TUGAS AKHIR - KM184801

ESTIMASI POSISI *AUTONOMOUS SURFACE VEHICLE* MENGGUNAKAN METODE *ENSEMBLE KALMAN FILTER* DENGAN KENDALI GERAK PID

RAHMARANI PUSPITA DEWI
06111740000072

Dosen Pembimbing
Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si
Hendro Nurhadi, Dipl, -Ing., Ph.D

Departemen Matematika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

TUGAS AKHIR – KM184801

ESTIMASI POSISI *AUTONOMOUS SURFACE VEHICLE* MENGGUNAKAN METODE *ENSEMBLE KALMAN FILTER* DENGAN KENDALI GERAK PID

RAHMARANI PUSPITA DEWI
NRP 06111740000072

Dosen Pembimbing
Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si
Hendro Nurhadi, Dipl, -Ing., Ph.D

Departemen Matematika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

FINAL PROJECT – KM184801

POSITION ESTIMATION OF AN AUTONOMOUS SURFACE VEHICLE USING ENSEMBLE KALMAN FILTER METHOD WITH PID CONTROLLER

RAHMARANI PUSPITA DEWI
NRP 06111740000072

Supervisors
Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si
Hendro Nurhadi, Dipl, -Ing., Ph.D

Mathematics Department
Faculty of Science and Data Analytic
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2021

LEMBAR PENGESAHAN

ESTIMASI POSISI AUTONOMOUS SURFACE VEHICLE MENGGUNAKAN METODE ENSEMBLE KALMAN FILTER DENGAN KENDALI GERAK PID

POSITION ESTIMATION OF AN AUTONOMOUS SURFACE VEHICLE USING ENSEMBLE KALMAN FILTER METHOD WITH PID CONTROLLER

Tugas Akhir

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat Untuk memperoleh gelar
Sarjana Matematika Pada bidang studi Matematika Terapan
Program Studi S-1 Departemen Matematika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:
Rahmarani Puspita Dewi
NRP: 06111740000072

Menyetujui,

Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si
19870728 201404 2 001

Hendro Nurhadi, Dipl-Ing., Ph.D
19751120 200212 1 002

Mengetahui,
Kepala Departemen Matematika
FSAD ITS

Subchan, Ph.D
NIP. 19710513 199702 1 001
Surabaya, 23 Agustus 2021

ESTIMASI POSISI *AUTONOMOUS SURFACE VEHICLE* MENGGUNAKAN METODE *ENSEMBLE KALMAN FILTER* DENGAN KENDALI GERAK PID

Nama Mahasiswa	: Rahmarani Puspita Dewi
NRP	: 06111740000072
Departemen	: Matematika FSAD ITS
Dosen Pembimbing	: 1. Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si 2. Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing.,Ph.D

Abstrak

Autonomous Surface Vehicle (ASV) merupakan sebuah kapal permukaan air yang dapat bergerak tanpa awak atau secara otomatis. Salah satu contoh dari ASV adalah *intelligent boat* (i-BOAT) yang kembangkan oleh ITS. Dikarenakan ASV bergerak tanpa awak, maka diperlukan suatu sistem pengendalian untuk menjaga agar ASV dapat bergerak teratur sesuai dengan yang diinginkan. Oleh karena itu, dalam Tugas Akhir ini dilakukan pengendalian pada model *nonlinier* ASV 3DOF (*surge*, *sway* dan *yaw*) menggunakan metode *Proportional Integral Derivative* (PID). Metode PID digunakan untuk mengendalikan agar ASV bergerak mengikuti lintasan yang diinginkan dengan kecepatan tertentu. Selanjutnya, dilakukan estimasi untuk memantau bagaimana posisi ASV setelah dilakukan pengendalian, menggunakan metode *Ensemble Kalman Filter* (EnKF). Terdapat dua skenario yang diterapkan. Skenario pertama yaitu agar ASV bergerak mengikuti lintasan $y = 0$ dengan posisi awal ASV berada pada lintasan (*on track*) dan kecepatan *surge* $u = 10$ m/s. Skenario kedua yaitu agar ASV bergerak mengikuti lintasan $y = 7$ dengan posisi awal ASV berada di luar lintasan (*off track*) dan kecepatan *surge* $u = 5$ m/s. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode PID dapat mengendalikan kecepatan *surge*, sudut *yaw* dan posisi ASV dengan baik pada kedua skenario dengan performa yang telah memenuhi desain kriteria.Untuk estimasi posisi ASV,

membangkitkan 300 ensemble memiliki akurasi yang lebih baik daripada membangkitkan 50 dan 100 ensemble di kedua skenario keadaan. Pada skenario pertama, menghasilkan nilai rata-rata RMSE untuk posisi x sebesar 0,0030558 dan posisi y sebesar 0,0030554. Sedangkan pada skenario kedua memiliki nilai rata-rata RMSE untuk posisi x sebesar 0,0031817 dan posisi y sebesar 0,0031831.

Kata kunci: *Autonomous Surface Vehicle* (ASV), *Ensemble Kalman Filter* (EnKF), Estimasi, *Intelligent Boat* (i-BOAT), *Proportional Integral Derivative* (PID)

POSITION ESTIMATION OF AN AUTONOMOUS SURFACE VEHICLE USING ENSEMBLE KALMAN FILTER METHOD WITH PID CONTROLLER

Name	: Rahmarani Puspita Dewi
NRP	: 06111740000072
Department	: Matematika FSAD ITS
Supervisors	: 1. Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si 2. Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing.,Ph.D

Abstract

Autonomous Surface Vehicle (ASV) is a vehicle in form of a ship on the surface of the water that can move whitout a crew on it or operate automatically. One example of ASV is intelligent boat (i-BOAT) which was developed by ITS. Due to the ASV moves without crew, a control system is needed to keep the ASV moving regularly. Therefore, in this Final Project, ASV motion control is performed on a nonlinear 3DOF model (surge, sway and yaw) using Proportional Integral Derivative (PID) method. The PID method is used to control the ASV to move along the desired trajectory at a certain speed. Furthermore, an estimation is made to determine how the ASV position will be after controlling. Position estimation is using Ensemble Kalman Filter (EnKF) method. There are two scenarios applied, first for the ASV to follow $y = 0$ *track with the ASV's initial position being on the track and surge speed* $u = 10\, m/s$. *Second, for the ASV to follow* $y = 7$ *track with the ASV's initial position being off the track and surge speed* $u = 5\, m/s$. *The simulation results show that the PID method can control the surge speed, yaw angle and ASV position well in both scenarios with performance that comply the design criteria. For ASV position estimation, generating 300 ensembles has better accuracy than generating 50 and 100 ensembles in both scenarios. In the first scenario, the average RMSE value for position x is 0.0030558 and position y is*

0.0030554. While in the second scenario, the average RMSE value for position x is 0.0031817 and position y is 0.0031831.

Keywords: *Autonomous Surface Vehicle (ASV), Ensemble Kalman Filter (EnKF), Estimation, Intelligent Boat (i-BOAT), Proportional Integral Derivative* (PID)

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena dengan limpahan rahmat, taufiq, dan ridho-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul

"ESTIMASI POSISI *AUTONOMOUS SURFACE VEHICLE* MENGGUNAKAN METODE *ENSEMBLE KALMAN FILTER* DENGAN KENDALI GERAK PID"

yang merupakan salah satu persyaratan akademis dalam menyelesaikan Program Sarjana Departemen Matematika, Fakultas Sains dan Analitika Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Sholawat serta salam tak lupa tercurahkan kepada Baginda Nabi Muhammad SAW.

Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik berkat kerjasama, bantuan dan dukungan dari banyak pihak. Sehubungan dengan hal tersebut, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Subchan, Ph.D selaku Kepala Departemen Matematika FSAD ITS sekaligus Dosen Penguji Tugas Akhir.
2. Ibu Dr. Dwi Ratna Sulistyaningrum, S.Si, MT dan Bapak Dr. Budi Setiyono, S.Si, MT selaku Sekretaris Program Studi S1 Departemen Matematika ITS.
3. Ibu Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si dan Bapak Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing.,Ph.D selaku Dosen Pembimbing yang telah membimbing, memberikan semangat dan motivasi kepada penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik.
4. Bapak Drs. Lukman Hanafi, M.Sc dan Ibu Prof.Dr.Dra.Mardlijah, MT selaku Dosen Penguji Tugas Akhir yang telah memberikan saran untuk perbaikan Tugas Akhir ini.
5. Ibu Dra. Laksmi Prita Wardhani, M.Si selaku Dosen Wali yang telah memberikan arahan akademik selama penulis menempuh pendidikan di Departemen Matematika ITS.

6. Seluruh jajaran dosen dan staf Departemen Matematika ITS yang telah memberikan banyak ilmu, pengalaman dan bantuan kepada penulis selama menempuh proses perkuliahan.
7. Kedua orang tua penulis, Bapak Hari dan Ibu Evi tercinta yang senantiasa memberikan dukungan dan do'a yang tak terhingga selama hidup penulis.
8. Kedua saudara penulis, Teteh Niar dan Mas Hanif yang telah memberikan semangat dan do’a kepada penulis.
9. Teman seperjuangan tugas akhir, Azizah Wahyantika yang telah mendengarkan keluh kesah penulis dan mendukung penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Isnainatul Mayagrafinda dan Adinda Oktaviani teman terbaik penulis yang selalu ada saat penulis membutuhkan selama menjalankan masa perkuliahan.
11. Teman-teman kos keputih 9b, Siti Masriyah, Erlyne Nadhilah Widyaningrum, Lintang Hayu Nur Afnani, Arini Nur Fadilah dan Nabila Rohmariyanti yang selalu mendukung dan memberikan banyak kenangan pada penulis selama masa perkuliahan.
12. Tim penelitian i-BOAT khususnya Mas Izzul dan Mbak Qori’ yang telah memberikan arahan kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir.
13. Teman-teman mahasiswa Matematika ITS khususnya MOBIUS yang telah memberikan banyak dukungan dan waktu yang berkesan bagi penulis.
14. Muhhammad Alfyan Rachmana Putra yang selalu mendoakan dan memotivasi penulis untuk tetap semangat, sabar dan pantang menyerah.
15. Semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu, terima kasih telah membantu sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan

saran dari pembaca. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang berkepentingan.

Surabaya, Agustus 2021

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL iii
LEMBAR PENGESAHAN vii
ABSTRAK ix
ABSTRACT xi
KATA PENGANTAR xiii
DAFTAR ISI xvii
DAFTAR GAMBAR xix
DAFTAR TABEL xxi
DAFTAR SIMBOL xxiii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Tujuan 4
1.5 Manfaat 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Penelitian Terdahulu 5
2.2 Autonomous Surface Vehicle 6
2.3 Model Matematika Gerak Kapal 8
2.3.1 Model Kinematik 10
2.3.2 Model Dinamik 11
2.4 Metode Proportional-Integral-Derivative (PID) 17
2.5 Metode Beda Hingga 19
2.6 Metode Ensemble Kalman Filter 22
BAB III METODE PENELITIAN 25
3.1 Studi Literatur 25
3.2 Identifikasi Model Gerak ASV 25
3.3 Diskritisasi Model 26
3.4 Mendesain model gerak ASV dengan kendali PID 26
3.5 Implementasi Metode Ensemble Kalman Filter 27

3.6 Simulasi, Analisis Hasil dan Pembahasan 27
3.7 Penulisan Laporan Tugas Akhir 27
3.8 Diagram Alir Penelitian 27
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN 31
4.1 Identifikasi Model Gerak ASV..... 31
4.2 Diskritisasi Model 35
4.3 Simulasi Model Tanpa Kendali 38
4.4 Mendesain Model Gerak ASV dengan Kendali PID .. 41
4.5 Bentuk Umum Model Sistem dan Model Pengukuran 44
4.6 Implementasi Algoritma Ensemble Kalman Filter 45
4.6.1 Tahap Inisialisasi 46
4.6.2 Tahap Prediksi 46
4.6.3 Tahap Koreksi..... 48
4.7 Diagram Blok Gabungan Proportional-Integral-Derivative (PID) dan Ensemble Kalman Filter..... 49
4.8 Simulasi dan Analisis Hasil 50
4.8.1 Simulasi 1 51
4.8.2 Simulasi 2 54
4.8.3 Simulasi 3 56
4.8.4 Simulasi 4 60
BAB V PENUTUP 63
5.1 Kesimpulan 63
5.2 Saran 63
DAFTAR PUSTAKA 65
BIODATA PENULIS 69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 : *Intelligent Boat (i-BOAT)* 8
Gambar 2. 2 : Gerakan *six-degree of freedom* (6-DOF)..... 9
Gambar 2. 3 : Penggambaran gerak ASV 10
Gambar 2. 4 : Diagram Blok Kendali PID 17
Gambar 3. 1 : Diagram Alir Penelitian 28
Gambar 3. 2 : Diagram Kendali PID pada Model ASV 29
Gambar 3. 3 : Diagram Algoritma Ensemble Kalman Filter 30
Gambar 4. 1 : Respon kecepatan s*urge* (1)..... 38
Gambar 4. 2 : Respon kecepatan *surge* (2)..... 39
Gambar 4. 3 : Respon sudut *yaw* (2)..... 40
Gambar 4. 4 : Respon lintasan (2) 40
Gambar 4. 5 : Diagram Blok PID-EnKF 50
Gambar 4. 6 : Respon kecepatan *surge* kendali PID *on track* 52
Gambar 4. 7 : Respon sudut *yaw* kendali PID *on track* 53
Gambar 4. 8 : Lintasan ASV kendali PID *on track* 53
Gambar 4. 9 : Lintasan ASV PID-EnKF *on track* dengan membangkitkan 300 ensemble 56
Gambar 4. 10 : Respon kecepatan *surge* kendali PID *off track* .. 58
Gambar 4. 11: Respon sudut *yaw* kendali PID *off track* 59
Gambar 4. 12 : Lintasan ASV Kendali PID *off track* 59
Gambar 4. 13 : Lintasan ASV PID-EnKF *off track* dengan membangkitkan 300 ensemble 62

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 : Notasi SNAME (1950) yang digunakan untuk kapal 9
Tabel 2. 2 : Tanggapan sistem kendali PID terhadap perubahan parameter 19
Tabel 2. 3 : Algoritma *Ensemble Kalman Filter* (EnKF)..... 23
Tabel 3. 1 : Data Spesifikasi i-BOAT 25
Tabel 4. 1 : Nilai koefisien PID *on track* 51
Tabel 4. 2 : Perbandingan RMSE PID-EnKF *on track* dengan membangkitkan 50, 100 dan 300 ensemble 55
Tabel 4. 3 : Nilai koefisien PID *off track* 58
Tabel 4. 4 : Perbandingan RMSE PID-EnKF *off track* dengan membangkitkan 50, 100 dan 30 ensemble 61

DAFTAR SIMBOL

X : Gaya *surge*
Y : Gaya *sway*
Z : Gaya *heave*
K : Momen *roll*
M : Momen *pitch*
N : Momen *yaw*
u : Kecepatan *surge*
v : Kecepatan *sway*
w : Kecepatan *heave*
p : Kecepatan *roll*
q : Kecepatan *pitch*
r : Kecepatan *yaw*
x : Perpindahan pada arah *surge*
y : Perpindahan pada arah *sway*
z : Perpindahan pada arah *heave*
ϕ : Sudut *roll*
θ : Sudut *pitch*
ψ : Sudut *yaw*
$\dot{x}$: Kecepatan pada arah *surge*
$\dot{y}$: Kecepatan pada arah *sway*
$\dot{\psi}$: Kecepatan *yaw*
$\dot{u}$: Perpindahan pada arah *sway*
$\dot{v}$: Percepatan *sway*
$\dot{r}$: Percepatan *yaw*
m : Massa kapal
x_G : Pusat gravitasi sumbu x
y_G : Pusat gravitasi sumbu y
z_G : Pusat gravitasi sumbu z
I_{zz} : Momen inersia terhadap sumbu z
$X_{\dot{u}}$: Turunan gaya arah *surge* terhadap $\dot{u}$
$Y_{\dot{v}}$: Turunan gaya arah *sway* terhadap $\dot{v}$
$Y_{\dot{r}}$: Turunan gaya arah *sway* terhadap $\dot{r}$
$N_{\dot{v}}$: Turunan momen *yaw* terhadap $\dot{v}$

$N_{\dot{r}}$: Turunan momen *yaw* terhadap $\dot{r}$
X_u : Koefisien *damping*
Y_v : Koefisien *damping*
Y_r : Koefisien *damping*
N_v : Koefisien *damping*
N_r : Koefisien *damping*
$X_{u|u|}$: Koefisien *cross-flow drag*
$Y_{v|v|}$: Koefisien *cross-flow drag*
$Y_{r|r|}$: Koefisien *cross-flow drag*
$N_{v|v|}$: Koefisien *cross-flow drag*
$N_{r|r|}$: Koefisien *cross-flow drag*
ρ : Massa jenis air
D : Diameter propeller
δ_n : Kecepatan propeller
δ_s : Sudut *steering*
x_{δ_s} : Lengan momen longitudinal dari pusat rotasi ke titik poros pendorong

BAB I
PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan hal-hal yang melatar belakangi permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir. Kemudian, permasalahan tersebut disusun kedalam suatu rumusan masalah. Lalu diberikan juga batasan masalah, tujuan yang diinginkan, serta manfaat yang dapat diperoleh.

