,0075
$A(7)$	0,0023
$A(8)$	-0,0111
$A(9)$	0,0139
$A(10)$	0,0194
$A(11)$	0,0505

Parameter	Nilai
$A(12)$	0,0268
$A(13)$	-0,4451
$A(14)$	0,7005
$A(15)$	106,4701
$A(16)$	0,0385

4.2.3 Analisa Data Eksperimen Penggerak Rudder

Dari eksperimen penggerak *rudder* yang telah dilakukan, didapatkan data sebagai berikut :

Tabel 4.5 Data Hasil Eksperimen Penggerak *Rudder*

Percobaan ke	<i>Settling Time</i>
1	0,535 s
2	0,475 s
3	0,456 s
4	0,488 s
5	0,511 s
Rata-rata	0,493 s

Dari nilai rata-rata tersebut, didapatkan *time constant* dari penggerak *rudder* dengan cara sebagai berikut :

$$\tau_{rudder} = \frac{\text{Settling time}}{5} = 0,0986 \text{ s} \quad (4.4)$$

Didapatkan nilai *time constant* sebesar 0,0986 detik untuk kecepatan respon penggerak *rudder*.

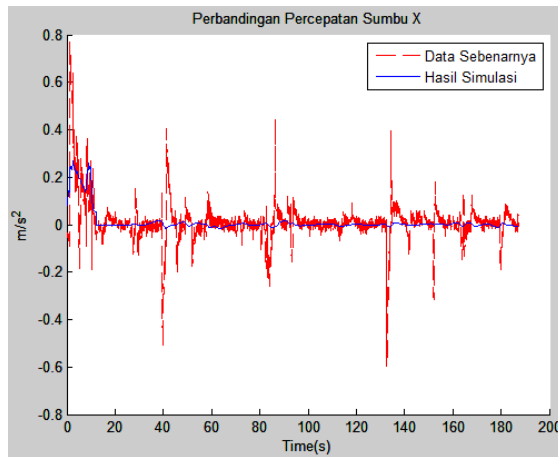
4.3 Validasi Dan Koreksi Parameter USV

Setelah didapatkan estimasi parameter *body* USV dan mesin *thruster*. Penulis melakukan validasi parameter untuk mengetahui kevalidan dari parameter tersebut. Dilakukan dua validasi pada buku ini, validasi pertama adalah validasi parameter *body* USV dan validasi kedua adalah validasi parameter mesin *thruster*.

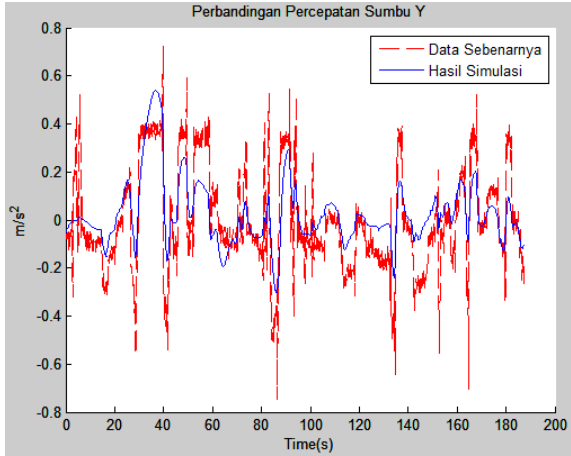
4.3.1 Validasi Parameter *Body* USV

Validasi parameter *body* USV dilakukan dengan menggunakan simulasi wahana USV dengan parameter yang sudah didapatkan pada sub bab 4.2.2. Parameter dikatakan valid jika nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) antara data hasil simulasi dan data dari eksperimen

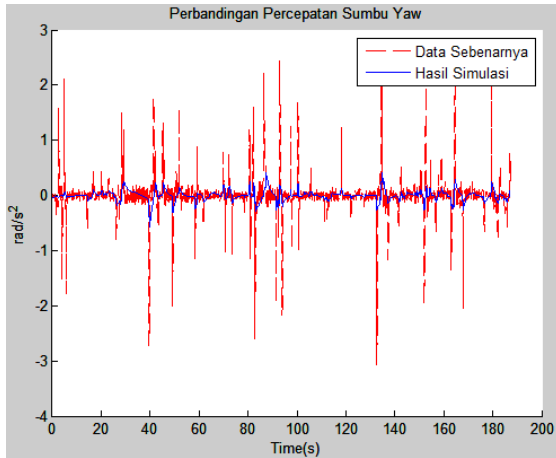
maneuver USV bernilai kecil atau mendekati nol. Selain itu, parameter yang valid akan menghasilkan grafik data hasil simulasi yang sama atau mendekati sama jika dibandingkan dengan grafik data hasil eksperimen *maneuver* USV. Jenis data yang dibandingkan ada tiga, percepatan sumbu x, percepatan sumbu y, dan percepatan rotasi sumbu *yaw body-frame* USV. Grafik dari perbandingan ketiga jenis data tersebut antara hasil simulasi dan hasil eksperimen ditunjukkan pada Gambar 4.11 - 4.13 sebagai berikut :



Gambar 4.11 Perbandingan Data Percepatan Sumbu X dan Hasil Simulasi Model



Gambar 4.12 Perbandingan Data Percepatan Sumbu Y dan Hasil Simulasi Model



Gambar 4.13 Perbandingan Data Percepatan Rotasi Sumbu *Yaw* dan Hasil Simulasi Model

Dibawah ini adalah Tabel hasil perhitungan nilai RMSE antara data simulasi dan data hasil eksperimen *maneuver* USV.

