



TUGAS AKHIR - KM184801

ESTIMASI MODEL KAPAL PERANG KORVET KELAS SIGMA MENGGUNAKAN METODE (KF-UMV-UI)

**AGRETTA ERTIFARI HERMAWAN
0611154000030**

Dosen Pembimbing
Subchan, Ph. D
Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si

Departemen Matematika
Fakultas Matematika, Komputasi, dan Sains Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



TUGAS AKHIR - KM184801

**ESTIMASI MODEL KAPAL PERANG KORVET KELAS
SIGMA MENGGUNAKAN METODE KF-UMV-UI**

AGRETTA ERTIFARI HERMAWAN
NRP. 06111540000030

Dosen Pembimbing:
Subchan, Ph.D
Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si

DEPARTEMEN MATEMATIKA
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



FINAL PROJECT - KM184801

**ESTIMATION OF CORVETTE SIGMA MODEL USING
KF-UMV-UI METHOD**

AGRETTA ERTIFARI HERMAWAN
NRP. 0611154000030

Supervisors:
Subchan, Ph.D
Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si

DEPARTMENT OF MATHEMATICS
Faculty of Science and Data Analytics
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

LEMBAR PENGESAHAN

**ESTIMASI MODEL KAPAL PERANG KORVET KELAS SIGMA
MENGUNAKAN METODE KF-UMV-UI**

**ESTIMATION OF CORVETTE SIGMA MODEL USING KF-UMV-UI
METHOD**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
Untuk memperoleh gelar Sarjana Matematika.
Pada bidang studi Matematika Terapan
Program Studi S1 Departemen Matematika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

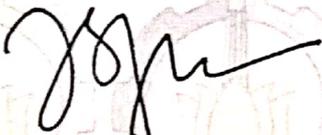
Oleh:

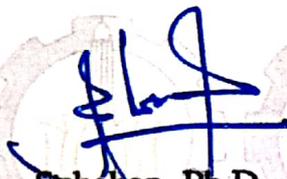
**AGRETTA ERTIFARI HERMAWAN
NRP. 06111540000030**

Menyetujui,

Dosen Pembimbing II,

Dosen Pembimbing I,

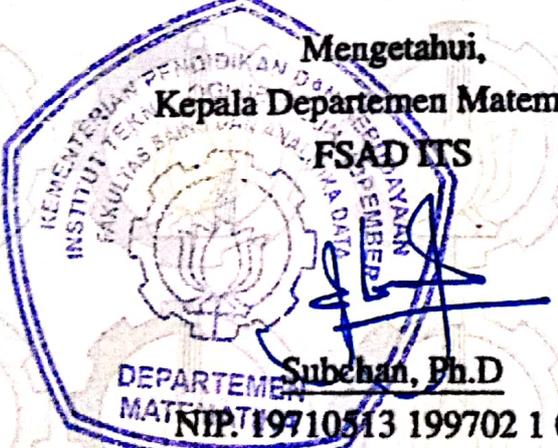

Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si
NIP. 19870728 201404 2 001


Subchan, Ph.D
NIP. 19710513 199702 1 001

Mengetahui,

Kepala Departemen Matematika

FSAD ITS


Subchan, Ph.D
NIP. 19710513 199702 1 001

Surabaya, 14 Januari 2020

**ESTIMASI MODEL KAPAL PERANG KORVET KELAS SIGMA
MENGUNAKAN METODE KF-UMV-UI**

Nama : Agretta Ertifari Hermawan
NRP : 0611154000030
Departemen : Matematika FSAD ITS
Dosen Pembimbing : 1. Subchan, Ph.D
2. Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si

Abstrak

Indonesia disebut dengan Negara Maritim (kepulauan) telah mendapatkan predikat sebagai salah satu Negara dengan kepulauan terbesar didunia. Dengan kondisi geografi tersebut, pertahanan Indonesia menjadi salah satu yang penting dalam usaha mempertahankan kedaulatan, keutuhan, dan keselamatan wilayah NKRI dari ancaman dan gangguan dari luar. Untuk pertahanan negara dalam wilayah laut, kapal perang bisa menjadi salah satu solusi yang tepat. Kapal Perang Korvet Kelas SIGMA merupakan salah satu kapal perang yang dimiliki oleh Indonesia. Pada tugas akhir ini dilakukan estimasi terhadap keadaan dan unknown input yang berbentuk deterministik atau tidak dipengaruhi dengan variabel acak. Metode *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input* (KF-UMV-UI) digunakan untuk mendapatkan solusi estimasi *state* dan *unknown input* dengan sistem waktu diskrit linear, dengan *unknown input* didefinisikan berada pada sistem tetapi nilai tidak diketahui dan tidak dapat diukur. Hasil simulasi dari penerapan algoritma KF-UMV-UI pada model dinamika Kapal Perang Korvet Kelas SIGMA 2 *Degree of Freedom* (DOF) bahwa nilai RMSE estimasi sudut *yaw* dan *unknown input* relatif kecil.

Kata Kunci : Kapal Perang Korvet Kelas SIGMA, *Unknown Input*, KF-UMV-UI, Pertahanan Negara

**ESTIMATION OF CORVETTE SIGMA MODEL USING KF-UMV-UI
METHOD**

Name : Agretta Ertifari Hermawan
NRP : 0611154000030
Department : Mathematics FSDA ITS
Supervisors : 1. Subchan, Ph.D
2. Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si

Abstract

Indonesia is called the Maritime State (archipelago) has been awarded as one of the countries with the largest islands in the world. With these geographical conditions, Indonesia's defense becomes one of the important ones in maintaining the sovereignty, integrity and safety of the Unitary Republic of Indonesia from threats and interference from outside. For national defense in the sea area, warships can be one right solution. Corvette Class SIGMA is one of the warships owned by Indonesia. In this final project, an estimation of the conditions and unknown inputs that are deterministic or not influenced by random variables is done. Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input (KF-UMV-UI) method is used to obtain a state and unknown input estimation solution with a linear discrete time system, with unknown input defined in the system but unknown and unknown values can be measured. The simulation results from the application of the KF-UMV-UI algorithm in the Corvette Class SIGMA 2 Degree of Freedom (DOF) dynamics model that the estimated RMSE values of yaw angles and unknown inputs are relatively small.

Keywords : *Corvet SIGMA, Unknown Input, KF-UMV-UI
National Defense*

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur bagi Allah SWT Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat, dan karunianya-NYA, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul:

ESTIMASI MODEL KAPAL PERANG KORVET KELAS SIGMA MENGUNAKAN METODE KF-UMV-UI

sebagai salah satu syarat kelulusan Program Sarjana Departemen Matematika FSAD Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak. Oleh sebab itu, tak lupa penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Sasongko, SH dan Sri Suyati, serta adik penulis, Pralampito Luhung, atas doa, inspirasi, dukungan, dan bimbingannya selama ini.
2. Bapak Subchan, Ph.D, selaku kepala Departemen Matematika FSAD ITS dan dosen pembimbing I yang telah memberikan motivasi dan dukungan kepada penulis.
3. Ibu Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si selaku dosen pembimbing II, atas bimbingan, saran, kritik, motivasi, dan ilmu yang diberikan selama proses pengerjaan Tugas Akhir.
4. Bapak Drs. Soetrisno, MI.Komp, dan Ibu Dr. Rinurwati, M.Si, selaku dosen penguji seminar proposal yang sudah memberikan masukan yang membangun.
5. Bapak Dr. Chairul Imron dan Ibu Soleha, S.Si, M.Si selaku dosen penguji seminar hasil dan sidang akhir yang sudah memberikan masukan yang membangun dan pengetahuan baru untuk penulis.

6. Ibu Dra. Farida Agustini Widjajati, MS dan Prof. Dr. Subiono, M.S sebagai dosen wali yang sudah memberikan arahan selama kegiatan perkuliahan di ITS.
7. Bapak Ibu dosen serta seluruh staf Tenaga Kependidikan Departemen Matematika Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
8. Wahyu Wismadya Rahadian dan keluarga, yang selalu memberikan doa dan dukungan yang dicurahkan kepada penulis.
9. Para sahabat penulis Dasilva, Rofiqoh, Alivia, Icha, Dewi, Arifah, Sima, Arum, Adisty, Dela, Ira dan Firda yang selalu menjadi tempat penulis untuk berkeluh kesah.
10. Nurdia, Zuhari dan Sovia yang selalu membantu dan menjadi pembimbing penulis dalam menyusun tugas akhir.
11. Kabinet Satu Aksi dan Departemen External Affair Himatika ITS 2017/2018 yang sudah memberikan pengalaman yang tak terlupakan oleh penulis.
12. Konseptor GERIGI ITS 2017 dan Divisi Materi dan Metode GERIGI ITS 2017 yang selalu memberikan hiburan kepada penulis.
13. Teman-teman mahasiswa Matematika ITS khususnya DOHMAIn yang telah memberikan masa berkesan selama penulis menjadi bagian dari mereka.
14. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu-persatu, yang telah memberikan saran, dukungan dan motivasi dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sangat dalam, atas doa dan semangat yang diberikan kepada penulis.

Penulis juga mengharapkan kritik dan saran dari berbagai pihak untuk perbaikan isi Tugas Akhir ini. Segala kritik dan saran

akan penulis terima dengan senang hati. Dan penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, 14 Januari 2019

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
KATA PENGANTAR	x
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR SIMBOL	xx
1 BAB I	
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
2 BAB II	
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Model Matematika Dinamika Kapal	6
2.3 Kalman Filter	15

2.4	Kalman Filter Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input (KF-UMV-UI)	17
3	BAB III	
	METODE PENELITIAN	21
4	BAB IV	
	ANALISIS DAN PEMBAHASAN	25
4.1	Model Dinamika Gerak Kapal	25
4.2	Diskritisasi Model Dinamika Kapal	29
4.3	Estimasi <i>State</i> dan <i>Unknown Input</i> pada Model Dinamika Kapal dengan KF-UMV-UI	30
	4.3.1 Model Sistem	30
	4.3.2 Model Pengukuran	31
4.4	Aplikasi Metode KF-UMV-UI pada Model Dinamika Gerak Kapal	32
	4.4.1 Tahap Inisialisasi	32
	4.4.2 Tahap Prediksi	33
	4.4.3 Tahap Koreksi	33
4.5	Simulasi Numerik	34
5	BAB V	
	PENUTUP	45
5.1	Kesimpulan	45
5.2	Saran	46
	DAFTAR PUSTAKA	47
	LAMPIRAN	L-1

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Gerak Dinamika Kapal	8
3.1 Jadwal Kegiatan	22
3.2 Diagram Alir Penelitian	23
4.1 Estimasi Sudut <i>Yaw</i>	35
4.2 Estimasi <i>Unknown Input</i>	35
4.3 Estimasi Sudut <i>Yaw</i>	37
4.4 Estimasi <i>Unknown Input</i>	37
4.5 Estimasi Sudut <i>Yaw</i>	39
4.6 Estimasi <i>Unknown Input</i>	39
4.7 Estimasi Sudut <i>Yaw</i>	41
4.8 Estimasi <i>Unknown Input</i>	42
4.9 Estimasi Sudut <i>Yaw</i>	43
4.10 Estimasi <i>Unknown Input</i>	44