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara maritim, dimana kurang lebih 75% wilayah Indonesia adalah wilayah perairan [1]. Karena luasnya wilayah perairan di Indonesia, maka peranan angkutan laut sangatlah vital sebagai pemersatu bangsa. Tanpa transportasi laut yang efektif dan memenuhi aspek keselamatan pelayaran, maka dapat dipastikan muncul persoalan distribusi logistik, dan selanjutnya akan diikuti persoalan pemerataan pembangunan terutama di daerah kepulauan [2]. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut diperlukan suatu teknologi wahana permukaan air. Wahana permukaan air yang telah dikembangkan oleh berbagai negara saat ini yaitu robot permukaan air tanpa awak, robot ini dikenal dengan sebutan *Autonomous Surface Vehicle* (ASV). Salah satu contoh dari ASV adalah *intelligent boat* (i-BOAT) yang dibuat oleh Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). ASV sendiri merupakan sebuah kapal tanpa awak yang mampu berlayar secara otomatis. ASV mampu bergerak dari suatu lokasi ke lokasi lain dengan bantuan sebuah sistem navigasi berupa waypoint dimana titk-titik lokasinya telah ditentukan sebelumnya [3]. Sistem navigasi biasanya dibantu dengan *Global Positioning System* (GPS) yang memberikan letak di permukaan bumi dengan bantuan penyelarasan sinyal satelit. Sistem ini memiliki tujuan untuk menemukan lintasan dari posisi awal ke posisi akhir kapal

[4]. Agar ASV dapat bergerak secara teratur sesuai dengan yang diinginkan, maka diperlukan suatu sistem pengendalian. Setelah dikendalikan akan dilakukan estimasi untuk memantau bagaimana posisi ASV apabila telah dilakukan pengendalian.

Beberapa metode yang biasa digunakan dalam sistem kendali ASV adalah *Proportional Integral Derivative* (PID) [5], *Sliding Mode Control* (SMC) [6], *Model Predictive Control* (MPC) [7], *Fuzzy Logic Controler* (FLC) [8] dan lain sebagainya. Salah satu diantaranya terdapat metode yang paling sederhana dan banyak digunakan baik di industri maupun militer karena mudah diimplementasikan termasuk dalam sistem *intelligent boat* (i-BOAT). Metode tersebut adalah *Proportional Integral Derivative* (PID). Setelah dilakukan pengendalian, selanjutnya dilakukan estimasi posisi ASV menggunakan metode *Ensemble Kalman Filter* (EnKF). Metode EnKF adalah metode estimasi modifikasi dari algoritma Kalman Filter yang dapat digunakan untuk mengestimasi model sistem linier maupun non-linier dengan membangkitkan atau menggunakan sejumlah ensemble pada tahap prediksi untuk mengestimasi kovarian errornya [12].

Pada penelitian sebelumnya, Christian R.Sonnenburg pada tahun 2013 melakukan penelitian yang berjudul "*Modeling, Identification, and Control of an Unmanned Surface Vehicle*" [13]. Penelitian ini membahas mengenai pemodelan, identifikasi, dan pengendalian pada Ribcraft USV. Selanjutnya terdapat penelitian yang dilakukan oleh Mohammad Shiddiq Pratomo, dkk pada tahun 2018 yang berjudul "Rancang Bangun Sistem *Stabilizer Rolling* Kapal Penumpang Menggunakan *Fin Stabilizer* Dengan Metode PID" [15]. Penelitian ini membahas mengenai pengontrol PID untuk mengendalikan *Fin stabilizer* yang berfungsi untuk menjaga keseimbangan kapal. Kemudian terdapat penelitian dengan judul "*Position Estimation of Tourisant ASV*

Using Ensemble Kalman Filter" oleh Hendro Nurhadi, dkk pada tahun 2019 [14]. Penelitian ini membahas mengenai estimasi lintasan pada Tourisant ASV menggunakan metode EnKF. Gerakan ASV dipengaruhi oleh kecepatan angin dan ketinggian gelombang.

Berdasarkan penjelasan di atas, penulis mengusulkan penelitian mengenai estimasi posisi *Autonomous Surface Vehicle* menggunakan metode *Ensemble Kalman Filter* dengan kendali gerak PID.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang ingin diselesaikan dalam Tugas Akhir, yaitu:

1. Bagaimana penerapan metode *Proportional Integral Derivative* (PID) untuk kendali gerak *Autonomous Surface Vehicle* (ASV)?
2. Bagaimana penerapan metode *Ensemble Kalman Filter* pada estimasi posisi *Autonomous Surface Vehicle* (ASV) yang telah dikendalikan?

1.3 Batasan Masalah

Beberapa batasan yang digunakan dalam Tugas Akhir, yaitu:

1. Parameter ASV yang digunakan pada penelitian ini adalah *intelligent boat* (i-BOAT) yang diambil berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Nasdec ITS.
2. Diasumsikan tidak terdapat gangguan pada saat ASV bergerak.
3. Persamaan model gerak ASV menggunakan 3 *Degree of Freedom* (DOF), yaitu gerak *surge*, *sway*, dan *yaw*.
4. Diasumsikan ASV bergerak tanpa penumpang.
5. Lintasan yang ditempuh dianggap bebas dari halangan.

6. Badan ASV simetris.
7. *Software* yang digunakan untuk simulasi adalah MATLAB 2020b.

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir, yaitu:

1. Mendapatkan hasil penerapan metode *Proportional Integral Derivative* (PID) untuk kendali gerak *Autonomous Surface Vehicle* (ASV).
2. Mendapatkan hasil penerapan metode *Ensemble Kalman Filter* pada estimasi posisi *Autonomous Surface Vehicle* (ASV) yang telah dikendalikan.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari Tugas Akhir, yaitu:

1. Mendapatkan sistem navigasi dan kendali untuk *intelligent boat* (i-BOAT) yang akurat.
2. Menambah referensi penelitian.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan diuraikan mengenai beberapa acuan yang digunakan dalam tugas akhir ini, diantaranya yaitu hasil penelitian-penelitian terdahulu, serta dasar teori mengenai *Autonomous Surface Vehicle* (ASV), model matematika gerak kapal, metode *Proportional Integral Derivative*, metode beda hingga dan metode *Ensemble Kalman Filter*.

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam Tugas Akhir ini penulis merujuk pada beberapa penelitian sebelumnya. Diantaranya penelitian mengenai pemodelan ASV oleh Christian R. Sonnenburg pada tahun 2013 yang berjudul "*Modeling, Identification, and Control of an Unmanned Surface Vehicle*" [13]. Penelitian ini membahas mengenai pemodelan, identifikasi, dan pengendalian pada Ribcraft USV. Tujuan pemodelan dan identifikasi adalah untuk menentukan model yang memungkinkan desain kendali berbasis model yang efektif dan pengoptimalan lintasan. Sehingga memungkinkan identifikasi parameter dengan mudah, selain itu dapat menggambarkan berbagai bentuk lambung dan konfigurasi aktuator. Model yang digunakan adalah model *nonlinier* 3-DOF.

Selanjutnya terdapat penelitian yang dilakukan oleh Mohammad Shiddiq Pratomo, Purwanto, dan Rahmandawati pada tahun 2018 yang berjudul "Rancang Bangun Sistem *Stabilizer Rolling* Kapal Penumpang Menggunakan *Fin Stabilizer* dengan Metode PID" [15]. Pada penelitian ini kontroler PID digunakan untuk mengontrol *Fin*. Dari hasil pengujian menggunakan metode *Handtuning* didapat *gain*

yang digunakan pada penelitian ini yaitu Kp=30, Ki=0.002, dan Kd=10. Pada pengujian tanpa gangguan dengan menggunakan kontroler PID didapat nilai overshoot sebesar 8%, waktu steady 1.3 detik, dan error steady sebesar 0.1 derajat. Sedangkan pada pengujian dengan gangguan gelombang air acak dengan kontroler PID didapat waktu steady rata-rata 3.69 detik, dengan rata-rata error steady sebesar 1.017 derajat dan rata-rata *overshoot* sebesar 11.09%. Respon kapal juga sesuai dengan yang diinginkan meskipun masih ada *overshoot*, tetapi waktu yang dibutuhkan fin untuk menyeimbangkan kapal cukup singkat yaitu sekitar 3.69 detik.

Kemudian terdapat penelitian dengan judul "*Position Estimation of Tourisant ASV Using Ensemble Kalman Filter*" oleh Hendro Nurhadi, Teguh Herlambang dan Dieky Adzkiya pada tahun 2019 [14]. Penelitian ini menggunakan Touristant ASV dengan panjang 4 meter, diameter 1,5 meter, dan tinggi 1,3 meter. Kemudian dilakukan estimasi posisi ASV dan gerakan ASV yang dipengaruhi oleh kecepatan angin dan ketinggian gelombang. Metode estimasi yang digunakan adalah metode *Ensemble Kalman Filter* (EnKF). EnkF diterapkan ke model ASV nonlinier untuk mendapatkan kesalahan posisi kecil. Dalam simulasi dilakukan 3 skenario berdasarkan jumlah ensemble yang dibangkitkan yaitu 100, 200 dan 300 ensemble. Kesalahan posisi yang dihasilkan dari simulasi pembangkitan 300 ensemble lebih baik dari pembangkitan 100 dan 200 ensemble, dan memiliki tingkat akurasi lebih dari 95%.

2.2 Autonomous Surface Vehicle

Autonomous Surface Vehicle (ASV) merupakan sebuah kapal tanpa awak yang mampu bergerak secara otomatis.

ASV mampu bergerak diatas permukaan air secara otomatis dari suatu lokasi ke lokasi lain dengan bantuan sebuah sistem navigasi berupa waypoint dimana titk-titik lokasinya telah ditentukan sebelumnya. ASV dilengkapi dengan GPS (*Global Positioning System*)[3]. Dalam penelitian ini ASV yang digunakan adalah intelligent boat (i-BOAT) yang dibuat oleh Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). i-BOAT hadir dengan maksud memenuhi fungsi yang dibutuhkan di aspek kemaritiman saat ini khususnya untuk manusia, seperti penyelamatan, pemenuhan logistik di pulau-pulau yang membutuhkan bantuan, dan fungsi pertahanan dan keamanan. i-BOAT dilengkapi dengan berbagai sensor mulai dari pemanfaatan *Global Positioning System* (GPS) dengan ketelitian tinggi, yang digabungkan dengan kamera beresolusi tinggi guna pengumpulan data sebagai bagian dari big data analisis, lalu diproses oleh komputer berspesifikasi tinggi yang tertanam di dalam kapal. Dengan beragam sensor tersebut, kapal pintar i-BOAT akan mempunyai kemampuan akselerasi, navigasi dan mendeteksi kondisi lingkungan, termasuk kemampuan menghindari halangan dan melakukan pergerakan, secara otonom [2].

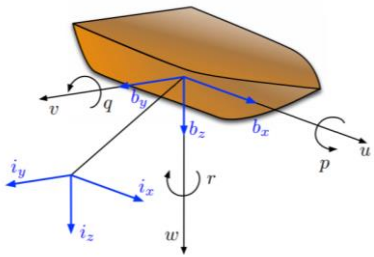
i-BOAT adalah sebuah kapal *Single Hull* berbahan aluminium Marine Grade yang mempunyai panjang LOA=4,7 meter, lebar B=2,08 meter, tinggi H=0,75 meter dan Sarat T=0,3 meter. Kapal ini didesain mampu untuk mengangkut beban enam orang atau setara 600 kilogram, mampu melaju dengan kecepatan normal 15 knots di radius area kerja 1 mil. i-BOAT berbeda dengan kapal lainnya karena menggunakan sistem autonomous, kapal yang mempunyai berat kosong 510 kilogram dan digerakkan dengan *outboard petrol engine* dengan Propeller propulsion yang mempunyai daya 40

HP melalui BBM Petroleum Oktan 92 pada putaran mesin 4.500 – 5.500 RPM ini mempunyai kemampuan *automatic start*, *automatic control* dan *remotely controlled*, termasuk juga dapat diubah kembali ke *manual control* [2].

Gambar 2. 1 : *Intelligent Boat (i-BOAT)*[2]

2.3 Model Matematika Gerak Kapal

Model matematika kapal muncul akibat dari pergerakan kapal yang disebabkan baik dari kapal itu sendiri (maneuver) maupun faktor luar yang mempengaruhinya (*seakeeping*). Pada prinsipnya perilaku gerak kapal dibagi dalam enam derajat kebebasan (*six-degree of freedom*) yaitu: *surge*, *sway* ,*yaw*, *heave* ,*roll* dan *pitch* seperti pada Gambar 2.2. Secara umum gerakan yang dialami kapal ada dua macam, yaitu gerak translasi dan rotasi. Gerak translasi yaitu *surge* (maju/mundur), *sway* (kanan/kiri), *heave* (atas/bawah). Sedangkan gerak rotasi yaitu *roll* (gerakan ke samping), *pitch* (gerakan memutar ke depan), *yaw* (gerakan menoleh ke kanan-kiri) [7].



Gambar 2. 2 : Gerakan *six-degree of freedom* (6-DOF) [13]

Untuk notasi yang digunakan pada kapal terdapat dalam tabel berikut ini :

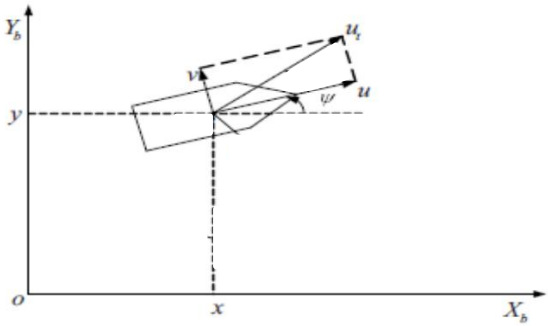
Tabel 2. 1 : Notasi SNAME (1950) yang digunakan untuk kapal [18]

DOF		Gaya dan Momen	Kecepatan linier dan anguler	Posisi dan sudut Euler
1	Gerakan pada sumbu *x* (*surge*)	X	u	x
2	Gerakan pada sumbu *y* (*sway*)	Y	v	y
3	Gerakan pada sumbu *z* (*heave*)	Z	w	z
4	Rotasi pada sumbu *x* (*roll*)	K	p	ϕ
5	Rotasi pada sumbu *y* (*pitch*)	M	q	θ
6	Rotasi pada sumbu *z* (*yaw*)	N	r	ψ

Dalam penelitian ini diasumsikan kapal beroperasi dalam lingkungan yang tenang dan tidak ada pengaruh gangguan dari luar seperti angin atau arus. Diasumsikan pula jika kapal

hanya bergerak dalam tiga derajat kebebasan: *surge*, *sway*, dan *yaw*. Sehingga dimisalkan tidak ada gangguan gelombang yang menyebabkan perubahan gerak rotasi *roll* dan *pitch* untuk membuat gerakan naik turun. Ketika variabel *roll*, *pitch*, dan *heave* diabaikan maka kapal akan bergerak dalam bidang horizontal (planar).