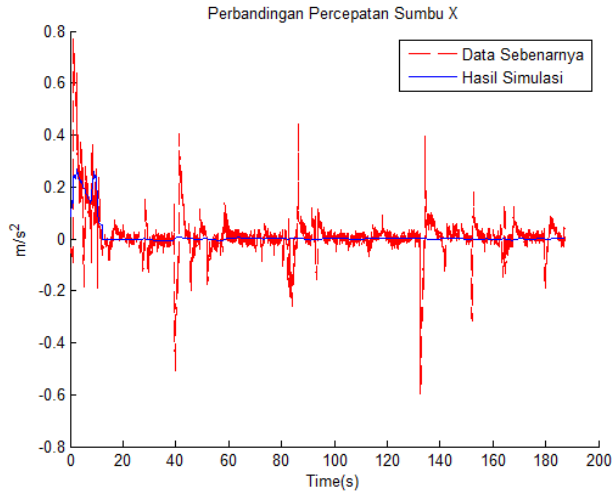
Tabel 4.6 Nilai RMSE antara Data Eksperimen dengan Hasil Simulasi

Variabel	Nilai RMSE
\dot{u}	0,0799
\dot{v}	0,1729
\dot{r}	0,3582

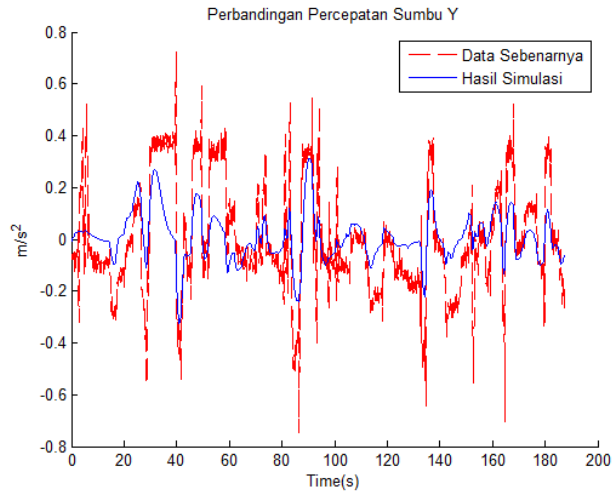
Menurut penulis, nilai RMSE di atas sudah termasuk nilai yang cukup kecil. Namun penulis menganalisa tiap parameter yang didapatkan dan menemukan bahwa ada parameter yang perlu dikoreksi. Analisa koreksi parameter tersebut antara lain :

- a. Koreksi parameter $A(1)$. Parameter $A(1)$ adalah parameter yang mempresentasikan hubungan percepatan *surge* dengan kecepatan *sway* dan *yaw*. Menurut analisa logis, jika USV memiliki nilai kecepatan *sway* dan *yaw* serta nilai gaya dorong *thruster* dijaga tetap pada satu nilai, maka kecepatan *surge* akan menurun berbanding lurus dengan besarnya kecepatan *sway* dan *yaw*. Agar kondisi tersebut terjadi, maka percepatan *surge* harus bernilai negatif ketika USV memiliki nilai kecepatan *sway* dan *yaw*. Sehingga parameter $A(1)$ seharusnya bertanda negatif. Untuk memenuhi kondisi tersebut, maka penulis melakukan koreksi parameter dengan mengubah tanda pada parameter $A(1)$ sehingga parameter $A(1)$ bertanda negatif. Sehingga nilai parameter $A(1)$ menjadi -0.0152.
- b. Koreksi parameter $A(7)$. $A(7)$ adalah parameter USV yang mempresentasikan damper non-linier pada sumbu y . Menurut analisa logis penulis, nilai parameter $A(7)$ seharusnya menjadi nilai dominan atau nilai paling besar diantara parameter $A(6)$ sampai $A(9)$. Hal ini dikarenakan bentuk wahana USV yang memiliki luas sisi kanan-kiri yang lebar sehingga menyebabkan damper non-linear pada pada sumbu y seharusnya dominan. Untuk memenuhi kondisi tersebut penulis melakukan koreksi parameter dengan mengalikan parameter yang telah didapat dengan suatu konstanta, dan penulis mengalikan parameter tersebut dengan konstanta sebesar 80. Sehingga nilai $A(7)$ menjadi bernilai 0.1831.

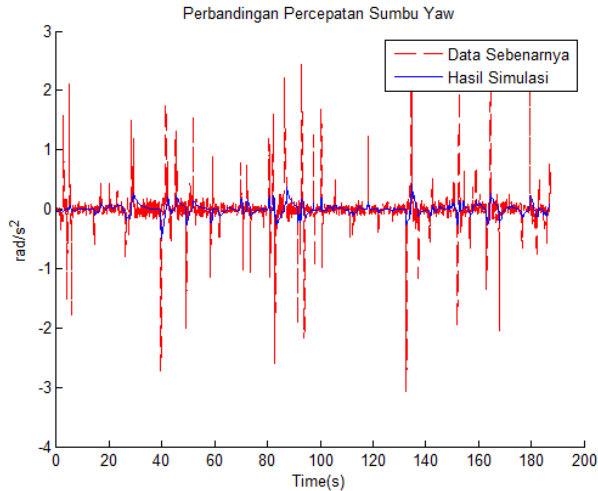
Setelah melakukan koreksi parameter, dilakukan validasi ulang dengan cara yang sama dengan validasi yang dilakukan sebelumnya. Perbandingan data sebenarnya dan hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar sebagai berikut :



