TUGAS AKHIR - KM184801

MOVING HORIZON ESTIMATION-MODEL PREDICTIVE CONTROL (MHE-MPC) UNTUK DESAIN KENDALI KAPAL AUTOPILOT

ANGGI NURINDA PRATIWI
06111640000116

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

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

TUGAS AKHIR - KM184801

MOVING HORIZON ESTIMATION - MODEL PREDICTIVE CONTROL (MHE - MPC) UNTUK DESAIN KENDALI KAPAL AUTOPILOT

ANGGI NURINDA PRATIWI
NRP 06111640000116

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

DEPARTEMEN MATEMATIKA
Fakultas SAINS DAN ANALITIKA DATA
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

FINAL PROJECT - KM4801

MOVING HORIZON ESTIMATION - MODEL PREDICTIVE CONTROL (MHE - MPC) FOR UNMANNED SHIP DESIGN CONTROL

ANGGI NURINDA PRATIWI
NRP 06111640000116

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

DEPARTMENT OF MATHEMATICS
Faculty of SCIENCE AND DATA ANALYTIC
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2020

LEMBAR PENGESAHAN

MOVING HORIZON ESTIMATION-MODEL PREDICTIVE CONTROL (MHE-MPC) UNTUK DESAIN KENDALI KAPAL AUTOPILOT

MOVING HORIZON ESTIMATION - MODEL PREDICTIVE CONTROL (MHE - MPC) FOR UNMANNED SHIP DESIGN CONTROL

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 :
ANGGI NURINDA PRATIWI
NRP. 06111640000116

Menyetujui,

Dosen Pembimbing II,	DosenPembimbing I,
Subchan, Ph.D	Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si
NIP. 19710513 199702 1 001	NIP. 19870728 201404 2 001

Mengetahui,
Kepala Departemen Matematika
FSAD ITS

Subchan, Ph.D
NIP. 19710513 199702 1 001
Jakarta, 17 Agustus 2020

MOVING HORIZON ESTIMATION - MODEL PREDICTIVE CONTROL (MHE - MPC) UNTUK DESAIN KENDALI KAPAL AUTOPILOT

Nama Mahasiswa	:	Anggi Nurinda Pratiwi
NRP	:	06111640000116
Jurusan	:	Matematika FSAD-ITS
Pembimbing	:	1. Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si
		2. Subchan, M.Sc, Ph.D

Abstrak

Penelitian ini membahas tentang desain kendali kapal autopilot dengan mempertimbangkan tiga derajat kebebasan yaitu sway, yaw, roll dan model matematika yang digunakan linear. Autopilot memberikan sebuah kemudahan bagi sang nahkoda kapal dan meminimalisir human error, permasalahan dalam kontrol kendali kapal yang dibahas adalah kontrol sudut kendali haluan kapal. Kontrol input yang diamati adalah rudder, bermaksud agar gerak kapal dapat mengikuti skenario yang diminta. Pada penelitian ini metode estimate yang dipilih adalah Moving Horizon Estimation (MHE) untuk mendapatkan state yang jauh lebih akurat. Kerja MHE yang dipadukan dengan Model Predictive Control (MPC) berfungsi untuk menstabilkan gerak kapal autopilot dan mengendalikan agar tetap mengikuti skenario yang dibuat. Pengaplikasian metode MHE dan MPC pada penelitian ini dapat memberikan hasil kuantitatif dan meningkatkan tingkat akurasi pergerakan kapal. Berdasarkan hasil simulasi, estimator yang dirancang mampu memberikan nilai estimasi pada kelima variabel. Sekitar detik ke-425 kecepatan yaw, sudut yaw, dan sudut rudder dapat bergerak mengikuti ke-4 skenario.

Kata kunci : *Moving Horizon Estimation, Model Predictive Control, Desain Kendali Kapal Autopilot*

MOVING HORIZON ESTIMATION - MODEL PREDICTIVE CONTROL (MHE - MPC) FOR UNMANNED SHIP DESIGN CONTROL

Name	:	Anggi Nurinda Pratiwi
NRP	:	06111640000116
Department	:	Mathematics FSDA-ITS
Supervisors	:	1. Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si 2. Subchan, M.Sc, Ph.D

Abstract

This research discusses about the autopilot ship control design by considering three degrees of freedom,sway, yaw, roll and the mathematical model used is linear. Autopilot provides convenience for the ship's captain and minimizes human error, the problem in ship control that is discussed is control of the ship's bow control angle. The input control observed is rudder, meaning that the ship's motion can follow the scenario requested. In this study, the estimate method chosen is Moving Horizon Estimation (MHE) to obtain a much more accurate state. The work of MHE and Model Predictive Control (MPC) which functions to stabilize the motion of the autopilot ship and control it so that it follows the scenario created. The application of the MHE and MPC methods in this study can provide quantitative results and increase the accuracy of ship movements. Based on the simulation results, the designed estimator is able to provide estimated values for the five variables. Around 425 seconds yaw speed, yaw angle and rudder angle can move according to all 4 scenarios.

Keyword: *Moving Horizon Estimation, Model Predictive Control, Autopilot Ship Full Design*

KATA PENGANTAR

Special Thank's To Maha Suci Allah, dzat yang Maha Kuasa atas segala sesuatu. Sebesar apapun masalah adalah kecil dihadapanNya. Segala puji hanya bagi Allah atas pertolongan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul

MOVING HORIZON ESTIMATION - MODEL PREDICTIVE CONTROL (MHE - MPC) UNTUK DESAIN KENDALI KAPAL AUTOPILOT

Penyelesaian penulisan Tugas Akhir ini tidak lepas dari orang-orang terdekat penulis yang telah mendukung dan memotivasi penulis. Oleh sebab itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ayah dan Ibu penulis yang selalu memberikan doa, semangat, dan dukungan dalam ibadah menuntut ilmu yang ditempuh oleh penulis selama ini.

2. Subchan, M.Sc, Ph.D sebagai Kepada Departemen Matematika, Fakultas Sains dan Analitika Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember sekaligus sebagai dosen pembimbing 2 penulis.

3. Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si sebagai dosen pembimbing 1, yang telah memberikan banyak saran kepada penulis hingga menyelesaikan Tugas Akhir ini.

4. Mbak Puput dan Mas Heri yang telah berkenan meluangkan waktunya dan bantuan selama mengerjakan Tugas Akhir.

5. Teman-teman penulis terkhusus untuk Farhan Hafiz yang telah menemani hari-hari penulis selama menuntut ilmu.

6. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i

ABSTRAK vii

ABSTRACT ix

KATA PENGANTAR xi

DAFTAR ISI xiii

DAFTAR GAMBAR xv

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 4

1.3 Batasan Masalah 4

1.4 Tujuan Penelitian 4

1.5 Manfaat Penelitian 5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 2

2.1 Penelitian Terdahulu 2

2.2 Model Dinamik dan Kinematik Kapal 3 DOF 6

2.3 Linearisasi Persamaan Diferensial 13

2.4 Diskritisasi Sistem 16

2.5 Moving Horizon Estimation 17

2.6 Model Predictive Control Linear 20

2.6.1 Diagram Blok dan Skema MPC 20

2.6.2 Desain MPC 22

BAB III METODE PENELITIAN 27

3.1 Studi literatur 27

3.2 Pengkajian model sistem dinamika kapal 27

3.3 Penerapan model MPC pada kontrol haluan kapal 27
3.4 Estimasi *state* dengan MHE 28
3.5 Simulasi desain sistem kendali MHE-MPC . . 28
3.6 Analisis hasil simulasi 28
3.7 Penulisan Laporan Tugas Akhir 29

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN 32
4.1 Model Matematika Dinamika Kapal Non-Linear 32
4.2 Linearisasi Model Dinamika Kapal 35
4.3 Diskritisasi Model Dinamika Kapal 39
4.4 Uji Keterkontrolan dan Keteramatan 44
4.5 Desain MPC 46
4.6 Desain Estimasi MHE 50
4.7 Desain Sistem Kendali MHE-MPC 53
4.8 Simulasi MHE-MPC 56
4.8.1 Hasil Simulasi dan Analisis Penerapan MHE-MPC 58

BAB V PENUTUP 67
5.1 Kesimpulan 67
5.2 Saran 67

DAFTAR PUSTAKA 70

BIODATA PENULIS 75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gerak Dinamik Kapal 7
Gambar 2.2 Bingkai Referensi XYZ dan $X_0Y_0Z_0$ . . . 9
Gambar 2.3 Diagram Blok MHE 17
Gambar 2.4 Strategi Horizon Bergerak: Panjang horizon dan pergerakan jendela horizon 19
Gambar 2.5 Diagram Blok MPC 21
Gambar 2.6 Skema Metode MPC, *Prediction Horizon* 21

Gambar 3.1 Diagram Alir MHE-MPC 30

Gambar 4.1 Kendali Haluan Kapal dan Sudut Kemudi 33
Gambar 4.2 Diagram Blok MHE-MPC 54
Gambar 4.3 Hasil Estimasi Skenario 1 58
Gambar 4.4 Hasil Estimasi Skenario 2 59
Gambar 4.5 Hasil Estimasi Skenario 3 60
Gambar 4.6 Hasil Estimasi Skenario 4 61
Gambar 4.7 MHE-MPC Berdasarkan Skenario 1 . . . 62
Gambar 4.8 MHE-MPC Berdasarkan Skenario 2 . . . 63
Gambar 4.9 MHE-MPC Berdasarkan Skenario 3 . . . 64
Gambar 4.10 MHE-MPC Berdasarkan Skenario 4 . . . 65

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 : Penelitian Terdahulu
' Tabel 4.1 : Nilai Parameter dan Koefisien Hidrodinamika

DAFTAR SIMBOL

m	massa kapal
I_x	momen inersia x
I_z	momen inersia z
x_G	posisi x terhadap *center of gravity* (CG) kapal
z_G	posisi z terhadap *center of gravity* (CG) kapal
Y_{hyd}	gaya dan momen *sway* dari komponen hidrodinamika
K_{hyd}	gaya dan momen *roll* dari komponen hidrodinamika
N_{hyd}	gaya dan momen *yaw* dari komponen hidrodinamika
$Y_{\delta r}\delta r$	gaya dan momen *sway* dari *rudder*
$K_{\delta r}\delta r$	gaya dan momen *roll* dari *rudder*
$N_{\delta r}\delta r$	gaya dan momen *yaw* dari *rudder*
$Y_{\dot{v}}$	koefisien gaya *sway* pada v
$Y_{\dot{p}}$	koefisien gaya *sway* pada p
$Y_{\dot{r}}$	koefisien gaya *sway* pada r
$K_{\dot{v}}$	koefisien gaya *roll* pada v
, $K_{\dot{p}}$	koefisien gaya *roll* pada p
$N_{\dot{v}}$	koefisien gaya *yaw* pada v
$N_{\dot{r}}$	koefisien gaya *yaw* pada r
u,v,p,r	variabel-variabel gerak yang mana arahnya didefinisikan dalam Gambar 2.1.
Y_{uv}	turunan gaya *sway* terhadap u dan v pada sumbu x dan y
Y_{ur}	turunan gaya *sway* terhadap u dan r pada sumbu x dan z
Y_{vr}	turunan gaya *sway* terhadap v dan r pada sumbu y dan z
τ_{hyd}	gaya-gaya hidrodinamika terhadap gaya *sway* Y (Seterusnya τ_{hyd} akan ditulis dengan simbol Y_{hyd})
τ_{hs}	gaya hidrostatis atau gaya normal dari kapal dengan gerak *sway*
τ_{eks}	gaya eksternal

$Y_{\phi\phi\phi}$	turunan gaya *sway* terhadap ϕ pada sumbu x
Y_v	turunan gaya *sway* terhadap v pada sumbu y
Y_r	turunan gaya *sway* terhadap r pada sumbu z
Y_p	turunan gaya *sway* terhadap p pada sumbu x
ρ	massa jenis air laut
g	konstanta gravitasi
∇	volume *displacement*
$GZ(\phi)$	metacenter
A_R	Luas Rudder
C_L	Koefisien gaya angkat
Φ	fungsi objektif
P, W	definit positif matriks diagonal MHE
N_H	horizon MHE
N_p	horizon MHE
$x(k\|k)$	vektor ruang keadaan yang berdimensi-n
$y(k\|k)$	vektor keluaran terukur yang berdimensi-m
$u(k\|k)$	vektor masukan berdimensi r
$\hat{y}(k\|k)$	output measurement
A	Matriks keadaan berdimensi n x n
B	Matriks input berdimensi n x m
C	Matriks output berdimensi m x n
Q, R	definit positif matriks diagonal MPC

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebuah kapal laut dalam melakukan pelayarannya membutuhkan suatu sistem pengendali gerak. Pengendalian ini digunakan untuk menjaga suatu kapal dalam lintasan tertentu. Dalam waktu 30 tahun terakhir ini terdapat suatu peningkatan dari permintaan terhadap akurasi dan keandalan yang lebih baik dari suatu sistem pengendali gerak. Pada kapal laut modern biasanya dilengkapi dengan sistem pengendali gerak yang baik. Sistem pengendali gerak tersebut memiliki tugas yang berbeda berdasarkan dari operasi yang dilakukan. Beberapa variabel yang dikendalikan meliputi posisi, kecepatan dan arah gerak kapal [15]. Indonesia adalah negara kepulauan terbesar di dunia yang terhimpit diantara dua samudra dan dua benua dengan luas total 1,904,569 km^2 yang memiliki komposisi luas daratan 1,811,569 km^2 dan luas perairan 93,000 km^2 [1]. Dengan daerah seluas itu dan kondisi geografis pulau yang terpisah-pisah dengan laut sehingga kapal merupakan salah satu pilihan tepat untuk transportasi industri ataupun patroli di wilayah laut.

Kapal didefinisikan sebagai alat yang bergerak pada permukaan laut yang memiliki 6 derajat kebebasan dalam bergerak yaitu *surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw* [2], akan tetapi pada penelitian ini variabel yang dikendalikan hanya dalam tiga derajat kebebasan yaitu *sway, yaw, roll* dengan asumsi gerak *surge, heave, pitch* tidak berpengaruh

pada manuver kapal. Banyak pendekatan yang dikenalkan dalam berbagai literatur, diantaranya pengendali *backstepping* yang digunakan pada wahana dalam air [3] dan untuk mengontrol kapal agar berada pada sebarang lintasan yang memungkinkan, serta pengendali *state* dan output *feedback* [4] yang digunakan untuk mengemudikan kapal permukaan *underactuated* mengikuti lintasan yang ada pada kecepatan maju konstan dengan mengabaikan gangguan lingkungan [5], penerapan metode Kalman Filter dalam sebagai estimator untuk mengestimasi variabel dinamik kapal [15] dan penelitian yang menerapkan *Model Predicitve Control (MPC)* sebagai model pengendali dengan menggunakan metode Akar Kuadrat-Unscented Kalman Filter (AK-UKF) untuk menambah keakuratan kendali yang sudah didapat dengan MPC [10].

Pada penelitian ini, penulis menggunakan *Model Predictive Control (MPC)* sebagai *controller* kapal autopilot. Pemilihan sistem algoritma MPC dikarenakan kendali ini dapat menangani sistem multivariabel, constraints selalu dicukupi, dan MPC bisa memprediksi output dari sistem. Penelitian ini difokuskan pada kendali input sudut *rudder* yang terjadi karena pergerakan kapal di lautan, *Degree of Freedom (DOF)* pada kapal dibatasi menjadi tiga yakni *sway,yaw,roll* dengan lainnya dianggap konstan, serta gangguan eksternal pada kapal diabaikan.