2.3.1 Model Kinematik



Gambar 2. 3 : Penggambaran gerak ASV [7]

Berdasarkan Gambar 2.3 sistem persamaan model kinematik ASV dalam gerakan planar dapat ditulis sebagai berikut:

$$\dot{x} = u\cos\psi - v\sin\psi \tag{2.1}$$

$$\dot{y} = u\sin\psi + v\cos\psi \tag{2.2}$$

$$\dot{\psi} = r \tag{2.3}$$

Dimana

x	: Perpindahan pada arah *surge*
y	: Perpindahan pada arah *sway*
ψ	: Sudut *yaw*
u	: Kecepatan *surge*
v	: Kecepatan *sway*
r	: Kecepatan yaw

Sistem persamaan ini dapat dituliskan dalam bentuk sebagai berikut [13]:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{v} \tag{2.4}$$

Dimana $\boldsymbol{v} = [u \quad v \quad r]^T$ merupakan vektor kecepatan, dan $\boldsymbol{\eta} = [x \quad y \quad \psi]^T$ merupakan posisi kapal dalam sudut euler, sehingga Persamaan (2.4) menjadi

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

2.3.2 Model Dinamik

Model *nonlinier* untuk persamaan gerak dinamik kapal dapat dituliskan sebagai berikut [16]:

$$\boldsymbol{M}_{RB}\dot{\boldsymbol{v}} + \boldsymbol{C}_{RB}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} = \boldsymbol{\tau}_{RB} \tag{2.6}$$

$$\boldsymbol{\tau}_{RB} = \boldsymbol{\tau}_H + \boldsymbol{\tau}_E + \boldsymbol{\tau} \tag{2.7}$$

$$\boldsymbol{\tau}_H = -\boldsymbol{M}_A\dot{\boldsymbol{v}} - \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{A}}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} - \boldsymbol{D}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} - \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta}) \tag{2.8}$$

Dimana

$\boldsymbol{M}_{RB}$	: massa *rigid body*
$\boldsymbol{C}_{RB}(\boldsymbol{v})$	: matriks coriolis dan sentripetal *rigid body*
$\boldsymbol{\tau}_{RB}$	: gaya dan momen *rigid body*
$\boldsymbol{\tau}_H$	: gaya dan momen hidrodinamik
$\boldsymbol{\tau}_E$	: gaya dan momen lingkungan
$\boldsymbol{\tau}$	: gaya dan momen penggerak
$\boldsymbol{M}_A$	: massa tambahan
$\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{A}}(\boldsymbol{v})$	: massa tambahan
$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{v})$	: matriks redaman (*damping*)
$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta})$	: gaya pemulih

Apabila Persamaan (2.7) dan (2.8) disubstitusikan ke Persamaan (2.6) maka akan menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{v}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}_E + \boldsymbol{\tau} \tag{2.9}$$

Dimana $\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}_{RB} + \boldsymbol{M}_A$ dan $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{v}) = \boldsymbol{C}_{RB}(\boldsymbol{v}) + \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{A}}(\boldsymbol{v})$. Karena diasumsikan kapal bergerak dalam 3 DOF (*surge, sway* dan *yaw*) maka gerakan *pitch, roll* dan *heave* diabaikan. Selain itu juga diasumsikan tidak terdapat gangguan dari lingkungan luar pada saat kapal bergerak, sehingga

$$Z = K = M = 0$$
$$p = q = w = 0$$
$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta}) = 0$$
$$\boldsymbol{\tau}_E = 0$$

Dengan variabel *state* dalam 3 DOF $\boldsymbol{v} = [u \quad v \quad r]^T$ dan $\boldsymbol{\eta} = [x \quad y \quad \psi]^T$. Sehingga Persamaan (2.9) menjadi:

$$\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{v}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} = \boldsymbol{\tau} \qquad (2.10)$$

Massa *rigid body* pada kapal yang bergerak planar adalah [16]:

$$\boldsymbol{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & -my_G \\ 0 & m & mx_G \\ -my_G & mx_G & I_{zz} \end{bmatrix}$$

dimana m merupakan massa total, dan I_{zz} merupakan momen inersia terhadap sumbu z. Koordinat pusat massa kapal dapat ditulis dalam vektor $[x_G \quad y_G \quad z_G]^T$. Karena diasumsikan distribusi massa homogen dan koordinat pusat diletakkan ditengah maka $y_G = 0$, sehingga massa *rigid body* menjadi

$$\boldsymbol{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_G \\ 0 & mx_G & I_{zz} \end{bmatrix}$$

Sedangkan massa tambahan didefinisikan sebagai gaya dan momen hidrodinamika, yaitu:

$$\boldsymbol{M}_A = -\begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{r}} \\ 0 & N_{\dot{v}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

Dimana $X_{\dot{u}}$ adalah turunan gaya arah *surge* terhadap $\dot{u}$, $Y_{\dot{v}}$ adalah turunan gaya arah *sway* terhadap $\dot{v}$, $Y_{\dot{r}}$ adalah turunan gaya arah *sway* terhadap $\dot{r}$, $N_{\dot{v}}$ adalah turunan momen *yaw* terhadap $\dot{v}$, dan $N_{\dot{r}}$ adalah turunan momen *yaw* terhadap $\dot{r}$.
Maka didapat matriks $\boldsymbol{M}$

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mx_G - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

Selanjutnya matriks $\boldsymbol{C}_{RB}(\boldsymbol{v})$ merupakan kombinasi dari variabel massa dengan elemen pada pusat massa yang menambahkan inersia rotasi, matriks $\boldsymbol{C}$ *rigid body* dapat dituliskan sebagai [16]:

$$\boldsymbol{C}_{RB}(\boldsymbol{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & -m(y_G r - u) \\ m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & 0 \end{bmatrix}$$

Dengan asumsi yang sama, distribusi massa homogen dan koordinat pusat diletakkan ditengah maka $y_G = 0$, maka matriks $\boldsymbol{C}_{RB}$ menjadi:

$$\boldsymbol{C}_{RB}(\boldsymbol{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & mu \\ m(x_G r + v) & -mu & 0 \end{bmatrix}$$

Sedangkan matriks $\boldsymbol{C}_A(\boldsymbol{v})$ didefinisikan sebagai

$$\boldsymbol{C}_A(\boldsymbol{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_{\dot{v}} v + \dfrac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2} r \\ 0 & 0 & -X_{\dot{u}} u \\ -Y_{\dot{v}} v - \dfrac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2} r & X_{\dot{u}} u & 0 \end{bmatrix}$$

Maka didapat matriks $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{v})$

$$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_G r + v) + Y_{\dot{v}} v + \dfrac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2} r \\ 0 & 0 & (m - X_{\dot{u}})u \\ m(x_G r + v) - Y_{\dot{v}} v - \dfrac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2} r & (X_{\dot{u}} - m)u & 0 \end{bmatrix}$$

(2.12)

Kemudian akan dicari matriks $\boldsymbol{D}(\boldsymbol{v})$ yang merupakan matriks *damping* (redaman) yang terdiri dari matriks *damping* linier ($\boldsymbol{D}_l$) dan matriks *damping* kuadratik ($\boldsymbol{D}_q$). Matriks $\boldsymbol{D}(\boldsymbol{v})$ dapat ditulis sebagai [13]:

$$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{v}) = \boldsymbol{D}_l + \boldsymbol{D}_q$$

Matriks *damping* linier muncul akibat gesekan laminar pada badan kapal dan diasumsikan kapal simetris pada sumbu longitudinalnya. Matriks *damping* linier diberikan sebagai berikut [13]:

$$\boldsymbol{D}_l = -\begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & N_v & N_r \end{bmatrix}$$

Matriks *damping* kuadratik terjadi akibat gesekan turbulen pada lambung kapal. Matriks *damping* kuadratik dapat dituliskan sebagai

$$\boldsymbol{D}_q(\boldsymbol{v}) = -\begin{bmatrix} X_{u|u|}|u| & 0 & 0 \\ 0 & Y_{v|v|}|v| & Y_{r|r|}|r| \\ 0 & N_{v|v|}|v| & N_{r|r|}|r| \end{bmatrix}$$

Gabungan matriks *damping* linier dan matriks *damping* kuadratik menghasilkan

$$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{v}) = -\begin{bmatrix} X_u + X_{u|u|}|u| & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{v|v|}|v| & Y_r + Y_{r|r|}|r| \\ 0 & N_v + N_{v|v|}|v| & N_r + N_{r|r|}|r| \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Setelah itu terdapat $\boldsymbol{\tau}$ yang merupakan gaya dan momen pendorong. $\boldsymbol{\tau}$ dipengaruhi oleh dorongan *propeller* dan sudut *steering* (kemudi). Gaya dorong (T) merupakan fungsi dari kecepatan kapal (V) dan kecepatan *propeller* (δ_n) dengan persamaan [16]:

$$T = \rho D^4 K_T(J_0)|\delta_n|\delta_n \quad (2.14)$$

dimana ρ adalah massa jenis air, D adalah diameter *propeller* dan K_T adalah koefisien dorongan yang bergantung pada *advance ratio*

$$J_0 = \frac{V(1-w)}{\delta_n D}$$

Dengan w adalah *wake fraction number* dengan nilai antara $0{,}1 - 0{,}4$. Untuk K_T didefinisikan sebagai [16]

$$K_T = \alpha_1 + \alpha_2 J_0 \tag{2.15}$$

dengan α_1 dan α_2 adalah konstanta, sehingga Persamaan (2.14) menjadi

$$T = cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n \tag{2.16}$$

dimana

$$c = \rho D^3(1-w)\alpha_2$$
$$d = \rho D^4 \alpha_1$$

Maka kontrol gaya dan momen dapat dituliskan sebagai [13]

$$X_{CTRL} = (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\cos\delta_s \tag{2.17}$$
$$Y_{CTRL} = (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\sin\delta_s \tag{2.18}$$
$$N_{CTRL} = x_{\delta_s}(cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\sin\delta_s \tag{2.19}$$

dimana x_{δ_s} adalah lengan momen longitudinal dari pusat rotasi ke titik poros pendorong, dan δ_s merupakan sudut *steering*.

Sistem persamaan gerak dinamik pada gerakan 3-DOF didapat dengan mensubstitusikan Persamaan (2.11), (2.12), (2.13), (2.17), (2.18) dan (2.19) ke Persamaan (2.10). Sehingga mengasilkan model dimensional sebagai berikut :

Persamaan *surge* (u) :

$$\begin{aligned}&(m - X_{\dot{u}})\dot{u} - m(x_G r^2 + vr) + Y_{\dot{v}} vr + \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2} r^2 \\ &= X_u u + X_{u|u|}|u|u + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\cos\delta_s\end{aligned} \tag{2.20}$$

Persamaan *sway* (v) :

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} + (m - X_{\dot{u}})ur$$

$$= Y_v v + Y_{v|v|}|v|v + Y_r r + Y_{r|r|}|r|r + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\sin\delta_s \tag{2.21}$$

Persamaan *yaw* (r) :

$$(mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_{zz} - N_{\dot{r}})\dot{r} + mx_G ur - Y_{\dot{v}}uv - \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2}ur + X_{\dot{u}}u = N_v v + N_{v|v|}|v|v + N_r r + N_{r|r|}|r|r + x_{\delta_s}(cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\sin\delta_s \tag{2.22}$$

Selanjutnya dilakukan penyederhanaan model dinamik dengan mengasumsikan sudut steering (δ_s) bernilai kecil, sehingga [13]:

$$\sin\delta_s \approx \delta_s \quad \text{dan} \quad \cos\delta_s \approx 1$$

maka Persamaan (2.20) sampai (2.22) menjadi [13]:

Persamaan surge (u) :

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} - m(x_G r^2 + vr) + Y_{\dot{v}}vr + \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2}r^2 = X_u u + X_{u|u|}|u|u + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n) \tag{2.23}$$

Persamaan sway (v) :

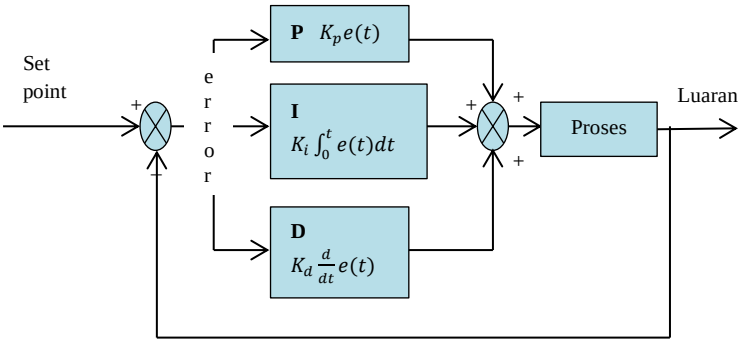
$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} + (m - X_{\dot{u}})ur = Y_v v + Y_{v|v|}|v|v + Y_r r + Y_{r|r|}|r|r + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s \tag{2.24}$$

Persamaan yaw (r) :

$$(mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_{zz} - N_{\dot{r}})\dot{r} + mx_G ur - Y_{\dot{v}}uv - \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2}ur + X_{\dot{u}}uv = N_v v + N_{v|v|}|v|v + N_r r + N_{r|r|}|r|r + x_{\delta_s}(cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s \tag{2.25}$$

2.4 Metode Proportional-Integral-Derivative (PID)

PID merupakan sistem pengendali konvesional yang banyak digunakan karena mudah diimplementasikan dan paling sederhana. PID terdiri atas tiga bagian yaitu *Proportional* (P), *Integral* (I), dan *Derivative* (D) [5]. Gambar diagram blok PID dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2. 4 : Diagram Blok Kendali PID [5]

Pengendali PID dapat dituliskan sebagai berikut [5]:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \qquad (2.26)$$

dimana

- $e(t) = r(t) - y(t)$
- $K_i = \frac{K_p}{T_i}$
- $K_d = K_p T_d$

dengan

$y(t)$: luaran pada sistem
$r(t)$: set point pada sistem
$e(t)$: sinyal error antara $y(t)$ dan $r(t)$
$U(t)$: merupakan luaran pada pengendali PID
K_p : gain *proportional*

K_i : gain *integral*
K_d : gain *derivative*
T_i : waktu konstan *integral*
T_d : waktu konstan *derivative*

Persamaan (2.26) menjelaskan bahwa nilai keluaran $U(t)$ merupakan jumlah dari gain *proportional* (K_p), gain *integral* (K_i) dan gain *derivative* (K_d) yang masing-masing dipengaruhi oleh error (e) dalam selang waktu (t) tertentu [19].

a. *Proportional Control*

Kendali proporsional memiliki *output* yang sebanding atau proporsional dengan besar sinyal kesalahan (selisih antara nilai yang diinginkan dengan nilai aktualnya, error). Setiap perubahan pada sinyal input menyebabkan sistem langsung mengeluarkan sinyal keluar sebesar konstanta pengalinya. Persamaan kendali proporsional dirumuskan sebagai [19]:

$$U(t) = K_p e(t) \tag{2.27}$$

b. *Integral Control*

Pengendali integral berfungsi untuk menghilangkan *steady-state* error menjadi nol. Jika sebuah *plant* tidak mempunyai unsur integrator (1/s), pengendali proposional tidak mampu menjamin *output* sistem akan tepat sesuai respon yang diinginkan, sehingga dibutuhkan pengendali integral. Persamaan kendali integral dirumuskan sebagai [19]:

$$U(t) = K_i \int_0^t e(t)dt \tag{2.28}$$

c. *Derivative Control*

Besar *output* dari pengendali derivatif memiliki sifat seperti operasi diferensial pada umumnya. Pengendali derivatif menggunakan kecepatan perubahan sinyal kesalahan sebagai parameter pengendali. Apabila tidak ada perubahan sinyal error, maka *output* dari kendali derivatif tidak akan berubah. Persamaan kendali derivatif dirumuskan sebagai [19]:

$$U(t) = K_d \frac{d}{dt} e(t) \tag{2.29}$$

Dalam perancangan sistem kendali PID yang perlu dilakukan adalah mengatur parameter P, I atau D agar tanggapan sinyal keluaran sistem terhadap masukan tertentu sebagaimana yang diiginkan. Tanggapan sistem kendali PID terhadap perubahan parameter tertera pada tabel di bawah ini [21]:

Tabel 2. 2 : Tanggapan sistem kendali PID terhadap perubahan parameter [21]

Tanggapan Loop Tertutup	**Waktu Naik**	**Overshoot**	**Waktu Turun**	**Kesalahan Keadaan Tunak**
Proportional (K_p)	Menurun	Meningkat	Perubahan Kecil	Menurun
Integral (K_i)	Menurun	Meningkat	Meningkat	Hilang
Derivative (K_d)	Perubahan Kecil	Menurun	Menurun	Perubahan Kecil

2.5 Metode Beda Hingga

Metode beda hingga merupakan salah satu metode numerik untuk menyelesaikan persamaan diferensial dengan merubah daerah pada variabel bebas menjadi partisi-partisi berhingga (*mesh*) dari titik dimana variabel tak bebas di

perkirakan [20]. Misalkan $f(x)$ adalah suatu fungsi yang didiferensialkan dalam interval $[x_0 - h, x_0 + h]$ dengan nilai h cukup kecil, maka apabila diuraikan menggunakan ekspansi deret Taylor disekitar titik $(x_0 + h)$ adalah sebagai berikut:

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}h + \frac{f''(x_0)}{2!}h^2 + \cdots + \frac{f^{(n-1)}(x_0)}{(n-1)!}h^{n-1} + O(h^n) \tag{2.30}$$

dimana $O(h^n)$ adalah error. Sedangkan ekspansi deret Taylor disekitar titik $(x_0 - h)$ adalah sebagai berikut:

$$f(x_0 - h) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}(-h) + \frac{f''(x_0)}{2!}(-h)^2 + \cdots + \frac{f^{(n-1)}(x_0)}{(n-1)!}(-h)^{n-1} + O((-h)^n) \tag{2.31}$$

Pendekatan turunan pertama didapat dengan memangkas Persamaan (2.30) sampai $O(h^2)$, sehingga diperoleh persamaan:

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}h + O(h^2) \tag{2.32}$$

Atau dapat dituliskan

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + h) - f(x_0) - O(h^2)}{h} \tag{2.33}$$

Dalam skema numerik untuk menyelesaikan persamaan differensial variabel x dipartisi menjadi $x_1, x_2, .., x_N$. Diasumsikan h konstan sehingga $x_{i+1} = x_i + h$, maka Persamaan (2.33) menjadi

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h} - O(h)$$

Dengan mengabaikan error $O(h)$ maka diperoleh

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h} \tag{2.34}$$

Persamaan (2.34) disebut aproksimasi **beda maju orde 1** untuk $f'(x_i)$. Selanjutnya dengan memangkas Persamaan (2.31) sampai $O(h^2)$ diperoleh:

$$f(x_0 - h) = f(x_0) - \frac{f'(x_0)}{1!}h + O(h^2) \tag{2.35}$$

Apabila variabel x dipartisi menjadi $x_1, x_2, .., x_N$ dan diasumsikan h konstan sehingga $x_{i-1} = x_i - h$, maka Persamaan (2.35) menjadi

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_i - h)}{h} + O(h) \tag{2.36}$$

Dengan mengabaikan error $O(h)$ maka diperoleh

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{h} \tag{2.37}$$

Persamaan (2.37) disebut aproksimasi **beda mundur orde 1** untuk $f'(x_i)$.