Gambar 4.14 Perbandingan Percepatan Sumbu X setelah Koreksi Parameter



Gambar 4.15 Perbandingan Percepatan Sumbu Y setelah Koreksi Parameter



Gambar 4.16 Perbandingan Percepatan Rotasi Sumbu *Yaw* setelah Koreksi Parameter

Dengan nilai RMSE ketiga data perbandingan di atas yang ditunjukkan pada Tabel 4.7 sebagai berikut :

Tabel 4.7 Hasil RMSE Validasi setelah Koreksi Parameter

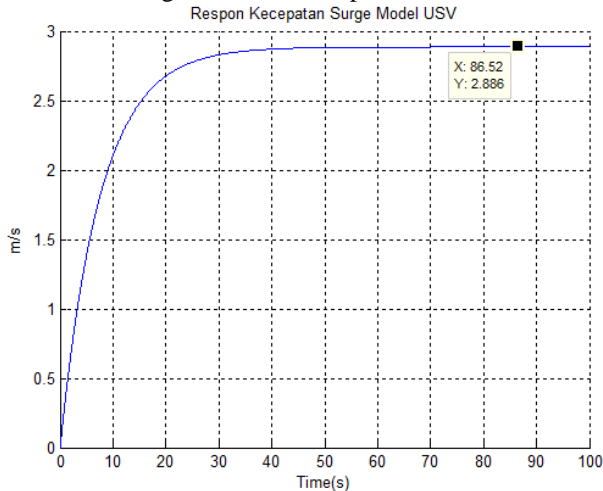
Variabel	Nilai RMSE
\dot{u}	0,0789
\dot{v}	0,1742
\dot{r}	0,3601

Menurut analisa penulis, nilai RMSE di atas sudah dapat dinilai sebagai suatu nilai yang kecil. Sehingga parameter USV hasil estimasi dan koreksi parameter dapat dikatakan valid. Namun seharusnya nilai dari RMSE tersebut bisa lebih kecil lagi dari nilai RMSE di atas atau lebih mendekati nol lagi. Menurut penulis, nilai RMSE diatas tidak terlalu mendekati nol dikarenakan data hasil eksperimen yang digunakan banyak berisi *noise*/gangguan bernilai cukup besar yang menyebabkan nilai *error* menjadi lebih besar. Data hasil eksperimen berisi banyak gangguan bernilai cukup besar dapat disebabkan oleh keterbatasan alat yang digunakan.

4.3.2 Validasi Parameter Mesin Thrust

Validasi dilakukan dengan menggunakan simulasi *body* USV yang sudah digabung dengan simulasi mesin *thruster* dengan parameter yang sudah didapatkan pada sub bab 4.2.1. Kemudian disimulasikan model gabungan tersebut dengan input persen *throttle* sesuai dengan data hasil eksperimen gerak lurus dan dianalisa nilai *steady state* kecepatan *surge* yang dihasilkan oleh simulasi. Jika nilai hasil simulasi tidak sama, maka perlu dilakukan koreksi, dalam hal ini yaitu dengan menambahkan *gain*. Hal ini boleh dilakukan karena analisa menggunakan analisa respon kecepatan *surge* saat *steady state*.

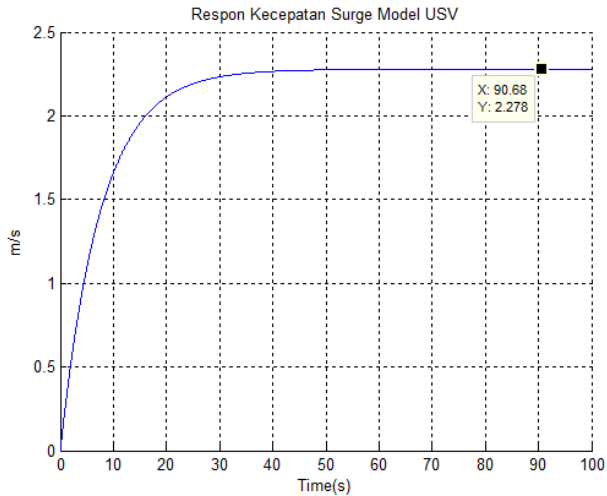
Berikut adalah hasil simulasi model gabungan dengan input persen *throttle* bernilai sama dengan data hasil eksperimen :



Gambar 4.17 Respon Kecepatan *Surge* Model USV

Dari Gambar 4.17 terlihat bahwa nilai *steady state* adalah 2,886 m/s, sedangkan data eksperimen gerak lurus menunjukkan bahwa kecepatan *surge steady state* adalah 2,2778 m/s. Karena perbedaan ini, maka penulis melakukan koreksi dengan menambahkan suatu *gain* yang akan dikalikan dengan input persen *throttle* dan menjadi input persen *throttle* baru. Besar *gain* tersebut adalah $2,2778/2,886$ atau 0,7892.

Respon setelah penambahan gain ditunjukkan pada Gambar 4.18 sebagai berikut :



Gambar 4.18 Respon Kecepatan Surge Model USV setelah Koreksi Parameter

Dari Gambar terlihat bahwa *gain* berhasil melakukan koreksi terhadap nilai *steady state* respon kecepatan *surge* model USV.