Untuk menambah keakuratan kendali yang sudah didapat dengan MPC, state model dan parameter model akan diestimasi dengan menggunakan metode *Moving Horizon Estimation (MHE)*, strategi MHE didasarkan pada penyelesaian masalah estimasi keadaan horizon terbatas pada setiap saat, yang terdiri dari masalah optimisasi

untuk meminimalkan perbedaan antara output yang diukur *(measurement output)* dan yang dihasilkan oleh model. Gagasan MHE berasal dari tahun 90-an, dan sifat teoretisnya dikembangkan pada tahun-tahun berikutnya untuk sistem linier [6], sistem nonlinier [7], dan sistem hibrida [8]. Dalam penelitian oleh M. Breckpot, T. Blanco Barjas, and B. De Moor, berjudul *Flood control of rivers with nonlinear model predictive control and moving horizon estimation* [9], strategi MHE digunakan untuk memperkirakan aliran dalam sistem sungai. Salah satu keunggulan MHE bahwa metode ini berlaku baik untuk persamaan linear maupun nonlinear sedangkan Kalman Filter hanya berlaku untuk persamaan linear, selain itu MHE cocok untuk penelitian ini karena model yang digunakan harus deterministik sedangkan Kalman Filter modelnya berbentuk stokastik. MHE memprediksi satu langkah ke depan dengan menggunakan data *measurement*, pada penelitian ini untuk mendapatkan data *measurement* yakni dengan menjumlahkan persamaan output sistem dengan noise.

Kontribusi utama dari Tugas Akhir ini adalah untuk menggabungkan metode MHE dan MPC dalam strategi kontrol output untuk masalah desain kendali kapal autopilot, dengan mengontrol sudut yaw dan memperhatikan pengendali rudder sebagai kendala input. Dengan menggunakan optimasi pada MHE-MPC maka disusun sebuah pengendali sehingga posisi kapal dapat mengikuti referensi yang diharapkan. Referensi yang diharapkan diatur dari pergerakan sudut yaw yakni dibuat 4 skenario :

1. Ketika kapal bergerak dari 30 deg menuju 0 deg
2. Ketika kapal bergerak dari -30 deg menuju 0 deg
3. Ketika kapal bergerak dari 0 deg menuju 30 deg

4. Ketika kapal bergerak dari 0 deg menuju -30 deg

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disajikan, rumusan masalah yang akan diselesaikan pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana algoritma MHE dalam mengestimasi gerak kapal?
2. Bagaimana hasil simulasi dari penerapan gabungan MHE-MPC pada kontrol kendali haluan kapal autopilot?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah :

1. Model gerak kapal yang digunakan adalah 3 DOF yaitu *sway, yaw, roll.*
2. Gangguan eksternal dan internal diabaikan.
3. Data parameter hidrodinamika berdasarkan pada penelitian [22].

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Mendapatkan hasil penerapan MHE pada kendali kapal autopilot.
2. Mendapatkan analisis hasil simulasi dari penerapan MHE-MPC pada suatu kapal autopilot.

1.5 Manfaat Penelitian

Dari penelitian Tugas Akhir ini, penulis mengharapkan agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi berbagai kalangan sebagai berikut :

1. Memberikan metode alternatif yang lebih baik pada kendali gerak kapal dengan menggunakan metode MHE-MPC.

2. Sebagai dasar penelitian terkait kontrol kendali kapal autopilot.

3. Bentuk kontribusi dalam pengembangan sistem kendali kapal autopilot.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

MPC telah banyak berkembang terutama dalam bidang industri, semakin banyak peneliti yang memiliki ketertarikan untuk mengangkat MPC sebagai bahan penelitian. Sebuah penelitian oleh Subchan dkk (2016) menerapkan *multi-agent MPC* untuk optimasi waktu hijau pada lalu lintas kota. Pada penelitian ini pengendali MPC mengontrol warna hijau pada pengaturan lampu lalu lintas agar panjang antrian di jalanan minimal dan tidak terjadi kemacetan. Model yang digunakan adalah jalanan 1 arah dengan 6 persimpangan dan 13 jalan. Pada di bidang lain yakni keuangan dilakukan oleh Wawan H.S dkk (2014), menggunakan pengendali MPC untuk menyelesaikan permasalahan optimasi portofolio saham dengan adanya kendala di dalam pembentukan portofolio saham. Data yang digunakan berupa 3 perusahaan yanng terhubung dalam *Jakarta Islamic Index (JII)*. Selain kedua bidang tersebut, tentunya sudah banyak sekali penelitian di sektor lain yang mengangkat metode MPC untuk menyelesaikan suatu masalah.

Gagasan MHE berasal dari tahun 90-an, dan sifat teoretisnya dikembangkan pada tahun-tahun berikutnya untuk sistem linier [6] berjudul *"Constrained linear state estimation a moving horizon approach"*, artikel ini membuktikan stabilitas untuk *moving horizon estimation* dan menganalisa hubungan antara masalah estimasi dan pendekatan *moving horizon*. Hubungan ini dianalisis menggunakan pemrograman dinamis maju dan

memungkinkan memperoleh kondisi yang memadai untuk stabilitas. Penerapan MHE dalam sistem nonlinier [7] seperti berikut ini yang berjudul *Moving Horizon Observer*, dalam peneitian ini pengamat menemukan sebuah pendekatan baru dalam sebuah masalah memperoleh kondisi estimate dari sistem nonlinier diusulkan berdasarkan metode optimasi yakni *receding horizon control.* Selanjutnya, MHE juga dapat digunakan dalam sistem hibrida [8] berjudul *"Constrained State Estimation for Nonlinear Discrete-Time Systems: Stability and Moving Horizon Approximations"* yang membahas teori umum untuk estimasi horizon bergerak atau *moving horizon estimation* yang terbatas. Tujuannya untuk mengembangkan algoritma praktis dari estimasi keadaan linier dan nonlinier terbatas juga digunakan untuk memberi penilaian terhadap manfaat dari estimasi yang dibatasi. Dalam [9], strategi MHE digunakan untuk memperkirakan aliran dalam sistem sungai.

Terkait dengan topik Tugas Akhir ini yang mengangkat sebuah kapal sebagai objek penelitian, MPC sejak dahulu sudah populer sebagai pengendali kemudi kapal dengan segala jenis kapal. Berikut adalah beberapa penelitian terdahulu terkait kontribusi MPC dalam bidang perkapalan. Pada thesis yang dilakukan oleh Heri Purnawan (2018) bahwa metode DC-MPC digunakan untuk kendali kapal perang pada penembakan misil dengan gangguan eskternal berupa *impact* misil diperhatikan dan kapal perang memiliki 4 DOF [17]. Tugas Akhir oleh Bayu A.R. (2017) metode yang digunakan adalah DC-MPC sebagai pengendali Lintasan Dubins untuk menjaga pergerakan kapal yang direpresentasikan oleh model dinamik kapal pada kondisi yang bergelombang, kapal yang diteliti berderajat kebebasan 2 yaitu *sway, yaw* [18]. Dalam sebuah penelitian yang berjudul *Penerapan Model Predictive Control (MPC) Pada Kapal Autopilot Dengan Lintasan*

Tertentu oleh Siti A.S. (2012) memecahkan permasalahan kendali kapal yakni *path following* dengan menggunakan pengendali MPC, kapal yang menjadi objek penelitian ini berjenis *underactuated* [11].

Selanjutnya oleh Tahiyatul dan Subchan (2012) dengan judul *Panduan Dan Kendali Kapal Tanpa Awak Dengan Menggunakan Metode Model Predictive Control (MPC) Dan Akar Kuadrat-Unscented Kalman Filter (AK-UKF)* membahas tentang kendali kapal tanpa awak menggunakan metode MPC sebagai pengendali posisi kapal agar dapat mengikuti lintasan yang diharapkan dan agar input kendali lebih akurat maka digunakan estimator Akar Kuadrat-Unscented Kalman Filter (AK-UKF) untuk mengestimasi *state* dan parameter model yang tidak pasti karena adanya gangguan [10]. Topik lainnya yang terkait dengan penerapan Kalman Filter pada kapal dilakukan oleh Nathanael, Aulia, dan Erna (2013) berjudul *Estimasi Variabel Dinamika Kapal Menggunakan Metode Kalman Filter.*, Kalman Filter dirancang sebagai estimator pada kondisi *noise* dari alat ukur, *noise* berasal dari sistem kapal dan ketidaktepatan dalam pemodelan. Metode Kalman Filter yang digunakan adalah metode Kalman Filter diskrit linier karena model dinamika kapal telah dilinierisai dan didiskritisasi terlebih dahulu dan pada penelitian ini variabel dinamik kapal yang diestimasi untuk keperluan *steering* adalah dinamika *sway-yaw* dengan variabel kecepatan sudut, posisi sudut dan kecepatan arah *sway* serta perancangan sistem berdasarkan spesifikasi kapal perang kelas SIGMA *Extended* [15]. Menurut Hanugra Aulia Sidharta, S.T., M.MT. selaku Dosen BINUS University menjabarkan beberapa keunggulan dari Kalman Filter yaitu mempunyai kemampuan untuk memprediksi apa yang akan terjadi, dan melakukan analisa korelasi antara berbagai macam data yang mungkin menurut anda tidak

berhubungan, ideal digunakan di dalam sistem yang berubah terus menerus dalam kondisi dinamis, penggunaan memori yang ringan, dikarenakan algoritma ini tidak memerlukan penyimpanan untuk data yang lampau. Tetapi penggunaan Kalman Filter ideal apabila digunakan untuk sistem linear, jika sistem nonlinear maka penggunaan Kalman Filter tidak disarankan karena hasilnya tidak optimum [19].

Berdasarkan Tabel 2.1 Penelitian-Penelitian Terdahulu, penulis mengusulkan Tugas Akhir tentang penerapan MHE-MPC untuk desain kendali kemudi kapal. Kapal yang diteliti mempunyai tiga *Degree of Freedom* (DOF) yakni *sway, yaw, roll*, gangguan eksternal diabaikan, dan sistem kemudi bersifat autopilot. Sistem kemudi dibuat autopilot agar dapat memperkecil kejadian *human error*. Penerapan MHE pada Tugas Akhir ini bertujuan sebagai estimator untuk mendapatkan hasil estimasi berupa *state* yang lebih baik dari inputan. Selanjutnya, pengendali MPC bertujuan untuk dapat memberikan hasil yang lebih baik agar kapal dapat begerak mengikuti referensi. Sehingga diharapkan desain kendali MHE-MPC dapat memberikan hasil yang maksimal dalam memecahkan masalah kemudi kapal autopilot agar bisa mengikuti referensi yang diinginkan.

Di bawah ini adalah tabel penelitian terdahulu :

Tabel 2.1 : Penelitian Terdahulu

No.	Judul	Penulis
1.	Distrubance Compensating Model Predictive Control Untuk Kendali Gerak Kapal Perang Dengan Misi Penembakan Misil	Heri Purnawan (2018)
2.	Kendali Sudut Pada Gerak Kapal Untuk Pelacakan Lintasan Dubins Menggunakan Model Distrubance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC)	Bayu Angga Riyanto (2017)
3.	Penerapan Multi Agent Model Predictive Control (MPC) Untuk Optimasi Waktu Hijau Pada Jaringan Lalu Lintas Perkotaan	Subchan dkk (2016)
4.	Penerapan Model Predictive Control (MPC) Pada Optimisasi Portofolio Saham	Wawan H.S., Subchan, Endah R. (2014)
5.	Estimasi Variabel Dinamik Kapal Menggunakan Metode Kalman Filter	Nathanael, Aulia, Erna (2013)
6.	Panduan Dan Kendali Kapal Tanpa Awak Dengan Menggunakan Metode Model Predictive Control (MPC) Dan Akar Kuadrat-Unscented Kalman Filter (AK-UKF)	Tahiyatu A, Subchan (2012)
7.	Penerapan Model Predictive Control Pada Kapal Autopilot Dengan Lintasan Tertentu	Siti, A.S., Kamiran, Subchan (2012)
8.	Penerapan Model Predictive Control (MPC) Pada Desain Pengendalian Robot Mobil Beroda Empat	Dimas Avian Maulana (2011)
9.	Flood Control Of Rivers With Nonlinear Model Predictive Control And Moving Horizon Estimation	M. Breckpot, T.Blanco Barjas, B.D Moor (2010)
10.	Constrained State Estimation For Nonlinear Discrete-Time System : Stability And Moving Horizon Approximations	Christopher V.R,. James B.R., David Q.M. (2003)
11.	Constrained Linear State Estimation a Moving Horizon Approac	Christopher V.R,. James B.R., Jay H.L. (2001)
12.	Moving Horizon Observers	H. Michalska, D.Q Mayne (1992)

2.2 Model Dinamik dan Kinematik Kapal 3 DOF

Model dinamik kapal merupakan suatu hasil dari ilmu statika dan dinamika. Dimana statika digunakan saat kapal mempertahankan posisinya dan bergerak dengan kecepatan konstan dan dinamika saat kapal melakukan akselerasi. Model matematika ini diawali dengan penemuan Archimedes terhadap gerakan hidrostatik yang menjadi dasar statika pada suatu kendaraan laut.

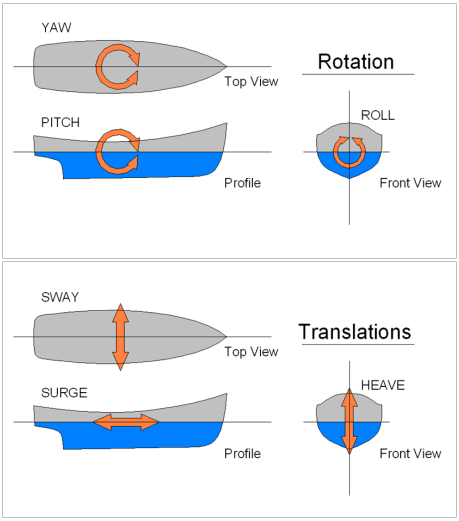
Secara umum gerakan yang dialami sebuah kapal ketika melaju di lautan ada dua macam, yaitu gerakan translasi dan rotasi seperti pada Gambar 2.1 di bawah ini [11].

Gerak translasi kapal dibagi menjadi tiga, yaitu:

1) *Surge* (maju/mundur)
2) *Sway* (kanan/kiri)
3) *Heave* (atas/ bawah)

Gerak rotasi kapal dibagi menjadi tiga, yaitu:

1) *Roll* (gerakan maju)
2) *Pitch* (gerakan memutar ke depan)
3) *Yaw* (gerakan memutar ke samping)



Gambar 2.1: Gerak Dinamik Kapal

Berdasarkan Gambar 2.1 [20], maka diperoleh definisi gerakan sebuah kapal adalah sebagai berikut:

surge	:	merupakan gerakan kapal sepanjang sumbu-X_0,
sway	:	merupakan gerakan kapal sepanjang sumbu-Y_0,
heave	:	merupakan gerakan kapal sepanjang sumbu-Z_0,
pitch	:	merupakan rotasi kapal terhadap sumbu-Y_0,
roll	:	merupakan rotasi kapal terhadap sumbu-X_0,
yaw	:	merupakan rotasi kapal terhadap sumbu-Z_0.

Umumnya persamaan model matematika dinamika Kapal

ini mengadaptasi Hukum 1,2,dan 3 Newton.

Berikut akan dijabarkan pengertian serta rumus dari Hukum-Hukum Fisika pada persamaan gerak kapal yang digunakan pada penelitian ini.