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1	Tabel Gaya Dinamika Kapal 7
2.2	Tabel Momen Dinamika Kapal 7
2.3	Variabel Normalisasi Sistem Primer I 13
2.4	Tahapan dalam Kalman Filter 19
2.5	Tahapan dalam KF-UMV-UI 20
4.1	Data Parameter KRI Korvet Kelas Sigma 25
4.2	Koefisien Hidrodinamika Kapal 26
4.3	Nilai awal variabel yang akan diamati 32
4.4	Nilai RMSE Simulasi Numerik I 36
4.5	Nilai RMSE Simulasi Numerik II 38
4.6	Nilai RMSE Simulasi Numerik III 40
4.7	Nilai RMSE Simulasi Numerik I 41
4.8	Nilai RMSE Simulasi Numerik I 43
4.9	Nilai RMSE Simulasi I-Simulasi V 44

DAFTAR SIMBOL

\dot{x}	Persamaan ruang keadaan
M	Matriks Inersia Kapal
N	Matriks Keadaan
x	Matriks Keadaan
δ	Sudut <i>rudder</i>
L	Panjang Kapal
B	Lebar Kapal
T	Tinggi Kapal
m	Massa Kapal
U	Kecepatan
C_B	Koefisien Blok
x_G	Posisi x Pusat Gravitasi
ρ	Massa Jenis Air
$Y_{\dot{v}}$	Turunan gaya <i>sway</i> terhadap \dot{v}
$Y_{\dot{r}}$	Turunan gaya <i>yaw</i> terhadap \dot{r}
$N_{\dot{v}}$	Turunan momen <i>sway</i> terhadap \dot{v}
$N_{\dot{r}}$	Turunan momen <i>yaw</i> terhadap \dot{r}
Y_v	Turunan gaya <i>sway</i> terhadap v
Y_r	Turunan gaya <i>yaw</i> terhadap r
N_v	Turunan momen <i>sway</i> terhadap v
N_r	Turunan momen <i>yaw</i> terhadap r

BAB I

PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan ini, dijelaskan latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan manfaat penulisan dari Tugas Akhir.

1.1 Latar Belakang Masalah

Suatu bangsa harus mempunyai ketahanan negara yaitu kekuatan, kemampuan, daya tahan dan keuletan agar dapat mencapai tujuan negara. Ketahanan Negara dipengaruhi dua aspek, yaitu aspek alamiah dan aspek kemasyarakatan. Aspek alamiah meliputi letak geografis Negara, keadaan dan kekayaan alam, dan keadaan dan kemampuan penduduk. Sedangkan aspek kemasyarakatan meliputi ideologi, politik, ekonomi, sosial budaya dan pertahanan dan keamanan (militer) [4].

Indonesia disebut dengan Negara Maritim (kepulauan) telah mendapatkan predikat sebagai salah satu Negara dengan kepulauan terbesar didunia. Karena Indonesia memiliki 17.504 pulau dengan luas wilayah total 1.904.569 km^2 . Indonesia mempunyai 5 pulau besar yaitu Sumatra, Jawa, Kalimantan, Sulawesi dan Irian Jaya. Dari kondisi tersebut dapat dilihat bahwa letak pulau-pulau tersebar dari Sabang hingga Merauke dipisahkan oleh lautan [5].

Dengan kondisi geografi tersebut, pertahanan Indonesia menjadi salah satu yang penting dalam usaha mempertahankan kedaulatan, keutuhan, dan keselamatan wilayah NKRI dari ancaman dan gangguan dari luar. Untuk pertahanan negara dalam wilayah laut, kapal perang bisa menjadi salah satu solusi yang tepat. Tujuan dari kapal perang adalah menegaskan posisi perairan suatu pemerintahan dan memberikan jaminan keamanan perairan untuk melindungi negara. Kapal Perang Korvet Kelas SIGMA merupakan salah satu kapal perang yang dimiliki oleh Indonesia.

Kapal Perang Korvet Kelas SIGMA membutuhkan pemodelan matematika pada pengoperasiannya. Karena pemodelan matem-

atika salah satu hal yang mempunyai peran penting dalam melakukan prediksi perilaku gerak kapal [6]. Pemodelan matematika pada kapal ini diperoleh berdasarkan hasil uji. Pada saat pengujian, ditemukan gangguan yang tidak dapat diketahui atau biasa disebut dengan *Unknown Input*.

Pada penelitian ini akan dibahas estimasi *unknown input* pada Kapal Perang Korvet Kelas SIGMA. Metode yang digunakan pada estimasi ini merupakan salah satu metode pengembangan dari *Extended Kalman Filter*, yaitu *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input* (KF-UMV-UI). Metode ini digunakan untuk mendapatkan solusi estimasi terhadap keadaan dan *unknown input* yang berada pada sistem linear. *Unknown input* dalam tugas akhir ini berada pada sistem tetapi nilai tidak diketahui dan tidak dapat diukur. Harapan dari penelitian ini dengan metode yang digunakan mampu mengestimasi *unknown input* dengan baik sehingga tidak mempengaruhi hasil dari *outputnya*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah yang dibahas dalam Tugas Akhir ini sebagai berikut.

1. Bagaimana penerapan algoritma *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input* (KF-UMV-UI) pada model dinamika Kapal Perang Korvet Kelas SIGMA ?
2. Bagaimana hasil simulasi dari penerapan algoritma *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input* (KF-UMV-UI) pada model dinamika Kapal Perang Korvet Kelas SIGMA dengan *software* MATLAB?

1.3 Batasan Masalah

Untuk mengerucutkan masalah pada Tugas Akhir ini, digunakan beberapa batasan masalah. Batasan masalah yang digunakan

pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Model Matematika dinamika kapal berbentuk sistem linear dengan mempertimbangkan *two-degree of freedom* (2DOF)
2. *Unknown Input* masuk kedalam sistem, namun tidak diketahui dan tidak dapat diukur.
3. *Software* yang digunakan untuk simulasi adalah MATLAB

1.4 Tujuan

Adapun tujuan pada Tugas Akhir adalah sebagai berikut.

1. Untuk menerapkan metode *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input* (KF-UMV-UI) pada model dinamika Kapal Perang Korvet Kelas SIGMA.
2. Untuk menganalisa hasil simulasi dari *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input* (KF-UMV-UI) pada model dinamika Kapal Perang Korvet Kelas SIGMA.

1.5 Manfaat

Adapun tujuan pada Tugas Akhir adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini memberikan wawasan tentang perkembangan model dinamika Kapal Perang Korvet Kelas SIGMA dengan menggunakan metode *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input* (KF-UMV-UI).
2. Hasil simulasi dapat dijadikan referensi untuk diimplementasikan pada sistem model dinamika Kapal Perang Korvet Kelas SIGMA.
3. Sebagai penunjang pertahanan negara.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam Tugas Akhir ini penulis menggunakan beberapa penelitian terdahulu yang sesuai dengan topik yang diambil. Salah satunya adalah penelitian dari jurnal yang ditulis oleh Zongsheng Zheng dengan judul *Unscented Kalman Filter-based Unbiased Minimum-Variance Estimation for Nonlinear Systems with Unknown Inputs* (2019). Jurnal ini membahas tentang metode *Unbiased Minimum-Variance Estimation* (UMV) berbasis *Kalman Filter* (UKF) untuk sistem non-linear dengan *unknown input*. Dengan memanfaatkan linearisasi statistik, sistem non-linear dan fungsi koreksi diubah menjadi bentuk regresi 'linear-like'. Bentuk regresi 'linear-like' memungkinkan kita menggunakan kerangka estimasi keadaan UMV untuk pengembangan *filtering* non-linear baru guna menangani *unknown input*. Untuk *unknown input* dapat menggunakan *weighted least-square*. Dilakukan dua pendekatan dalam penelitian ini, penulis memperoleh filter dengan meminimalkan *error* dari matriks kovarian keadaan. Hasil dari penelitian ini bahwa UKF tidak dapat menangani masalah estimasi keadaan *unknown input* karena sangat kuat hasil estimasi biasanya. Untuk UKF-UI dan UKF-UMV mampu mengestimasi *unknown input* meskipun sistem non-linear. Namun pada UKF-UI *error* yang dihasilkan lebih besar dari UKF-UMV. Karena hasil MSE dari UKF-UMV yang paling rendah. [7]

Pada tahun 2010 Shuwen Pan, Hongye Su, Hong Wang dan Jian Chu melakukan penelitian mengenai *the study of joint input and state estimation with kalman filtering*. Jurnal ini membahas permasalahan *input* bersama dan estimasi keadaan untuk sistem stokastik waktu diskrit dengan umpan balik langsung dari *unknown input* ke *output* nya. Pendekatan *Kalman Filter unknown input* diturunkan dengan metode estimasi *weighted least-squares*. Hasil simulasi dari penelitian menunjukkan efektivitas dan optimalitas

pendekatan *Kalman Filter* dengan *unknown input*. Pendekatan KF-UI yang diusulkan dapat melacak vektor keadaan x_k dan *unknown input* d_k dengan baik, kendalian estimasi keadaan $\hat{x}_{k|k}$ dan *unknown input* $\hat{d}_{k|k}$ mendekati nilai nyata dengan cepat meskipun nilai awal yang tidak akurat. [8]

Pada tahun 2017 Tahiyatul Asfihani, Subchan, Dieky Adzkiya, dkk melakukan penelitian mengenai Estimation of The Corvette SIGMA Motion in Missile Firing Mission. Artikel ini membahas tentang estimasi gerak kapal perang ketika menembakkan rudal untuk mencapai target yang bergerak. Dengan menggunakan pengembangan metode dari Extended Kalman Filter, yaitu Extended Kalman Filter-Unknown Input-Without Direct Feedthrough (EKF-UI-WDF). Metode ini bekerja secara bersamaan mengestimasi keadaan dan unknown input. Penelitian ini menggunakan Kapal Perang Korvet SIGMA dengan unknown input percepatan target yang didefinisikan. Hasil dari simulasi memperlihatkan kinerja dari metode EKF-UI-WDF untuk gerak kapal pada saat menembakkan rudal. Hasil numerik estimasi errornya sangat kecil, yaitu kurang dari 10^{-8} . [12]

2.2 Model Matematika Dinamika Kapal

Gerakan yang dialami kapal ketika beroperasi dilautan dikenal dengan *six-degree of freedom* (6 derajat kebebasan), yaitu : *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw*. Dari keenam gerakan derajat kebebasan diklasifikasi menjadi dua gerak, yaitu gerak translasi dan gerak rotasi. Untuk gerak translasi terdiri dari *surge* (maju/mundur), *sway* (kanan/kiri), dan *heave* (atas/bawah). Untuk gerak rotasi terdiri dari *roll* (berputar), *pitch* (mengangguk) dan *yaw* (menggeleng). Keenam komponen gerak tersebut dijelaskan pada Tabel 2.1, Tabel 2.2 dan Gambar 2.1 sebagai berikut.