4.4 Pengujian *Feedback Linearization Decoupler*

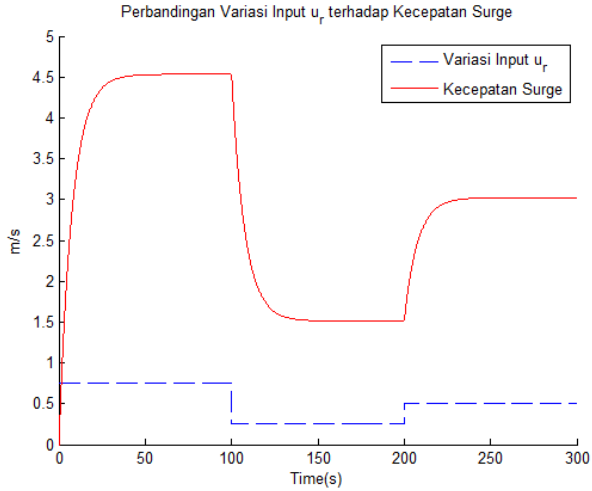
Setelah dilakukan validasi dan koreksi, selanjutnya dilakukan pengujian *feedback linearization decoupler* yang sudah dirancang pada sub bab 3.3 dengan menggunakan parameter yang telah tervalidasi. Pengujian dilakukan dengan memasukkan variasi input u_r dan r_r ke dalam simulasi gabungan yang telah terkoneksi dengan *feedback* yang telah dirancang.

Analisa hasil yang dilakukan adalah dengan melihat respon output u dan r yang dihasilkan. Dan membandingkan dengan input u_r dan r_r . Jika respon output u hanya dipengaruhi oleh input u_r dan respon output r hanya dipengaruhi oleh input r_r , maka *feedback* yang telah dirancang berhasil memenuhi tujuan pembuatannya.

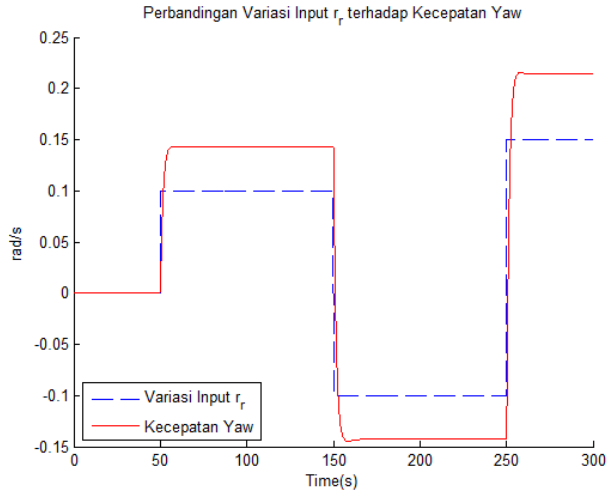
Perlu diingat bahwa untuk mengendalikan kecepatan rotasi sumbu *yaw* diperlukan kecepatan *surge*. Kapal tidak bisa dibelokkan jika tidak ada gaya dorong kedepan yang menyebabkan kapal memiliki kecepatan

surge. Sehingga untuk mengetahui kebenaran *feedback linearization decoupler* untuk kecepatan rotasi sumbu yaw, input u_r tidak boleh bernilai 0. Pada penelitian ini digunakan nilai $u_r = 0,5$ untuk pengujian *feedback* pada kecepatan sumbu yaw.

Berikut adalah grafik hasil pengujian *feedback linearization decoupler* yang telah dirancang :



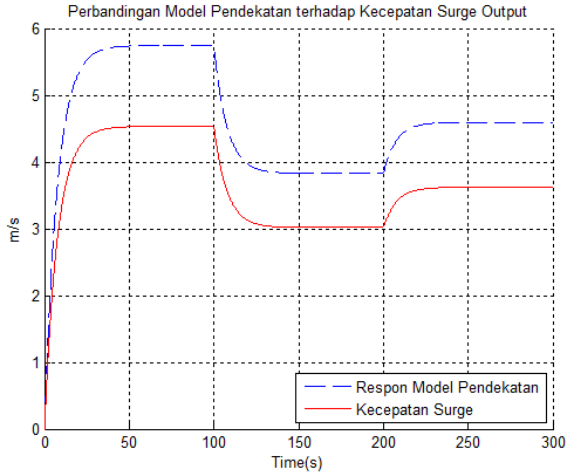
Gambar 4.19 Perbandingan Variasi Input u_r terhadap Kecepatan Surge



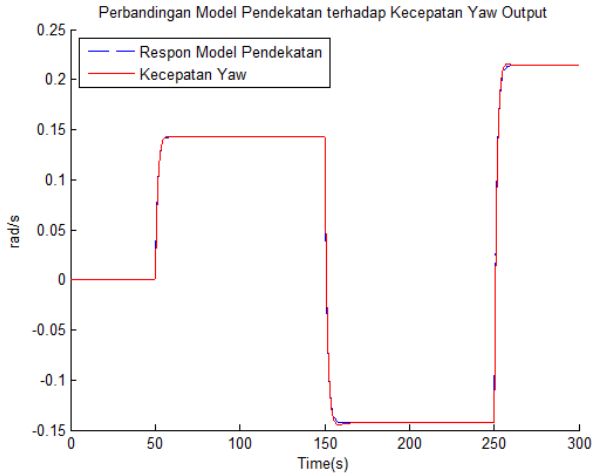
Gambar 4.20 Perbandingan Variasi r_r Input terhadap Kecepatan Rotasi Yaw

Dengan melihat grafik, kita dapat mengetahui bahwa respon output u mengikuti input u_r dan respon output r mengikuti input r_r , meskipun nilai *steady state* masih belum sama.