Hukum 2 Newton berbunyi : Jika benda dikenakan gaya maka resultan gaya akan mengalami percepatan, Nama lain dari Hukum 2 Newton juga disebut sebagai Hukum Momentum.

$$\sum F = ma$$

, di mana jika ruas kanan dan ruas kiri diturunkan terhadap t waktu, maka dapat ditulis sebagai berikut ini :

$$\sum F = ma = m\frac{da}{dt} = mv$$

Sehingga dapat ditulis rumus momentum sebagai berikut :

$$p = mv$$

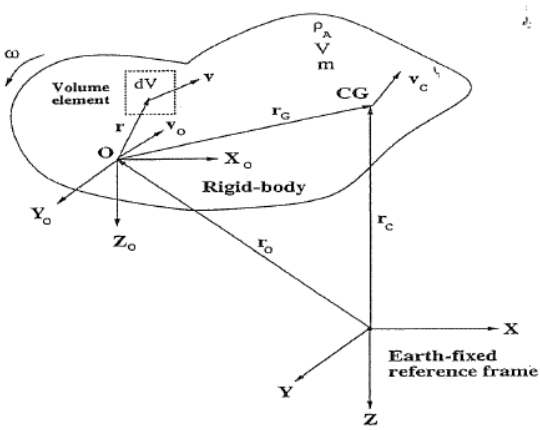
Hukum 3 Newton : Aksi Reaksi. Untuk setiap aksi pasti akan selalu ada gaya reaksi yang sama besar dan berlawanan arah, sehingga salah satunya harus di negatifkan.

$$\sum F_{aksi} = \sum F_{reaksi}$$

Moment Gaya atau Torsi adalah sebuah besaran yang menyatakan besarnya gaya yang bekerja pada sebuah benda sehingga mengakibatkan benda tersebut berotasi. Besarnya moment gaya (Torsi) bergantung pada gaya yang dikeluarkan serta jarak antara sumbu putaran dan letak gaya.

$$\tau = \vec{r}F = Ia = m\vec{r^2}a$$

$$\text{Koordinat } \textit{center of gravity } r_g = \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix}^T$$



Gambar 2.2: Bingkai Referensi XYZ dan $X_0Y_0Z_0$

$$\text{Gaya} = [X, Y, Z]^T$$
$$\text{Moment Gaya } V = [u, v, w]^T$$
$$\text{Kecepatan Angular } \omega = [p, q, r]^T$$

Untuk mendapatkan persamaan gerak dalam sistem koordinat pada Gambar 2.2 membutuhkan rumusan :

$$\dot{c} = c^\circ + \omega \times c$$

merupakan turunan waktu terhadap sembarang vector c di XYZ dan $X_0Y_0Z_0$. Dimana $\dot{c}$ adalah turunan waktu di XYZ dan c° adalah turunan waktu di $X_0Y_0Z_0$.

Mengaplikasikan Hukum 2 Newton dan Gambar 2.2 [20]

untuk mendapatkan model matematika gerak translasi kapal.

$$
\begin{aligned}
r_c =& r_0 + r_g \\
v_c =& \dot{r_c} = \dot{r_0} + \dot{r_g} \\
v_0 =& \dot{r_0} \\
r_g^{\circ} =& 0 \\
\dot{r_g} =& r_g^{\circ} + \omega \times r_g = \omega \times r_g \\
v_c =& v_0 + \omega \times r_g \\
\dot{v_c} =& \dot{v_0} + \dot{\omega} \times r_g + \omega \times \dot{r_g} \\
& v_0 + \omega \times r_g \\
\dot{v_c} =& \dot{v_0} + \dot{\omega} \times r_g + \omega \times \omega \times r_g
\end{aligned}
$$

menyesuaikan dengan Tugas Akhir ini, maka $v_0 = V$

$$a = \dot{V} + \omega \times V + \dot{\omega} \times r_g + \omega \times \omega \times r_g \tag{2.1}$$

$$\sum F = ma$$

$$\sum F = m(\dot{V} + \omega \times V + \dot{\omega} \times r_g + \omega \times \omega \times r_g) \tag{2.2}$$

dengan matriks ω yang ditulis sebagai berikut :

$$\omega = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

Kemudian diperoleh persamaan umum gerak translasi kapal :

$$
\begin{aligned}
X =& m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \\
Y =& m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] \\
Z =& m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})]
\end{aligned} \tag{2.4}
$$

Selanjutnya mendapatkan model matematika gerak rotasi kapal sebagai berikut ini [20]:

$$\sum M = H + m \times r_g \times (\dot{V} + \omega \times V) \tag{2.5}$$

dimana :

$$\begin{aligned}
H =& I\dot{\omega} + \omega \times I\omega^T \qquad (2.6)\\
I =& \int_{body} r_g^2 dm \\
=& \int_{body} [r \times r \times dm] \\
=& \int_{body} \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix} dm \\
=& \begin{bmatrix} \int(y^2+z^2)dm & -\int(xy)dm & -\int(xz)dm \\ -\int(xy)dm & \int(x^2+z^2)dm & -\int(yz)dm \\ -\int(xz)dm & -\int(yz)dm & \int(x^2+y^2)dm \end{bmatrix} \\
=& \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_z \end{bmatrix} \qquad (2.7)
\end{aligned}$$

I_x, I_y, I_z adalah moment inersia. I_{xy}, I_{xz}, I_{yz} adalah hasil kali inersia.

Jika kapal simetris terhadap sebuah sumbu maka hasil kali inersia akan sama dengan nol, sehingga matriks inersia berbentuk sebagai berikut [20] :

$$I = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

Berikut ini diperoleh persamaan umum gerak rotasi kapal

$$\begin{aligned} K =& I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \\ M =& I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] \\ N =& I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] \end{aligned} \tag{2.9}$$

Simbol *dot* diatas variabel gerak menotasikan turunan terhadap waktu. ϕ dan ψ masing-masing menotasikan sudut *roll* dan sudut *yaw*.

Pada penelitian ini, model matematika untuk sistem persamaan gerak kapal dibentuk dengan mempertimbangkan tiga derajat kebebasan dengan mengabaikan gerak translasi *heave* dan gerak rotasi *pitch* maka w dan $r = 0$ serta besar koordinat $y_G = 0$. Model matematika dalam penelitian ini didefinisikan sebagai berikut [22] pada persamaan (2.10) dan persamaan sudut (2.11)

$$\begin{aligned} (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - (mz_G + Y_{\dot{p}})\dot{p} + (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} &= -mur + Y_{hyd} + Y_{\delta r}\delta r \\ -(mz_G + K_{\dot{v}})\dot{v} + (I_x - K_{\dot{p}})\dot{p} &= mz_G ur + K_{hyd} + K_{\delta r}\delta \\ (mx_G + N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} &= mx_G ur + N_{hyd} + N_{\delta r}\delta r \end{aligned} \tag{2.10}$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= p \\ \dot{\psi} &= r\cos\phi \end{aligned} \tag{2.11}$$

$\dot{\psi}$ dan $\dot{\phi}$ secara berturut-turut adalah laju perubahan sudut yaw dan sudut roll, serta p adalah kecepatan roll dan r adalah kecepatan yaw. Sudut kendali kapal (δr) dikendalika agar sudut haluan kapal (ψ) sesuai dengan referensi, maka diperlukan model kinematika berdasarkan persamaan (2.11).

Gaya dan Moment Hidrodinamika mengadaptasi dari hukum momentum dan kekekalan massa. Hidrodinamika ialah

ilmu yang mengkaji fenomena gerak kapal pada fluida yang dinamis. Hidrodinamika dapat diidentifikasi sebagai jumlahan dari 3 komponen gaya baru, yaitu :

1. massa tambahan akibat inersia dari fluida sekitarnya
2. redaman potensial radiasi atau induksi akibat energi yang dibawakan dari gelombang
3. gaya restoring akibat dari gaya archimedes berupa berat dan gaya apung kapal

dimana pada Persamaan (2.10) komponen gaya dan momen hidrodinamika diberikan sebagai berikut [22]:

$$\begin{aligned}
Y_{hyd} &= Y_{u|v|}u|v| + Y_{ur}ur + Y_{v|v|}v|v| + Y_{r|v|}r|v| + \\
&\quad Y_{\phi|uv|}\phi|uv| + Y_{\phi|ur|}\phi|ur| + Y_{\phi uu}\phi u^2 \\
K_{hyd} &= K_{u|v|}u|v| + K_{ur}ur + K_{v|v|}v|v| + K_{r|v|}r|v| + \\
&\quad K_{\phi|uv|}\phi|uv| + K_{\phi|ur|}\phi|ur| + K_{\phi uu}\phi u^2 + \\
&\quad K_{|u|p}|u|p + K_{p|p|}p|p| + K_p p + K_{\phi\phi\phi}\phi^3 - \\
&\quad \rho g \nabla GZ(\phi) \\
N_{hyd} &= N_{u|v|}u|v| + N_{|u|r}|u|r + N_{r|r|}r|r| + N_{r|v|}r|v| + \\
&\quad N_{\phi|uv|}\phi|uv + N_{\phi u|r|}\phi|ur| + N_p p + N_{|p|p}|p|p + \\
&\quad N_{|u|p}|u|p + N_{\phi u|u|}\phi u|u|
\end{aligned}$$

Nilai $K_{\delta r} = I_{\delta z} Y_{\delta r}$ dan $N_{\delta r} = l_{\delta x} Y_{\delta r}$. Untuk nilai gaya rudder $Y_{\delta r}$ dihitung dengan persamaan berikut [23]:

$$Y_{\delta r} = \frac{1}{4\delta stall}\pi C_L A_R U^2$$

Pergerakan kapal dikontrol sehingga kapal dapat mencapai sudut haluan yang diinginkan, maka diperlukan variabel input sudut rudder. Rudder mempunyai kemampuan dalam menjaga arah sesuai dengan perintah dari sinyal kendali [20].

2.3 Linearisasi Persamaan Diferensial

Linearisasi merupakan proses membawa suatu sistem nonlinear menjadi sistem linear. Linearisasi dilakukan pada

sistem nonlinear untuk mengetahui perilaku sistem disekitar titik ekuilibrium sistem tersebut. Linearisasi pada sistem nonlinear dimaksudkan untuk memperoleh aproksimasi yang baik.

Diberikan sistem persamaan diferensial nonlinear [25]:

$$\begin{aligned}
\frac{dx_1}{dt} &= f(x_1, x_2, \cdots, x_n, u_1, u_2, \cdots, u_m) \\
\frac{dx_2}{dt} &= f(x_1, x_2, \cdots, x_n, u_1, u_2, \cdots, u_m) \\
&\vdots \\
\frac{dx_n}{dt} &= f(x_1, x_2, \cdots, x_n, u_1, u_2, \cdots, u_m)
\end{aligned} \tag{2.12}$$

dengan asumsi bahwa fungsi-fungsi $f_i, i = 1, 2, \cdots, n$ dapat diturunkan secara kontinu. Sistem persamaan diferensial (2.12) dapat direpresentasikan dalam bentuk vektor sebagai berikut:

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

diberikan $u_e = [u_{1e}, u_{2e}, \cdots, u_{me}]^T$ merupakan input konstan yang menjadikan sistem (2.13) mempunyai keadaan setimbang $x_e = [x_{1e}, x_{2e}, \cdots, x_{ne}]^T$, sehingga u_e dan x_e memenuhi :

$$f(x_e, u_e) = 0$$

Didefinisikan keadaan setimbang yaitu

$$x = x_e + \Delta x \tag{2.14}$$

$$u = u_e + \Delta u \tag{2.15}$$

dengan menggunakan espansi Taylor

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= f(x_e + \Delta x, u_e + \Delta u) \\ &= f(x_e, u_e) + \frac{\partial f}{\partial x}(x_e, u_e)\Delta x + \frac{\partial f}{\partial u}(x_e, u_e)\Delta u + \cdots\end{aligned}$$

dimana

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x_e, u_e) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{|x=x_e, u=u_e}$$

$$\frac{\partial f}{\partial u}(x_e, u_e) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial u_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial u_n} \end{bmatrix}_{|x=x_e, u=u_e}$$

merupakan matriks Jacobian dari f terhadap x dan u, dihitung pada titik setimbang, $[x_e^T u_e^T]$. Karena x_e konstan, maka

$$\frac{d}{dt}x = \frac{d}{dt}x_e + \frac{d}{dt}\Delta x = \frac{d}{dt}\Delta x$$

Dengan mengambil turunan pertama dari deret Taylor, maka diperoleh pendekatan linier sebagai berikut:

$$\Delta\dot{x} = A\Delta x + B\Delta u$$

dengan

$$A = \frac{\partial f}{\partial x}(x_e, u_e) \tag{2.16}$$

$$B = \frac{\partial f}{\partial u}(x_e, u_e) \tag{2.17}$$

2.4 Diskritisasi Sistem

Dalam kontrol pada persamaan waktu kontinu, kita perlu mengubah persamaan ruang keadaan waktu kontinu menjadi persamaan ruang keadaan waktu diskrit [26].

Pertama-tama meninjau matriks eksponensial yang didefinisikan sebagai berikut ini:

$$\begin{aligned} e^{At} &= I + At + \frac{1}{2!}A^2t^2 + \frac{1}{3!}A^3t^3 + \cdots + \frac{1}{n!}A^nt^n + \cdots \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A^nt^n}{n!} \end{aligned}$$

Diberikan persamaan keadaan waktu kontinu sebagai berikut ini:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

Selanjutnya digunakan notasi kT dan $(k+1)T$ sebagai pengganti dari k dan $k+1$. Penyajian waktu diskrit akan mempunyai bentuk sebagai berikut:

$$x((k+1)T) = A_d(T)x(kT) + B_d(T)u(kT)$$

Terlihat bahwa matriks A_d dan B_d bergantung pada waktu sampling T. Selanjutnya untuk menentukan A_dT dan B_dT, dengan mengalikan e^{At} dikedua sisi dan diperoleh :

$$\begin{aligned} e^{-At}\dot{x}(t) &= e^{-At}Ax(t) + e^{-At}Bu(t) \\ e^{-At}\dot{x}(t) - e^{-At}Ax(t) &= e^{-At}Bu(t) \\ \frac{d}{dt}(e^{-At}x(t)) &= e^{-At}Bu(t) \\ e^{-At}x(t) &= x(0) + e^{-At}\int_0^t e^{-Av}Bu(v)dv \\ x(t) &= e^{At}x(0) + e^{At}\int_0^t e^{-Av}Bu(v)dv \end{aligned}$$

substitusi $t = kT$ diperoleh :

$$x((kT)) = e^{AkT}x(0) + e^{AkT}\int_0^{kT} e^{-Av}Bu(v)dv$$

dan

$$x((k+1)T) = e^{A(k+1)T}x(0) + e^{A(k+1)T}\int_0^{(k+1)T} e^{-Av}Bu(v)dv$$
$$= e^{AT}x(kT) + e^{A(k+1)T}\int_{kT}^{(k+1)T} e^{Av}Bu(v)dv$$

dengan $\lambda = T - v$ diperoleh:

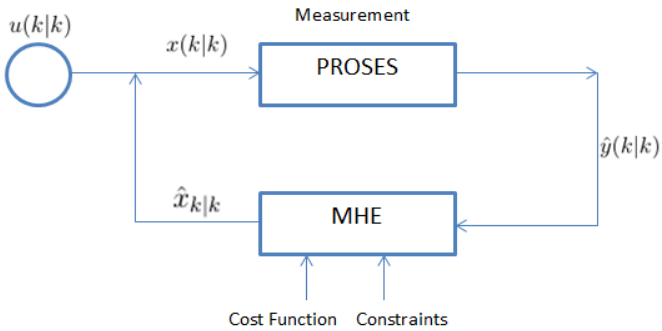
$$x((k+1)T) = e^{AT}x(kT) + \int_0^T e^{A\lambda}Bu(kT)d\lambda$$

Maka diperoleh:

$$A_d(T) = e^{AT}$$
$$B_d(T) = (\int_0^T e^{A\lambda}d\lambda)B$$

2.5 Moving Horizon Estimation

Diagram blok dari MHE dapat diilustrasikan berdasarkan Gambar 2.3 sebagai berikut ini:



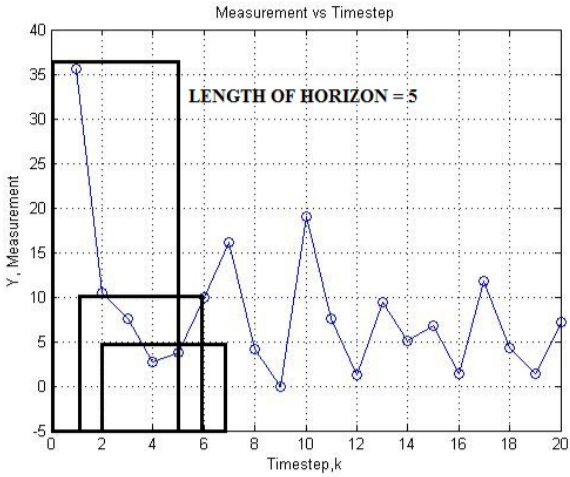
Gambar 2.3: Diagram Blok MHE

Berdasarkan Gambar 2.3, data parameter baik dalam sistem maupun model sudah diketahui besar nilainya. Input measurement masuk ke dalam suatu sistem untuk didapatkan sebuah output measurement dan *state measurement*. Input prediktif masuk kedalam suatu model untuk didapatkan sebuah output prediktif dan *state predictive*. Hal ini beriterasi terus menerus sesuai dengan N_{MHE} atau banyaknya iterasi dalam MHE. Selisih antara kedua *state* disebut sebagai bias atau *error*. Iterasi bisa dihentikan jika *error* yang diperoleh sangat kecil atau lebih kecil dari sebelumnnya karena jika *error* kecil dapat dikatakan hasil adalah optimum.