Selain aproksimasi pada orde pertama kita dapat meningkatkan orde aproksimasi dengan memangkas deret taylor sampai $O(h^3)$. Apabila Persamaan (2.30) dan (2.31) dipangkas sampai $O(h^3)$ diperoleh

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + f'(x_0)h + \frac{f''(x_0)}{2!}h^2 + O(h^3) \tag{2.38}$$

$$f(x_0 - h) = f(x_0) - f'(x_0)h + \frac{f''(x_0)}{2!}h^2 - O(h^3) \tag{2.39}$$

Dengan melakukan eliminasi pada Persamaan (2.38) dan (2.39) diperoleh

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + h) - f(x_0 - h) - 2O(h^3)}{2h} \tag{2.40}$$

Dengan membagi variabel x menjadi partisi $x_1, x_2, .., x_N$ dan diasumsikan h konstan maka diperoleh

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1})}{2h} - O(h^2) \tag{2.41}$$

jika error $O(h^2)$ diabaikan maka diperoleh

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1})}{2h} \tag{2.42}$$

Persamaan (2.42) disebut aproksimasi **beda pusat orde 2** untuk $f'(x_i)$.

2.6 Metode Ensemble Kalman Filter

Metode *Ensemble Kalman Filter* (EnKF) adalah metode estimasi modifikasi dari algoritma Kalman Filter yang dapat digunakan untuk mengestimasi model sistem linier maupun *nonlinier* dengan membangkitkan atau menggunakan sejumlah ensemble pada tahap prediksi untuk mengestimasi kovarian errornya [11]. Pada algoritma Ensemble Kalman Filter (EnKF) mempunyai tiga tahapan, yaitu tahap inisialisasi, tahap prediksi (time update step) dan tahap koreksi (measurement update step).

Bentuk umum sistem dinamik *nonlinier* pada EnKF adalah sebagai berikut:

$$X_{k+1} = f(X_k, U_k) + w_k \tag{2.43}$$

Pengukuran linier:

$$Z_k = HX_k + V_k \tag{2.44}$$

$$x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_{x0}) \quad ; \quad w_k \sim N(0, Q_k) \quad ; \quad V_k \sim N(0, R_k)$$

dengan

X_{k+1}	:	variabel state pada waktu $k+1$
X_k	:	variabel state pada waktu k
U_k	:	vektor input pada waktu k
w_k	:	*noise* pada sistem dengan mean $\overline{w_k} = 0$ dan varian Q_k

V_k	:	*noise* pada pengukuran dengan mean $\overline{V_k} = 0$ dan varian R_k
$f(X_k, U_k)$	:	fungsi tak linier dari X_k dengan input U_k
Z_k	:	variabel pengukuran
H	:	matriks pengukuran
Q_k	:	variansi *noise* dari sistem
R_k	:	variansi *noise* pengukuran

Proses estimasi pada EnKF diawali dengan membangkitkan sejumlah N_e *ensemble*. Pembangkitan *ensemble* dilakukan secara random dan berdistribusi normal. Misalkan akan dibangkitkan sejumlah N_e *ensemble* untuk $X_{0.i} = [x_{0,1}\ x_{0,2}\ x_{0,3}\ \dots\ x_{0,N_e}]$. Pada EnKF, noise sistem w_k pada tahap prediksi dan noise pengukuran V_k pada tahap koreksi dibangkitkan dalam bentuk *ensemble*. Algoritma *Ensemble Kalman Filter* akan diuraikan dalam tabel dibawah ini.

Tabel 2. 3 : Algoritma *Ensemble Kalman Filter* (EnKF) [22]

Model Sistem	$X_{k+1} = f(X_k, U_k) + w_k$
Model Pengukuran	$Z_k = HX_k + V_k$
Asumsi	$w_k \sim N(0, Q_k)$ $V_k \sim N(0, R_k)$
Tahap Inisialisasi	Bangkitkan N_e *ensemble* sesuai estimasi awal $\bar{x}_0$ $X_{0.i} = [x_{0,1}\ x_{0,2}\ x_{0,3}\ \dots\ x_{0,N_e}]$ Tentukan nilai awalan : $\hat{X}_0 = \frac{1}{N_e}\sum_{i=1}^{N_e} X_{0.i}$ Dengan $X_{0.i} \sim N(\bar{x}_0, P_0)$

Tahap Prediksi	$\hat{X}_{k,i}^{-} = f\left(\hat{X}_{k-1}, U_{k-1}\right) + w_{k,i}$ dengan $w_{k,i} \sim N(0, Q_k)$ Dengan $i = 1,2,3, \dots, N_e$ Estimasi : $\hat{X}_k^{-} = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \hat{X}_{k,i}^{-}$ Kovarian error : $P_k^{-} = \frac{1}{N_e - 1} \sum_{i=1}^{N_e} \left(\hat{X}_{k,i}^{-} - \hat{X}_k^{-}\right) \left(\hat{X}_{k,i}^{-} - \hat{X}_k^{-}\right)^T$ Dengan $i = 1,2,3, \dots, N_e$
Tahap Koreksi	Bangkitkan N_e *ensemble* data pengukuran $Z_{k,i} = Z_k + V_{k,i}$ dengan $i = 1,2,3, \dots, N_e$; $V_{k,i} \sim N(0, R_k)$ Kalman Gain : $K_k = P_k^{-} H^T (H P_k^{-} H^T + R_k)^{-1}$ Estimasi : $\hat{X}_{k,i} = \hat{X}_{k,i}^{-} + K_k (Z_{k,i} - H \hat{X}_{k,i}^{-})$ $\hat{X}_k = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \hat{X}_{k,i}$ Kovarian error : $P_k = [I - K_k H] P_k^{-}$

BAB III
METODE PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan bagaimana langkah-langkah yang digunakan dalam menyelesaikan permasahalan dalam tugas akhir ini. Tahap penelitian dalam tugas akhir ini terdiri atas: studi literatur, identifikasi model gerak ASV, desain kendali gerak ASV menggunakan kendali PID, diskritisasi model, implementasi metode, simulasi, analisis hasil dan pembahasan, dan penulisan laporan tugas akhir. Adapun metode penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

3.1 Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan studi literatur dari berbagai sumber seperti jurnal ilmiah, buku, laporan tugas akhir/thesis terdahulu yang berkaitan dengan permasalaan yang ada. Hal ini bertujuan untuk mempelajari lebih dalam mengenai model kinematik dan dinamik dari ASV, metode kendali *Proportional Integral Derivative* (PID), metode beda hingga dan metode *Ensemble Kalman Filter*.

3.2 Identifikasi Model Gerak ASV

Pada tahap ini, diidentifikasi model gerak ASV dalam 3 derajat kebebasan (3-DOF) yaitu untuk gerak *surge, sway* dan *yaw*. Selanjutnya dilakukan penentuan parameter model yang sesuai dengan data spesifikasi dari *intelligent boat* (i-BOAT). Data spesifikasi i-BOAT ditampilkan dalam tabel sebagai berikut:

Tabel 3. 1 : **Data Spesifikasi i-BOAT**

Kuantitas (Simbol)	Nilai (satuan)
Panjang (L)	4,700 (meter)

Lebar (B)	2,082 (meter)
Tinggi (H)	0,750 (meter)
Sarat (T)	0,300 (meter)
Koefisien Blok (C_B)	0,45
Massa kosong (m)	510 (kg)
Diameter propeller (D)	25 (cm)

3.3 Diskritisasi Model

Pada tahap ini, model gerak ASV masih dalam bentuk waktu kontinu sehingga akan dilakukan diskritisasi menggunakan metode beda hingga maju agar sistemnya menjadi waktu diskrit.

3.4 Mendesain model gerak ASV dengan kendali PID

Pada tahap ini dilakukan desain kendali gerak ASV dengan menggunakan metode PID, dengan langkah-langkah sebagai berikut:

a. Menentukan masukan dan keluaran kendali

   Pada tahap ini ditentukan sinyal keluaran kendali yang merupakan input sistem *nonlinier* ASV yaitu kecepatan *propeller* (δ_n) dan sudut *steering* (δ_s). Untuk mendapatkan keluaran kendali digunakan sinyal error sebagai input kendali yaitu selisih antara set point dengan luaran pada sistem.

b. Penentuan nilai K_p, K_i, dan K_d

   Penentuan besaran nilai K_p, K_i, dan K_d pada desain PID menggunakan *trial* dan error.

c. Mendapat error dan *settling time*

   Setelah diterapkan sistem kendali PID hasil yang didapatkan adalah berupa respon error, *settling time*, *rise time*, dan *maximum overshoot*.

3.5 Implementasi Metode Ensemble Kalman Filter

Pada tahap ini, dilakukan penerapan metode *Ensemble Kalman Filter* pada model gerak ASV yang telah dikendalikan. Metode ini menggunakan sejumlah ensemble untuk mengestimasi kovarian error pada tahap prediksi. Algoritma metode *Ensemble Kalman Filter* terdiri dari tiga tahapan, yaitu tahap inisialisasi, tahap prediksi dan tahap koreksi.

3.6 Simulasi, Analisis Hasil dan Pembahasan

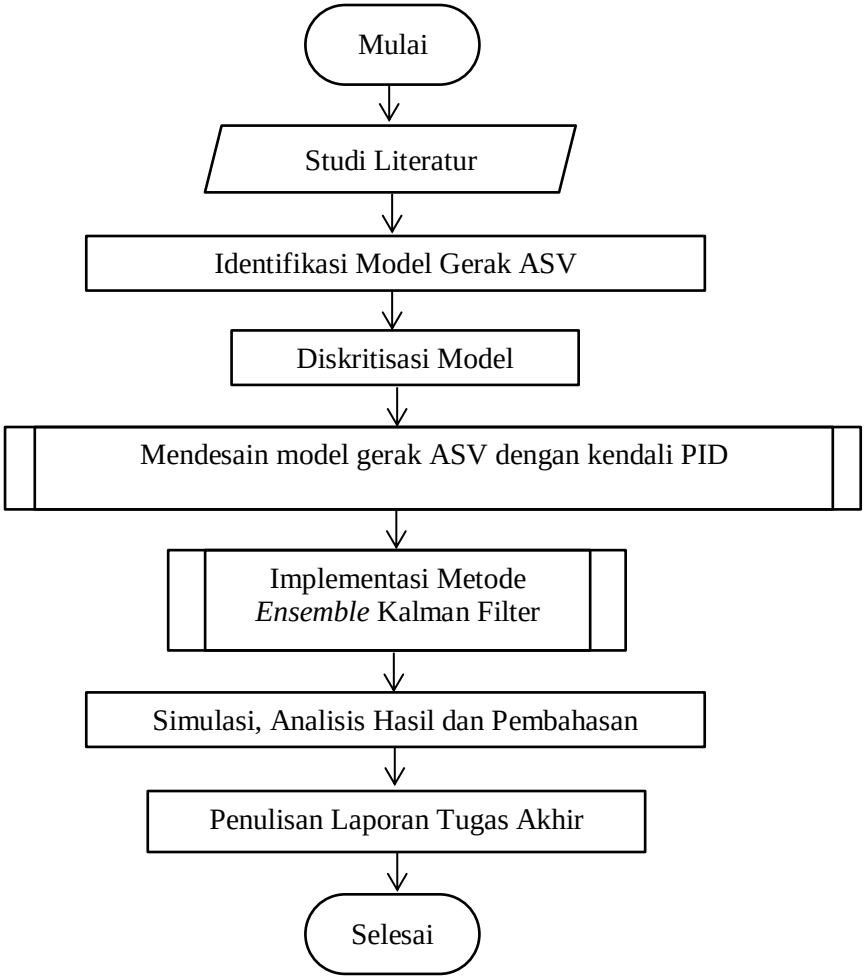
Pada tahap ini, dilakukan simulasi dengan menggunakan software MATLAB 2020b untuk mengetahui hasil implementasi dari kendali gerak PID pada ASV dan estimasi posisi menggunakan metode *Ensemble Kalman Filter*. Selanjutnya dilakukan analisis terhadap hasil implementasi tersebut. Hasil analisis yang diperoleh menjadi landasan untuk mengambil kesimpulan. Kemudian dilakukan penarikan kesimpulan dari hasil pembahasan dan diberikan saran untuk perbaikan pada penelitian berikutnya.

3.7 Penulisan Laporan Tugas Akhir

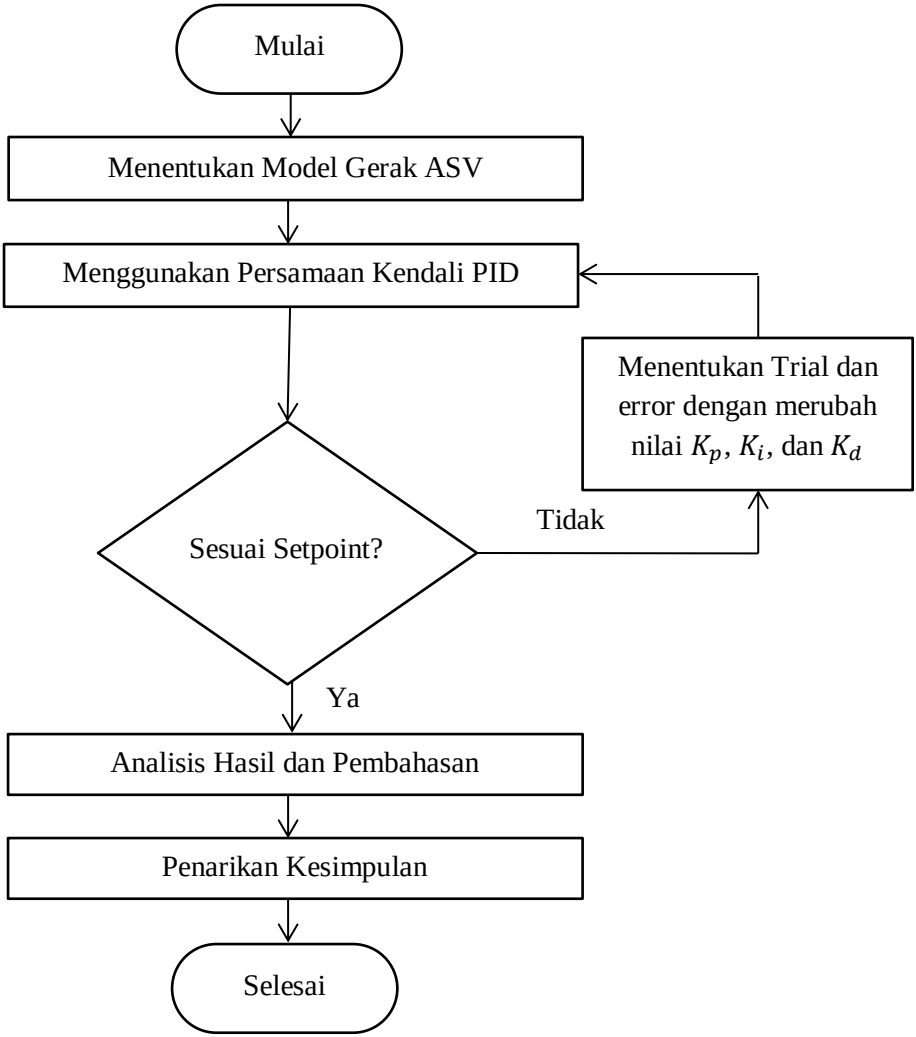
Pada langkah ini, setelah mendapat jawaban permasalahan dari tugas akhir maka dibuat laporan tugas akhir.

3.8 Diagram Alir Penelitian

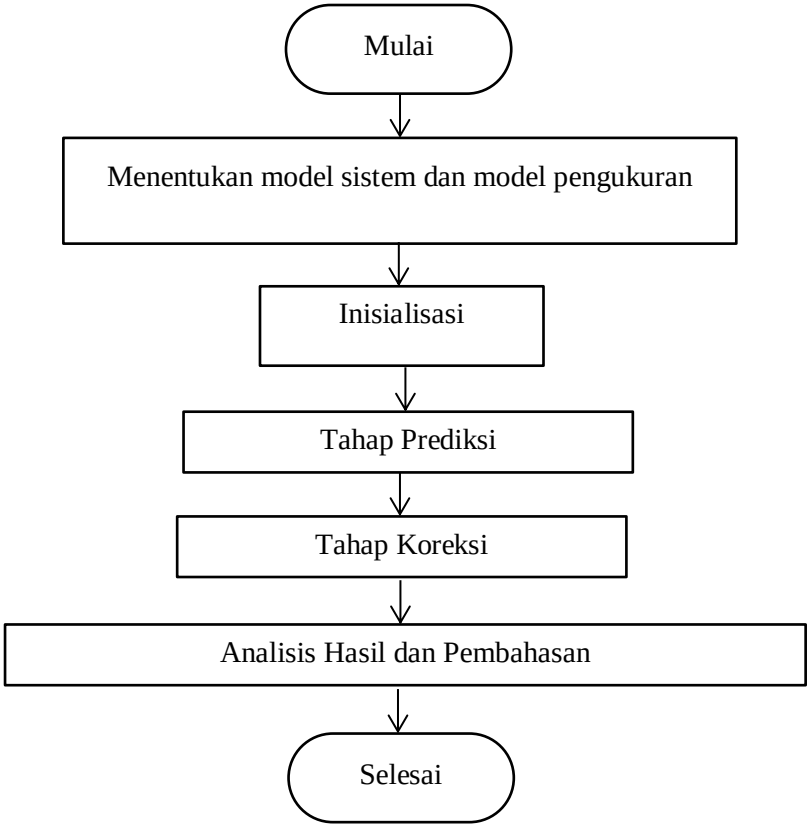
Langkah-langkah penelitian pada tugas akhir ini disajikan dalam diagram alir berikut:



Gambar 3. 1 : Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 2 : Diagram Kendali PID pada Model ASV



Gambar 3. 3 : Diagram Algoritma Ensemble Kalman Filter

BAB IV
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dibahas mengenai estimasi posisi pada gerak ASV. Dimulai dengan identifikasi model gerak ASV dalam tiga derajat kebebasan, selanjutnya akan dilakukan penerapan metode *Proportional Integral Derivative* (PID) dan metode *Ensemble Kalman Filter*. Kemudian dilakukan simulasi dengan menggunakan *software* MATLAB 2020b untuk menganalisis performa sistem berdasarkan hasil yang diperoleh.