Tabel 2.1. Tabel Gaya Dinamika Kapal

DOF	Gerakan	Gaya	Kecepatan Linear	Posisi
1	<i>Surge</i>	X	u	x
2	<i>Sway</i>	Y	v	y
3	<i>Heave</i>	Z	w	z

Tabel 2.2. Tabel Momen Dinamika Kapal

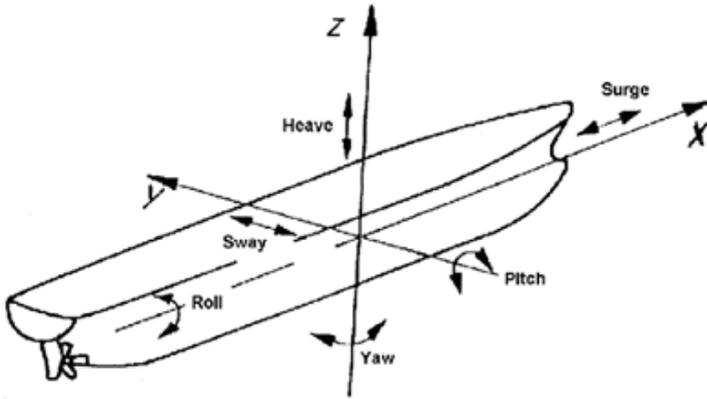
DOF	Gerakan	Momen	Kecepatan Angular	Sudut Euler
1	<i>Roll</i>	K	p	Φ
2	<i>Pitch</i>	M	q	θ
3	<i>Yaw</i>	N	r	Ψ

Persamaan gaya kapal dalam six-degree of freedom (6DOF) pada masing-masing sumbu x , y dan z dijelaskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\
 m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= Y \\
 m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= Z
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Persamaan momen kapal dalam six-degree of freedom (6DOF) pada masing-masing sumbu x , y dan z dijelaskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= K \\
 I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= M \\
 I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= N
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$



Gambar 2.1. Gerak Dinamika Kapal

Persamaan gerak kapal diasumsikan sebagai berikut.

1. Koordinat pusat diposisikan ditengah kapal ($y_G = 0$).
2. Distribusi massa homogen dan bidang xy simetris ($I_{xy} = I_{yz} = 0$).
3. *Heave*, *roll* dan *pitch* diabaikan ($w = p = q = \dot{w} = \dot{p} = \dot{q} = 0$).

Dari asumsi tersebut, maka Persamaan Gaya (2.1) menjadi.

$$\begin{aligned}
 \text{Surge : } & m(\dot{u} - vr - x_G r^2) = X \\
 \text{Sway : } & m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) = Y \\
 \text{Yaw : } & I_z \dot{r} + m x_G (\dot{v} + ur) = N
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

4. Persamaan gangguan dari gerak kapal didasarkan pada asumsi tambahan, yaitu kecepatan *sway* v , kecepatan *yaw* r dan sudut *rudder* δ .

Dari penjelasan tersebut, gerak *surge* dapat diabaikan ketika diasumsikan kecepatan u_0 konstan dengan gaya dorong yang konstan. Dengan cara yang sama, diasumsikan bahwa kecepatan rata-rata pada gerak *sway* dan gerak *yaw* adalah $v_0 = r_0 = 0$. Dengan demikian,

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \Delta u; & v &= \Delta v; & r &= \Delta r \\ X &= X_0 + \Delta X; & Y &= \Delta Y; & N &= \Delta N \end{aligned}$$

dengan Δu , Δv , Δr adalah gangguan yang kecil dari nilai u_0 , v_0 , dan r_0 dan ΔX , ΔY , ΔN adalah gangguan yang kecil dari nilai X_0 , Y_0 , dan N_0 .

Dengan asumsi bahwa gangguan urutan yang lebih tinggi dapat diabaikan, maka Persamaan Gerak Kapal (2.3) dinyatakan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} m\Delta\dot{u} &= X_0 + \Delta X \\ m(\Delta\dot{v} + u_0\Delta r + x_G\Delta\dot{r}) &= \Delta Y \\ I_z\Delta\dot{r} + mx_G(\Delta\dot{v} + u_0\Delta r) &= \Delta N \end{aligned} \quad (2.4)$$

Persamaan gerak kendali secara keseluruhan dapat dipisahkan dari persamaan kecepatan. Sehingga persamaan kecepatan dan persamaan gerak kendali yang dihasilkan sebagai berikut.

Persamaan Kecepatan :

$$m\dot{u} = X$$

Persamaan Gerak Kapal :

$$\begin{aligned} m(\dot{v} + u_0r + x_G\dot{r}) &= Y \\ I_z\dot{r} + mx_G(\dot{v} + u_0r) &= N \end{aligned} \quad (2.5)$$

Asumsikan bahwa kecepatan rata-rata adalah konstan yang menunjukkan bahwa model ini hanya berlaku untuk sudut *rudder* yang kecil.

Persamaan gerak kendali kapal *three-degree of freedom* (3DOF) ketika manuver terdapat variable keadaan v, r, ψ dan δ . Dari Persamaan (2.5) persamaan gerak kendali dinamika kapal menjadi sebagai berikut.

$$\begin{aligned} m(\dot{v} + u_0 r + x_G \dot{r}) &= Y \\ I_z \dot{r} + m x_G (\dot{v} + u_0 r) &= N \end{aligned}$$

Gaya dan momen hidrodinamika yaitu dimodelkan dengan teori linier Davidson dan Schiff (1946) [2].

$$\begin{aligned} Y &= Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_{\delta} \delta \\ N &= N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_v v + N_r r + N_{\delta} \delta \end{aligned}$$

dengan,

$Y_{\dot{v}}$ = koefisien gaya massa tambahan pada v sepanjang sumbu y

$Y_{\dot{r}}$ = koefisien gaya massa tambahan pada r sepanjang sumbu y

Y_v = turunan gaya *sway* terhadap v pada sumbu y

Y_r = turunan gaya *syaw* terhadap r pada sumbu z

Y_{δ} = turunan gaya *sway* terhadap δ

$N_{\dot{v}}$ = koefisien gaya momen sepanjang sumbu z terhadap v

$N_{\dot{r}}$ = koefisien gaya momen sepanjang sumbu z terhadap r

N_v = turunan momen *yaw* terhadap v pada sumbu y

N_r = turunan momen *yaw* terhadap r pada sumbu z

N_{δ} = turunan momen *sway* terhadap δ

Setelah dilakukan pendekatan dengan Davidson dan Schiff, persamaan model dinamika kapal *two-degree of freedom* (2DOF) sebagai berikut [2].

$$M_{\dot{v}} + N(u_0)v = b\delta_R \quad (2.6)$$

dengan, $\dot{v} = [v, r]^T$ adalah vektor keadaan, δ_R adalah sudut *rudder*. Untuk $M, N(u_0), b$ dan u'_0 dijelaskan sebagai berikut.

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ mx_G - Y_{\dot{v}} & mx_G u_0 - N_r \end{bmatrix}$$

$$N(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r \\ -N_v & mx_G u_0 - N_r \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Kemudian ditetapkan matriks inersia $M \neq M^T$. Model *state-space* yang tepat diperoleh ketika vektor *state* $x = [v, r]^T$ dan $u = \delta_r$. Oleh karena itu,

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

dengan,

$$A = -M^{-1}N = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

$$B = M^{-1}b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

dengan, a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} , b_1 dan b_2 dijelaskan sebagai berikut.

$$a_{11} = \frac{(I_z - N_r)Y_v - (mx_G - Y_{\dot{r}})N_v}{\det(M)}$$

$$a_{12} = \frac{(I_z - N_r)(Y_v - mu_0) - (mx_G - Y_{\dot{r}})(N_r - mx_G u_0)}{\det(M)}$$

$$a_{21} = \frac{(m - Y_v)N_v - (mx_G - Y_v)N_v}{\det(M)}$$

$$\begin{aligned}
 a_{22} &= \frac{(m-Y_v)(N_r-mx_Gu_0)-(mx_G-Nv)(Y_r-mu_0)}{\det(M)} \\
 b_1 &= \frac{(I_z-N_r)Y_\delta-(mx_G-Y_r)N_\delta}{\det(M)} \\
 b_2 &= \frac{(m-Y_v)N_\delta-(mx_G-Nv)Y_\delta}{\det(M)}
 \end{aligned}$$

dengan $\det(M)$ adalah determinan dari matriks inersia.

Persamaan (2.5) diubah dalam bentuk non-dimensional yang diturunkan dengan Sistem Prime I. Dimana besaran gaya diperoleh ketika dibagi dengan $\frac{1}{2}\rho U^2 L^2$, momen dikalikan dengan $\frac{1}{2}\rho U^2 L^3$, besaran massa dibagi dengan $\frac{1}{2}\rho L^3$, besaran momen inersia dibagi dengan $\frac{1}{2}\rho L^5$. Dengan $\rho =$ massa jenis air laut ($1024 \frac{kg}{m^3}$), $L =$ panjang kapal (*Length between Perpendicular*), $U =$ kecepatan *service* kapal, $B =$ lebar kapal, $T =$ kedalaman/tinggi kapal, $C_B =$ koefisien blok. Untuk Variabel Normalisasi Sistem Prime I dijelaskan pada Tabel 2.2.

Kemudian Persamaan (2.5) menjadi sebagai berikut.

$$M'v + N'(u_0)v = b' \delta'_R \quad (2.7)$$

Dengan Sistem Prime I dilakukan transformasi guna memperoleh variable non-dimensional sebagai berikut.

$$v = Uv' \quad (2.8)$$

$$r = \frac{U}{L}r' \quad (2.9)$$

$$\delta = \delta'_R \quad (2.10)$$

$$x_G = x'_G L \quad (2.11)$$

$$m = \frac{m' \rho L^3}{2} \quad (2.12)$$

$$I_z = \frac{I'_z \rho}{2} \quad (2.13)$$

Tabel 2.3. Variabel Normalisasi Sistem Primer I

No	Unit	Sistem Prime I
1	<i>Lenght</i> (Panjang)	L
2	<i>Mass</i> (Massa)	$\frac{1}{2} \rho L^3$
3	<i>Inertia Moment</i> (Momen Inersia)	$\frac{1}{2} \rho L^5$
4	<i>Time</i> (Waktu)	$\frac{L}{U}$
5	<i>Reference Area</i> (Area Referensi)	L^2
6	<i>Position</i> (Posisi)	L
7	<i>Angle</i> (Sudut)	I
8	<i>Linear Velocity</i> (Kecepatan Linier)	U
9	<i>Angular Velocity</i> (Kecepatan Sudut)	$\frac{U}{L}$
10	<i>Linear Acceleration</i> (Percepatan Linier)	$\frac{U^2}{L}$
11	<i>Angular Acceleration</i> (Percepatan Sudut)	$\frac{U^2}{L^2}$
12	<i>Force</i> (Kekuatan)	$\frac{1}{2} \rho U^2 L^2$
13	<i>Moment</i> (Momen)	$\frac{1}{2} \rho U^2 L^3$

dengan M' , $N'(u_0)$, dan b' sebagai berikut.

$$M' = \begin{bmatrix} m' - Y'_v & m' x'_G - Y'_r \\ m' x'_G - N'_v & I'_z - N'_r \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$N'(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & m' u_0 - Y'_r \\ -N_v & m' x'_G u_0 - N'_r \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$b' = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$u'_0 = \frac{u_0}{U} = \frac{u_0}{\sqrt{(u_0 + \Delta u)^2 + \Delta v^2}} \approx 1 \quad (2.17)$$

Kuantitas non-dimensional dinyatakan dengan tanda ($'$). Sistem Prime I dari SNAME (1950) merupakan bentuk nondimensional yang digunakan untuk persamaan gerak kapal dimana $Y_{\dot{v}}$ adalah turunan gaya *sway* terhadap \dot{v} , $Y_{\dot{r}}$ adalah turunan gaya *yaw* terhadap \dot{r} , $N_{\dot{v}}$ adalah turunan momen *sway* terhadap \dot{v} , $N_{\dot{r}}$ adalah turunan momen *yaw* terhadap \dot{r} , Y_v adalah turunan gaya *sway* terhadap v , Y_r adalah turunan gaya *yaw* terhadap r , N_v adalah turunan momen *sway* terhadap v , dan N_r adalah turunan momen *yaw* terhadap r .