Dalam teori kontrol, observer keadaan (estimator) adalah sebuah sistem yang mengestimasi *state* yang diberikan oleh sistem real, yakni hasil pengukuran sebuah input dan output sistem real. *Moving Horizon Estimation (MHE)* merupakan pendekatan optimasi yang menggunakan serangkaian pengukuran yang diamati dari waktu ke waktu dan menghasilkan estimasi dalam penelitian ini yakni *state*, MHE memerlukan pendekatan berulang yang bergantung pada pemrograman linier atau pemrograman nonlinier untuk menemukan solusi. Strategi dasar MHE adalah merumuskan kembali masalah estimasi sebagai program kuadratik dengan menggunakan jendela horizon *(horizon window)*. Ketika pengukuran baru tersedia, pengukuran lama akan dibuang dan optimasi baru diselesaikan untuk memperkirakan kondisi baru sistem. Di bawah ini adalah gambar MHE terkait *estimation window*.

Pada Gambar 2.4 panjang horizon dianggap 5 langkah waktu. Pergerakan jendela horizon sehubungan dengan setiap langkah waktu yang dijelaskan dalam tiga kotak.

Kelebihan MHE dengan metode lainnya adalah mampu menangani masalah optimisasi untuk model linear dan nonlinear yang terdapat constraint serta model yang lebih



Gambar 2.4: Strategi Horizon Bergerak: Panjang horizon dan pergerakan jendela horizon

kompleks [12]. Hal ini telah diterapkan dengan sukses dalam beberapa kasus di mana EKF gagal. MHE meminimumkan fungsi objektif dengan sebagai berikut ini, menggunakan model dengan nilai yang terukur :

$$J_N = min_{x,y} \sum_{i=k-N}^{k} \|\hat{y}(i) - y(x(i))\|_P^2 + \sum_{i=k-N}^{k-1} \|\hat{u}(i) - u(i)\|_W^2 \tag{2.18}$$

$$\text{dimana, } \|a\|_A^2 = a^T A a$$

Kendala :

$$\begin{gathered} x(k+j) = Ax(k+j-1|k) + Bu(k+j-1|k) \\ x^{min} \leq x_{N_H} \leq x^{max} \\ u^{min} \leq u_{N_H-1} \leq u^{max} \end{gathered}$$

Estimator MHE harus menyelesaikan masalah optimisasi ini beberapa kali hingga konvergensi tercapai atau waktu habis.

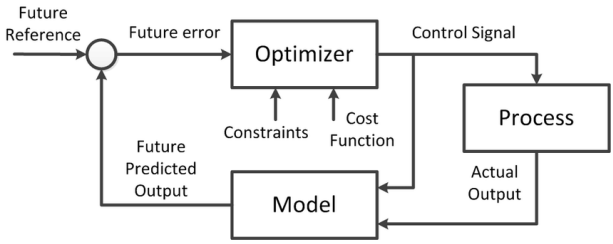
2.6 Model Predictive Control Linear

Konsep Model Predictive Control (MPC) telah dikenalkan pada tahun 80-an oleh Clarke, Mohtadi dan Tus hingga sampai sekarang menjadi sebuah strategi kendali yang banyak diterapkan pada proses industri. *Predictive control* ini memungkinkan *self tuning control* juga memiliki variabel kontrol yang minimum dan menggunakan algoritma *Generalize Predictive Control (GPC)*. Algoritma *Generalized Predictive Control* merupakan salah satu metode sistem kendali prediktif yang mampu beradaptasi dengan perubahan parameter sistem (pengendali adaptif) [13]. MPC memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan metode pengendali lainnya. Diantaranya yaitu mampu menangani sistem multivariabel, memiliki kemampuan untuk mengantisipasi peristiwa di masa depan dan dapat mengambil tindakan kontrol yang sesuai. MPC merupakan strategi mendesain suatu metode pengendalian untuk mendapatkan sinyal kendali yang optimal dengan cara meminimumkan suatu fungsi objektif.

2.6.1 Diagram Blok dan Skema MPC

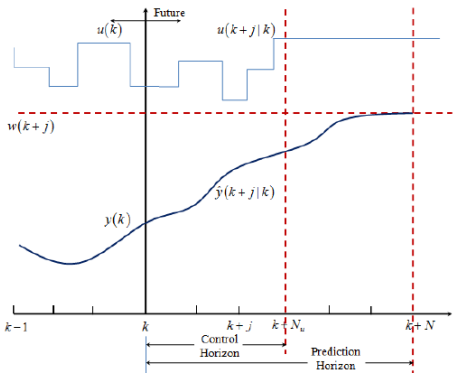
Diagram blok dari MPC dapat diilustrasikan dalam Gambar 2.5.

Berdasarkan Gambar 2.5 data input dan output pada saat k masuk ke dalam model, sehingga menghasilkan prediksi keluaran pada saat k. Selisih antara prediksi keluaran dengan referensi akan menghasilkan kesalahan yang disebut *future error*. *Future error* masuk ke dalam proses optimasi. Optimizer bekerja di dalam rentang kendala yang telah diberikan dengan meminimumkan fungsi objektif.



Gambar 2.5: Diagram Blok MPC

Fungsi objektif dibentuk dari kuadrat kesalahan antara sinyal prediksi keluaran dengan referensi. Dari proses optimasi tersebut akan menghasilkan input yang baru *(future input)*, kemudian hasil yang didapat disubstitusikan kembali ke model untuk menghasilkan prediksi keluaran yang baru. Perhitungan ini berlangsung terus menerus dan berulang sampai waktu yang telah ditentukan. Skema metode MPC dapat dijelaskan oleh Gambar 2.6.



Gambar 2.6: Skema Metode MPC, *Prediction Horizon*

Prediction horizon dalam MPC mengacu pada langkah

yang digunakan untuk memprediksi keluaran. Pada *prediction horizon* kendali masukan sebelumnya menjadi pedoman untuk menentukan prediksi kendali masukan yang akan digunakan untuk memprediksi keluaran selanjutnya. Dalam MPC, sinyal kendali (kontrol) mengalami perubahan setiap waktu, sehingga respon mampu menghasilkan nilai yang semakin baik pada sistem [13].

Berdasarkan Gambar 2.6, MPC didasarkan pada iterasi, optimasi prediksi yang berhingga *(finite horizon optimization)* dari model sistem. Pada waktu k nilai state dan input dijadikan sebagai sampel dan *optimizer* menghitung nilai $u(t)$ berdasarkan jumlah prediksi horizon p, kemudian hanya input pertama yang akan disubstitusikan ke dalam model sistem, untuk dilakukan proses optimasi berikutnya. Proses ini akan berlangsung sampai total waktu yang ditentukan.

Nilai sistem kendali $u(k|k)$ dikirim ke proses sedangkan nilai terprediksi berikutnya dibuang, karena pada cuplikan berikutnya keluaran $y(k+1)$ sudah diketahui nilainya. Maka langkah pertama diulang dengan nilai keluaran proses yang baru dan semua perhitungan diperbaiki. Nilai yang baru yakni $u(k+1|k+1)$ nilainya berbeda dengan $u(k+1|k)$, diperoleh dengan menggunakan konsep *receding horizon* atau kendali horizon berjalan, karena rentang prediksinya seakan-akan terus bergeser.

2.6.2 Desain MPC

Dalam pemodelan kali ini menggunakan persamaan diskrit dan linear. Persamaan diskrit yang digunakan adalah sebagai berikut ini :

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \tag{2.19}$$

$$y(k) = Cx(k) \tag{2.20}$$

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa tujuan dari algoritma MPC adalah meminimasi fungsi

objektif. Berikut adalah fungsi objektif kuadratik dalam algoritma MPC :

$$J(k) = \sum_{j=1}^{N_p} \|\hat{y}(k+j|k) - y(k+j|k)\|^2_{Q(i)} + \sum_{j=0}^{N_p-1} \|u(k+j-1|k)\|^2_{R(i)} \tag{2.21}$$

$$\text{dimana, } \|a\|^2_A = a^T A a$$

Batasan :

$$x(k+j|k) = Ax(k+j-1|k) + Bu(k+j-1|k) \tag{2.22}$$

$$x(k) = x(k|k) \tag{2.23}$$

$$Cx(k+j+1|k) \leq D \tag{2.24}$$

$$Su(k+j|k) \leq T \tag{2.25}$$

$$S\Delta u(k+j|k) \leq V \tag{2.26}$$

(2.22) adalah persamaan dinamik sistem yang digunakan untuk memprediksi keadaan yang akan datang, (2.24) dan (2.25) adalah kendala *state* dan *input*, matriks C, D, S, T , dan V adalah matriks-matriks pada pertidaksamaan kendala *state*, *input*, dan *increment input*. Selanjutnya $x(k+j|k), u(k+j|k), \Delta u(k+j|k)$ berturut-turut menyatakan *state*, *input*, dan *increment input* pada saat $k+j$ yang diamati pada saat k. Dengan diberikan informasi $x(k)$, prediksi variabel keadaan dapat diprediksi sebanyak prediksi horizon N_p. Berdasarkan persamaan (2.19) dinotasikan prediksi variabel *state* sebagai berikut :

$$
\begin{aligned}
x(k+1|k) =& Ax(k|k) + Bu(k|k) \\
x(k+2|k) =& Ax(k|k) + Bu(k|k) \\
=& A^2x(k) + ABu(k|k) + Bu(k+1|k) \\
& \vdots \\
x(k+N_p|k) =& Ax(k+N_p-1|k) + Bu(k+N_p|k) \\
=& A^2x(k) + A^{N_p-1}Bu(k|k) + \cdots \\
& + Bu(k+N_P-1|k)
\end{aligned} \tag{2.27}
$$

Sedangkan untuk persamaan keluaran (2.20), dapat dilakukan prediksi sebagai berikut ini:

$$
\begin{aligned}
y(k+1|k) &= Cx(k+1|k) \\
&= CAx(k|k) + Bu(k|k) \\
y(k+2|k) &= Cx(k+2|k) \\
&= CAx(k|k) + Bu(k|k) \\
&\vdots \\
y(k+N_p|k) &= Cx(k+N_p|k) \\
&= CAx(k+N_p-1|k) + CBu(k+N_p|k) \\
&= CA^2x(k) + CA^{N_p-1}Bu(k|k) + \cdots \\
&+ CBu(k+N_P-1|k)
\end{aligned} \tag{2.28}
$$

Dari proses optimasi, dapat dihasilkan barisan kontrol optimal u sebanyak N_p untuk waktu k sebagai berikut.

$$
u_k^{k+N_p-1} = u(k), u(k+1), \cdots, u(k+N_p-1) \tag{2.29}
$$

Dengan demikian prediksi *state* optimal adalah

$$x(k+1|k), x(k+2|k), \cdots, x(k+N_p|k)$$

Selanjutnya, digunakan prinsip *receding horizon* pada MPC, yaitu nilai kontrol optimal yang digunakan pada model sistem adalah vektor awal dari barisan kontrol optimal yang dihasilkan, sehingga nilai kontrol yang diberikan pada keluaran sistem adalah $u_k = u(k|k)$.

Untuk dapat membentuk *formula kuadratik programming*, maka didefinisikan vektor keluaran dan input sistem sebagai berikut:

$$Y = \begin{bmatrix} y(k+1) & y(k+2) & \cdots & y(k+N_p) \end{bmatrix}^T \tag{2.30}$$

$$U = \begin{bmatrix} u(k+1) & u(k+2) & \cdots & u(k+N_p-1) \end{bmatrix}^T \tag{2.31}$$

Ukuran dari Y dan U berturut-turut adalah $m_1.N_p$x1 dan $n_1.N_p$x1, dimana m_1 adalah jumlah variabel keluaran dan n_1 adalah jumlah variabel input atau kontrol. Berdasarkan Persamaan (2.30) dan (2.31), maka Y dapat dituliskan ke dalam bentuk matriks berikut:

$$Y = Fx(k) + \Phi U \tag{2.32}$$

dengan

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \cdots & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & CA^{N_p-3}B & \cdots & CB \end{bmatrix}$$

BAB III
METODE PENELITIAN

Berikut ini langkah – langkah yang akan dilaksanakan pada penelitian ini terdiri atas:

3.1 Studi literatur

Pada tahap ini, dilakukan studi literatur mengenai sistem gerak kapal autopilot, Linearisasi, *Model Predicitive Control (MPC)*, dan *Moving Horizon Estimation (MHE)* melalui buku-buku, jurnal, laporan tugas akhir/thesis terdahulu ataupun artikel dari internet yang dapat menunjang penelitian. Model yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah sistem gerak dengan tiga derajat kebebasan *sway, yaw, roll*, yakni dengan asumsi kecepatan *surge* kapal konstan

3.2 Pengkajian model sistem dinamika kapal

Pada tahap ini, dilakukan model matematika untuk sistem gerak kapal yang didapat adalah nonlinier dengan 3 DOF dengan asumsi kecepatan *surge* konstan. Kemudian dilakukan pelinieran terhadap sistem dinamik dengan metode Jacobian di sekitar titik setimbang. Setelah diperoleh sistem yang linier, maka dilakukan uji keterkontrolan dari sistem hasil linearisasi tersebut di sekitar titik ekuilibrium. Dilakukan diskritisasi dengan menggunakan toolbox MATLAB.

3.3 Penerapan model MPC pada kontrol haluan kapal

Langkah pertama yakni mendefinisikan nilai awal *sway, yaw, roll*, menginisiasi nilai horizon MPC yaitu N. Selanjutnya menyelesaikan persamaan (2.21) dengan kendala

di persamaan (2.22) sampai (2.26). Adanya kendala bertujuan untuk meminimumkan nilai *error* antara output sistem yaitu *heading angle* terhadap sudut hadap referensi. Hasil dari MPC berupa barisan input seperti persamaan (2.29) serta barisan state optimal dan menurut prinsip *receding horizon* hasil optimum pada MPC didapat dari nilai pertama, yakni $u(k|k) = u^*(k|k)$. Nantinya output dari MPC akan dijadikan input pada metode MHE.

3.4 Estimasi *state* dengan MHE

Mengetimasi *state* model dinamika kapal dengan menggunakan metode *Moving Horizon Estimation* (MHE). Langkah pertama yakni menginisiasi nilai estimasi *state* awal $\hat{x_0}$ dan panjang horizon MHE yakni N. Selanjutnya, jika besar $k < N$ maka nilai *estimate state* $\hat{x}_{k+1|k}$ diperbaharui dari persamaan sistem (2.19). Jika $k > N$ maka nilai *estimate state* didapat dari persamaan (2.18) dengan kendalanya. Pada tugas akhir ini data measurement didapat dari penjumlahan antara persamaan output dengan noise output.