4.1 Identifikasi Model Gerak ASV

Pada bagian ini dibahas mengenai model gerak *nonlinear* pada ASV seperti yang telah dijelaskan pada Bab II. Model yang digunakan adalah persamaan model gerak 3-DOF sesuai dengan Persamaan (2.23) sampai (2.25) yaitu:

Persamaan *surge* (u) :

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} - m(x_G r^2 + vr) + Y_{\dot{v}} vr + \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2} r^2$$
$$= X_u u + X_{u|u|}|u|u + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)$$

Persamaan *sway* (v) :

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} + (m - X_{\dot{u}})ur$$
$$= Y_v v + Y_{v|v|}|v|v + Y_r r + Y_{r|r|}|r|r + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s$$

Persamaan *yaw* (r) :

$$(mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_{zz} - N_{\dot{r}})\dot{r} + mx_G ur - Y_{\dot{v}} uv - \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2} ur + X_{\dot{u}} uv$$
$$= N_v v + N_{v|v|}|v|v + N_r r + N_{r|r|}|r|r + x_{\delta_s}(cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s$$

Dari persamaan dapat dimisalkan bahwa

$$X_m = m(x_G r^2 + vr) - Y_{\dot{v}} vr - \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2} r^2 + X_u u + X_{u|u|}|u|u$$

$$Y_m = -(m - X_{\dot{u}})ur + Y_v v + Y_{v|v|}|v|v + Y_r r + Y_{r|r|}|r|r$$

$$N_m = -mx_G ur + Y_{\dot{v}} uv + \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2} ur - X_{\dot{u}} uv + N_v v + N_{v|v|}|v|v + N_r r + N_{r|r|}|r|r$$

Dari permisalan tersebut jika disubstitusikan pada Persamaan (2.23) sampai (2.25) kemudian diubah kedalam bentuk matriks maka menjadi:

$$\begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mx_G - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_m + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n) \\ Y_m + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s \\ N_m + x_{\delta_s}(cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mx_G - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_m + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n) \\ Y_m + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s \\ N_m + x_{\delta_s}(cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

Jika dimisalkan

$$A = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mx_G - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

dengan

$E = m - X_{\dot{u}}$; $\quad G = mx_G - N_{\dot{v}}$; $\quad I = I_{zz} - N_{\dot{r}}$;
$F = m - Y_{\dot{v}}$; $\quad H = mx_G - Y_{\dot{r}}$;

Maka Persamaan (4.2) menjadi

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & 0 & 0 \\ 0 & F & H \\ 0 & G & I \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_m + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n) \\ Y_m + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s \\ N_m + x_{\delta_s}(cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Determinan dari A adalah

$$det(A) = EFI - EHG = E(FI - HG)$$

Kemudian dicari kofaktor dari A

$$\text{Kof}(A) = \begin{bmatrix} FI - HG & 0 & 0 \\ 0 & EI & -EG \\ 0 & -EH & EF \end{bmatrix}$$

Maka didapatkan matriks adjoin dengan $\text{Adj}(A) = [\text{Kof}(A)]^T$

$$\text{Adj}(A) = \begin{bmatrix} FI - HG & 0 & 0 \\ 0 & EI & -EH \\ 0 & -EG & EF \end{bmatrix}$$

dan matriks A^{-1} adalah

$$A^{-1} = \frac{1}{E(FI - HG)} \begin{bmatrix} FI - HG & 0 & 0 \\ 0 & EI & -EH \\ 0 & -EG & EF \end{bmatrix}$$

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{I}{(FI - HG)} & \frac{-H}{(FI - HG)} \\ 0 & \frac{-G}{(FI - HG)} & \frac{F}{(FI - HG)} \end{bmatrix}$$

Sehingga Persamaan (4.3) menjadi bentuk ruang keadaan (*state space*) yaitu:

$$\begin{bmatrix}\dot{u}\\ \dot{v}\\ \dot{r}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{E} & 0 & 0\\ 0 & \frac{I}{FI-HG} & -\frac{H}{FI-HG}\\ 0 & -\frac{G}{FI-HG} & \frac{F}{FI-HG}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_m+(cV\delta_n+d|\delta_n|\delta_n)\\ Y_m+(cV\delta_n+d|\delta_n|\delta_n)\delta_s\\ N_m+x_{\delta_s}(cV\delta_n+d|\delta_n|\delta_n)\delta_s\end{bmatrix} \tag{4.4}$$

Misalkan

$T_1=\frac{1}{E}$; $T_3=-\frac{G}{FI-HG}$; $T_5=\frac{F}{FI-HG}$;

$T_2=\frac{I}{FI-HG}$; $T_4=-\frac{H}{FI-HG}$;

Persamaan (4.4) akan menjadi

$$\begin{bmatrix}\dot{u}\\ \dot{v}\\ \dot{r}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}T_1 & 0 & 0\\ 0 & T_2 & T_4\\ 0 & T_3 & T_5\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_m+(cV\delta_n+d|\delta_n|\delta_n)\\ Y_m+(cV\delta_n+d|\delta_n|\delta_n)\delta_s\\ N_m+x_{\delta_s}(cV\delta_n+d|\delta_n|\delta_n)\delta_s\end{bmatrix} \tag{4.5}$$

Sehingga persamaan untuk masing-masing state adalah:

Surge

$$\dot{u}=T_1(X_m+(cV\delta_n+d|\delta_n|\delta_n)) \tag{4.6}$$

Sway

$$\dot{v}=T_2(Y_m+(cV\delta_n+d|\delta_n|\delta_n)\delta_s)+T_4(N_m+x_{\delta_s}(cV\delta_n+d|\delta_n|\delta_n)\delta_s) \tag{4.7}$$

Yaw

$$\dot{r}=T_3(Y_m+(cV\delta_n+d|\delta_n|\delta_n)\delta_s)+T_5(N_m+x_{\delta_s}(cV\delta_n+d|\delta_n|\delta_n)\delta_s) \tag{4.8}$$

Atau jika dijabarkan manjadi:

Surge

$$\dot{u}=(m(x_G r^2+vr)-Y_{\dot{v}}vr-\frac{Y_{\dot{r}}+N_{\dot{v}}}{2}r^2+X_u u+X_{u|u|}|u|u+(cV\delta_n+d|\delta_n|\delta_n))/(m-X_{\dot{u}}) \tag{4.9}$$

Sway

$$\dot{v}=((I_{zz}-N_{\dot{r}})(-(m-X_{\dot{u}})ur+Y_v v+Y_{v|v|}|v|v+Y_r r$$

$$+Y_{r|r|}|r|r + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s) - (mx_G - Y_{\dot{r}})$$
$$(-mx_G ur + Y_{\dot{v}} uv + \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2} ur - X_{\dot{u}} uv + N_v v$$
$$+N_{v|v|}|v|v + N_r r + N_{r|r|}|r|r$$
$$+x_{\delta_s}(cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s))$$
$$/((m - Y_{\dot{v}})(I_{zz} - N_{\dot{r}}) - (mx_G - Y_{\dot{r}})(mx_G - N_{\dot{v}}))$$
(4.10)

Yaw

$$\dot{r} = (-(mx_G - N_{\dot{v}})(-(m - X_{\dot{u}})ur + Y_v v + Y_{v|v|}|v|v + Y_r r$$
$$+Y_{r|r|}|r|r + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s) + (m - Y_{\dot{v}})$$
$$(-mx_G ur + Y_{\dot{v}} uv + \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2} ur - X_{\dot{u}} uv + N_v v$$
$$+N_{v|v|}|v|v + N_r r + N_{r|r|}|r|r$$
$$+x_{\delta_s}(cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s))$$
$$/((m - Y_{\dot{v}})(I_{zz} - N_{\dot{r}}) - (mx_G - Y_{\dot{r}})(mx_G - N_{\dot{v}}))$$
(4.11)

Untuk mengetahui posisi ASV maka diperlukan model kinematik yang terdapat pada Persamaan (2.1) sampai (2.3). Sehingga apabila digabungkan dengan Persamaan (4.6) sampai (4.8) menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1(X_m + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)) \\ T_2(Y_m + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s) + T_4(N_m + x_{\delta_s}(cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s) \\ T_3(Y_m + (cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s) + T_5(N_m + x_{\delta_s}(cV\delta_n + d|\delta_n|\delta_n)\delta_s) \\ u\cos\psi - v\sin\psi \\ u\sin\psi + v\cos\psi \\ r \end{bmatrix}$$
(4.12)

4.2 Diskritisasi Model

Sebelum diimplementasikan pada metode pengendalian model matematika yang telah diidentifikasi sebelumnya pada Persamaan (4.12) akan diubah dalam bentuk waktu diskrit

terlebih dahulu. Diskritisasi dilakukan menggunakan metode beda hingga maju untuk memprediksi satu langkah waktu ke depan dengan panjang grid variabel waktu (Δt).

Persamaan (4.12) adalah persamaan dalam waktu kontinyu atau dapat dituliskan sebagai:

$$f(X,U,t) = \begin{bmatrix} T_1(X_m(t) + (cV\delta_n(t) + d|\delta_n(t)|\delta_n(t))) \\ T_2\big(Y_m(t) + \big(cV\delta_n(t) + d|\delta_n(t)|\delta_n(t)\big)\delta_s(t)\big) + T_4(N_m(t) + x_{\delta_s}(cV\delta_n(t) + d|\delta_n(t)|\delta_n(t))\delta_s(t)) \\ T_3(Y_m(t) + (cV\delta_n(t) + d|\delta_n(t)|\delta_n(t))\delta_s(t)) + T_5(N_m(t) + x_{\delta_s}(cV\delta_n(t) + d|\delta_n(t)|\delta_n(t))\delta_s(t)) \\ u(t)\cos\psi(t) - v(t)\sin\psi(t) \\ u(t)\sin\psi(t) + v(t)\cos\psi(t) \\ r(t) \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

dengan

$$X_m(X,U,t) = m\big(x_G r(t)^2 + v(t)r(t)\big) - Y_{\dot{v}}v(t)r(t) - \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2}r(t)^2 + X_u u(t) + X_{u|u|}|u(t)|u(t)$$

$$Y_m(X,U,t) = -(m - X_{\dot{u}})u(t)r(t) + Y_v v(t) + Y_{v|v|}|v(t)|v(t) + Y_r r(t) + Y_{r|r|}|r(t)|r(t)$$

$$N_m(X,U,t) = -mx_G u(t)r(t) + Y_{\dot{v}}u(t)v(t) + \frac{Y_{\dot{r}} + N_{\dot{v}}}{2}u(t)r(t) - X_{\dot{u}}u(t)v(t) + N_v v(t) + N_{v|v|}|v(t)|v(t) + N_r r(t) + N_{r|r|}|r(t)|r(t)$$

Dimana $X = \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \\ r(t) \\ x(t) \\ y(t) \\ \psi(t) \end{bmatrix}$; $U = \begin{bmatrix} \delta_n(t) \\ \delta_s(t) \end{bmatrix}$

Bentuk diskrit dari model pada Persamaan (4.13) adalah sebagai berikut:

Diskritisasi $\dot{u}$

$$\dot{u} = \frac{du(t)}{dt} = \frac{u_{k+1} - u_k}{\Delta t}$$
$$\frac{u_{k+1} - u_k}{\Delta t} = (T_1(X_{m_k} + (cV\delta_{n_k} + d|\delta_{n_k}|\delta_{n_k})))$$
$$u_{k+1} = (T_1(X_{m_k} + (cV\delta_{n_k} + d|\delta_{n_k}|\delta_{n_k})))\Delta t + u_k \quad (4.14)$$

Diskritisasi $\dot{v}$

$$\dot{v} = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{v_{k+1} - v_k}{\Delta t}$$
$$\frac{v_{k+1} - v_k}{\Delta t} = T_2\left(Y_{m_k} + (cV\delta_{n_k} + d|\delta_{n_k}|\delta_{n_k})\delta_{s_k}\right)$$
$$+T_4(N_{m_k} + x_{\delta_s}(cV\delta_{n_k} + d|\delta_{n_k}|\delta_{n_k})\delta_{s_k})$$
$$v_{k+1} = (T_2\left(Y_{m_k} + (cV\delta_{n_k} + d|\delta_{n_k}|\delta_{n_k})\delta_{s_k}\right)$$
$$+T_4(N_{m_k} + x_{\delta_s}(cV\delta_{n_k} + d|\delta_{n_k}|\delta_{n_k})\delta_{s_k}))\Delta t + v_k \quad (4.15)$$

Diskritisasi $\dot{r}$

$$\dot{r} = \frac{dr(t)}{dt} = \frac{r_{k+1} - r_k}{\Delta t}$$
$$\frac{r_{k+1} - r_k}{\Delta t} = T_3\left(Y_{m_k} + (cV\delta_{n_k} + d|\delta_{n_k}|\delta_{n_k})\delta_{s_k}\right)$$
$$+T_5(N_{m_k} + x_{\delta_s}(cV\delta_{n_k} + d|\delta_{n_k}|\delta_{n_k})\delta_{s_k})$$
$$r_{k+1} = (T_3\left(Y_{m_k} + (cV\delta_{n_k} + d|\delta_{n_k}|\delta_{n_k})\delta_{s_k}\right)$$
$$+T_5(N_{m_k} + x_{\delta_s}(cV\delta_{n_k} + d|\delta_{n_k}|\delta_{n_k})\delta_{s_k}))\Delta t + r_k \quad (4.16)$$

Diskritisasi $\dot{x}$

$$\dot{x} = \frac{dx(t)}{dt} = \frac{x_{k+1} - x_k}{\Delta t}$$
$$\frac{x_{k+1} - x_k}{\Delta t} = u_k \cos\psi_k - v_k \sin\psi_k$$
$$x_{k+1} = (u_k \cos\psi_k - v_k \sin\psi_k)\Delta t + x_k \quad (4.17)$$

Diskritisasi $\dot{y}$

$$\dot{y} = \frac{dy(t)}{dt} = \frac{y_{k+1} - y_k}{\Delta t}$$
$$\frac{y_{k+1} - y_k}{\Delta t} = u_k \sin\psi_k + v_k \cos\psi_k$$
$$y_{k+1} = (u_k \sin\psi_k + v_k \cos\psi_k)\Delta t + y_k \quad (4.18)$$

Diskritisasi $\dot{\psi}$

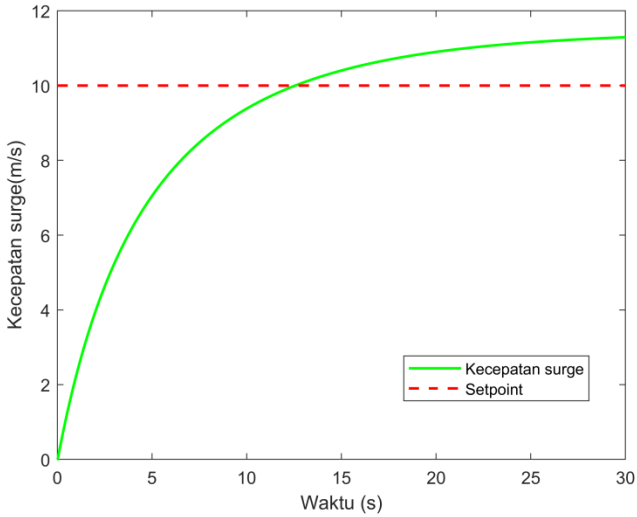
$$\dot{\psi} = \frac{d\psi(t)}{dt} = \frac{\psi_{k+1} - \psi_k}{\Delta t}$$

$$\frac{\psi_{k+1} - \psi_k}{\Delta t} = r_k$$

$$\psi_{k+1} = r_k \Delta t + \psi_k \tag{4.19}$$

4.3 Simulasi Model Tanpa Kendali

Model matematika dalam bentuk waktu diskrit pada Persamaan (4.14) sampai (4.19) selanjutnya akan disimulasikan tanpa kendali, sehingga menghasilkan respon sebagai berikut:

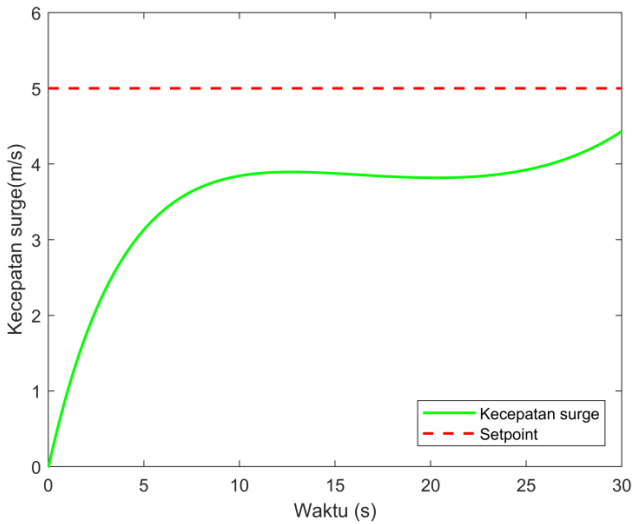


Gambar 4. 1 : Respon kecepatan s*urge* (1)

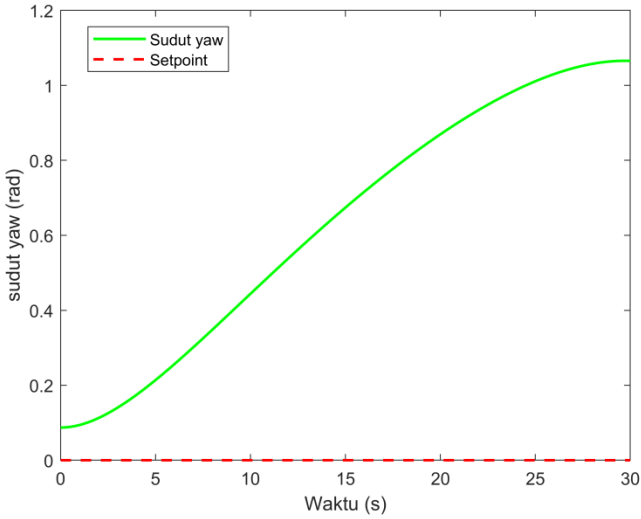
Gambar 4.1 menunjukkan respon gerak *surge* dengan nilai awal ASV yaitu $u = 0$ m/s, $v = 0$ m/s, $r = 0$ rad/s, $x = 0$ m, $y = 0$ m dan $\psi = 0$ rad. Nilai perubahan waktu $\Delta t = 0.01$ dan diberikan nilai $T = 30$ detik, sehingga terdapat

$k = 3000$ langkah waktu. Diberikan setpoint kecepatan *surge* $u = 10\ \mathrm{m/s}$. Pada Gambar 4.1 terlihat bahwa kecepatan *surge* semula berjalan menuju setpoint, namun respon mencapai kestabilan ketika telah melebihi setpoint. Respon mencapai kestabilan pertama kali (*settling time*) pada 22,86 detik, dengan *steady state error* 14,058%, *overshoot* 0% dan *undershoot* 0%.

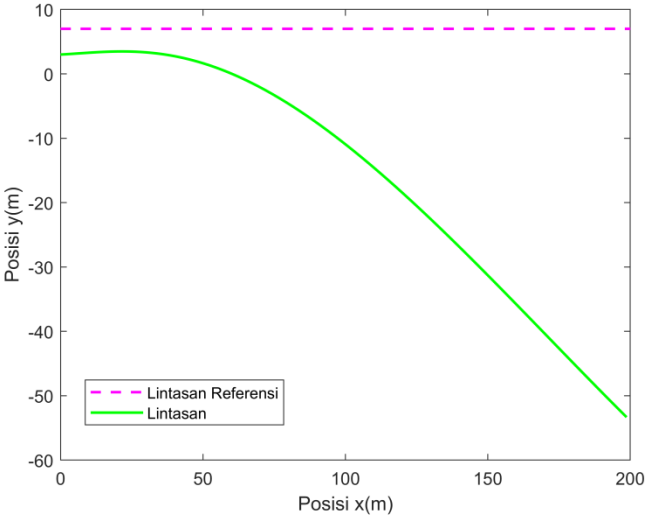
Selanjutnya dilakukan simulai model tanpa pengendali dengan nilai awal ASV yaitu $u = 0\ \mathrm{m/s}$, $v = 0\ \mathrm{m/s}$, $r = 0\ \mathrm{rad/s}$, $x = 0\ \mathrm{m}$, $y = 3\ \mathrm{m}$ dan $\psi = 5° \approx 0{,}0873\ \mathrm{rad}$. . Nilai perubahan waktu $\Delta t = 0.01$ dan diberikan nilai $T = 30$ detik, sehingga terdapat $k = 3000$ langkah waktu. Diberikan setpoint kecepatan *surge* $u = 5\ \mathrm{m/s}$, setpoint sudut *yaw* $\psi = 0\ \mathrm{rad}$ dan setpoint lintasan $y = 7$. Sehingga menghasilkan respon sebagai berikut:



Gambar 4. 2 : Respon kecepatan *surge* (2)



Gambar 4. 3 : Respon sudut *yaw* (2)



Gambar 4. 4 : Respon lintasan (2)

Gambar 4.2 menunjukkan respon kecepatan *surge*, terlihat bahwa respon telah berjalan menuju setpoint namun belum mencapai setpoint. Karena respon belum mencapai kestabilan maka *settling time*, *steady state error*, *overshoot* dan *undershoot* tidak dapat ditentukan. Selanjutnya pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 terlihat bahwa respon sudut *yaw* dan lintasan menjauhi setpoint yang ditentukan, sehingga error yang dihasilkan sangat besar.

4.4 Mendesain Model Gerak ASV dengan Kendali PID

Perancangan sistem kendali dilakukan menggunakan metode *Proportional Integral Derivative* (PID). Dalam waktu kontinyu sinyal keluaran pada pengendali PID dirumuskan seperti pada Persamaan (2.26) yaitu:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Dimana $U(t)$ sinyal keluaran yang merupakan input sistem yaitu kecepatan *propeller* (δ_n) dan sudut *steering* (δ_s). $e(t)$ merupakan sinyal error yaitu selisih antara set point dengan luaran pada sistem. Karena pengendalian bertujuan agar ASV bergerak mengikuti lintasan yang diinginkan dengan kecepatan tertentu maka terdapat tiga sinyal error yang digunakan yaitu error kecepatan *surge* ($e_u(t)$), error posisi ($e_{xy}(t)$) dan error sudut *yaw* ($e_\psi(t)$). Error kecepatan *surge* ($e_u(t)$) digunakan untuk memperoleh sinyal keluaran δ_n, sedangkan error posisi ($e_{xy}(t)$) dan error sudut *yaw*($e_\psi(t)$) digunakan untuk memperoleh sinyal keluaran δ_s, hal ini berdasarkan model dinamika ASV pada Persamaan (4.9) dimana kecepatan *surge* hanya dipengaruhi oleh kecepatan *propeller* (δ_n), sedangkan posisi dan sudut yaw

dipengaruhi oleh sudut *steering* (δ_s). Selanjutnya K_p, K_i dan K_d merupakan gain *proportional*, gain *integral* dan gain *derivative* yang berupa nilai konstanta. Sehingga persamaan sinyal keluaran pada pengendali PID untuk tugas akhir ini adalah:

$$\begin{bmatrix}\delta_n(t)\\ \delta_s(t)\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}K_{p1} & 0 & 0\\ 0 & K_{p2} & K_{p3}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e_u(t)\\ e_{xy}(t)\\ e_\psi(t)\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}K_{i1} & 0 & 0\\ 0 & K_{i2} & K_{i3}\end{bmatrix}\int_0^t \begin{bmatrix}e_u(t)\\ e_{xy}(t)\\ e_\psi(t)\end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix}K_{d1} & 0 & 0\\ 0 & K_{d2} & K_{d3}\end{bmatrix}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}e_u(t)\\ e_{xy}(t)\\ e_\psi(t)\end{bmatrix} \tag{4.20}$$

Karena pengolahan sinyal dilakukan pada waktu diskrit maka Persamaan (4.19) akan diubah dalam bentuk waktu diskrit. Bentuk integral dan differensial pada keluaran PID dapat dituliskan dalam bentuk diskrit sebagai berikut:

Integral :

$$\int_0^t e(t)dt \approx \sum_0^k e_k\,\Delta t$$

$$\begin{bmatrix}\int_0^t e_u(t)dt\\ \int_0^t e_{xy}(t)dt\\ \int_0^t e_\psi(t)dt\end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix}\sum_0^k e_u\\ \sum_0^k e_{xy}\\ \sum_0^k e_\psi\end{bmatrix}_k \Delta t \tag{4.21}$$

Differensial:

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e_k - e_{k-1}}{\Delta t}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{de_u(t)}{dt} \\ \frac{de_{xy}(t)}{dt} \\ \frac{de_\psi(t)}{dt} \end{bmatrix} \approx \left(\begin{bmatrix} e_u \\ e_{xy} \\ e_\psi \end{bmatrix}_k - \begin{bmatrix} e_u \\ e_{xy} \\ e_\psi \end{bmatrix}_{k-1} \right) \frac{1}{\Delta t} \tag{4.22}$$

Sehingga diperoleh keluaran kendali PID diskrit sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \end{bmatrix}_k = & \begin{bmatrix} K_{p1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{p2} & K_{p3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_u \\ e_{xy} \\ e_\psi \end{bmatrix}_k \\ & + \begin{bmatrix} K_{i1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{i2} & K_{i3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_0^k e_u \\ \sum_0^k e_{xy} \\ \sum_0^k e_\psi \end{bmatrix}_k \Delta t \\ & + \begin{bmatrix} K_{d1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{d2} & K_{d3} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} e_u \\ e_{xy} \\ e_\psi \end{bmatrix}_k - \begin{bmatrix} e_u \\ e_{xy} \\ e_\psi \end{bmatrix}_{k-1} \right) \frac{1}{\Delta t} \end{aligned} \tag{4.23}$$

Desain kendali ASV bertujuan agar hasil pengamatan dsesuai dengan yang diharapkan. Hasil respon kecepatan yang diharapkan memiliki *steady state error* kurang dari 7%, *overshoot* kurang dari 7% dan *undershoot* kurang dari 7%. Prosentase *steady state error* dapat dihitung dari selisih antara *set point* dengan grafik yang dihasilkan pada saat stabil, selanjutnya dibagi dengan setpoint dan dikalikan 100%. Sedangkan hasil respon sudut *yaw* dan posisi yang diharapkan memilik error kurang dari 7%.

4.5 Bentuk Umum Model Sistem dan Model Pengukuran

Model pada Persamaan (4.14) sampai (4.19) merupakan bentuk fungsi *nonlinear* dengan waktu diskrit. Model tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$X_{k+1} = f(X_k, U_k) \tag{4.24}$$

dengan

$$X_{k+1} = \begin{bmatrix} u_{k+1} \\ v_{k+1} \\ r_{k+1} \\ x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ \psi_{k+1} \end{bmatrix} \quad ; \quad f(X_k, U_k) = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix}$$

dimana

$$f_1 = (T_1(X_{m_k} + (cV\delta_{n_k} + d|\delta_{n_k}|\delta_{n_k})))\Delta t + u_k$$

$$f_2 = (T_2\big(Y_{m_k} + (cV\delta_{n_k} + d|\delta_{n_k}|\delta_{n_k})\delta_{s_k}\big) + T_4(N_{m_k} + x_{\delta_s}(cV\delta_{n_k} + d|\delta_{n_k}|\delta_{n_k})\delta_{s_k}))\Delta t + v_k$$

$$f_3 = (T_3\big(Y_{m_k} + (cV\delta_{n_k} + d|\delta_{n_k}|\delta_{n_k})\delta_{s_k}\big) + T_5(N_{m_k} + x_{\delta_s}(cV\delta_{n_k} + d|\delta_{n_k}|\delta_{n_k})\delta_{s_k}))\Delta t + r_k$$

$$f_4 = (u_k \cos\psi_k - v_k \sin\psi_k)\Delta t + x_k$$

$$f_5 = (u_k \sin\psi_k + v_k \cos\psi_k)\Delta t + y_k$$

$$f_6 = r_k \Delta t + \psi_k$$

Dalam model (4.24) adanya *noise* (gangguan) diabaikan. *Noise* dapat terjadi pada model sistem misalnya seperti kesalahan dalam memodelkan, selain itu *noise* juga dapat terjadi pada model pengukuran. Meskipun *noise* memiliki nilai yang sangat kecil, namun perlu diperhitungankan keberadaannya. Oleh karena itu, model pada Persamaan (4.24) dengan mempertimbangkan *noise* dapat dituliskan sebagai:

$$X_{k+1} = f(X_k, U_k) + w_k \tag{4.25}$$

$$X_{k+1} = \begin{bmatrix} u_{k+1} \\ v_{k+1} \\ r_{k+1} \\ x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ \psi_{k+1} \end{bmatrix} \quad ; \quad f(X_k, U_k) = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad ; \quad w_k = \begin{bmatrix} w_{1k} \\ w_{2k} \\ w_{3k} \\ w_{4k} \\ w_{5k} \\ w_{6k} \end{bmatrix}$$

Dimana w_k adalah *noise* sistem yang berdistribusi normal dengan *mean* nol dan varians $Q, w_k \sim N(0, Q_k)$. Sedangkan untuk model pengukurannya adalah sebagai berikut:

$$Z_k = H(X_k) + V_k$$

$$Z_k = H \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \\ r_k \\ x_k \\ y_k \\ \psi_k \end{bmatrix} + V_k \tag{4.26}$$

Dimana V_k adalah *noise* pengukuran yang berdistribusi normal dengan *mean* dan varians $R, V_k \sim N(0, R_k)$. Matriks H berukuran $n \times m$ dikarenakan data pengukuran memiliki n variabel dan terdapat m variabel yang diamati kemudian akan diestimasi menggunakan *Ensemble Kalman Filter*.

4.6 Implementasi Algoritma Ensemble Kalman Filter

Pada metode *Ensemble Kalman Filter* proses estimasi dilakukan melalui tiga tahapan, yaitu tahap inisialisasi, tahap prediksi dan tahap koreksi. Tahap inisialisasi dilakukan dengan membangkitkan sejumlah N_e *ensemble* yang merupakan representasi dari variabel keadaan dengan *mean* 0 dan kovarians 1. Pada tahap prediksi (*time update*) dilakukan prediksi variabel keadaan berdasarkan sistem dinamik. Sedangkan pada tahap koreksi (*measurement update*)

dilakukan koreksi terhadap data-data pengukuran untuk memperbaiki hasil estimasi.

4.6.1 Tahap Inisialisasi

Akan dibangkitkan sejumlah N_e *ensemble* dalam bentuk matriks berukuran $n \times N_e$ dengan n banyaknya variabel keadaan dan N_e banyaknya *ensemble*. Dalam penelitian ini terdapat 6 variabel yang akan diestimasi yaitu u, v, r, x, y dan ψ maka diperoleh matriks *ensemble* sebagai berikut:

$$X_{0,i} = \begin{bmatrix} u_{0,1} & u_{0,2} & \cdots & u_{0,N_e} \\ v_{0,1} & v_{0,2} & \cdots & v_{0,N_e} \\ r_{0,1} & r_{0,2} & \cdots & r_{0,N_e} \\ x_{0,1} & x_{0,2} & \cdots & x_{0,N_e} \\ y_{0,1} & y_{0,2} & \cdots & y_{0,N_e} \\ \psi_{0,1} & \psi_{0,2} & \cdots & \psi_{0,N_e} \end{bmatrix} \tag{4.27}$$

Selanjutnya akan ditentukan nilai awalan berdasarkan matriks *ensemble* pada Persamaan (4.26)

$$\hat{X}_0 = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} X_{0,i}$$

$$\hat{X}_0 = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \begin{bmatrix} u_{0,1} & u_{0,2} & \cdots & u_{0,N_e} \\ v_{0,1} & v_{0,2} & \cdots & v_{0,N_e} \\ r_{0,1} & r_{0,2} & \cdots & r_{0,N_e} \\ x_{0,1} & x_{0,2} & \cdots & x_{0,N_e} \\ y_{0,1} & y_{0,2} & \cdots & y_{0,N_e} \\ \psi_{0,1} & \psi_{0,2} & \cdots & \psi_{0,N_e} \end{bmatrix} \tag{4.28}$$

4.6.2 Tahap Prediksi

Pada tahap ini akan ditentukan estimasi *ensemble*, *mean* estimasi dan kovarian error estimasi. Untuk mencari estimasi *ensemble* akan digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\hat{X}_{k,i}^{-} = f\left(\hat{X}_{k-1}, U_{k-1}\right) + w_{k,i} \tag{4.29}$$

dengan $w_{k,i} \sim N(0, Q_k)$

Untuk $i = 1$, diperoleh

$\hat{X}_{k,1}^{-} = f\left(\hat{X}_{k-1}, U_{k-1}\right) + w_{k,1}$

$$\hat{X}_{k,1}^{-} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} w_{k,1}^1 \\ w_{k,1}^2 \\ w_{k,1}^3 \\ w_{k,1}^4 \\ w_{k,1}^5 \\ w_{k,1}^6 \end{bmatrix}$$

Untuk $i = 2$, diperoleh

$\hat{X}_{k,2}^{-} = f\left(\hat{X}_{k-1}, U_{k-1}\right) + w_{k,2}$

$$\hat{X}_{k,2}^{-} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} w_{k,2}^1 \\ w_{k,2}^2 \\ w_{k,2}^3 \\ w_{k,2}^4 \\ w_{k,2}^5 \\ w_{k,2}^6 \end{bmatrix}$$

$\vdots$

Untuk $i = N_e$, diperoleh

$\hat{X}_{k,N_e}^{-} = f\left(\hat{X}_{k-1,}, U_{k-1}\right) + w_{k,N_e}$

$$\hat{X}_{k,N_e}^{-} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} w_{k,N_e}^1 \\ w_{k,N_e}^2 \\ w_{k,N_e}^3 \\ w_{k,N_e}^4 \\ w_{k,N_e}^5 \\ w_{k,N_e}^6 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan estimasi *ensemble* untuk $i = 1$ hingga $i = N_e$, maka diperoleh persamaan estimasi *ensemble* dengan jumlah sebanyak N_e dan iterasi sebanyak k yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\hat{X}_k^- = \left[f\left(\hat{X}_{k-1,}, U_{k-1}\right) \quad f\left(\hat{X}_{k-1,}, U_{k-1}\right) \quad \dots \quad f\left(\hat{X}_{k-1,}, U_{k-1}\right)\right] + \left[w_{k,1} \quad w_{k,2} \quad \cdots \quad w_{k,N_e}\right]$$

Untuk Persamaan (4.29) diperoleh matriks sebesar $k \times N_e$. Selanjutnya *mean* estimasi dari setiap variabel keadaan dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\hat{X}_k^- = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \hat{X}_{k,i}^-$$

Dengan kovarian error tahap prediksi adalah:

$$P_k^- = \frac{1}{N_e - 1} \sum_{i=1}^{N_e} \left(\hat{X}_{k,i}^- - \hat{X}_k^-\right) \left(\hat{X}_{k,i}^- - \hat{X}_k^-\right)^T$$

Nilai estimasi dan kovarian error pada tahap prediksi yang telah dihitung akan dikoreksi agar akurat dalam mengestimasi kecepatan dan posisi.