Berikut adalah cara perhitungan numerik untuk mendapatkan massa tambahan (*add mass*) dan momen inersia menggunakan Theory Strip [2] dengan T adalah kedalaman kapal, L adalah panjang kapal, B adalah lebar kapal, C_B adalah koefisien blok.

$$\frac{-Y'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0,16 \frac{C_B B}{T} - 5,1 \left(\frac{B}{L} \right)^2 \quad (2.18)$$

$$\frac{-Y'_{\dot{r}}}{\pi(T/L)^2} = 0,67 \left(\frac{B}{T} \right) - 0,0033 \left(\frac{B}{L} \right)^2 \quad (2.19)$$

$$\frac{-N'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} = 1,1 \left(\frac{B}{L} \right) - 0,041 \left(\frac{B}{T} \right) \quad (2.20)$$

$$\frac{-N'_{\dot{r}}}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0,017 \frac{C_B B}{T} - 0,33 \left(\frac{B}{L} \right) \quad (2.21)$$

$$\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0,4 \frac{C_B B}{T} \quad (2.22)$$

$$\frac{-Y_r'}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2.2 \left(\frac{B}{L} \right) - 0.008 \left(\frac{B}{T} \right) \quad (2.23)$$

$$\frac{-N_v'}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2.4 \left(\frac{T}{L} \right) \quad (2.24)$$

$$\frac{-N_r'}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{4} + 0.039 \left(\frac{B}{T} \right) - 0.56 \left(\frac{B}{L} \right) \quad (2.25)$$

2.3 Kalman Filter

Kalman Filter adalah sebuah metode estimasi variabel keadaan dari sistem dinamik stokastik linear diskrit yang meminimumkan kovarian *error* estimasi. Untuk sistem gerak kapal yang berbentuk non-linear harus diubah terlebih dahulu kedalam bentuk linear supaya Kalman Filter bisa diimplementasikan. Kalman Filter mampu mengestimasi variabel keadaan dinamis dari sistem dengan dua tahap yaitu tahap prediksi (*time update*) dan tahap koreksi (*measurement update*). Algoritma Kalman Filter waktu diskrit ditulis sebagai berikut.

Model sistem :

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}x_k + \mathbf{B}u_k + \mathbf{G}w_k \quad (2.26)$$

Model pengukuran :

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}x_k + v_k \quad (2.27)$$

Asumsi,

$$\mathbf{x}_0 \sim N(\bar{x}_0, P_{x_0}); w_k \sim N(0, Q_k); v_k \sim N(0, R_k)$$

dengan,

- \bar{x}_0 = estimasi awal
- x_0 = inisialisasi sistem
- $x(k+1)$ = variabel *state* pada waktu $(k+1)$ dan berdimensi $n \times 1$
- x_k = variabel *state* pada waktu k , estimasi awalnya \bar{x}_0 dan kovarian awal $P_{x_0} \in R^n$
- u_k = vektor *input* statistik pada waktu k , $u_k \in R^n$
- w_k = *noise* pada pengukuran dengan *mean* $\bar{w}_k = 0$ dan varian Q_R
- z_k = variabel pengukur $z_k \in R^m$
- v_k = *noise* pada pengukuran dengan *mean* $\bar{v}_k = 0$ dan varian R_k
- A, B, H = matriks dengan elemen-elemennya adalah koefisien variabel *state*

Tahap prediksi (*time update*) dipengaruhi oleh sistem dinamika dengan memprediksi variable keadaan dan menghitung tingkat akurasi dengan menggunakan persamaan kovarian *error* atau *norm* kovarian *error*. Pada tahap koreksi, dilakukan koreksi berdasarkan informasi data-data pengukuran untuk memperbaiki hasil estimasi. Pada tahap ini akan ditentukan matriks Kalman Gain yang digunakan untuk meminimumkan kovarian *error*.

Hasil estimasi yang telah didapatkan kemudian dimasukkan dalam model sistem untuk mendapatkan prediksi satu langkah kedepan, dan data pengukuran hasil prediksi digunakan untuk mendapatkan estimasi yang lebih baik. Kedua tahap ini dilakukan secara berulang-ulang sesuai waktu k yang telah ditentukan.

Algoritma Kalman Filter terdiri dari empat bagian, yaitu bagian pertama mendefinisikan model sistem dan model pengukuran, bagian kedua adalah *inisialisasi* (nilai awal), bagian ketiga adalah tahap prediksi dan bagian keempat adalah tahap koreksi.

Tahapan-tahapan tersebut dijelaskan pada Tabel 2.3 sebagai berikut.

2.4 Kalman Filter Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input (KF-UMV-UI)

Selama ini metode untuk *filtering*, salah satunya Kalman Filter telah banyak digunakan untuk mengestimasi keadaan optimal dari sistem dari data pengamatan *noise*. Namun, metode-metode tersebut mengharuskan untuk semua *input* harus diketahui. Pada kenyataannya, *unknown input* tidak dapat dihindari karena gangguan yang tidak pasti dan tidak diperlakukan sebagai *noise* yang stabil atau *input* yang tidak dapat diukur.

Sesuai dengan perkembangan metode *filtering* dengan *unknown input* teknik pendekatan terbagi kedalam dua kategori. Untuk yang pertama, dilakukan pendekatan dimana kondisi yang ditambah termasuk *unknown input* dan keadaan yang diestimasi dengan informasi sebelumnya. Untuk yang kedua, dilakukan pendekatan dimana solusi *filtering* adalah turunan dengan meminimalkan *error* dari matriks kovarian keadaan dengan kendala dari kondisi estimator unbiased.

Algoritma *Kalman Filter Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input* (KF-UMV-UI) ditulis sebagai berikut.[8]

Model Sistem :

$$x_{k+1} = \mathbf{A}_x x_k + \mathbf{B}_k u_k + \mathbf{C} d_k + w_k \quad (2.28)$$

Model Pengukuran :

$$y_k = \mathbf{E}_k x_k + \mathbf{H}_k d_k + v_k \quad (2.29)$$

Asumsi,

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

$x_k = \begin{bmatrix} x_{1,k} & x_{2,k} & | & \cdots & x_{n,k} \end{bmatrix}^T \in R^n$ adalah vektor *state*, $d_k = \begin{bmatrix} d_{1,k} & d_{2,k} & \cdots & d_{m,k} \end{bmatrix}^T \in R^n$ adalah vektor *unknown input*, $y_k \in R^p$ adalah vektor (*output measurement*). $w_k \in R^n$ adalah *process noise* dan $v_k \in R^p$ adalah *measurement noise* diasumsikan tidak saling berkorelasi, *zero-mean*, *random signal* dengan matriks kovarian yang diketahui, $Q_k = E \begin{bmatrix} w_k & w_k^T \end{bmatrix}$ dan $R_k = E \begin{bmatrix} v_k & v_k^T \end{bmatrix}$. A_k, B_k, C_k , dan H_k adalah matriks yang berukuran $(n \times n), (n \times m), (p \times n)$, dan $(p \times m)$.

Untuk algoritma Kalman Filter Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input (KF-UMV-UI) akan dijelaskan pada Tabel 2.4 sebagai berikut.

Tabel 2.4. Tahapan dalam Kalman Filter

Model Sistem
$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Gw_k$
Model Pengukuran
$z_k = Hx_k + v_k$
Asumsi
$x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_{x_0}); w_k \sim N(0, Q_k); v_k \sim N(0, R_k)$
Inisialisasi
$\hat{x}_0 = \bar{x}_0$ $P_0 = P_{x_0}$
Tahap Prediksi
Estimasi : $x_{k+1} = A\hat{x}_k + B\hat{u}_k$ Kovarian <i>Error</i> $P_{k+1} = AP_kA^T + GQG^T$
Tahap Koreksi
Kalman Gain : $K_{k+1} = P_{k+1}^- H^T (HP_{k+1}^- H^T + R)^{-1}$ Estimasi : $\hat{x}_k = \hat{x}_{k+1}^- + K_k + 1(z_{k+1} - H\hat{x}_{k+1})$ Kovarian <i>Error</i> $P_{k+1} = [I - K_{k+1}H_{k+1}]P_{k+1}^-$

Tabel 2.5. Tahapan dalam KF-UMV-UI

Model Sistem
$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + E_k d_k + w_k$
Model Pengukuran
$y_k = C_k x_k + H_k d_k + v_k$
Asumsi
$x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_{x_0}); w_k \sim N(0, Q_k); v_k \sim N(0, R_k)$
Inisialisasi
$\hat{x}_0 = \bar{x}_0$ $P_0 = P_{x_0}$
Tahap Prediksi
Estimasi : $\hat{x}_{k k-1} = A_{k-1} \hat{x}_{k-1 k-1} + B_{k-1} \hat{d}_{k-1 k-1}$
Kovarian Error : $P_{x,k k-1} = A_{k-1} P_{x,k-1 k-1} A_{k-1}^T + B_{k-1} H_{k-1}^T R_{k-1}^{-1} C_{k-1} A_{k-1}^T$ $+ A_{k-1} C_{k-1}^T R_{k-1}^{-1} H_{k-1} B_{k-1}^T + B_{k-1} S_{k-1} B_{k-1}^T + Q_{k-1}$
Tahap Koreksi
Kalman Gain : $K_{x,k} = P_{x,k k-1} C_k^T [R_k + C_k P_{x,k k-1} C_k^T]^{-1}$ $S_k = [H_k^T R_k^{-1} (I_p - C_k K_{x,k}) H_k]^{-1}$
Estimasi : $\hat{x}_{k k} = \hat{x}_{k k-1} + K_{x,k} [y_k - C_k \hat{x}_{k k-1} - H_k \hat{d}_{k k}]$ $\hat{d}_{k k} = S_k H_k^T R_k^{-1} (I_p - C_k K_{x,k}) (y_k - C_k \hat{x}_{k k-1})$
Kovarian Error $P_{x,k-1 k-1} = (I_n + K_{x,k-1} H_{k-1} S_{k-1} H_{k-1}^T R_{k-1}^{-1} C_{k-1})$ $(I_n - K_{x,k-1} C_k) P_{x,k-1 k-2}$

BAB III

METODE PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai metode yang digunakan dalam Tugas Akhir ini agar proses pengerjaan dapat terstruktur dengan baik. Tahap-tahap yang dilakukan dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini, yaitu sebagai berikut.