3.5 Simulasi desain sistem kendali MHE-MPC

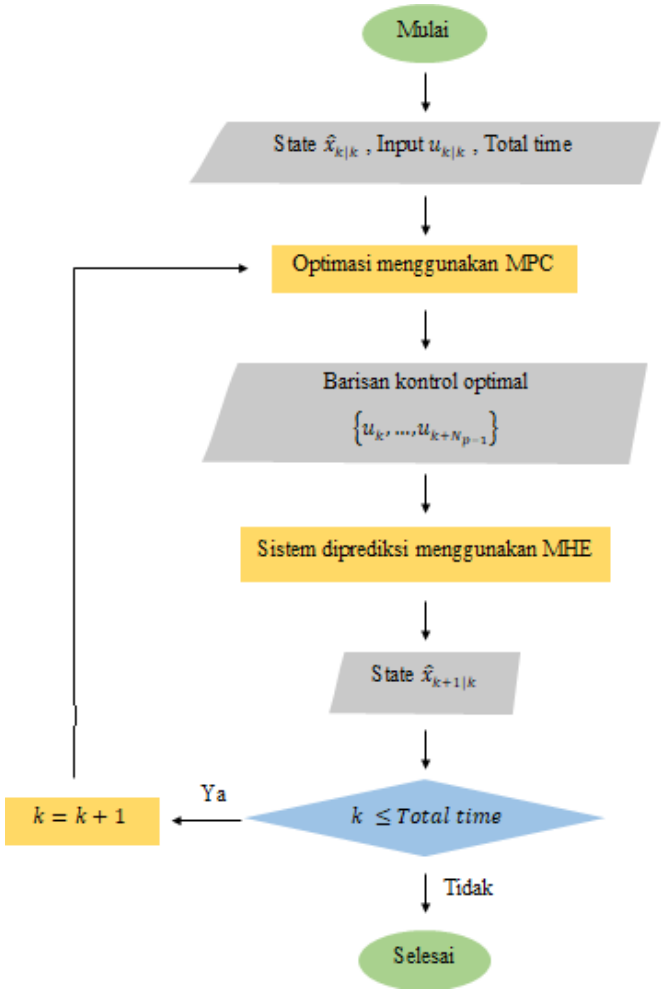
Setelah didapatkan *state* dari hasil estimasi model kapal maka selanjutnya dilakukan simulasi akhir dengan menggunakan *software* MATLAB untuk mendapatkan hasil grafik pergerakan kendali dan sebuah output dari masing-masing variabel.

3.6 Analisis hasil simulasi

Selanjutnya dilakukan analisis terhadap hasil simulasi yang diperoleh. Setelah menganalisis hasil simulasi maka dapat ditarik sebuah kesimpulan dari hasil pemilihan dan kerja metode pada Tugas Akhir ini.

3.7 Penulisan Laporan Tugas Akhir

Pada tahap ini dilakukan pembuatan tugas Akhir setelah melakukan simulasi dan memecahkan permasalahan pada topik Tugas Akhir ini. Berikut adalah diagram alur penulisan laporan Tugas Akhir ini.



Gambar 3.1: Diagram Alir MHE-MPC

BAB IV
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai desain kendali haluan kapal dengan *Moving Horizon Estimation-Model Predictive Control (MHE-MPC)*. Pembahasan diawali dengan mengontrol gerak haluan kapal *rudder*. Karena metode kendali yang digunakan hanya bisa diterapkan pada sistem diskrit, maka dilakukan pendiskritan. *Moving Horizon Estimation-Model Predictive Control (MHE-MPC)* diterapkan sebagai metode kendali pada sistem kendali haluan kapal autopilot. Tahap terakhir dari bab ini yaitu simulasi dengan *software* MATLAB dan dianalisis performansi sistem dari hasil simulasi tersebut.

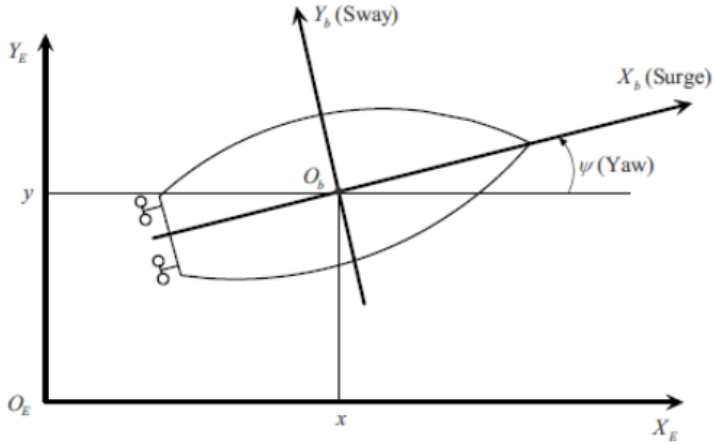
4.1 Model Matematika Dinamika Kapal Non-Linear

Model matematika yang digunakan dalam penelitian ini adalah model matematika yang diusulkan oleh Yoon dkk [21] seperti pada Persamaan (2.10) dengan gaya hidrodinamika.

Kendali yang dirancang pada penelitian ini bertujuan untuk mengendalikan sudut kemudi kapal (δr) agar sudut haluan kapal (ψ) sesuai dengan yang diharapkan. Sudut *yaw* dihitung terhadap sumbu x bumi, sedangkan sudut kemudi kapal *(rudder)* dihitung terhadap badan kapal [20]. Berdasarkan pada Gambar 4.1, dapat didefinisikan model kinematika pada kendali kapal sebagai berikut [20]:

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= p \\ \dot{\psi} &= r\cos\phi \end{aligned} \tag{4.1}$$

dimana $\dot{\psi}$ dan $\dot{\phi}$ secara berturut-turut adalah laju perubahan



Gambar 4.1: Kendali Haluan Kapal dan Sudut Kemudi

sudut *yaw* dan laju perubahan sudut *roll*. Dengan p adalah kecepatan *roll* dan r adalah kecepatan *yaw*.

Jadi, persamaan dinamika kapal nonlinear pada penelitian dapat dituliskan sebagai berikut :

$$
\begin{gathered}
(m-Y_{\dot{v}})\dot{v}-(mz_G+Y_{\dot{p}})\dot{p}+(mx_G-Y_{\dot{r}})\dot{r} = -mur+Y_{hyd}+Y_{\delta r}\delta r \\
-(mz_G+K_{\dot{v}})\dot{v}+(I_x-K_{\dot{p}})\dot{p} = mz_G ur + K_{hyd} + K_{\delta r}\delta r \\
(mx_G+N_{\dot{v}})\dot{v}+(I_z-N_{\dot{r}})\dot{r} = mx_G ur + N_{hyd} + N_{\delta r}\delta r \\
\dot{\phi} = p \\
\dot{\psi} = r\cos\phi
\end{gathered}
$$

Nilai $K_{\delta r} = I_{\delta z}Y_{\delta r}$ dan $N_{\delta r} = l_{\delta x}Y_{\delta r}$. Untuk nilai gaya rudder $Y_{\delta r}$ dihitung dengan persamaan berikut [23]:

$$Y_{\delta r} = \frac{1}{4\delta stall}\pi C_L A_R U^2$$

Berikut nilai dari gaya hidrodinamika secara matematis :

$$
\begin{aligned}
Y_{hyd} &= Y_{u|v|}u|v| + Y_{ur}ur + Y_{v|v|}v|v| + Y_{r|v|}r|v| \\
&\quad + Y_{\phi|uv|}\phi|uv| + Y_{\phi|ur|}\phi|ur| + Y_{\phi uu}\phi u^2 \\
K_{hyd} &= K_{u|v|}u|v| + K_{ur}ur + K_{v|v|}v|v| + K_{r|v|}r|v| \\
&\quad + K_{\phi|uv|}\phi|uv| + K_{\phi|ur|}\phi|ur| + K_{\phi uu}\phi u^2 \\
&\quad + K_{|u|p}|u|p + K_{p|p|}p|p| + K_p p + K_{\phi\phi\phi}\phi^3 \\
&\quad - \rho g \nabla GZ(\phi) \\
N_{hyd} &= N_{u|v|}u|v| + N_{|u|r}|u|r + N_{r|r|}r|r| + N_{r|v|}r|v| \\
&\quad + N_{\phi|uv|}\phi|uv| + N_{\phi u|r|}\phi|ur| + N_p p \\
&\quad + N_{|p|p}|p|p + N_{|u|p}|u|p + N_{\phi u|u|}\phi u|u|
\end{aligned}
\tag{4.2}
$$

Persamaan gerak kapal diubah kedalam bentuk *state space* sebagai berikut ini :

$$
\begin{bmatrix}
(m - Y_{\dot{v}}) & -(mz_G + Y_{\dot{p}}) & (mX_G - Y_{\dot{r}}) & 0 & 0 \\
-(mz_G + K_{\dot{v}}) & (I_x - K_{\dot{p}}) & 0 & 0 & 0 \\
(mx_G - N_{\dot{v}}) & 0 & (I_z - N_{\dot{r}}) & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} =
\begin{bmatrix} -mU_r \\ -mz_G U_r \\ -mx_G U_r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
+
\begin{bmatrix} Y_\delta \\ K_\delta \\ N_\delta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta
$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (m - Y_{\dot{v}}) & -(mz_G + Y_{\dot{p}}) & (mX_G - Y_{\dot{r}}) & 0 & 0 \\ -(mz_G + K_{\dot{v}}) & (I_x - K_{\dot{p}}) & 0 & 0 & 0 \\ (mx_G - N_{\dot{v}}) & 0 & (I_z - N_{\dot{r}}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} -mU_r \\ -mz_G U_r \\ -mx_G U_r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_\delta \\ K_\delta \\ N_\delta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta$$

Selanjutnya, untuk mempermudah dalam melakukan uji keterkontrolan dan desain sistem kendali, maka model dilinierkan disekitar titik setimbang, sebagaimana akan dibahas pada Subbab 4.2.

Dan untuk memperoleh sistem diskrit yang dibutuhkan dalam perancangan kendali, pada tahap berikutnya dilakukan dengan menggunakan toolbox MATLAB yang akan dijelaskan pada Subab 4.3.

4.2 Linearisasi Model Dinamika Kapal

Model persamaan gerak kapal dengan tiga derajat kebebasan, pada Persamaan (2.10) merupakan sistem persamaan tak linear yang kemudian dilinearisasi untuk mendapatkan persamaan linear yang lebih sederhana sehingga memudahkan dalam proses analisis sifat-sifat sistem dan desain sistem kendali. Proses linierisasi umumnya menghasilkan matriks keadaan dan matriks input [22]. Berdasarkan Persamaan (2.10) didefinisikan vektor variabel keadaan sebagai berikut:

$$x \triangleq \begin{bmatrix} v & p & r & \phi & \psi \end{bmatrix}^T$$

Maka Persamaan (2.1) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & I_{2x2} \end{bmatrix}^{-1} f(x) + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & I_{2x2} \end{bmatrix}^{-1} \tau_c \delta r \tag{4.3}$$

dengan

$$\tau_c = \begin{bmatrix} Y_{hyd} & K_{hyd} & N_{hyd} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \tag{4.4}$$

$$M = \begin{bmatrix} (m - Y_{\dot{v}}) & -(mz_G + Y_{\dot{p}}) & (mX_G - Y_{\dot{r}}) \\ -(mz_G + K_{\dot{v}}) & (I_x - K_{\dot{p}}) & 0 \\ (mx_G - N_{\dot{v}}) & 0 & (I_z - N_{\dot{r}}) \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

dan

$$f(x) = f_{hyd}(x) + f_c(x)$$

dengan definisi fungsi $f_{hyd}(x)$ dan $f_c(x)$

$$f_{hyd}(x) = \begin{bmatrix} Y_{hyd} \\ K_{hyd} \\ N_{hyd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \; f_c(x) = \begin{bmatrix} -mU_r \\ -mz_G U_r \\ -mx_G U_r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Untuk merancang sistem kendali dan menganalisis tentang sifat-sifat sistem, akan lebih mudah jika bekerja dengan model linier. Sehingga sistem pada Persamaan (4.3) diubah menjadi bentuk

$$\dot{x} = A_c x + B_c \delta r \tag{4.6}$$

Dengan mengambil bentuk turunan pertama dari ekspansi Taylor disekitar titik setimbang $x = x_e$, matriks hasil linierisasi didefinisikan sebagai [22]:

$$A_c \triangleq \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & I_{2X2} \end{bmatrix}^{-1} \frac{df(x)}{dx}|_{x=x_e} \tag{4.7}$$

$$B_c \triangleq \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & I_{2X2} \end{bmatrix}^{-1} \tau_c \tag{4.8}$$

Pada keadaan setimbang, kapal berjalan konstan sesuai dengan kecepatan referensi yang diberikan [22][20]. Pada kondisi ini, tidak terjadi perubahan kecepatan baik untuk surging ataupun swaying.

Sehingga titik setimbang untuk kecepatan surging $u_e = U$ dan untuk kecepatan swaying $v_e = 0$, sedangkan untuk gerakan rotasi juga tidak mengalami perubahan (diabaikan) dengan mempertimbangkan kondisi tersebut, maka titik setimbang untuk variabel yang lain berturut-turut adalah $p_e = r_e = \phi_e = \psi_e = 0$. Sehingga diperoleh [22]:

$$\frac{df(x)}{dx}|_{x=x_e} =$$

$$\begin{bmatrix} Y_{|u|v|}|U| & 0 & (Y_{|u|r|} - m)|U| \\ K_{|u|v|}|U| & K_P + K_{|u|p|}|U| & (K_{|u|r|} - mz_G)|U| \\ N_{|u|v|}|U| & N_P + N_{|u|p|}|U| & (N_{|u|r|} - mx_G)|U| \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} Y_{|\psi|u|r|}|U|U| + mz_G)|U| & 0 \\ K_{|u|u|}|U|U| - \rho g \nabla GZ & 0 \\ N_{|u|u|}|U|U| & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

Berdasarkan nilai parameter dan nilai koefisien hidrodinamika pada Tabel 4.1 [22]

Tabel 4.1 : Nilai Parameter dan Koefisien Hidrodinamika

X-Coefficients	N-Coefficients	K-Coefficients	Y-Coefficients
$X_{\dot{u}} = -17400$	$N_{\dot{v}}$=538000	$K_{\dot{u}}$=296000	$Y_{\dot{v}} = -1.9022 \times 10^6$
$X_{u\|u\|} = -1960$	$N_{\dot{r}} = -4.3958 \times 10^7$	$K_{\dot{r}}$= 0.0	$Y_{\dot{r}} = -1.4 \times 10^6$
X_{vr}= $0.33 \times m$	$N_{\dot{p}}$=0.0	$K_{\dot{p}} = -0.674 \times 10^6$	$Y_{\dot{p}} = -0.296 \times 10^6$
	$N_{\|u\|v} = -92000$	$K_{\|u\|v} = 9260$	$Y_{\|u\|v} = -11800$
	$N_{\|u\|r} = -4.71 \times 10^6$	$K_{ur} = -102000$	$Y_{ur} = 131000$
	$N_{v\|v\|} = 0.0$	$K_{v\|v\|} = 29300$	$Y_{v\|v\|} = -3700$
	$N_{r\|r\|} = -202 \times 10^6$	$K_{r\|r\|} = 0.0$	$Y_{r\|r\|} = 0.0$
	$N_{v\|r\|} = 0.0$	$K_{v\|r\|} = 0.621 \times 10^6$	$Y_{v\|r\|} = -0.794 \times 10^6$
	$N_{r\|v\|} = -15.6 \times 10^6$	$K_{r\|v\|} = 0.142 \times 10^6$	$Y_{r\|v\|} = -0.182 \times 10^6$
	$N_{\phi\|uv\|} = -0.214 \times 10^6$	$K_{\phi\|uv\|} = -8400$	$Y_{\phi\|uv\|} = 10800$
	$N_{\phi u\|r\|} = -4.98 \times 10^6$	$K_{\phi\|ur\|} = -0.196 \times 10^6$	$Y_{\phi\|ur\|} = 0.251 \times 10^6$
	$N_{\phi u\|u\|} = -8000$	$K_{\phi uu} = -1180$	$Y_{\phi uu} = -74$
	$N_{\|u\|p} = 0.0$	$K_{\|u\|p} = -15500$	$Y_{\|u\|p} = 0.0$
	$N_{p\|p\|} = 0.0$	$K_{p\|p\|} = -0.416 \times 10^6$	$Y_{p\|p\|} = 0.0$
	$N_p = 0.0$	$K_p = -0.5 \times 10^6$	$Y_p = 0.0$
	$N_\phi = 0.0$	$K_{\phi\phi\phi} = -0.325\rho g \nabla$	$Y_\phi = 0.0$
	$N_{\phi\phi\phi} = 0.0$		$Y_{\phi\phi\phi} = 0.0$
			$Y_{\delta uu} = 2 \times 3.5044 \times 10^3$