4.6.3 Tahap Koreksi

Pada tahap ini diawali dengan mereplikasi data pengukuran ke dalam matriks berukuran $m \times N_e$ dengan m adalah banyaknya variabel pengukuran. Akan digunakan persamaan sebagai berikut:

$$Z_{k,i} = Z_k + V_{k,i} \tag{4.30}$$

Dari persamaan data pengukuran untuk $i = 1,2, \dots, N_e$ diperoleh persamaan data pengukuran dengan jumlah *ensemble* sebanyak N_e dan k iterasi.

$$z_k = \left[Z_{k,1} \quad Z_{k,2} \quad \cdots \quad Z_{k,N_e}\right]$$

Selanjutnya Kalman gain dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R_k)^{-1} \tag{4.31}$$

Dengan P_k^- merupakan kovarian error pada tahap prediksi, H merupakan matriks pengukuran dan R_k merupakan *noise* pengukuran. Kalman gain akan digunakan untuk menghitung nilai estimasi pada tahap koreksi dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\hat{X}_{k,i} = \hat{X}_{k,i}^- + K_k (Z_{k,i} - H\hat{X}_{k,i}^-) \tag{4.32}$$

Dimana $\hat{X}_{k,i}^-$ merupakan nilai estimasi pada tahap prediksi. Dari persamaan di atas diperoleh *mean* estimasi sebagai berikut:

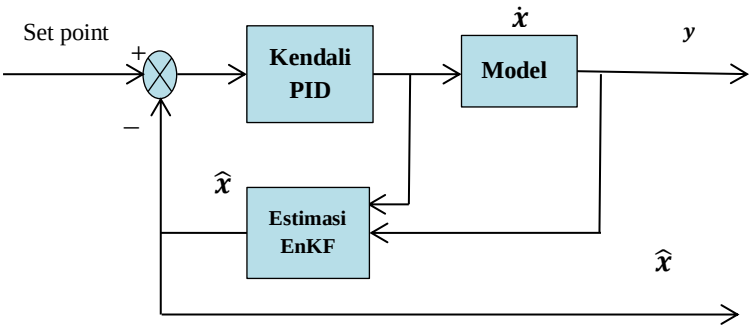
$$\hat{X}_k = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \hat{X}_{k,i} \tag{4.33}$$

Nilai *mean* estimasi digunakan untuk membandingkan hasil estimasi dari metode EnKF dengan nilai sebenarnya. Kemudian kovarian error tahap koreksi dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_k = [I - K_k H] P_k^- \tag{4.34}$$

4.7 Diagram Blok Gabungan Proportional-Integral-Derivative (PID) dan Ensemble Kalman Filter

Pada bagian ini terdapat diagram blok gabungan antara gabungan Proportional-Integral-Derivative (PID) dan Ensemble Kalman Filter yang ditunjukkan pada gambar sebagai berikut:



Gambar 4. 5 : Diagram Blok PID-EnKF

Mula-mula model *nonlinear* gerak ASV 3DOF dikenakan kendali PID. Tujuan dari pengendalian adalah untuk meminimalkan selisih antara keluaran sistem dengan *setpoint* atau referensinya. *Output* dari proses kendali disimpan sebagai data pengukuran yang nantinya dipakai sebagai inputan pada metode estimasi *Ensemble Kalman Filter* untuk mendapatkan estimasi state. Hasil dari blok estimasi dikembalikan lagi bersama dengan data input dan output sebelumnya untuk dikontrol kembali. Perhitungan ini berlangsung seterusnya dan berulang-ulang.

4.8 Simulasi dan Analisis Hasil

Pada tahap ini dilakukan simulasi dengan menerapkan metode PID dan simulasi dengan menerapkan PID-*Ensemble Kalman Filter* pada estimasi gerak ASV 3 DOF. Terdapat dua skenario yang diterapkan yaitu:

1. ASV bergerak mengikuti lintasan $y = 0$ dengan posisi awal ASV berada pada lintasan (*on track*) dan kecepatan *surge* $u = 10$ m/s.

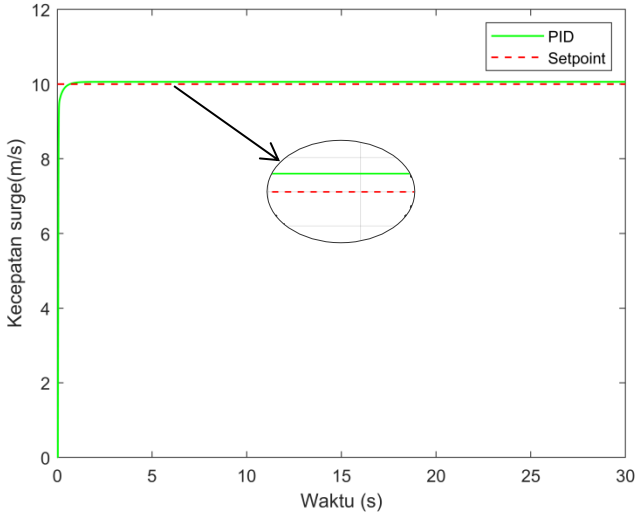
2. ASV bergerak disepanjang lintasan $y = 7$ dengan posisi awal ASV berada di luar lintasan (*off track*) dengan kecepatan *surge* $u = 5\ \mathrm{m/s}$.

4.8.1 Simulasi 1

Simulasi 1 ini bertujuan untuk mengendalikan agar ASV bergerak mengikuti lintasan $y = 0$ dengan posisi awal ASV berada pada lintasan (*on track*). Diberikan nilai awal simulasi yaitu $u = 0\ \mathrm{m/s}$, $v = 0\ \mathrm{m/s}$, $r = 0\ \mathrm{rad/s}$, $x = 0\ \mathrm{m}$, $y = 0\ \mathrm{m}$ dan $\psi = 0\ \mathrm{rad}$. Nilai perubahan waktu $\Delta t = 0.01$ dan diberikan nilai $T = 30$ detik sehingga terdapat $k = 3000$ langkah waktu. Diberikan setpoint kecepatan *surge* $u = 10\ \mathrm{m/s}$. Karena ASV bergerak lurus pada lintasannya maka sudut *yaw* referensi dan error posisi sama dengan 0. Selanjutnya ditentukan nilai proportional, Integral dan Derivative dilakukan secara trial dan error agar didapatkan respon sinyal yang stabil. Nilai PID disajikan pada tabel berikut:

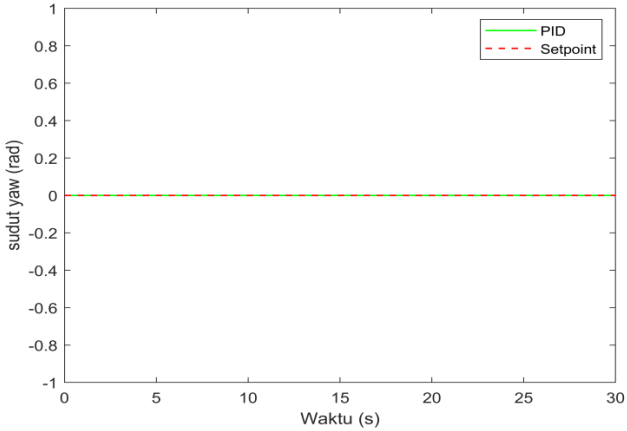
Tabel 4. 1 : **Nilai koefisien PID *on track***

	K_p	K_i	K_d
Surge	0,7	0	0



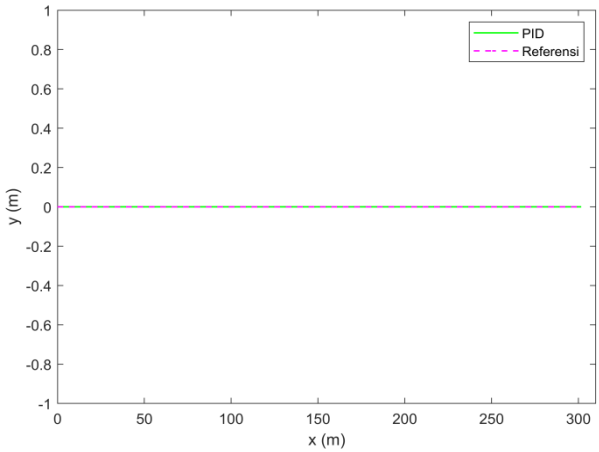
Gambar 4. 6 : Respon kecepatan *surge* kendali PID *on track*

Pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa respon kecepatan *surge* bergerak dari 0 m/s dan mencapai kestabilan pertama kali (*settling time*) pada waktu 0,33 detik dengan steady state error 0,621 % , overshoot 0% dan undershoot 0%. Berdasarkan hasil respon sistem setelah diberi kendali PID terlihat bahwa jalannya sistem sudah sesuai dengan desain kriteria yang telah ditetapkan sebelumnya.



Gambar 4. 7 : Respon sudut *yaw* kendali PID *on track*

Gambar 4.7 menunjukkan respon sudut *yaw*. Karena sudut *yaw* awal sama dengan sudut *yaw* referensi, maka respon sudut *yaw* dari kendali gerak lurus konstan pada $\psi = 0$ rad. Sehingga lintasan ASV yang dihasilkan yaitu:



Gambar 4. 8 : Lintasan ASV kendali PID *on track*

4.8.2 Simulasi 2

Dalam simulasi 2 ini, dilakukan simulasi untuk estimasi posisi ASV yang bergerak mengikuti lintasan $y = 0$ dengan posisi awal ASV berada pada lintasan (*on track*) menggunakan metode *Ensemble Kalman Filter* (EnKF). Mula-mula dilakukan pengendalian menggunakan metode PID pada model gerak ASV. Output kendali pada waktu k digunakan bersama output sistem untuk mendapatkan estimasi state pada waktu $k + 1$, selanjutnya estimasi state digunakan untuk mendapatkan sinyal error yang menjadi input kendali pada waktu $k + 1$. Perhitungan ini berlangsung seterusnya dan berulang-ulang hingga iterasi tertentu.

Diberikan nilai awal simulasi yaitu $u = 0\ \mathrm{m/s}$, $v = 0\ \mathrm{m/s}$, $r = 0\ \mathrm{rad/s}$, $x = 0\ \mathrm{m}$, $y = 0\ \mathrm{m}$ dan $\psi = 0\ \mathrm{rad}$. Nilai perubahan waktu $\Delta t = 0.01$ dan diberikan nilai $T = 30$ detik sehingga terdapat $k = 3000$ langkah waktu. Selanjutnya dibangkitkan sejumlah 50, 100 dan 300 ensemble. Dengan nilai kovarian error sistem $Q_k = 10^{-4}$ untuk variabel u, v, r, x, y dan ψ. Sedangkan untuk kovarian error pengukuran $R_k = 10^{-5}$. Variabel pengukuran merupakan posisi x, y dan ψ sehingga matriks diberikan matriks H yaitu:

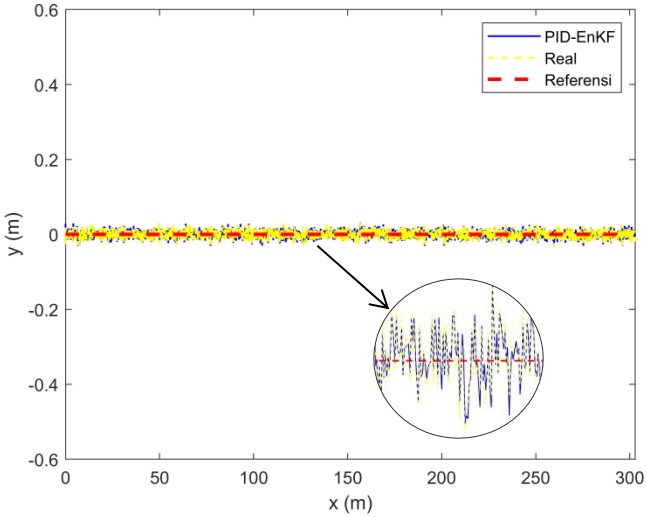
$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nilai rata-rata Root Mean Square Error (RMSE) setiap variabel state yang diukur dari membangkitkan 50, 100 dan 300 ensemble dengan sepuluh kali percobaan dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4. 2 : Perbandingan RMSE PID-EnKF *on track* dengan membangkitkan 50, 100 dan 300 ensemble

state	Ensemble		
	50	100	300
$\boldsymbol{x}$	0,0031699	0,0030844	0,0030558
$\boldsymbol{y}$	0,0031617	0,0030856	0,0030554
$\boldsymbol{\psi}$	0,0031664	0,0030865	0,0030548
Waktu simulasi	0,9897142	1,4868154	3,0955114

Pada Tabel 4.2 diatas perbandingan antara metode EnKF menunjukkan bahwa membangkitkan 300 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 50 dan 100 ensemble karena rata-rata RMSE terkecil berada pada pembangkitan 300 ensemble. Namun untuk waktu simulasi pada pembangkitan 300 ensemble lebih lama dari 50 dan 100. Rata-rata RMSE pada pembangkitan 50, 100 dan 300 ensemble memiliki selisih yang kecil, dengan rata-rata RMSE untuk 50 ensemble yaitu 0,0031660, 100 ensemble yaitu 0,0030855, dan 300 ensemble yaitu 0,0030553. Oleh karena itu, dalam simulasi ini dibangkitkan sejumlah 300 ensemble. Hasil simulasi untuk pembangkitan 300 ensemble tampak pada gambar sebagai berikut:



Gambar 4. 9 : Lintasan ASV PID-EnKF *on track* dengan membangkitkan 300 ensemble

Pada Gambar 4.9 warna merah pada grafik menunjukkan lintasan referensi, warna kuning menunjukkan nilai real sistem dan warna biru menunjukkan nilai estimasi PID-EnKF. Pada simulasi terlihat bahwa lintasan hasil estimasi PID-EnkF berada di sekitaran garis referensi $y = 0$. Didapat nilai rata-rata Root Mean Square Error (RMSE) untuk posisi x adalah 0,0030558 dan untuk posisi y adalah 0,0030554.

4.8.3 Simulasi 3

Simulasi 3 bertujuan untuk mengendalikan agar ASV bergerak mengikuti lintasan $y = 7$ dengan posisi awal ASV berada di luar lintasan (*off track*). Diberikan nilai awal simulasi yaitu $u = 0$ m/s, $v = 0$ m/s, $r = 0$ rad/s, $x = 0$ m, $y = 3$ m dan $\psi = 5° \approx 0{,}0873$ rad. Nilai perubahan waktu

$\Delta t = 0.01$ dan diberikan nilai $T = 30$ detik sehingga terdapat $k = 3000$ langkah waktu.