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan identifikasi masalah dengan mencari referensi teori yang menunjang penelitian. Selanjutnya dilakukan pemahaman materi yang meliputi model matematika dinamika kapal, dan kajian detail mengenai algoritma *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input* (KF-UMV-UI).

2. Pemodelan Matematika pada Kapal

Pada tahap ini membahas tentang model matematika kapal yang menggunakan sistem dinamika kapal dua derajat kebebasan (2DOF) yaitu sway dan yaw dengan pendekatan Davidson dan Schiff.

3. Penerapan Metode KF-UMV-UI

Pada tahap ini model matematika kapal yang digunakan berbentuk sistem linear, sehingga langkah-langkah yang dilakukan untuk estimasi model dinamika kapal dengan metode KF-UMV-UI sebagai berikut.

(a) Tahap Prediksi

Pada tahap ini dilakukan perhitungan kovarian error dan estimasi keadaan pada model sistem.

(b) Tahap Koreksi

Pada tahap ini dilakukan perhitungan Kalman Gain, Kovarian error pada model pengukuran diperoleh hasil

estimasi. Hasil perhitungan dikatakan baik ketika nilai kovarian error semakin kecil dan nilai error yang semakin kecil juga.

(c) Simulasi Numerik

Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB dengan input parameter yang telah didefinisikan dan asumsi yang telah dibuat.

4. **Analisa Hasil dan Pembahasan**

Pada tahap ini dilakukan analisis hasil simulasi numerik model dinamika kapal dengan menggunakan KF-UMV-UI.

5. **Kesimpulan dan Saran**

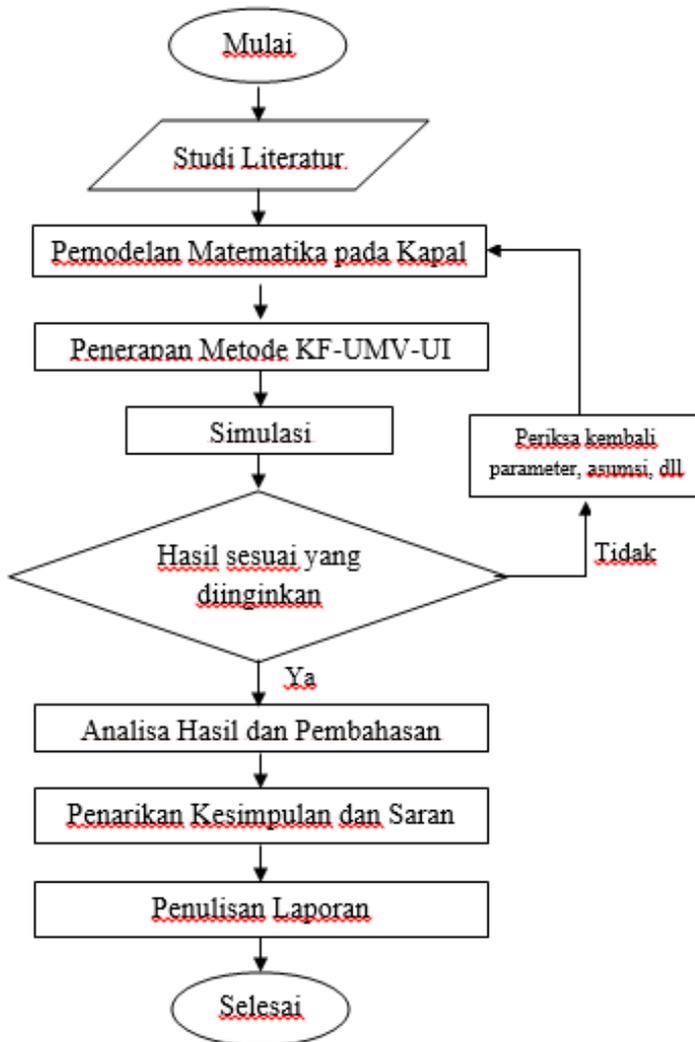
Pada tahap ini akan dilakukan penarikan kesimpulan dan saran sesuai dengan hasil simulasi yang dilakukan.

6. **Penulisan Laporan**

Pada tahap ini dilakukan penulisan laporan untuk tugas akhir.

No	Kegiatan	Bulan											
		1				2				3			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi Literatur	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2	Pemodelan Matematika pada Kapal	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3	Penerapan Metode KF-UMV-UI	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4	Analisa Hasil dan Pembahasan	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5	Penarikan Kesimpulan dan Saran	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
6	Penulisan Laporan	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Gambar 3.1. Jadwal Kegiatan



Gambar 3.2. Diagram Alir Penelitian

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dijelaskan penerapan algoritma *Kalman Filter Based Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input* dalam mengestimasi model kapal dua derajat kebebasan, yaitu *sway* dan *yaw*. Kemudian dilakukan simulasi dari algoritma yang telah dirancang untuk mendapatkan nilai dari hasil estimasinya.

4.1 Model Dinamika Gerak Kapal

Pada Tugas Akhir ini, kapal yang digunakan adalah KRI Korvet Kelas Sigma. Dapat dilihat pada Tabel 4.1 Data Parameter dari KRI Korvet kelas Sigma sebagai berikut ini. Dari data pa-

Tabel 4.1. Data Parameter KRI Korvet Kelas Sigma

Nama	Simbol	Ukuran
<i>Length the Ship</i>	L	101,07m
<i>Breadth</i>	B	14m
<i>Draft Depth</i>	T	3,7m
<i>Mass of Ship</i>	m	$2423 \times 10^3 Kg$
<i>Velocity</i>	U	15,4m/s
<i>Coefficient Block</i>	C_B	0,65
<i>Nominal x Coordinate of Gravity</i>	x_G	5,5m
<i>Rudder Area</i>	A_δ	$5,5m^2$
<i>Sea Water Density</i>	ρ	$1024kg/m^3$

rameter pada Tabel 4.1 disubstitusikan ke Persamaan (2.17-2.24). Hasil yang diperoleh berupa nilai koefisien hidrodinamika kapal dalam bentuk non-dimensional. Berikut merupakan hasil perhitungan koefisien hidrodinamika kapal yang ditunjukkan pada Tabel 4.2. Berdasarkan pada hasil perhitungan koefisien hidrodinamika

Tabel 4.2. Koefisien Hidrodinamika Kapal

Koefisien-N	Koefisien-Y
$N'_{\dot{v}} = 1,1638 \times 10^{-5}$	$Y'_{\dot{v}} = -0,0055$
$N'_{\dot{r}} = -3,3426 \times 10^{-4}$	$Y'_{\dot{r}} = -0,0107$
$N'_v = -0,0025$	$Y'_v = -0,0083$
$N'_r = -0,0013$	$Y'_r = 9,4906 \times 10^{-4}$

kapal dalam mencari koefisien dari matriks M dinamika kapal pada Persamaan (2.5) menggunakan model matematika Davidson dan Schiff yang telah dinondimensionalkan menjadi sebagai berikut.

$$M' = \begin{bmatrix} m' - Y'_{\dot{v}} & m' x'_G - Y'_{\dot{r}} \\ m' x'_G - N'_{\dot{v}} & I'_z - N'_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

Selanjutnya substitusi pusat massa kapal, nilai massa kapal dan momen inersia kapal terhadap sumbu z , dengan perhitungan sebagai berikut.

Mendapatkan x'_G dari Persamaan (2.11)

$$\begin{aligned} x_G &= x'_G \times L \\ \Leftrightarrow x'_G &= \frac{x_G}{L} \\ \Leftrightarrow x'_G &= 0,0544 \end{aligned}$$

Mendapatkan m' dari Persamaan (2.12)

$$\begin{aligned} m &= \frac{m' \rho L^3}{2} \\ \Leftrightarrow m' &= \frac{2m}{\rho L^3} \\ \Leftrightarrow m' &= 0,0046 \end{aligned}$$

Mendapatlan I'_z dari Persamaan (2.13)

$$\begin{aligned} I_z &= \frac{I'_z \rho}{2} \\ \Leftrightarrow I'_z &= \frac{2I_z}{\rho} \\ \Leftrightarrow I'_z &= 2,0769 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh nilai dari matriks M' sebagai berikut.

$$M' = \begin{bmatrix} 0,0100 & 0,0109 \\ 2,3780 \times 10^{-4} & 2,0769 \times 10^{-6} \end{bmatrix}$$

Selanjutnya mencari koefisien matriks N dinamika kapal pada Persamaan (2.5) dengan model matematika Davidson dan Schiff yang telah nondimensional sebagai berikut.

$$N' = \begin{bmatrix} -Y'_v & m' - Y'_r \\ -N'_v & m' x'_G - N'_r \end{bmatrix}$$

Dengan mensubstitusikan nilai $m', x'_G, Y'_v, Y'_r, N'_v, N'_r$ pada matriks N' diatas, maka diperoleh nilai matriks sebagai berikut.

$$N' = \begin{bmatrix} 0,0083 & 0,0036 \\ 0,0025 & 0,0016 \end{bmatrix}$$

Kemudian menghitung koefisien matriks b dinamika kapal pada Persamaan (2.5) dengan model matematika Davidson dan Schiff yang telah dinondimensional sebagai berikut.

$$b' = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Sehingga model dinamika kapal Davidson dan Schiff yang telah diubah kedalam bentuk nondimensional pada Persamaan (2.6) menjadi sebagai berikut.

$$\dot{x} = M'^{-1}N'(u_0)v + M'^{-1}b'\delta'_R$$

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0,0100 & 0,0109 \\ 2,3780 \times 10^{-4} & 2,0769 \times 10^{-6} \end{bmatrix}^{-1} \\
 &\begin{bmatrix} 0,0083 & 0,0036 \\ 0,0025 & 0,0016 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} + \\
 &\begin{bmatrix} 0,0100 & 0,0109 \\ 2,3780 \times 10^{-4} & 2,0769 \times 10^{-6} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \delta_R
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Pada Tugas Akhir ini estimator pada model dinamika kapal yang dipengaruhi oleh *unknown input* dengan variabel yang diamati adalah ψ yang merupakan sudut hadap kapal dan meninjau persamaan $\dot{\psi} = r$. Dengan r merupakan kecepatan sudut hadap kapal. Sehingga ruang keadaan model didapatkan $x = [v, r, \psi]^T$ sebagai vektor keadaan dan $u = \delta_R$. Kemudian Persamaan (4.1) ditulis dalam bentuk sebagai berikut.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

dengan

$$\begin{aligned}
 A &= M'^{-1}N \\
 B &= M'^{-1}b
 \end{aligned}$$

maka diperoleh

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0,8318 & 0,3622 & 0 \\ 1,0959 \times 10^{-9} & 7,2702 \times 10^{-10} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \\
 &\begin{bmatrix} -5,2378 \times 10^{-7} \\ 4,8150 \times 10^{-7} \\ 0 \end{bmatrix} u
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Sehingga dapat ditentukan variabel-variabel yang diestimasi dan memberi notasi pada setiap variabel sebagai berikut.

$$x_1 = v$$

$$x_2 = r$$

$$x_3 = \psi$$

dengan x_1, x_2 merupakan model dinamika kapal dan x_3 merupakan model kinematika kapal.