L (panjang)	48 m
m (massa)	359000 kg
∇ (displacement)	350 kg
U (ref. Kecepatan)	10 m/s
Centre of Gravity Coordinates :	
z_G (pada z)	-1.75
x_G (pada x)	-3.38
Rudder Data :	
GZ (metacenter)	0.776 m
g (gravitasi)	9.82 m/s^2
ρ (massa jenis)	1025 kg/m^3
C_L (koefisien gaya angkat)	1.15 m
A_R (Area)	0.73 m^2
δ_{stall} (sudut stall)	30

maka diperoleh matriks keadaan dan matriks input time

invariant sebagai berikut:

$$A_c = \begin{bmatrix} -0.1528 & -0.0223 & -2.4971 & 0.0978 & 0 \\ 0.0042 & -0.0192 & -0.1878 & -0.0837 & 0 \\ -0.0370 & 0.0013 & -1.2255 & -0.0196 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0.0027 \\ -0.0001 \\ 0.0018 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

4.3 Diskritisasi Model Dinamika Kapal

Penyajian model waktu diskrit memerlukan A_d dan B_d yang dicari sebagai berikut :

$$
\begin{aligned}
A_d(T) &= e^{AT} \\
&= I + At + \frac{1}{2!}A^2t^2 + \frac{1}{3!}A^3t^3 + \cdots + \frac{1}{n!}A^nt^n + \cdots \\
&= I + At + \frac{1}{2!}A^2t^2 + \frac{1}{3!}A^3t^3 + \cdots \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} -0.1528 & -0.0223 & -2.4971 & 0.0978 & 0 \\ 0.0042 & -0.0192 & -0.1878 & -0.0837 & 0 \\ -0.0370 & 0.0013 & -1.2255 & -0.0196 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} T \\
&+ \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0.1159 & 0.0907 & 3.4375 & 0.0320 & 0 \\ 0.0062 & -0.0834 & 0.2233 & 0.0057 & 0 \\ 0.0510 & -0.0220 & 1.5941 & 0.0203 & 0 \\ 0.0042 & -0.0192 & -0.1878 & -0.0837 & 0 \\ -0.0370 & 0.0013 & -1.2255 & -0.0196 & 0 \end{bmatrix} T^2 \\
&+ \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -0.1445 & 0.0373 & -4.5191 & -0.0636 & 0 \\ -0.0096 & 0.0077 & -0.2736 & 0.0032 & 0 \\ -0.0669 & 0.0239 & -2.0768 & -0.0244 & 0 \\ 0.0062 & -0.0834 & 0.2233 & 0.0057 & 0 \\ 0.0510 & -0.0220 & 1.5941 & 0.0203 & 0 \end{bmatrix} T^3 \\
&+ \cdots
\end{aligned}
$$

dengan T = 1 s dan pemotongan pada n > 3 maka diperoleh :

$$A_d(1) = \begin{bmatrix} -0.0756 & 0.0838 & -0.2054 & 0.1192 & 0 \\ 0.0083 & -0.0748 & -0.0389 & -0.0799 & 0 \\ -0.0030 & -0.0134 & -0.1628 & -0.0061 & 0 \\ 0.0028 & 0.9872 & -0.1252 & -0.0558 & 0 \\ -0.0247 & 0.0008 & 0.1830 & -0.0131 & 0 \end{bmatrix}$$

$$
\begin{aligned}
B_d(T) &= (\int_0^T e^{A\lambda} d\lambda) B \\
&= (\int_0^T A_d(\lambda) d\lambda) \begin{bmatrix} 0.0027 \\ -0.0001 \\ 0.0018 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.0027 \\ -0.0001 \\ 0.0018 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} -0.1528 & -0.0223 & -2.4971 & 0.0978 & 0 \\ 0.0042 & -0.0192 & -0.1878 & -0.0837 & 0 \\ -0.0370 & 0.0013 & -1.2255 & -0.0196 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} T^2 \begin{bmatrix} 0.0027 \\ -0.0001 \\ 0.0018 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
&+ \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0.1159 & 0.0907 & 3.4375 & 0.0320 & 0 \\ 0.0062 & -0.0834 & 0.2233 & 0.0057 & 0 \\ 0.0510 & -0.0220 & 1.5941 & 0.0203 & 0 \\ 0.0042 & -0.0192 & -0.1878 & -0.0837 & 0 \\ -0.0370 & 0.0013 & -1.2255 & -0.0196 & 0 \end{bmatrix} T^3 \begin{bmatrix} 0.0027 \\ -0.0001 \\ 0.0018 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
&+ \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -0.1445 & 0.0373 & -4.5191 & -0.0636 & 0 \\ -0.0096 & 0.0077 & -0.2736 & 0.0032 & 0 \\ -0.0669 & 0.0239 & -2.0768 & -0.0244 & 0 \\ 0.0062 & -0.0834 & 0.2233 & 0.0057 & 0 \\ 0.0510 & -0.0220 & 1.5941 & 0.0203 & 0 \end{bmatrix} T^4 \begin{bmatrix} 0.0027 \\ -0.0001 \\ 0.0018 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
&+ \cdots
\end{aligned}
$$

dengan T = 1 s dan pemotongan pada n > 3 maka diperoleh :

$$B_d(1) = \begin{bmatrix} -0.0004 \\ -0.0003 \\ 0.0003 \\ -0.0002 \\ 0.0011 \end{bmatrix}$$

Pendiskritan model juga dilakukan menggunakan software MATLAB yang menggunakan metode yang sama seperti di atas dengan waktu sampling 1 s sehingga diperoleh ruang keadaan waktu diskrit sebagai berikut :

$$A_d(1) = \begin{bmatrix} 0.8872 & 0.0724 & -1.3383 & 0.1056 & 0 \\ 0.0061 & 0.9405 & -0.1100- & 0.0802 & 0 \\ -0.0198 & -0.0067 & 0.3141 & -0.0125 & 0 \\ 0.0028 & 0.9768 & -0.0656 & 0.9593 & 0 \\ -0.0122 & -0.0022 & 0.5848 & -0.0072 & 1.0000 \end{bmatrix} \tag{4.11}$$

$$B_d(1) = \begin{bmatrix} 0.0010 \\ -0.0002 \\ 0.0010 \\ -0.0001 \\ 0.0006 \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

Karena perhitungan analitik mengalami pemotongan pada n > 3 maka digunakan hasil perhitungan MATLAB untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat sehingga diperoleh model pada waktu diskrit berdasarkan persamaan (4.11) dan (4.12) sebagai berikut :

$$x(k+1|k) = \begin{bmatrix} 0.8872 & 0.0724 & -1.3383 & 0.1056 & 0 \\ 0.0061 & 0.9405 & -0.1100- & 0.0802 & 0 \\ -0.0198 & -0.0067 & 0.3141 & -0.0125 & 0 \\ 0.0028 & 0.9768 & -0.0656 & 0.9593 & 0 \\ -0.0122 & -0.0022 & 0.5848 & -0.0072 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$x(k|k) + \begin{bmatrix} 0.0010 \\ -0.0002 \\ 0.0010 \\ -0.0001 \\ 0.0006 \end{bmatrix} u(k|k)$$

4.4 Uji Keterkontrolan dan Keteramatan

Uji keterkontrolan dilakukan dengan cara menghitung jumlah rank dari pasangan matriks Ac dan Bc pada sistem. Suatu sistem dikatakan terkontrol dan teramati ketika rank dari matriks keterkontrolannya sama dengan jumlah variabel keadaan sistem tersebut.

$$\begin{aligned} A_c =& M^{-1}A \\ =& \begin{bmatrix} -0.1528 & -0.0223 & -2.4971 & 0.0978 & 0 \\ 0.0042 & -0.0192 & -0.1878 & -0.0837 & 0 \\ -0.0370 & 0.0013 & -1.2255 & -0.0196 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{4.13}$$

$$\begin{aligned} B_c =& M^{-1}B \\ =& \begin{bmatrix} 0.0027 \\ -0.0001 \\ 0.0018 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{4.14}$$

$$M = \begin{bmatrix} B_c \\ A_c B_c \\ A_c^2 B_c \\ A_c^3 B_c \\ A_c^4 B_c \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.0027 & 0.0049 & 0.0065 & 0.0085 & 0.0111 \\ 0.0001 & 0.0003 & 0.0004 & 0.0005 & 0.0007 \\ 0.0018 & 0.0023 & 0.0030 & 0.0039 & 0.0051 \\ 0 & 0.0001 & 0.0003 & 0.0004 & 0.0005 \\ 0 & 0.0018 & 0.0023 & 0.0030 & 0.0039 \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

Didapat *controlability matrix* C_o, dengan ukuran matriks A_c adalah $n \times n$ dan ukuran matriks B_c adalah $n \times m$ [24]

$$C_0 = \begin{bmatrix} B_c & A_c B_c & \cdots & A_c^{N-1} B_c \end{bmatrix}$$

Dimana C_o mempunyai baris n dan kolom nm. Oleh karena itu, sistem (A_c, B_c) terkontrol jika

$$rank(C_o) = n$$

Dapat diketahui bahwa rank(C_o)=5, maka sistem dalam keadaan terkontrol.

Untuk menguji keteramatan suatu sistem, maka jumlah rank dari pasangan matriks A_c dan C_d sama dengan jumlah variabel keadaan sistem tersebut. Diketahui besar matriks output C_d sebagai berikut :

$$C_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

Didapat *observability matrix Ob*, dengan ukuran matriks A_c adalah $n \times n$ dan ukuran matriks C_d adalah $p \times n$ [24]

$$Ob = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \cdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

Dapat diketahui bahwa rank(Ob)=5, maka sistem dalam keadaan teramati.

4.5 Desain MPC

Berikut langkah-langkah *Model Predictive Control* (MPC):

1. Menentukan panjang horizon MPC N_p
2. Menentukan state awal x_0
3. meminimumkan fungsi objektif MPC berikut

$$J(k) = \sum_{j=1}^{N_p} \|\hat{y}(k+j|k) - y(k+j|k)\|^2_{Q(i)} + \sum_{j=0}^{N_p-1} \|u(k+j-1|k)\|^2_{R(i)} \tag{4.17}$$

   dengan kendala :

$$\begin{gathered} x(k+j|k) = Ax(k+j-1|k) + Bu(k+j-1|k) \\ x(k) = x(k|k) \\ Cx(k+j+1|k) \leq D \\ Su(k+j|k) \leq T \\ S\Delta u(k+j|k) \leq V \end{gathered}$$

4. diperoleh nilai kontrol input $u_{k|k}$yang optimal yakni $u_{k|k} = u^*_{k|k}$
5. Kembali ke tahap 3, dengan $k = k + 1$

Secara umum, kendala dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu kendala pada variabel keadaan dan kendala pada input.

1. Kendala pada variabel kendali pada input yakni berupa sudut *rudder* (kemudi) dengan U_{max} sebagai batas atas dan U_{min} sebagai batas bawah, maka kendala didefinisikan sebagai berikut.

$$u_{min} \leq u(k+j) \leq u_{max} \tag{4.18}$$

dapat diekspresikan dalam dua persamaan berikut ini

$$\begin{aligned} -u(k+j) &\leq -u_{min} \\ u(k+j) &\leq u_{max} \end{aligned}$$

Kemudian dibentuk ke dalam matriks :

$$\begin{bmatrix} -I \\ I \end{bmatrix} u(k+j) \leq \begin{bmatrix} -u_{min} \\ u_{max} \end{bmatrix}; j = 0, 1, 2, \cdots, N_p - 1 \tag{4.19}$$

misalkan,

$$S = \begin{bmatrix} -I \\ I \end{bmatrix} \tag{4.20}$$

dan

$$T = \begin{bmatrix} -u_{min} \\ u_{max} \end{bmatrix} \tag{4.21}$$

sehingga menjadi :

$$Su \leq T \tag{4.22}$$

2. Kendala variabel keadaan yaitu kecepatan yaw, yang dapat diekspresikan dalam bentuk sebagai berikut :

$$r_{min} \leq r \leq r_{max} \tag{4.23}$$

$$\begin{bmatrix} -I \\ I \end{bmatrix} r \leq \begin{bmatrix} -r_{min} \\ r_{max} \end{bmatrix} \tag{4.24}$$

misalkan,

$$C = \begin{bmatrix} -I \\ I \end{bmatrix} \tag{4.25}$$

dan

$$D = \begin{bmatrix} -r_{min} \\ r_{max} \end{bmatrix} \tag{4.26}$$

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa tujuan dari algoritma MPC adalah meminimasi fungsi objektif. Persamaan (4.17) diubah dalam bentuk kuadratik programming menjadi :

$$\begin{aligned}
J(k) &= \|\hat{y}(k+1|k) - y(k+1|k)\|^2_{Q(i)} + \|u(k|k)\|^2_{R(i)} \\
&+ \|\hat{y}(k+2|k) - y(k+2|k)\|^2_{Q(i)} + \|u(k+1|k)\|^2_{R(i)} \\
&+ \cdots + \|\hat{y}(k+N_p|k) - y(k+N_p|k)\|^2_{Q(i)} \\
&+ \|u(k+N_p-1|k)\|^2_{R(i)} \\
J(k) &= (\hat{y}(k+1|k) - y(k+1|k))^T Q_1 (\hat{y}(k+1|k) - y(k+1|k)) \\
&+ (\hat{y}(k+2|k) - y(k+2|k))^T Q_1 (\hat{y}(k+2|k) - y(k+2|k)) \\
&+ \cdots + (\hat{y}(k+N_p|k) - y(k+N_p|k))^T Q_{N_p} (\hat{y}(k+N_p|k) \\
&- y(k+N_p|k)) + (u(k|k))^T R_1 (u(k|k)) + (u(k+1|k))^T \\
&R_1 (u(k+1|k)) + \cdots + (u(k+N_p-1|k))^T R_{N_p} (u(k+N_p-1|k)) \\
J(k) &= \hat{y}(k+1|k)^T Q_1 \hat{y}(k+1|k) - 2y(k+1|k)^T Q_1 y(k+1|k) \\
&+ y(k+1|k)^T Q_1 y(k+1|k) + \hat{y}(k+2|k)^T Q_2 \hat{y}(k+2|k) \\
&- 2y(k+2|k)^T Q_2 y(k+2|k) Q_2 + y(k+2|k)^T Q_2 y(k+2|k) + \cdots \\
&+ \hat{y}(k+2|k)^T Q_{N_p} \hat{y}(k+2|k) - 2y(k+2|k)^T Q_{N_p} y(k+2|k) Q_{N_p} \\
&+ y(k+2|k)^T Q_{N_p} y(k+2|k) + u(k|k)^T R_1 u(k|k) + u(k+1|k)^T R_1 \\
&u(k+1|k) + \cdots + u(k+N_p-1|k)^T R_{N_p-1} u(k+N_p-1|k)
\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
J(k) = {} & \hat{y}(k+1|k)^T Q_1 \hat{y}(k+1|k) - 2C(k+1|k)^T Q_1 C(k+1|k) \\
& + C(k+1|k)^T Q_1 C(k+1|k) + \hat{y}(k+2|k)^T Q_2 \hat{y}(k+2|k) \\
& - 2C(k+2|k)^T Q_2 C(k+2|k) Q_2 + C(k+2|k)^T Q_2 C(k+2|k) + \cdots \\
& + \hat{y}(k+2|k)^T Q_{N_p} \hat{y}(k+2|k) - 2C(k+2|k)^T Q_{N_p} C(k+2|k) Q_{N_p} \\
& + C(k+2|k)^T Q_{N_p} C(k+2|k) + u(k|k)^T R_1 u(k|k) + u(k+1|k)^T R_1 \\
& u(k+1|k) + \cdots + u(k+N_p-1|k)^T R_{N_p-1} u(k+N_p-1|k)
\end{aligned} \tag{4.27}
$$