Selanjutnya adalah uji perbandingan respon antara output sistem yang telah dilengkapi *feedback* dan respon output model pendekatan yang ditunjukkan pada Persamaan 3.27 dan 3.28. Berikut adalah hasil perbandingan respon output sistem dan model pendekatan hasil *feedback linearization decoupler* ditunjukkan pada Gambar 4.21 dan 4.22.



Gambar 4.21 Perbandingan Respon Kecepatan *Surge* Model Pendekatan dan Sistem USV yang Dilengkapi *Feedback*



Gambar 4.22 Perbandingan Respon Kecepatan *Yaw* Model Pendekatan dan Sistem USV yang Dilengkapi *Feedback*

Dilihat dari kedua Gambar 4.21 dan 4.22, bisa disimpulkan bahwa respon output sistem dan respon output model pendekatan memiliki *time settling* yang sama. Namun pada output kecepatan *surge* terjadi *error steady state* yang nantinya akan dihilangkan dengan menambahkan kontroler PI yang sudah dirancang, sehingga *time constant* sesuai dengan spesifikasi desain dan tidak terjadi *error steady state* pada kedua kecepatan.

Dari semua kesimpulan di atas bisa dikatakan bahwa *feedback linearization decoupler* yang sudah dirancang berhasil mengubah sistem awal yang masih *non-linear* menjadi suatu sistem *linear*. Untuk mengatur kecepatan respon output u dan r serta nilai *steady state*-nya sehingga sesuai dengan karakteristik dan nilai yang diinginkan, digunakan kontroler PI yang telah dirancang di sub bab 3.6 dan dianalisa pada sub bab 4.5.

4.5 Pengujian Kontroler Kecepatan Surge Dan Yaw Rate

Pengujian terakhir adalah pengujian kontroler PI yang didesain untuk mengendalikan kecepatan *surge* dan kecepatan rotasi sumbu *yaw*. Dengan menggunakan hasil perancangan pada sub bab 3.6 dan parameter *body* USV yang sudah divalidasi, parameter kontroler PI ditunjukkan pada Tabel 4.8 sebagai berikut :

Tabel 4.8 Parameter Kontroler PI Kecepatan Surge dan Yaw Rate

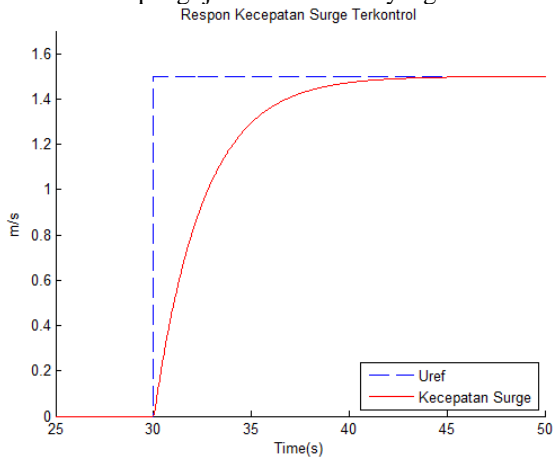
Parameter	Nilai
$K_p u$	0,5
$K_i u$	0,0653
$K_p r$	2
$K_i r$	1,4009

Dengan menggunakan parameter tersebut, dilakukan pengujian dengan menggunakan input referensi u_{ref} dan r_{ref} yang terdefinisi, dan kemudian di analisa output u dan r yang dihasilkan sistem yang telah dikontrol dengan kontroler PI. Analisa yang dilakukan adalah analisa kecepatan respon output dan nilai *steady state* output.

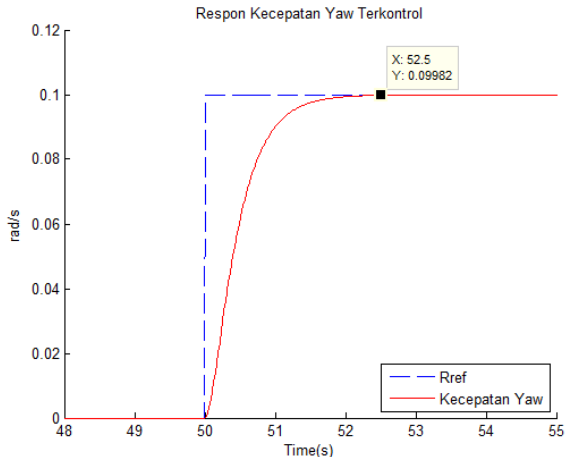
Seperti yang dijelaskan pada sub bab 4.4, untuk menguji kontroler kecepatan rotasi sumbu *yaw* memerlukan nilai kecepatan *surge* yang tidak nol. Sehingga nilai input referensi u_{ref} tidak boleh bernilai nol dalam pengujian kontroler kecepatan rotasi sumbu *yaw*. Dalam

penelitian ini digunakan nilai $u_{ref} = 1,5$ untuk pengujian kontroler kecepatan *yaw*.

Berikut adalah hasil pengujian kontroler PI yang telah dirancang :



Gambar 4.23 Respon Kecepatan *Surge* Model USV Terkontrol



Gambar 4.24 Respon Kecepatan Rotasi *Yaw* Model USV Terkontrol

Dari Gambar 4.21, bisa disimpulkan bahwa kontroler berhasil mengendalikan kecepatan surge dan menghasilkan *settling time* ± 10 detik yang berarti nilai *time constant* adalah ± 2 detik, sesuai dengan spesifikasi desain. Dan dari Gambar 4.22 bisa dilihat bahwa pengendalian kecepatan *yaw* menyebabkan output kecepatan *yaw* sama dengan referensi pada detik 52.5 dimana 2.5 detik setelah *step input* bekerja. Hal ini berarti sinyal output memiliki *settling time* ± 2.5 detik dan *time constant* ± 0.5 detik yang mana sudah sesuai dengan spesifikasi desain yang dirancang pada sub bab 3.6. Selain itu, dari kedua Gambar di atas bisa dilihat bahwa tidak ada *error steady state* dari sistem yang sudah dikendalikan dengan kontroler PI.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5 PENUTUP

Pada bab ini akan dibahas mengenai kesimpulan yang diambil berdasarkan hasil analisa dan pengujian dari pemodelan dan desain kontroler PI untuk USV LSS-01, juga saran untuk pengembangan kedepannya.