4.2 Diskritisasi Model Dinamika Kapal

Sistem dinamika kapal yang akan diimplementasikan dalam Kalman Filter harus didiskritkan terlebih dahulu. Pendiskritan model dinamika kapal pada Persamaan (4.2) dijelaskan sebagai berikut.

Diskritisasi pada persamaan v atau x_1 yang merupakan kecepatan *sway* pada kapal.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= 0,8318x_1 + 0,3622x_2 \\ \Leftrightarrow \frac{x_{1k+1} - x_{1k}}{\Delta t} &= 0,8318x_1 + 0,3622x_2 \\ \Leftrightarrow x_{1k+1} &= \Delta t(0,8318x_1 + 0,3622x_2) + x_{1k} \end{aligned}$$

Diskritisasi pada persamaan r atau x_2 yang merupakan kecepatan *yaw* pada kapal.

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= 1,0959 \times 10^{-9}x_1 + 7,2702 \times 10^{-10}x_2 \\ \Leftrightarrow \frac{x_{2k+1} - x_{2k}}{\Delta t} &= 1,0959 \times 10^{-9}x_1 + 7,2702 \times 10^{-10}x_2 \\ \Leftrightarrow x_{2k+1} &= \Delta t(1,0959 \times 10^{-9}x_1 + 7,2702 \times 10^{-10}x_2) \\ &\quad + x_{2k} \end{aligned}$$

Diskritisasi pada persamaan ψ atau x_3 yang merupakan sudut *yaw* pada kapal.

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= x_2 \\ \Leftrightarrow \frac{x_{3k+1} - x_{3k}}{\Delta t} &= x_2 \\ \Leftrightarrow x_{3k+1} &= \Delta t(x_2) + x_{3k} \end{aligned}$$

Dari proses diskritisasi didapatkan model sistem yang dimplemen-

tasikan pada metode *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input* dengan $\Delta t = 0,5$ dan menggunakan *software* Matlab. Berikut model sistem yang diperoleh.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 0,4159 & 0,1811 & 0 \\ 5,4795 \times 10^{-10} & 1 & 0 \\ 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} -2,6189 \times 10^{-7} \\ 2,4075 \times 10^{-7} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (4.3)$$

4.3 Estimasi *State* dan *Unknown Input* pada Model Dinamika Kapal dengan KF-UMV-UI

Sebelum diimplementasikan kedalam metode *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance with Unknown Input*, model dinamika kapal yang didapatkan pada Persamaan (4.3) harus melewati tahap untuk menentukan model sistem dan model pengukuran.

4.3.1 Model Sistem

Model sistem yang digunakan pada penelitian ini adalah substitusi Persamaan (4.3) ke Persamaan (2.28) sebagai berikut.

$$x_{k+1} = A_x x_k + B_k u_k + C_k d_k + w_k$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 0,4159 & 0,1811 & 0 \\ 5,4795 \times 10^{-10} & 1 & 0 \\ 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} -2,6189 \times 10^{-7} \\ 2,4075 \times 10^{-7} \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} [d_k] + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

u adalah sudut *rudder* sebesar 35° . d_k adalah *unknown input*, dimana $d_k = 1u_s[k] - 2u_s[k-1]$ dan u_s adalah *unit step function*. Persamaan d_k digunakan untuk memisahkan nilai *real* dari d_k atau *unknown input* dan mempengaruhi hasil grafik pada simulasi numerik. w_k adalah vektor *noise* sistem dengan mean sama dengan nol dan kovariannya yaitu Q_k atau umumnya ditulis dengan $w_k \sim (0, Q_k)$

4.3.2 Model Pengukuran

Model sistem yang digunakan pada penelitian ini pada Persamaan (2.29) adalah sebagai berikut.

$$y_k = E_x x_k + H_k d_k + v_k$$

Karena *output* sistem berupa sudut *yaw* (ψ) atau x_3 , maka model pengukuran menjadi sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} [d_k] + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

v_k adalah vektor *noise* pengukuran dengan mean sama dengan nol dan kovariannya yaitu R_k atau umumnya ditulis dengan $v_k \sim N(0, R_k)$.

4.4 Aplikasi Metode KF-UMV-UI pada Model Dinamika Gerak Kapal

Metode *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance with Unknown Input* (KF-UMV-UI) adalah salah satu modifikasi dari metode *Kalman Filter* yang digunakan untuk model sistem linear. Pada metode ini dilakukan dengan tiga tahapan, yang pertama yaitu Tahap Inisialisasi, yang kedua yaitu Tahap Prediksi dan yang terakhir yaitu Tahap Koreksi. Tahapan-tahapan tersebut dilakukan dengan bantuan *software* MATLAB.

4.4.1 Tahap Inisialisasi

Pada tahap ini akan ditentukan nilai awal dari variabel yaitu $x_1, x_2, \text{ dan } x_3$, kovarian *noise* sistem dan kovarian *noise* pengukuran. Nilai awal dari variabel ditampilkan pada Tabel 4.3 sebagai berikut.

Tabel 4.3. Nilai awal variabel yang akan diamati

Variabel	Nilai
x_1	$0m/s$
x_2	$0m/s$
x_3	$0rad$

Berikut nilai awal dari kovarian *noise* sistem Q_k dan kovarian *noise* pengukuran R_k .

$$Q_k = \begin{bmatrix} 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-3} \end{bmatrix}, R_k = \begin{bmatrix} 10^{-3} & 0 \\ 0 & 10^{-3} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

4.4.2 Tahap Prediksi

Dengan model sistem yang berbentuk linear, maka bisa dilanjutkan dengan menghitung estimasi dan kovarian *error*.

$$\begin{aligned} \text{Estimasi} & : \hat{x}_{k|k-1} = A_{k-1}\hat{x}_{k-1|k-1} + B_{k-1}\hat{d}_{k-1|k-1} \\ \text{Kovarian } error & : P_{x,k|k-1} = A_{k-1}P_{x,k-1|k-1}A_{k-1}^T + B_{k-1} \cdot \\ & H_{k-1}^T R_{k-1}^{-1} C_{k-1} A_{k-1}^T + A_{k-1} C_{k-1}^T R_{k-1}^{-1} \cdot \\ & H_{k-1} B_{k-1}^T + B_{k-1} S_{k-1} B_{k-1}^T + Q_{k-1} \end{aligned}$$

4.4.3 Tahap Koreksi

Pada tahap koreksi dilakukan perhitungan Kalman Gain, kovarian error pada model pengukuran kemudian diperoleh hasil estimasi melalui model pengukuran.

1. Kalman Gain :

$$K_{x,k} = P_{x,k|k-1} C_k^T [R_k + C_k P_{x,k|k-1} C_k^T]^{-1}$$

dan

$$S_k = [H_k^T R_k^{-1} (I_p - C_k K_{x,k}) H_k]^{-1}$$

2. Estimasi :

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_{x,k} [y_k - C_k \hat{x}_{k|k-1} - H_k \hat{d}_{k|k}]$$

dan

$$\hat{d}_{k|k} = S_k H_k^T R_k^{-1} (I_p - C_k K_{x,k}) (y_k - C_k \hat{x}_{k|k-1})$$

3. Kovarian *Error* :

$$\begin{aligned} P_{x,k-1|k-1} & = (I_n + K_{x,k-1} H_{k-1} S_{k-1} H_{k-1}^T R_{k-1}^{-1} C_{k-1}) \cdot \\ & (I_n - K_{x,k-1} C_k) P_{x,k-1|k-2} \end{aligned}$$

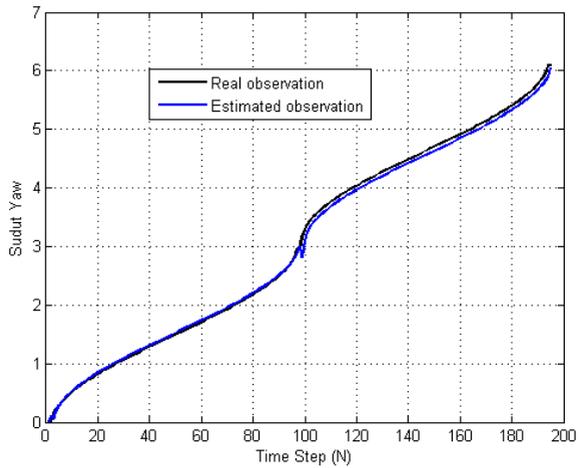
Jika perhitungan dikatakan bagus ketika nilai kovarian *error*nya semakin kecil dan juga perhitungan dikatakan bagus jika nilai *error*nya semakin kecil pula.

4.5 Simulasi Numerik

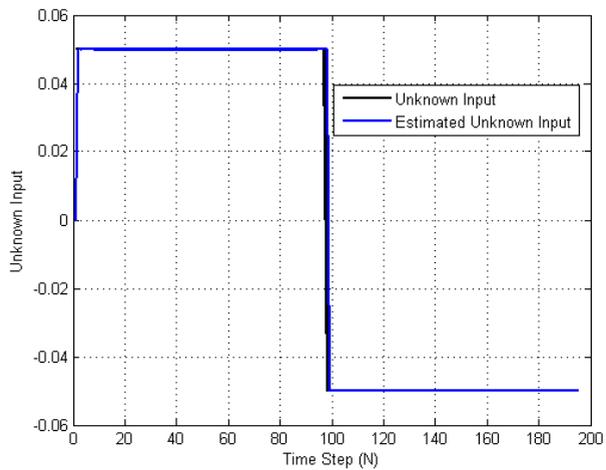
Hasil simulasi numerik dievaluasi dengan membandingkan nilai real berupa sudut *yaw* (ψ) yang diambil dari hasil uji *Turning Circle Test* dengan hasil estimasi dari *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance with Unknown Input. Turning Circle Test* adalah uji kapal dalam sebuah lintasan berbentuk lingkaran. Data sudut *yaw* yang diperoleh dari hasil uji *Turning Circle Test* berbentuk derajat, yaitu $0^\circ - 360^\circ$. Namun pada simulasi numerik data sudut *yaw* diubah dalam bentuk *rad*. Iterasi dilakukan sebanyak $N = 195$ sesuai dengan jumlah data hasil uji. Dan ditampilkan nilai RMSE dari masing-masing simulasinya. Berikut masing-masing hasil simulasi menggunakan MATLAB dengan kovarian yang berbeda.

a. Simulasi Numerik I

Simulasi numerik pertama dengan menggunakan *unknown-input* sesuai dengan Persamaan (4.6), kovarian *noise* sistem (Q_k) dan kovarian *noise* pengukuran (R_k) sesuai dengan Persamaan (4.7). Simulasi numerik dilakukan sebanyak 3 kali *running* dengan menggunakan MATLAB. Hasil dari Simulasi Numerik I dapat dijelaskan, pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Gambar 4.1 merupakan grafik estimasi sudut *yaw*. Sumbu x pada grafik adalah time step dan sumbu y pada grafik adalah sudut *yaw* dari $0rad - 7rad$. Hasil grafik sudut *yaw* menunjukkan bahwa plot estimasi mengikuti plot *real* yang berasal dari data uji *turning circle test*. Gambar 4.2 merupakan grafik estimasi *unknown input* yang berupa *step function*. Hasil grafik *unknown input* menunjukkan bahwa plot estimasi mengikuti plot *real* yang berbentuk *step function*. Hasil RMSE sebanyak 3 kali *running* dapat dilihat pada Tabel 4.4, sehingga didapatkan rata-rata RMSE sudut *yaw* 0.0047 dan rata-rata RMSE *unknown input* 0.0006.