Dimana $\hat{y}(k+j|k)$ merupakan prediksi output berupa sudut *yaw* untuk $t = k+j$ yang diprediksi pada saat $t = k$. $u(k+j-1|k)$ adalah variabel input berupa sudut *rudder* untuk $t = k+j-1$ yang didenisikan pada saat $t = k$. Kemudian $Q(i)$ dan $R(i)$ adalah matriks bobot yang bersifat definit positif, digunakan dalam meminimumkan fungsi tujuan. Matriks $Q(i)$ berdimensi $n \times n$ dimana n adalah jumlah variabel keadaan dalam sistem. Karena variabel yang digunakan dalam sistem ini sebanyak 2, maka dimensi matriks $Q(i)$ adalah 2×2. Sedangkan $R(i)$ adalah matriks berdimensi $m \times 1$ dimana m adalah jumlah kendali input dalam sistem, yaitu sudut kemudi (rudder), sehingga diperoleh matriks berdimensi 1×1.

$$
J(k) = \frac{1}{2} j^T E j + j^T F
$$

dimana

$$
j = \begin{bmatrix} u_{k|k} \\ x_{k+1} \\ \vdots \\ u_{k+N_p-1} \\ x_{k+N_p} \end{bmatrix}
$$

$$E = \begin{bmatrix} R_0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & C^T Q_1 C & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R_{N_p-1} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & C^T Q_{N_p} C \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 \\ -2C^T Q_1 \hat{y}(k+1|k) \\ \vdots \\ 0 \\ -2C^T Q_{N_p} \hat{y}(k+N_p|k) \end{bmatrix}$$

4.6 Desain Estimasi MHE

Berikut langkah-langkah *Moving Horizon Estimation* (MHE) :

1. Menentukan panjang horizon MHE N_{MHE}
2. Menentukan estimasi state awal $\hat{x_0}$
3. Jika $k < N$ maka menghitung $\hat{x}_1$ dengan menggunakan rumus $\hat{x}_1 = A\hat{x}_0 + Bu_0$.
   Jika $k > N$, permasalahan optimasi berikut dapat diselesaikan dengan *Moving Horizon Estimation* (MHE)

$$J_N = min_{x,y} \sum_{i=1}^{N} \|\hat{y}(i) - y(x(i))\|_P^2 + \|\hat{u}(i) - u(i)\|_W^2 \tag{4.28}$$

   dengan kendala :

$$\begin{gathered} x(k+j) = Ax(k+j-1|k) + Bu(k+j-1|k) \\ x^{min} \leq x_{N_H} \leq x^{max} \\ u^{min} \leq u_{N_H-1} \leq u^{max} \end{gathered}$$

   nilai measurement didapat dari penjumlahan antara persamaan sistem dengan *noise* yang sebesar 0.0175 deg.

4. diperoleh nilai state yang optimal yakni $\hat{x}_{k|k} = \hat{x}^*_{k|k}$
5. Kembali ke tahap 3, dengan $k = k + 1$

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa tujuan dari algoritma MPC adalah meminimasi fungsi objektif. Persamaan (4.28) diubah dalam bentuk kuadratik programming menjadi :

$$\begin{aligned}
J(k) =& \|\hat{y}(k-N|k) - y(k-N|k)\|_P^2 + \|\hat{u}(k-N) - u(k-N|k)\|_W^2 \\
&+ \|\hat{y}(k-N+1|k) - y(k-N+1|k)\|_P^2 \\
&+ \|\hat{u}(k-N+1) - u(k-N+1|k)\|_W^2 \\
&+ \cdots + \|\hat{y}(k|k) - y(k|k)\|_P^2 + \|\hat{u}(k|k) - u(k|k)\|_W^2 \\
J(k) =& (\hat{y}(k+1|k) - y(k+1|k))^T P(\hat{y}(k+1|k) - y(k+1|k)) \\
&+ (\hat{y}(k-N|k) - y(k-N|k))^T P(\hat{y}(k-N|k) - y(k-N|k)) \\
&+ \cdots + (\hat{y}(k-N+1|k) - y(k-N|k))^T P(\hat{y}(k-N+1|k) \\
&- y(k-N+1|k)|k) + \cdots + (\hat{y}(k|k) - y(k|k))^T P(\hat{y}(k|k) - y(k|k)) \\
&+ (\hat{u}(k-N|k) - u(k-N|k))^T W(\hat{u}(k-N|k) - u(k-N|k)) \\
&+ (\hat{u}(k-N+1|k) - u(k-N+1|k))^T W(\hat{u}(k-N+1|k) \\
&- u(k-N+1|k)) + \cdots + (\hat{u}(k|k) - u(k|k))^T W(\hat{u}(k|k) - u(k|k))
\end{aligned} \tag{4.29}$$

diketahui

$$y(x(i)) = Cx(i)$$
$$C = \hat{H}$$

Maka persamaan (4.29) dituliskan sebagai:

$$
\begin{aligned}
J(k) =& (\hat{y}(k+1|k) - \hat{H}x(k+1|k))^T Q(\hat{y}(k+1|k) - \hat{H}x(k+1|k)) \\
&+ (\hat{y}(k-N|k) - \hat{H}x(k-N|k))^T P(\hat{y}(k-N|k) - \hat{H}x(y(k-N|k)) \\
&+ \cdots + (\hat{y}(k-N+1|k) - \hat{H}x(k-N|k))^T P(\hat{y}(k-N+1|k) \\
&- \hat{H}x(k-N+1|k)|k) + \cdots + (\hat{y}(k|k) - \hat{H}x(k|k))^T P(\hat{y}(k|k) \\
&- y(k|k)) + (\hat{u}(k-N|k) - u(k-N|k))^T W(\hat{u}(k-N|k) \\
&- u(k-N|k)) + (\hat{u}(k-N+1|k) - u(k-N+1|k))^T W \\
&(\hat{u}(k-N+1|k) - u(k-N+1|k)) + \cdots + (\hat{u}(k|k) - u(k|k))^T \\
&W(\hat{u}(k|k) - u(k|k)) \\
J(k) =& - \hat{y}(k-N|k)^T V\hat{H}x(k-N|k) - x(k-N)^T \hat{H}^T V\hat{y}(k-N|k) \\
&+ x(k-N|k)^T \hat{H}^T V\hat{H}x(k-N|k) - \cdots - \hat{y}(k|k)^T V\hat{H}x(k|k) \\
&- x(k|k)^T \hat{H}^T V\hat{y}(k|k) + x(k)^T \hat{H}^T V\hat{H}x(k|k) \\
&- \hat{u}(k-N|k)^T Wu(k-N|k) - u(k-N|k)^T W\hat{u}(k-N|k) \\
&+ u(k-N|k)^T Wu(k-N|k) - \cdots - \hat{u}(k-1|k)^T Wu(k-1|k) \\
&- u(k-1|k)^T W\hat{u}(k-1|k) + u(k-1|k)^T Wu(k-1|k) \\
=& - 2x(k-N|k)^T \hat{H}^T V\hat{y}(k-N|k) + x(k-N|k)^T \hat{H}^T V\hat{H} \\
& x(k-N|k) - \cdots - 2x(k|k)^T \hat{H}^T V\hat{y}(k|k) + x(k|k)^T \hat{H}^T V\hat{H}x(k|k) \\
&- 2u(k-N|k)^T W\hat{u}(k-N|k)^T + u(k-N|k)^T Wu(k-N|k) \\
&- \cdots - 2u(k-1|k)^T W\hat{u}(k-1|k) + u(k-1|k)^T Wu(k-1|k)
\end{aligned}
\tag{4.30}
$$

$$
J(k) = \frac{1}{2} X^T H X + X^T f
$$

dimana

$$X = \begin{bmatrix} x_{k-N} \\ u_{k-N} \\ \vdots \\ u_{k-1} \\ x_k \end{bmatrix}$$

$$f = \begin{bmatrix} -2\hat{H}^T P \hat{y}_{k-N} \\ -2W\hat{u}_{k-N} \\ \vdots \\ -2W\hat{u}_{k-1} \\ -2\hat{H}^T Q \hat{y}_k \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 2\hat{H}^T P \hat{H} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 2W & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\hat{H}^T P \hat{H} & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 2\hat{H}^T P \hat{H} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 2W \end{bmatrix} \tag{4.31}$$

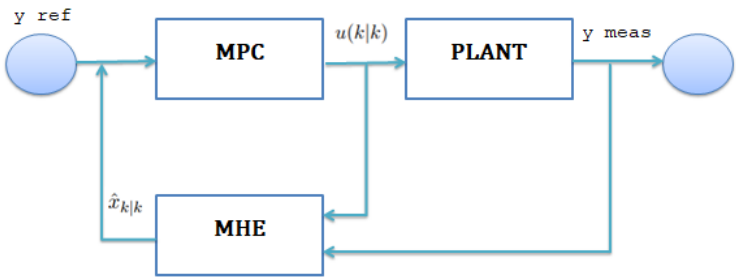
4.7 Desain Sistem Kendali MHE-MPC

Estimator yang digunakan yakni *Moving Horizon Estimation* (MHE) yang meminimumkan fungsi objektif MHE, Perkiraan referensi $\hat{x_0}$ biasanya diambil dari solusi masalah MHE pada perkiraan sebelumnya. Estimasi ini diperoleh dengan penyelesaian *least-square problem* sebanyak horizon N.

Menginisiasi nilai state ($x_{k|k}$), input ($u_{k|k}$), *Total Time* yang didapat dari pembagian antara waktu (t) dengan *Time Sampling* (t_s). Setelah dilakukan inisiasi, kemudian masuk ke tahap optimasi MPC pada tahap ini diperlukan nilai awal dari *state* dan input sehingga didapatkan sebuah barisan kontrol

yang optimal $(u_k, \cdots, u_{k+N-1})$. Sesuai dengan cara kerja metode MPC, bahwa kontrol optimal adalah $(u_{k|k})$. Setelah mendapatkan hasil input optimal selanjutnya masuk ke tahap metode MHE untuk mendapatkan hasil estimasi berupa *state* yang optimum $(\hat{x}_{k|k})$. Jika waktu iterasi k kurang dari sama dengan nilai *Total Time*, maka dilakukan iterasi selanjutnya $k = k + 1$ seterusnya hingga k lebih dari *Total Time* maka tahap iterasi berhenti. Nilai *measurement output* didapat dari penjumlahan antara sistem persamaan linear output $(y = Cx)$ dengan *noise*, hal ini disebabkan karena pada penelitian ini tidak menggunakan data pengukuran.

Berikut adalah diagram blok proses pengerjaan metode MHE-MPC :



Gambar 4.2: Diagram Blok MHE-MPC

Untuk dapat melakukan penerapan skema MHE-MPC, maka penerapan MHE-MPC dapat dilakukan sebagai berikut:

1. Menentukan horizon N

2. Pada saat $k = 0, \cdots$,total time
   Menginisiasi nilai k (banyaknya iterasi) dari 0 hingga total time, dimana nilai total time diperoleh dari

pembagian antara waktu dan time sampling. Time sampling dan waktu iinputkan dengan masing-masing sebesar 0.5 dan 300.

3. Langkah MPC dengan menggunakan nilai state $\hat{x}_0$ dan input u_0, menyelesaikan permasalahan optimasi dari meminimumkan fungsi objektif sebagai berikut :

$$J(k) = \sum_{j=1}^{N} \|\hat{y}(k+j|k) - y(k+j|k)\|_Q^2 + \sum_{j=0}^{N-1} \|u(k+j-1|k)\|_R^2 \tag{4.32}$$

dengan kendala :

$$x(k+j|k) = Ax(k+j-1|k) + Bu(k+j-1|k)$$

dari proses optimasi menggunakan *quadratic programming* diperoleh input yang optimal yakni $u^*_{k+1|k}, u^*_{k+2|k}, \cdots, u^*_{k+N-1|k}$. Nilai input yang digunakan adalah input optimal yang pertama saja, yakni $u_{k+1} = u^*_{k+1}$

4. Jika $k < N$ maka menghitung $\hat{x}_1$ dengan menggunakan rumus $\hat{x}_1 = A\hat{x}_0 + Bu_0$.
   Jika $k > N$, permasalahan optimasi berikut dapat diselesaikan dengan *Moving Horizon Estimation* (MHE)

$$J_N = min_{x,y} \sum_{i=1}^{N} \|\hat{y}(i) - y(x(i))\|_P^2 + \|\hat{x}(i) - x(i)\|_W^2 \tag{4.33}$$

   dengan kendala :
   $x(k+j|k) = Ax(k+j-1|k) + Bu(k+j-1|k)$

   Dan diperoleh nilai state yang optimal yakni $\hat{x}_{k|k} = \hat{x}^*_{k|k}$

5. Kembali ke langkah 3 untuk $k = k + 1$

4.8 Simulasi MHE-MPC

Simulasi MHE-MPC pada penelitian ini menggunakan *software* MATLAB. Model yang digunakan berbentuk linear, dengan output sistem berupa kecepatan *yaw* dan sudut *yaw* serta objek yang dikontrol berupa *rudder*. Sistem yang dikendalikan adalah deterministik dan tidak terdapat gangguan lingkungan pada model sistem, serta diselesaikan kedalam bentuk *quadratic programming*.

Tahap awal dalam simulasi adalah dengan memberikan nilai horizon N yaitu 20, waktu pengambilan sampel $Ts = 1s$, dan total waktu simulasi t adalah 1500 satuan waktu, serta massa kapal dan parameter terkait Tabel 4.1 [22]. Kendala sudut hadap kapal (*rudder*) adalah $|\delta r| = 35$ rad dan batas keadaan kecepatan yaw 0.0932 rad/s, sehingga matriks yang bersesuaian adalah

$$
\begin{aligned}
C &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
D &= \begin{bmatrix} 0.0932 \\ 0.0932 \end{bmatrix} \\
S &= \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \\
T &= \begin{bmatrix} 35 \\ 35 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.34}
$$

Tahap selanjutnya yakni mendapatkan nilai *state* estimasi $\hat{x}$ dengan MHE, saat $k = 1$. Jika $k > N$, maka dilakukan proses estimasi dengan fungsi tujuan pada persamaan (4.33). Jika $k \leq N$, maka input kendali yang dihasilkan diterapkan

pada model sistem

$$\hat{x}_{k+1|k} = Ax(k|k) + Bu(k|k) \tag{4.35}$$

Pada proses estimasi ini dibutuhkan inisiasi nilai *state* awal yang terdiri dari v, p, r, ϕ, ψ didefinisikan sebagai berikut :

$$x_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 30 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya, melakukan proses optimasi MPC dengan fungsi tujuan pada persamaan (4.32) dan matriks batas kendala pada persamaan. Nilai *state* pada tahap ini terupgrade menjadi *state* hasil output MHE atau disebut *state estimate* $\hat{x}$. Hasil dari proses optimasi ini diperoleh barisan input kontrol $u^*_{k+1|k}, u^*_{k+2|k}, \cdots, u^*_{k+N-1|k}$ sesuai dengan konsep MPC maka nilai input yang digunakan adalah input optimal yang baris pertama saja, yaitu $u_{k+1|k} = u^*_{k+1|k}$

Pada penelitian ini tidak mempunyai pengukuran riil / *measurement*, sehingga diambil dari nilai penjumlahan antara persamaan output dengan *noise* sehingga didapatkan *measurement output*. Matriks kovarian *Noise* pada output (M_{out}) dan matriks *measurement output* (H) dengan output berupa kecepatan yaw dan sudut yaw *(heading angle)*, didefinisikan sebagai berikut :

$$M_{out} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.0349 \end{bmatrix}; H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.36}$$