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pemodelan dinamik dan pengaturan kecepatan *surge* dan *yaw* USV yang dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan melakukan pemodelan USV menggunakan metode *Non-Linear Least Square* Levenberg-Marquardt, didapatkan kesimpulan bahwa metode ini bisa digunakan untuk memodelkan model non-linier USV. Hal ini dibuktikan dengan nilai RMSE validasi yang sudah cukup kecil, yakni 0,0799 untuk percepatan *surge*, 0,1729 untuk percepatan *sway*, dan 0,3582 untuk percepatan rotasi *yaw*. Namun karena adanya *error* yang cukup besar pada data yang diolah menyebabkan harus dilakukan beberapa koreksi agar parameter sesuai dengan logika dan asumsi logis yang terkait dengan USV, dan setelah divalidasi ulang menghasilkan nilai RMSE 0,0789 untuk percepatan *surge*, 0,1742 untuk percepatan *sway*, dan 0,3601 untuk percepatan rotasi *yaw*. Koreksi parameter menghasilkan nilai RMSE validasi model yang cukup kecil sehingga parameter setelah koreksi bisa digunakan untuk mempresentasikan USV LSS-01.
2. Dilakukan perancangan kontroler PI untuk mengatur kecepatan *surge* dan *yaw* USV. Perancangan kontroler PI pada kecepatan *surge* berhasil memenuhi spesifikasi desain yang digunakan yaitu *time constant* bernilai 2 detik dan menghasilkan respon orde satu pada kecepatan *surge*. Perancangan kontroler PI pada kecepatan *yaw* juga berhasil memenuhi spesifikasi desain, yakni *time constant* bernilai 0,5 detik. Dan *error steady state* bernilai 0 untuk kedua kecepatan.

5.2 Saran

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

1. Menerapkan metode estimasi parameter yang lain sehingga bisa dibandingkan metode mana yang lebih cocok untuk pemodelan USV.
2. Menggunakan alat penyimpan data yang lebih canggih/mutakhir sehingga gangguan/*noise* tidak terlalu tercampur dalam data yang akan mempengaruhi hasil estimasi parameter, atau melakukan metode penyaringan *noise* pada saat eksperimen pada alat/*hardware* yang sama.
3. Digunakan metode kontrol adaptif karena pada kenyataannya USV bergerak di perairan yang memiliki gangguan ombak, arus, dan angin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] "THE NAVY UNMANNED SURFACE," Department of The Navy United States of America, 23 July 2007. [Online]. Available: <http://www.navy.mil/navydata/technology/usvmppr.pdf>. [Accessed 1 September 2018].
- [2] L. Knockaert, "VECTOR FITTING VS . LEVENBERG-MARQUARDT : SOME EXPERIMENTS," 2009.
- [3] A. Ranganathan, "The Levenberg-Marquardt Algorithm," no. June, pp. 1–5, 2004.
- [4] H. P. Gavin, "The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems," pp. 1–19, 2017.
- [5] J. P. Khac Duc Do, "Control of Ships and Underwater Vehicles," *Springer-Verlag*, 2009.
- [6] M. A. F. Eranugroho, "Perbandingan PID Model Reference Adaptive Control dengan L1 Adaptive Control untuk Kemudi Kapal Tanpa Awak dalam Kontrol Waypoint," *Department of Electrical Engineering ITS*, 2018.
- [7] X. Li, "Model-Based Design of Brushless DC Motor Control and Motion Control Modelling for Robocup SSL Robots," *Technology and Communication, Applied Sciences University of Finland*, 2015.
- [8] S. Mohan, R. K. R, V. Sriram, and V. A. Vengatkumar, "Design and Implementation of the Propeller for Marine Propulsion Using Pi Controller," vol. 3, no. V, 2015.
- [9] P. R. Kumar and V. N. Babu, "Position Control of Servo System using PID Controller Tuning with Soft Computing," *IJERT*, vol. 3, no. 11, pp. 976–980, 2014.

- [10] M. Haris, “Perancangan Kontroler Adaptif MRAC dan LQT untuk Kestabilan dan Trayektori Tracking pada UAV berjenis Fixed-Wing,” *Departmen of Electrical Engineering ITS*, 2019.
- [11] K. Madsen, N.B. Nielsen, and O. Tingleff, “Methods for nonlinear least squares problems,” *Informatics and Mathematical Modeling, Technical University of Denmark*, 2004.