Mula-mula kecepatan ASV (kecepatan *surge* (u)) akan ditambah hingga mencapai kecepatan konstan $5\,\mathrm{m/s}$, selanjutkan ASV akan diarahkan agar mengikuti garis referensi. Garis referensi yang digunakan adalah garis lurus dengan persamaan $ax + by + c = 0$ yang dinyatakan berdasarkan sumbu bumi. Ditentukan garis referensi adalah $y = 7$ sehingga nilai $a = 0$, $b = 1$ dan $c = -7$. Jarak dari posisi ASV saat ini (x_0, y_0) dengan garis referensi disebut error posisi dan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$d = \frac{ax_0 + by_0 + c}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

Sehingga didapat persamaan error posisi yaitu:

$$d = y_0 - 7$$

Kemudian sudut *yaw* referensi dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\psi^* = \tan^{-1}\left(-\frac{a}{b}\right) = 0° = 0\,\mathrm{rad}$$

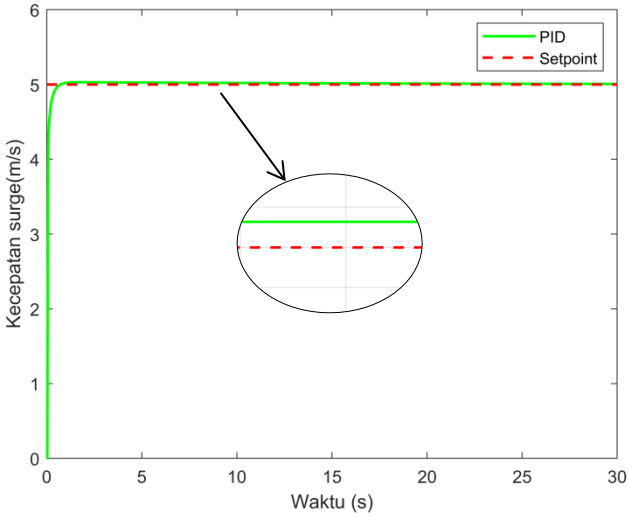
Agar ASV dapat bergerak mengikuti garis referensi dibutuhkan dua pengendali, yaitu untuk meminimalkan jarak dari posisi ASV saat ini dengan garis referensi (error posisi) dan untuk mengarahkan sudut *yaw* kendaraan ASV agar menuju sudut *yaw* referensi.

Selanjutnya dilakukan penentuan nilai *proportional*, *Integral* dan *Derivative* yang dilakukan secara *trial* dan *error* agar didapatkan respon sinyal yang stabil. Nilai PID disajikan pada tabel berikut:

Tabel 4. 3 : Nilai koefisien PID *off track*

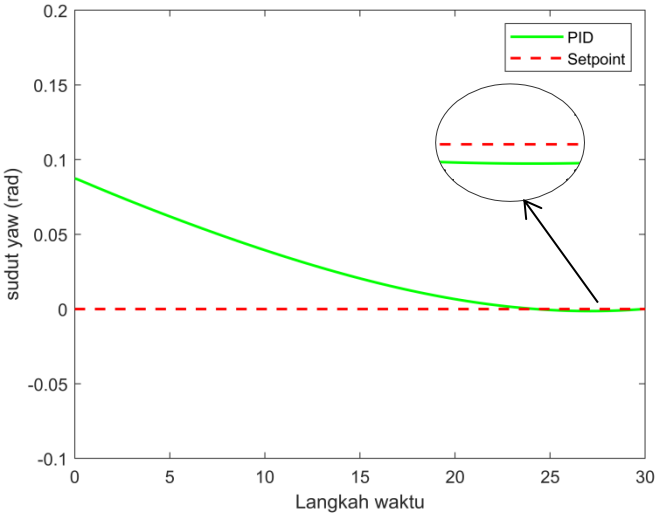
	K_p	K_i	K_d
Kecepatan *surge*	20	0,5	0
Sudut *yaw*	-1,2175	0,06	0
Error posisi	0,0215	0,0009	0

Berikut merupakan respon yang dihasilkan setelah dilakukan pengendalian.

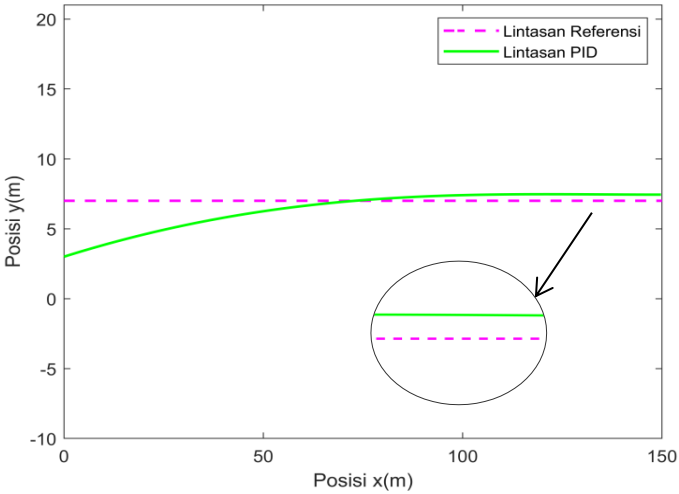


Gambar 4. 10 : Respon kecepatan *surge* kendali PID *off track*

Pada Gambar 4.10 menunjukkan bahwa respon kecepatan *surge* mencapai kestabilan pertama kali (*settling time*) pada waktu 0,406988 detik dengan *steady state error* 0,154 %, *overshoot* 0,4523% dan *undershoot* 0%. Berdasarkan hasil respon sistem setelah diberi kendali PID terlihat bahwa jalannya sistem sudah sesuai dengan desain kriteria yang telah ditetapkan sebelumnya.



Gambar 4. 11: Respon sudut *yaw* kendali PID *off track*



Gambar 4. 12 : Lintasan ASV Kendali PID *off track*

Gambar 4.11 menunjukkan respon sudut *yaw*. Terlihat bahwa sudut *yaw* ASV telah menuju ke sudut *yaw* referensi pada waktu 22,675 detik dengan error sebesar $9{,}3561 \times 10^{-3}$ %. Sedangkan Gambar 4.12 menunjukkan lintasan ASV. Terlihat bahwa setelah dikendalikan ASV bergerak mengikuti lintasan referensi yang diberikan. Namun masih terdapat selisih antara lintasan ASV dengan lintasan referensi. Selisih tersebut menghasilkan error sebesar 6,28 %. Berdasarkan hasil respon sistem setelah diberi kendali PID terlihat bahwa jalannya sistem sudah sesuai dengan desain kriteria yang telah ditetapkan sebelumnya.

4.8.4 Simulasi 4

Dalam simulasi 4 dilakukan simulasi untuk estimasi posisi ASV yang bergerak mengikuti lintasan $y = 7$ dengan posisi awal ASV berada di luar lintasan (*off track*) menggunakan metode *Ensemble Kalman Filter* (EnKF). Simulasi ini menggunakan cara yang sama seperti pada Simulasi 2.

Diberikan nilai awal simulasi yaitu $u = 0\ \mathrm{m/s}$, $v = 0\ \mathrm{m/s}$, $r = 0\ \mathrm{rad/s}$, $x = 0\ \mathrm{m}$, $y = 3\ \mathrm{m}$ dan $\psi = 5° \approx 0{,}0873$ rad. Nilai perubahan waktu $\Delta t = 0.01$ dan diberikan nilai $T = 30$ detik sehingga terdapat $k = 3000$ langkah waktu. Dalam simulasi dibangkitkan sejumlah 50, 100 dan 300 ensemble. Dengan nilai kovarian error sistem $Q_k = 10^{-4}$ untuk variabel u, v, r, x, y dan ψ. Sedangkan untuk kovarian error pengukuran $R_k = 10^{-5}$. Variabel pengukuran merupakan respon posisi x, y dan ψ sehingga matriks diberikan matriks H yaitu:

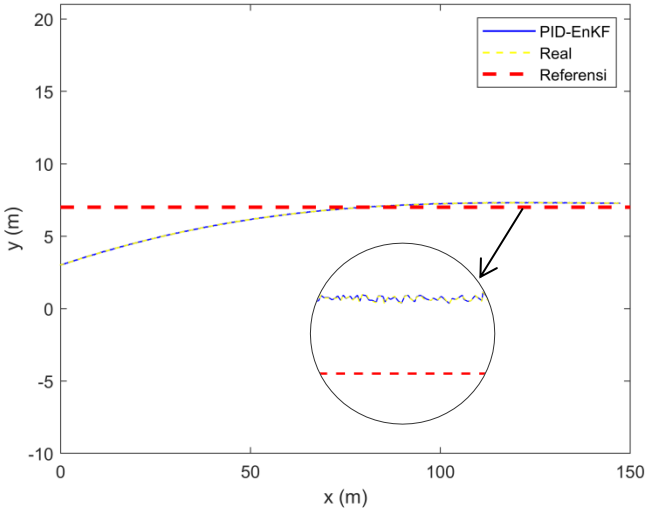
$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nilai rata-rata Root Mean Square Error (RMSE) setiap variabel state yang diukur dari membangkitkan 50, 100 dan 300 ensemble dengan sepuluh kali percobaan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. 4 : Perbandingan RMSE PID-EnKF *off track* dengan membangkitkan 50, 100 dan 30 ensemble

state	**Ensemble**		
	50	**100**	**300**
$\boldsymbol{x}$	0,0046441	0,0033811	0,0031817
$\boldsymbol{y}$	0,0046403	0,0033838	0,0031831
$\boldsymbol{\psi}$	0,0046465	0,0033820	0,0031828
Waktu simulasi	1,7928884	2,4462274	4,4919819

Pada Tabel 4.4 diatas perbandingan antara metode EnKF menunjukkan bahwa membangkitkan 300 ensemble lebih akurat daripada membangkitkan 50 dan 100 ensemble karena rata-rata RMSE terkecil berada pada pembangkitan 300 ensemble. Rata-rata RMSE antara 50, 100 dan 300 ensemble memiliki selisih yang kecil, dengan rata-rata RMSE untuk 50 ensemble yaitu 0,0046436, 100 ensemble yaitu 0,0033823, dan 300 ensemble yaitu 0,0031825. Karena membangkitkan 300 ensemble lebih akurat maka dalam simulasi ini dibangkitkan sejumlah 300 ensemble. Hasil simulasi tampak pada gambar sebagai berikut:



Gambar 4. 13 : Lintasan ASV PID-EnKF *off track* dengan membangkitkan 300 ensemble

Pada Gambar 4.13 warna merah pada grafik menunjukkan lintasan referensi, warna kuning menunjukkan nilai real sistem dan warna biru menunjukkan nilai estimasi PID-EnKF. Pada simulasi ini terlihat bahwa ASV semula berada di luar lintasan, kemudian bergerak menuju lintasan $y = 7$ dan bergerak konstan di sekitarannya. Didapat nilai rata-rata Root Mean Square Error (RMSE) untuk posisi x adalah 0,0031817 dan untuk posisi y adalah 0,0031831.

BAB V
PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari penulisan tugas akhir dan saran yang dapat digunakan untuk pengembangan penelitian – penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan topik yang sama.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan uraian analisis dan pembahasan yang telah dipaparkan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Metode pengendalian *Proportional-Integral-Derivative* (PID) dapat diterapkan dalam model *nonlinier* ASV 3DOF dan diperoleh hasil bahwa metode PID dapat mengendalikan kecepatan *surge*, sudut *yaw* dan posisi ASV dengan baik di kedua skenario keadaan dengan performa yang telah memenuhi desain kriteria.
2. Estimasi posisi ASV menggunakan metode *Ensemble Kalman Filter* dengan membangkitkan 300 ensemble, memiliki akurasi yang lebih baik daripada membangkitkan 50 dan 100 ensemble di kedua skenario keadaan. Pada skenario pertama, menghasilkan nilai rata-rata RMSE untuk posisi x sebesar 0,0030558 dan posisi y sebesar 0,0030554. Sedangkan pada skenario kedua memiliki nilai rata-rata RMSE untuk posisi x sebesar 0,0031817 dan posisi y sebesar 0,0031831.

5.2 Saran

Adapun saran dari penulis yang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya yaitu:

1. Menggunakan metode tuning untuk menentukan nilai gain pada pengendalian PID MIMO (*multi input multi output*) agar memperoleh hasil yang optimal.
2. Menggunakan metode pengendalian dan estimasi lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Badan Pusat Statistik, 2018, Statistik Sumber Daya Laut dan Pesisir, Halaman 3.

[2] its.ac.id. (2020, 29 September). ITS Luncurkan i-BOAT, Kapal Canggih Tanpa Awak. Diakses pada 20 November 2020, dari https://www.its.ac.id/news/2020/09/ 29/its-luncurkan-i-boat-kapal-canggih-tanpa-awak/

[3] Saputra, F. R., & Rivai, M. (2018). Autonomous surface vehicle sebagai alat pemantau lingkungan menggunakan metode navigasi waypoint. *Jurnal Teknik ITS*, *7*(1), A76-A81.

[4] Winggari, Iratdya (2018) Kendali Sudut Haluan Kapal untuk Pelacakan Lintasan Dubins dengan Halangan Statis menggunakan Model Predictive Control. Tugas Akhir Departemen Matematika. ITS. Surabaya.

[5] Fahmy, R. A., Badr, R. I., & Rahman, F. A. (2014). Adaptive PID controller using RLS for SISO stable and unstable systems. *Advances in Power Electronics.*

[6] Nurhadi, H., Apriliani, E., Herlambang, T., & Adzkiya, D. (2020). Sliding mode control design for autonomous surface vehicle motion under the influence of environmental factor. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, *10*(5), 4789.

[7] Sholikhah, S. A., & Subchan, S. (2012). Penerapan Model Predictive Control (MPC) pada Kapal Autopilot dengan Lintasan Tertentu. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, *1*(1), A45-A50.

[8] Faruchi, A., Aisyah, A. S., & Masroeri, A. A. (2013). Perancangan sistem kontrol berbasis logika fuzzy pada

kapal niaga untuk menghindari benda asing di perairan tanjung perak. Jurnal Teknik Fisika ITS, pp. 1–10.

[9] Dwi, Nurdia. (2019). Perbandingan Metode SMC dan PID pada Rancangan Sistem Kontrol Gerak Autonomous Surface Vehicle (ASV) Terhadap Pengaruh Faktor Lingkungan. Tugas Akhir Departemen Matematika. ITS. Surabaya.

[10] Herlambang, T. (2016). *Desain dan analisa sistem gerak autonomous underwater vehicle* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).

[11] Puspitasari, Novita. (2018). Perbandingan Metode *Unscented Kalman Filter* dan *Ensemble Kalman Filter* untuk Estimasi Lintasan Autonomous Surface Vehicle (ASV) di bawah Pengaruh Faktor Lingkungan. Tugas Akhir Departemen Matematika. ITS. Surabaya.

[12] Ayu, Lingga. (2019). Perbandingan Metode *Ensemble Kalman Filter* (EnKF) dan *Unscented Kalman Filter* (UKF) pada Tracking Lintasan Robot Mobil. Tugas Akhir Departemen Matematika. ITS. Surabaya.

[13] Sonnenburg, C. R., & Woolsey, C. A. (2013). Modeling, identification, and control of an unmanned surface vehicle. *Journal of Field Robotics*, *30*(3), 371-398.

[14] Nurhadi, H., Herlambang, T., & Adzkiya, D. (2019, December). Position estimation of Touristant ASV using ensemble Kalman filter. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2187, No. 1, p. 060006). AIP Publishing LLC.

[15] Pratomo, M. S. (2018). Rancang Bangun Sistem Stabilizer Rolling Kapal Penumpang Menggunakan Fin

Stabilizer Dengan Kontroller PID. *Jurnal Mahasiswa TEUB*, *6*(7).

[16] Fossen, T.I.(1994). Guidance and Control of Ocean Vehicles. Hoboken :Wiley.

[17] Subiono. 2016. Sistem Linear dan Kontrol Optimal. ITS Surabaya.

[18] Fossen,T.I.,(2011), Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, JohnWileyandSons.

[19] Wardhana, D. W., Wahyudi, A., & Nurhadi, H. (2016). Perancangan Sistem Kontrol PID Untuk Pengendali Sumbu Azimuth Turret Pada Turret-Gun Kaliber 20mm. *Jurnal Teknik ITS*, *5*(2), A512-A516.

[20] Causon, D. M., & Mingham, C. G. (2010). *Introductory finite difference methods for PDEs*. Bookboon.

[21] Ali, M. (2004). Pembelajaran Perancangan sistem kontrol PID dengan software MATLAB. *Jurnal Edukasi@ Elektro*, *1*(1), 1-8.

[22] Putra, F. P., Apriliani, E., & Handoko, E. Y. (2019, July). Estimation The Height of Tsunami Waves in The Southern Island of Java Using Ensemble Kalman Filter Method. In *2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)* (pp. 477-482). IEEE.

BIODATA PENULIS

Penulis bernama lengkap Rahmarani Puspita Dewi dengan nama penggilan Rani. Lahir di Kuningan, 15 September 1999 dan tinggal di Malang. Jenjang pendidikan formal yang ditempuh yaitu SDN 1 Gondang Wetan (2005-2011), SMPN 11 Malang (2011-2014), SMAN 1 Malang (2014-2017). Pada tahun 2017 penulis diterima di Departemen Matematika Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui jalur seleksi SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa di Departemen Matematika ITS penulis aktif sebagai Staff Departemen Applied Science HIMATIKA ITS 2018/2019, kemudian dilanjutkan menjabat sebagai Sekretaris Departemen Science HIMATIKA ITS 2019/2020. Selain itu, penulis juga aktif di Unit Kegiatan Tari dan Karawitan (UKTK ITS) sebagai Staff Departemen Internal 2017/2018, kemudian dilanjutkan menjabat sebagai Ketua Divisi Karawitan UKTK ITS 2018/2019.

Apabila ingin memberikan kritik, saran dan berdiskusi lanjut mengenai Buku Tugas Akhir ini, dapat menghubungi email **rahmaranipd@gmail.com**. Semoga Bermanfaat.