Gambar 4.1. Estimasi Sudut *Yaw*



Gambar 4.2. Estimasi *Unknown Input*

Tabel 4.4. Nilai RMSE Simulasi Numerik I

RMSE	I	II	III
x_3	0.0047	0.0046	0.0048
d	0.0006	0.0006	0.0006

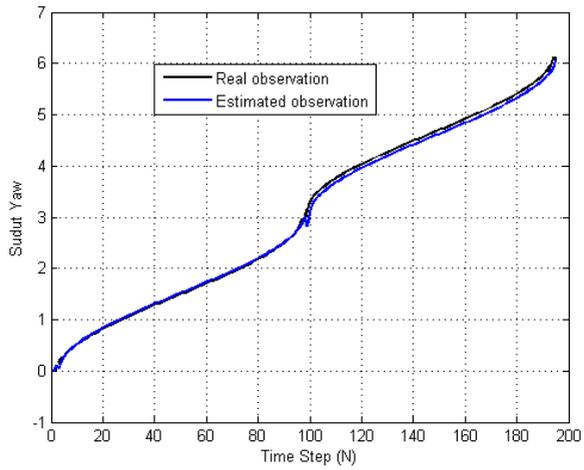
b. Simulasi Numerik II

Simulasi numerik kedua dilakukan perubahan pada kovarian *noise* sistem (Q_k) sebagai berikut.

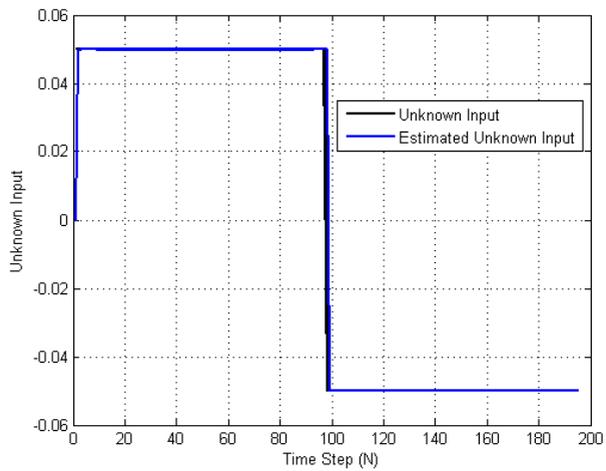
$$Q_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_k = \begin{bmatrix} 10^{-3} & 0 \\ 0 & 10^{-3} \end{bmatrix}$$

Nilai kovarian noise sistem Q_k diubah menjadi lebih besar dan nilai kovarian noise pengukuran R_k tetap. Gambar(4.3) adalah grafik estimasi kapal pada sudut *yaw*. Hasil grafik menunjukkan bahwa plot estimasi mengikuti plot *real* dan tidak terjadi perubahan yang signifikan. Gambar (4.4) adalah grafik estimasi kapal pada *unknown input*. Hasil grafik menunjukkan bahwa plot estimasi mengikuti pola plot nilai *real*nya yang berbentuk *step function*. Hasil RMSE sebanyak 3 kali *running* dapat dilihat pada Tabel 4.5, sehingga didapatkan rata-rata RMSE sudut *yaw* 0.0047 dan rata-rata RMSE *unknown input* 0.0006. Oleh karena itu, perubahan nilai kovarian noise sistem tidak menghasilkan perubahan yang signifikan dapat dilihat dari grafik dan nilai RMSE yang sama seperti simulasi numerik I.



Gambar 4.3. Estimasi Sudut *Yaw*



Gambar 4.4. Estimasi *Unknown Input*

Tabel 4.5. Nilai RMSE Simulasi Numerik II

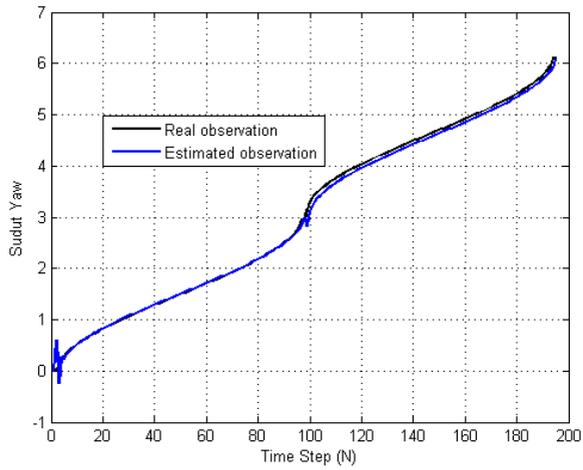
RMSE	I	II	III
x_3	0.0048	0.0049	0.0047
d	0.0006	0.0006	0.0006

c. Simulasi Numerik III

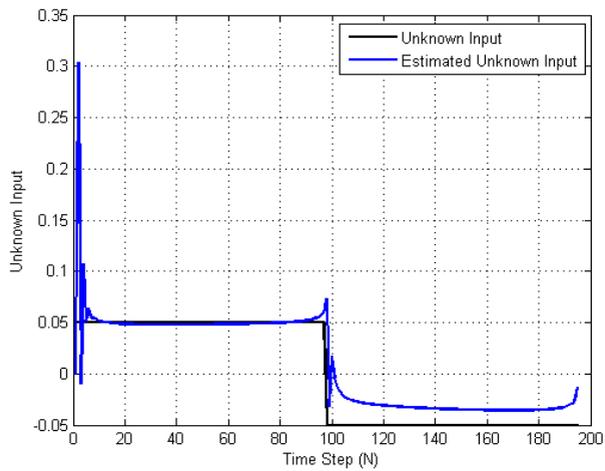
Simulasi numerik ketiga dilakukan perubahan pada kovarian *noise* pengukuran sebagai berikut.

$$Q_k = \begin{bmatrix} 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-3} \end{bmatrix}, R_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nilai kovarian *noise* sistem Q_k tetap dan nilai kovarian *noise* pengukuran R_k diubah menjadi lebih besar. Gambar(4.5) adalah grafik estimasi kapal pada sudut *yaw*. Hasil grafik menunjukkan bahwa plot estimasi mengikuti pola plot nilai *real* dan tidak terjadi perubahan yang signifikan. Pada sudut $0rad$ terdapat sedikit lonjakan pada estimasi kemudian kembali mengikuti pola plot *real*. Hal itu menunjukkan adanya gangguan disekitar kapal, seperti gelombang atau angin. Gambar (4.6) adalah grafik estimasi kapal pada *unknown input*. Hasil grafik menunjukkan bahwa plot estimasi hampir mengikuti plot pola *real* yang berbentuk *step function*. Tetapi pada estimasi *unknown input* dapat dilihat pada grafik terjadi lonjakan pada sumbu y kemudian kembali mengikuti pola plot nilai *real*. Hasil RMSE sebanyak 3 kali *running* dapat dilihat pada Tabel 4.6, sehingga didapatkan rata-rata RMSE sudut *yaw* 0.0068 dan rata-rata RMSE *unknown input* 0.0039.



Gambar 4.5. Estimasi Sudut *Yaw*



Gambar 4.6. Estimasi *Unknown Input*

Tabel 4.6. Nilai RMSE Simulasi Numerik III

RMSE	I	II	III
x_3	0.0095	0.0053	0.0057
d	0.0063	0.0028	0.0026

d. Simulasi Numerik IV

Simulasi numerik keempat dilakukan perubahan terhadap kovarian *noise* sistem Q_k dan kovarian *noise* pengukuran R_k sebagai berikut.

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

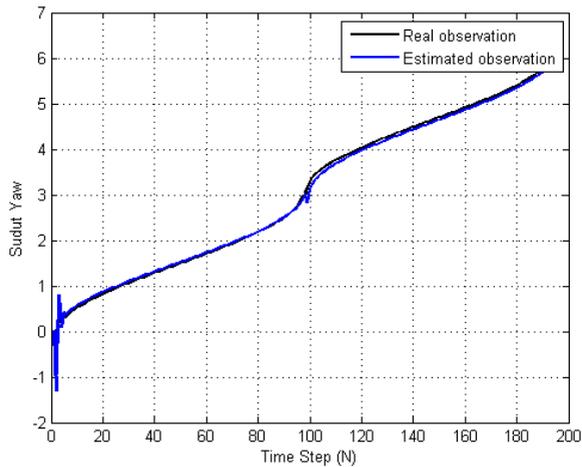
$$R_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Gambar(4.7) adalah grafik estimasi kapal pada sudut *yaw* dan (4.8) adalah grafik estimasi kapal pada *unknown input*. Perubahan kovarian *noise* sistem (Q_k) dan kovarian *noise* pengukuran yang dibuat sama dan lebih besar berpengaruh pada estimasi sudut *yaw* dan estimasi *unknown input*. Dilihat pada Gambar (4.7) hasil grafik sudut *yaw* menunjukkan bahwa plot estimasi mengikuti pola plot nilai realnya. Tetapi terjadi pergeseran sudut *yaw* pada *time step* awal. Hal itu terjadi karena perubahan Q_k dan R_k yang lebih besar berdampak pada gerak kapal. Sama halnya seperti Gambar (4.8), hasil grafik *unknown input* menunjukkan bahwa plot estimasi mengikuti pola plot nilai realnya. Tetapi terjadi lonjakan pada *time step* awal. Hal itu terjadi karena perubahan

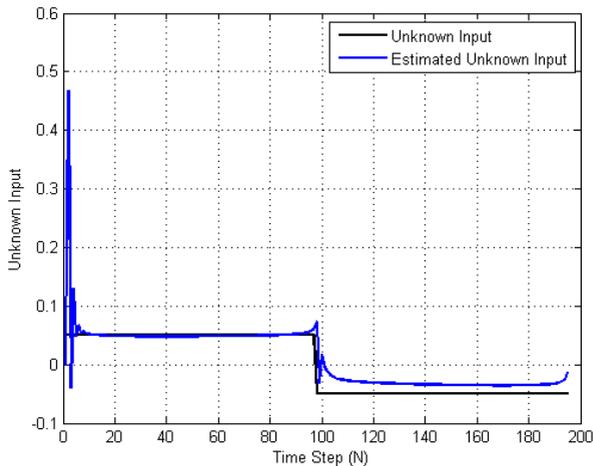
Q_k dan R_k yang lebih besar berdampak pada *unknown input* pula. Hasil RMSE sebanyak 3 kali *running* dapat dilihat pada Tabel 4.7, sehingga didapatkan rata-rata RMSE sudut *yaw* 0.0075 dan rata-rata RMSE *unknown input* 0.0050.