LAMPIRAN

A.1 Program Matlab untuk Estimasi Parameter Body USV

```
%Perhitungan Tu dan Tr
%Throttle ke Rad/s
Tu(:,2)=242.7027.*(Tu(:,2).^0.5);
%Rad/s ke Round/s
Tu(:,2)=Tu(:,2).*(1/(2*pi));
%RPM/s ke FThrust
Tu(:,2)=(0.020188*1025*0.05^4*Tu(:,2).^2);
d_rud=0.673; %Lengan Gaya Rudder
L_rud=6.75*10^-3; %Luas Penampang Rudder
for i=1:size(Tr,1)
    sinTr(i)=sin(Tr(i,2));
end
sinTr=sinTr';
%Momen Gaya
Tr(:,2)=sinTr.*(0.8*L_rud*u(:,2)*d_rud);
%Gaya Dorong Thrust
Tu(:,2)=Tu(:,2)-abs(sinTr.*(0.8*L_rud*u(:,2)));

%Perhitungan variabel lain dari data hasil
eksperimen
vr = v(:,2).*r(:,2);
uAbsolutu = abs(u(:,2)).*u(:,2);
ur = u(:,2).*r(:,2);
vAbsolutv = abs(v(:,2)).*v(:,2);
rAbsolutv = abs(r(:,2)).*v(:,2);
vAbsolutr = abs(v(:,2)).*r(:,2);
uv = u(:,2).*v(:,2);
vAbsolutv = abs(v(:,2)).*v(:,2);
rAbsolutv = abs(r(:,2)).*v(:,2);
vAbsolutr = abs(v(:,2)).*r(:,2);
rAbsolutr = abs(r(:,2)).*r(:,2);
```

```

% Tebakan Parameter
x0 = 1e2*[1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1];
%Estimasi Parameter
options.Algorithm = 'levenberg-marquardt';
options.ScaleProblem = 'jacobian';
options.FunctionTolerance = 1e-25;
options.StepTolerance = 1e-25;
options.FiniteDifferenceType = 'central';
options.DiffMaxChange = 1e-12;
options.MaxFunEvals = 100000;
options.TolX=1e-80;
[x,Resnorm,FVAL,EXITFLAG,OUTPUT] =
lsqnonlin(@fungsi,x0,[],[],options,vr,u(:,2),uAbsolutu,Tu(:,2),ur,v(:,2),vAbsolutv,rAbsolutv,vAbsolutr,rAbsolutr,r(:,2),Tr(:,2),uv,udot(:,2),vdot(:,2),rdot(:,2));

ii = size(IterasiEstimasi);
A=IterasiEstimasi(ii(1),2:ii(2));
%Koreksi Parameter
A(3)=0;
A(7)=80.*A(7);
A(1)=-A(1);

```

A.2 Program Fungsi Matlab Model Dinamika USV untuk Estimasi Parameter

```

%fungsi(A,vr,u(:,2),uAbsolutu,Tu(:,2),ur,v(:,2),vAbsolutv,rAbsolutv,vAbsolutr,rAbsolutr,r(:,2),Tr(:,2),uv,udot(:,2),vdot(:,2),rdot(:,2))
function [ rssidoutput ] =
fungsi(A,x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8,x9,x10,x11,x12,x13,x14,x15,x16)

f1 = (A(1)*x1-A(2)*x2-0*x3+A(4)*x4+0*x5-0*x6-0*x7-0*x8-0*x9-0*x10-0*x11+0*x12+0*x13)-x14;

```

```

f2 = (0*x1+0*x2+0*x3+0*x4+A(5)*x5-A(6)*x6-
A(7)*x7-A(8)*x8-A(9)*x9-0*x10-
0*x11+0*x12+0*x13)-x15;

f3 = (0*x1+0*x2+0*x3+0*x4+0*x5-0*x6-A(10)*x7-
A(11)*x8-A(12)*x9-A(13)*x10-
A(14)*x11+A(15)*x12+A(16)*x13)-x16;

rssoutput = [f1,f2,f3];
end

```

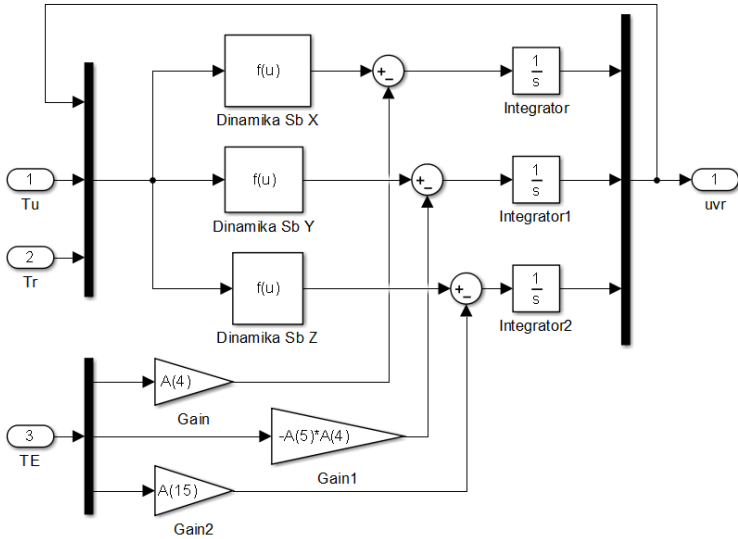
A.3 Program Matlab Konversi Data Hasil Eksperimen menjadi Input Validasi Parameter

```

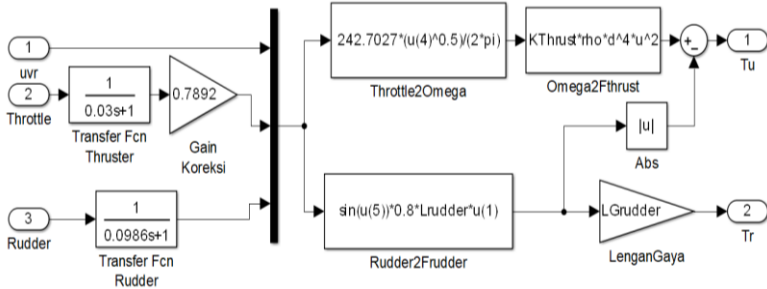
%Pembentukan Variabel Structured with Time untuk
Input Simulasi Validasi
tt=u(:,1)-u(1,1);
Throttle.time=tt;
Throttle.signals.values=Tu(:,2);
Throttle.signals.dimensions=1;
Rudder.time=tt;
Rudder.signals.values=Tr(:,2);
Rudder.signals.dimensions=1;

```

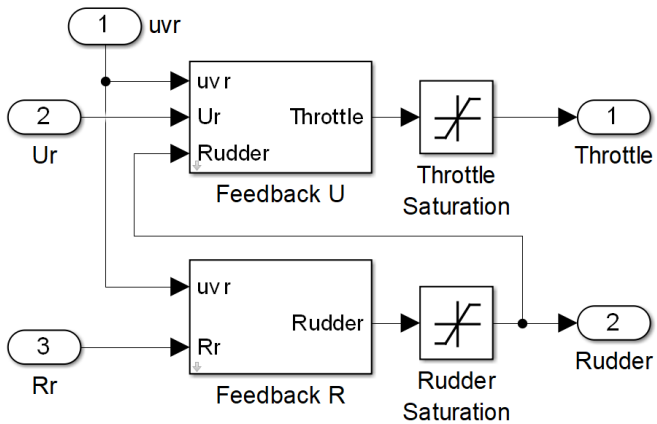
B.1 Diagram Blok *Simulink* Model Dinamika USV



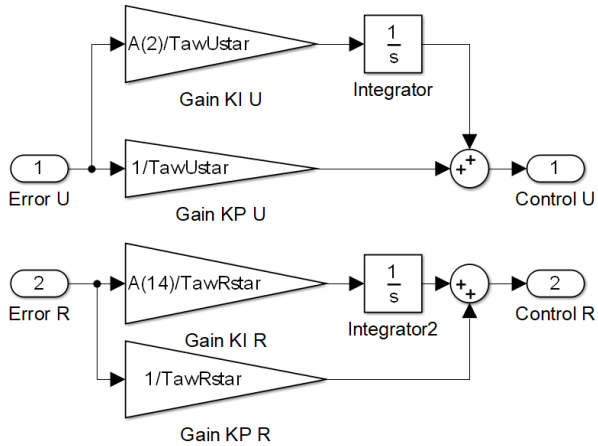
B.2 Diagram Blok *Simulink* Konversi Sinyal τ_u dan τ_r



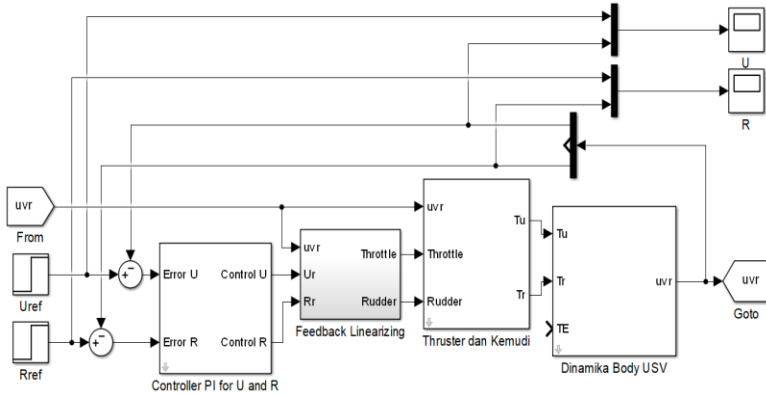
B.3 Diagram Blok *Simulink Feedback Linearization Decoupler*



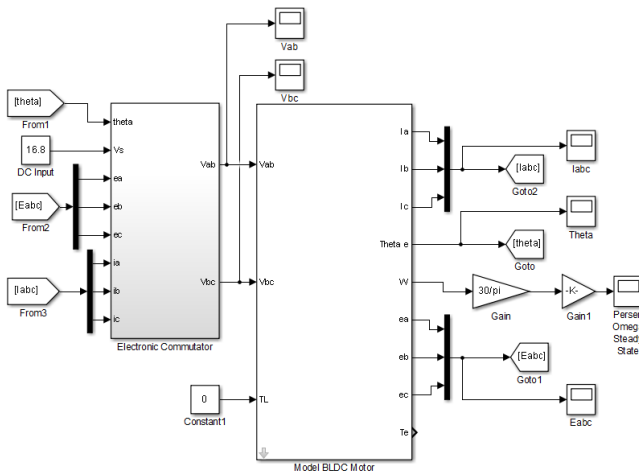
B.4 Diagram Blok *Simulink Kontroler PI*



B.5 Diagram Blok Total Pemodelan Dinamik dan Pengaturan USV



B.6 Diagram Blok Motor BLDC dari Sumber Referensi



BIOGRAFI PENULIS



Fachruddin Ari Setiawan, lahir di Kediri pada tanggal 29 Desember 1999. Penulis merupakan putra pertama dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan di SDN 1 Datengan pada tahun 2004. Kemudian memasuki SMPN 1 Grogol pada tahun 2010. Dan pada tahun 2013 penulis melanjutkan pendidikan di SMAN 1 Kediri. Pada tahun 2015 penulis memulai jenjang S1 Departemen Teknik Elektro, di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya., dengan mengambil Program Studi Teknik Sistem Pengaturan. Untuk menghubungi penulis, dapat melalui surat elektronik pada alamat email ddinfachruddin00@gmail.com