Tabel 4.7. Nilai RMSE Simulasi Numerik I

RMSE	I	II	III
x_3	0.0087	0.0071	0.0067
d	0.0057	0.0039	0.0053



Gambar 4.7. Estimasi Sudut *Yaw*



Gambar 4.8. Estimasi *Unknown Input*

e. Simulasi Numerik V

Simulasi numerik kelima dilakukan perubahan *unknown input* yaitu $d_k = 0.1u_s[k] - 0.2u_s[k - 0.1]$. Dengan kovarian *noise* sistem dan kovarian *noise* pengukuran seperti inisialisasi.

$$Q_k = \begin{bmatrix} 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-3} \end{bmatrix}$$

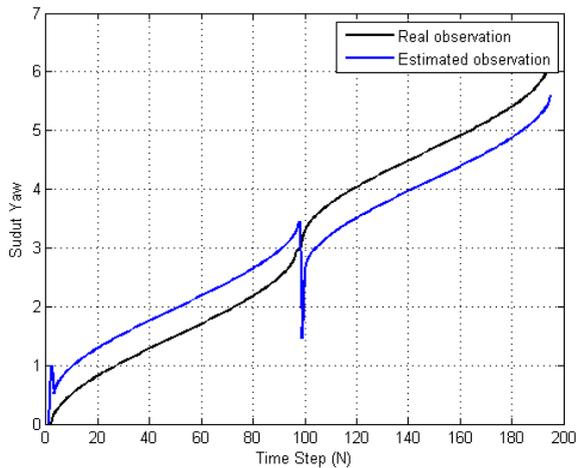
$$R_k = \begin{bmatrix} 10^{-3} & 0 \\ 0 & 10^{-3} \end{bmatrix}$$

Gambar(4.9) adalah grafik estimasi kapal pada sudut *yaw*. Perubahan nilai *unknown input* yang lebih besar membuat estimasi sudut *yaw* bergeser. Hal itu terjadi karena *unknown*

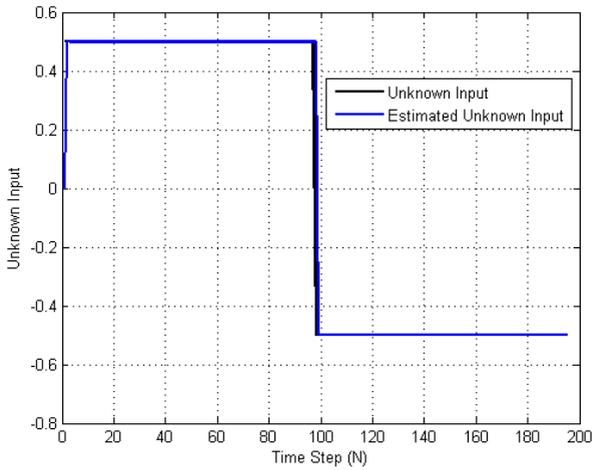
input yang besar berpengaruh pada sudut *yaw* gerak kapal. Gambar (4.10) adalah grafik estimasi kapal pada *unknown input*. Hasil grafik *unknown input* menunjukkan bahwa plot estimasi mengikuti pola plot nilai realnya. Hasil RMSE sebanyak 3 kali *running* dapat dilihat pada Tabel 4.8, sehingga didapatkan rata-rata RMSE sudut *yaw* 0.0370 dan rata-rata RMSE *unknown input* 0.0057.

Tabel 4.8. Nilai RMSE Simulasi Numerik I

RMSE	I	II	III
x_3	0.0370	0.0370	0.0370
d	0.0057	0.0057	0.0057



Gambar 4.9. Estimasi Sudut *Yaw*



Gambar 4.10. Estimasi *Unknown Input*

Dari simulasi I hingga simulasi V menghasilkan nilai RMSE estimasi sudut *yaw* yang lebih besar daripada hasil RMSE estimasi *unknown input*. Hasil RMSE diberikan pada Tabel 4.9 sebagai berikut.

Tabel 4.9. Nilai RMSE Simulasi I-Simulasi V

RMSE	Simulasi I	Simulasi II	Simulasi III	Simulasi IV	Simulasi V
x_3	0.0047	0.0048	0.0068	0.0075	0.0370
d	0.0006	0.0006	0.0039	0.0050	0.0057

BAB V

PENUTUP

Pada bab ini berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan serta saran dari penulis agar penelitian dapat dikembangkan lebih baik.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian disimpulkan bahwa:

1. Metode *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input* (KF-UMV-UI) ketika digunakan untuk mengestimasi model dinamika Kapal Perang Korvet Kelas SIGMA 2 *Degree of Freedom* (DOF) dengan kovarian *noise* sistem dan kovarian *noise* pengukuran menghasilkan RMSE yang relatif kecil.
2. Metode *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input* (KF-UMV-UI) ketika digunakan untuk mengestimasi model dinamika Kapal Perang Korvet Kelas SIGMA 2 *Degree of Freedom* (DOF) dengan kovarian *noise* sistem dan kovarian *noise* pengukuran yang diubah lebih besar secara bergantian maupun bersamaan menghasilkan RMSE yang lebih besar.
3. Metode *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input* (KF-UMV-UI) ketika digunakan untuk mengestimasi model dinamika Kapal Perang Korvet Kelas SIGMA 2 *Degree of Freedom* (DOF) dengan *unknown input* diubah lebih besar secara menghasilkan RMSE yang lebih besar dan perubahan terhadap hasil simulasi.
4. Hasil simulasi dari penerapan algoritma *Kalman Filter based Unbiased Minimum Variance Estimation with Unknown Input* (KF-UMV-UI) pada model dinamika Kapal Perang Ko-

rvet Kelas SIGMA 2 *Degree of Freedom* (DOF) memperlihatkan bahwa perubahan kovarian *noise* sistem, kovarian *noise* dan *unknown input* menyebabkan perubahan pola plot grafik. Ketika diubah menjadi nilai yang lebih besar maka terjadi pergeseran atau lonjakan pada pola plot grafik. Karena nilai-nilai itu berpengaruh terhadap gerak kapal.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya, sebagai berikut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kamilah,R. (2017). *Penerapan Extended Kalman Filter- Unknown Input- Without Direct Feedtrough (EKF-UI-WDF) pada Kapal dalam Misi Penembakan. Tugas Akhir.* Matematika FMKSD ITS. Surabaya.
- [2] Fossen T.I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles* ed. John Willey dan Sons.New York, USA.
- [3] Wardhani.D.E. (2018). *Kendali Kestabilan Kapal Korvet Kelas Sigma dalam Misi Penembakan Menggunakan Model Predictive Control (MPC). Tugas Akhir.* Matematika FMKSD ITS. Surabaya.
- [4] Kementrian Pertahanan Negara Indonesia. (2017). *Bela Negara Sebagai Instrumen Revolusi Mental Menjaga Keutuhan Wilayah NKRI dan Menjaga Kedaulatan Bangsa Di Era Global.* <https://www.kemhan.go.id/belanegara/opini/bela-negara-sebagai-instrumen-revolusi-mental-menjaga-keutuhan-wilayah-nkri-dan-menjaga-kedaulatanbangsa-di-era-global>. diakses 23 Agustus 2019(13:35).
- [5] Katadata. (2019). *Berapa Jumlah Pulau di Indonesia?*.<https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2018/10/16/berapa-jumlah-pulau-di-indonesia>. diakses 23 Agustus 2019(14:00).
- [6] Kim.D.W. (2016). *A study on hydrodynamic coefficients estimation of modelling ship using system identification method.* Journal of the Korean Society of Marine Engineering Vol. 40 No. 10 pp. 935-941. ISSN 2234-8352.
- [7] Zheng.Z. (2019). *Unscented Kalman Filter-based Unbiased Minimum-Variance Estimation for Nonlinear Sys-*

tems with Unknown Inputs. IEEE SIGNAL PROCESSING LETTERS:1-5.

- [8] Pan.S. (2011). *The Study of Joint Input and State Estimation with Kalman Filtering*. Transactions of the Institute of Measurement and Control(33). 8:901–918.
- [9] Subiono. 2013. *Sistem Linear dan Kontrol Optimal*. Version 2.1.1. Subiono. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.Surabaya.
- [10] Welch G dan G.Bishop. 2006. *An Introduction to the Kalman Filter*. University of North Carolina at Chapel Hill.
- [11] Gillinjs.S. (2007). *Unbiased minimum-variance input and state estimation for linear discrete-time systems with direct feedthrough*. Automatica(43):934 – 937.
- [12] Asfihani.T, Subchan, D.Adzkiyah, D.M.Rosyid, H.Purnawan dan R.Kamilah. (2017). *Estimation of The Corvette SIGMA Motion in Missile Firing Mission*. 5th International Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA) Yogyakarta.August 9-11:203-207.

BIODATA PENULIS

Penulis bernama Agretta Ertifari Hermawan, lahir di Surabaya 07 Juli 1997. Jenjang pendidikan formal yang ditempuh oleh penulis dimulai dari TK Teladan Pertiwi (2001-2003), SDN BARATAJAYA (2003-2009), SMP Negeri 39 Surabaya (2009-2012), SMA Negeri 9 Surabaya (2012-2015). Setelah lulus dari SMA Negeri 9 Surabaya penulis melanjutkan studi ke jenjang S1 di Departemen Matematika FMKSD ITS pada tahun 2015-sekarang melalui jalur SNMPTN dengan NRP 0611154000030.



Di Departemen Matematika FMKSD ITS penulis mengambil Bidang Minat Matematika Terapan dibagian Laboratorium Pe-modelan. Selain aktif kuliah, penulis juga aktif berorganisasi dan mengikuti kepanitiaan yang ada di ITS. Untuk organisasi yang diikuti penulis yaitu menjadi staff Departemen Hubungan Luar BEM FMIPA ITS (Badan Eksekutif Mahasiswa) (2016-2017), menjadi staff Departemen External Affair HIMATIKA ITS (Himpunan Mahasiswa Matematika ITS) (2016-2017) dan menjadi Kepala Departemen External Affair HIMATIKA ITS (Himpunan Mahasiswa Matematika ITS) (2017-2018). Untuk kepanitiaan yang diikuti penulis yaitu menjadi staff sie Public Relation Ini Lho ITS 2016, Ketua Divisi Forum Daerah Public Relation Ini Lho ITS 2017, Wakil Ketua Sie Konsumsi GERIGI ITS 2016, Ketua Divisi Materi dan Metode GERIGI ITS 2017 yang merangkap sebagai Konseptor GERIGI ITS 2017 juga. Dan pada semester 6, penulis melaksanakan Kerja Praktek di Pusat Teknologi Penerbangan LAPAN Rumpin, Bogor di Laboratorium Avionik pada tahun 2018.