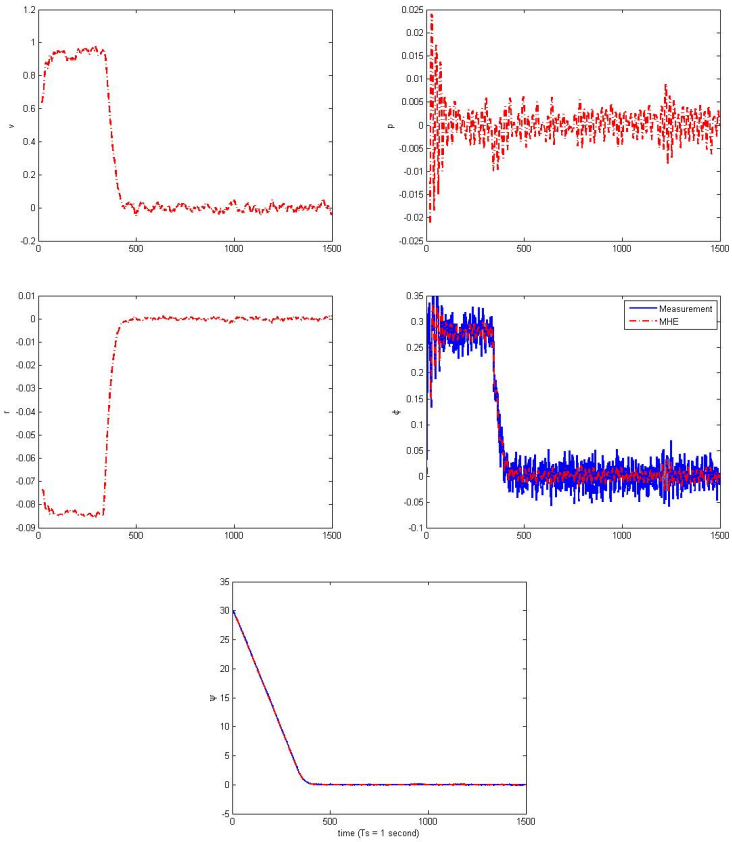
Pada simulasi tugas akhir ini, dibuat 4 skenario gerak *yaw angle* :

1. Ketika kapal bergerak dari 30 deg menuju 0 deg
2. Ketika kapal bergerak dari -30 deg menuju 0 deg

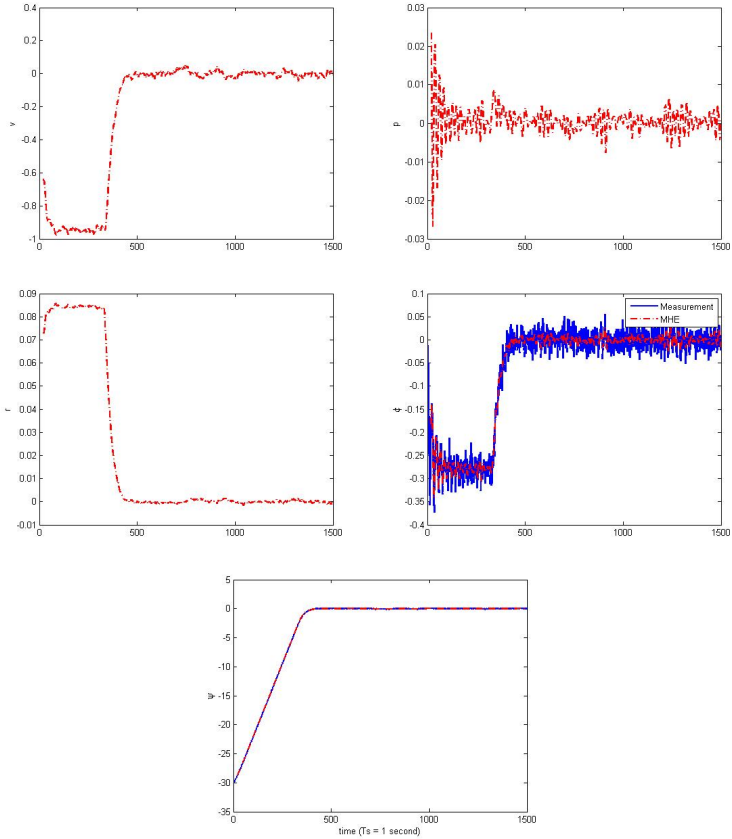
3. Ketika kapal bergerak dari 0 deg menuju 30 deg
4. Ketika kapal bergerak dari 0 deg menuju -30 deg

4.8.1 Hasil Simulasi dan Analisis Penerapan MHE-MPC

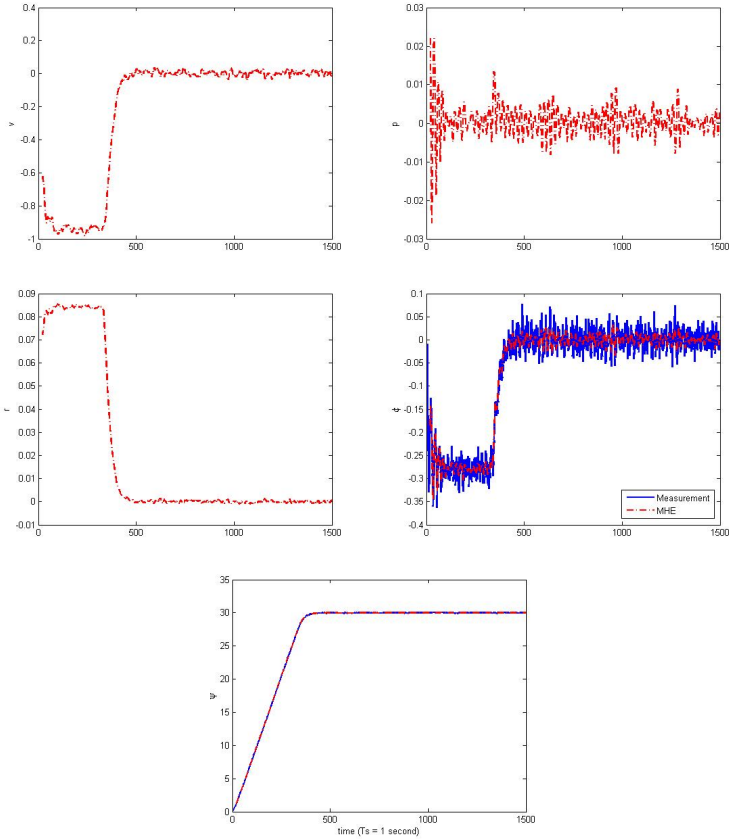
Berikut ini adalah hasil simulasi dari penggunaan metode MHE-MPC untuk ke-5 *state* dengan 4 skenario berbeda :



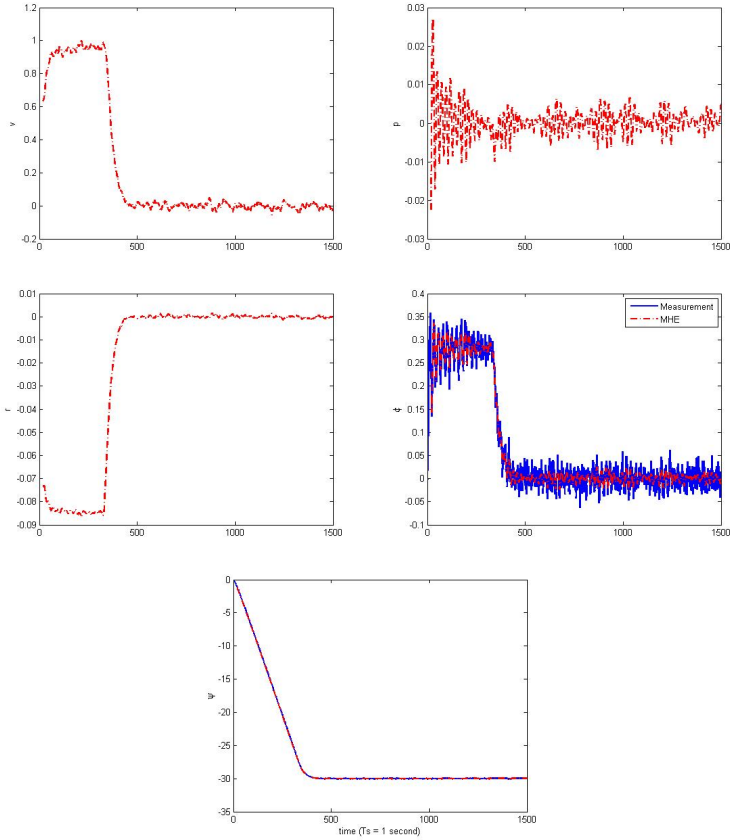
Gambar 4.3: Hasil Estimasi Skenario 1



Gambar 4.4: Hasil Estimasi Skenario 2

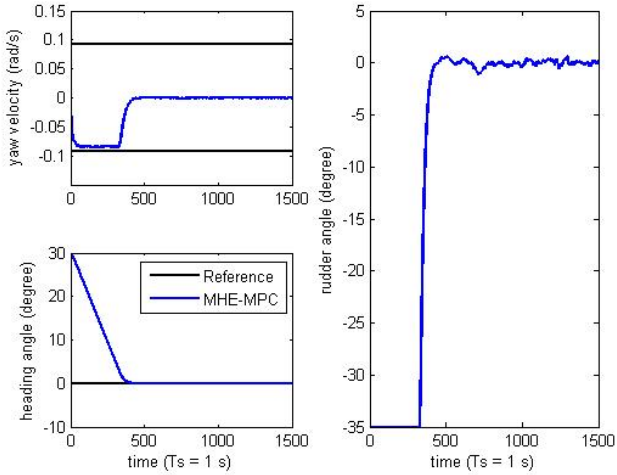


Gambar 4.5: Hasil Estimasi Skenario 3



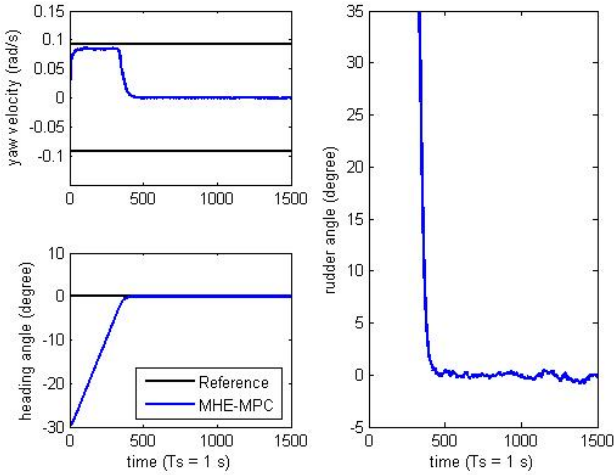
Gambar 4.6: Hasil Estimasi Skenario 4

Berikut ini adalah hasil simulasi dari penerapan metode MHE-MPC :



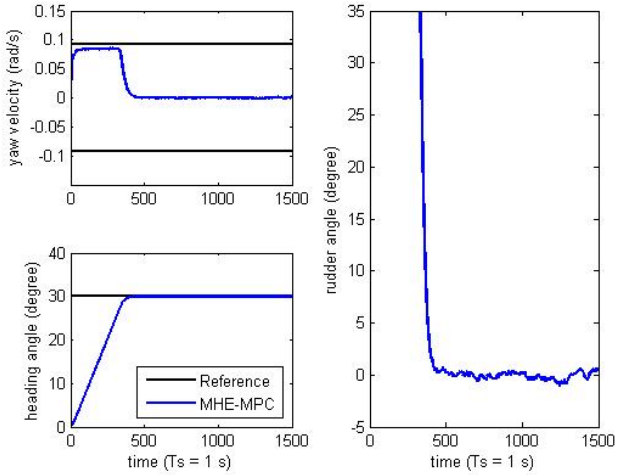
Gambar 4.7: MHE-MPC Berdasarkan Skenario 1

Pada Gambar 4.7 yaw velocity bergerak dari -0.0932 menuju ke referensi yakni 0 dalam waktu 425 s. Heading angle mencapai referensi ketika detik ke-425 s yang bergerak dari sudut 30 deg menuju 0 deg. Rudder angle bergerak mulai dari -35 deg menuju 0 deg dengan waktu selama 425 s.



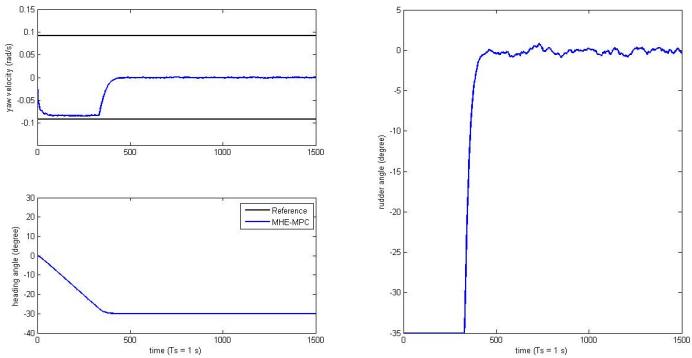
Gambar 4.8: MHE-MPC Berdasarkan Skenario 2

Pada Gambar 4.8 yaw velocity bergerak dari 0.0932 menuju ke referensi yakni 0 dalam waktu 425 s. Heading angle mencapai referensi ketika detik ke-425 s yang bergerak dari sudut -30 deg menuju 0 deg. Rudder angle bergerak mulai dari 35 deg menuju 0 deg dengan waktu selama 425 s.



Gambar 4.9: MHE-MPC Berdasarkan Skenario 3

Pada Gambar 4.9 yaw velocity bergerak dari 0.0932 menuju ke referensi yakni 0 dalam waktu 425 s. Heading angle mencapai referensi ketika detik ke-425 s yang bergerak dari sudut 0 deg menuju 30 deg (referensi). Rudder angle bergerak mulai dari 35 deg menuju 0 deg dengan waktu selama 425 s.



Gambar 4.10: MHE-MPC Berdasarkan Skenario 4

Pada Gambar 4.10 yaw velocity bergerak dari -0.0932 menuju ke referensi yakni 0 dalam waktu 425 s. Heading angle mencapai referensi ketika detik ke-425 s yang bergerak dari sudut 0 deg menuju -30 deg (referensi). Rudder angle bergerak mulai dari -35 deg menuju 0 deg dengan waktu selama 425 s.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penerapan dari metode MHE-MPC pada persamaan kapal linear maka diperoleh hasil sebagai berikut :

1. Berdasarkan estimasi state dengan Moving Horizon Estimation (MHE) diperoleh hasil estimasi pada 5 variabel state yaitu kecepatan sway, kecepatan yaw, kecepatan roll, sudut roll dan sudut yaw.

2. Berdasarkan hasil simulasi dari MHE - MPC diperoleh bahwa :
   (a) Kecepatan yaw yang bergerak dalam batas yang diberikan, mencapai ke-4 referensi pada detik ke-425 s.
   (b) Sudut yaw yang bergerak mengikuti 4 kondisi membutuhkan waktu rata-rata selama 425 s.
   (c) Pergerakan sudut hadap kapal (rudder) mencapai ke-4 referensi dengan rata-rata waktu selama 425 s.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu:

1. Menambahkan gangguan lingkungan yang ada pada sistem seperti gelombang air laut dan angin.

2. Menghitung nilai error yang dihasilkan dari simulasi MHE - MPC dan membandingkannya dengan metode lain.

3. *Degree of Freedom* (DOF) pada kapal ditambah menjadi 4,5,atau 6, serta ditambahkan penggerak selain rudder seperti sirip *(fin)*.

DAFTAR PUSTAKA

[1] https://www.cia.gov/library/publications/the-worldfactbook/geos/id.htmlaccessed 11/06/

[2] D. P. Sari, "Perancangan sistem pengendalian dan monitoring untuk menghindari tabrakan antar kapal di alur pelayaran tanjung perak Surabaya", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), (2011).

[3] P. Encarnacao and A. Pascoal, "3D path following for antonomous underwater vehicle", in Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control,Sydney, Australia, (2000) 2977-2982.

[4] R. Skjetne and T.I. Fossen, "Nonlinear maneuver and control of ship", Proceedings of Oceans 2001IEEE Conference and Exhibition, (2001) 1808-1815

[5] K.D. Do and J. Pan, "State- and output-feedback robust path following for underactuated ship using serret-frenet frame", Ocean Engineering, Vol. 31 (2004) 587-613.

[6] C. Rao, J. Rawlings, and J. Lee, "Constrained linear state estimationa moving horizon approach", Automatica, vol. 37, pp. 16191628 (2001).

[7] H. Michalska and D. Mayne, "Moving horizon observers and observer based control", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 40, no. 6, pp. 995 1006, (1995).

[8] C. Rao, J. Rawlings, and D. Mayne, "Constrained state estimation for nonlinear discrete-time systems: stability and moving horizon approximations", IEEETrans.Automat.Contr.,vol.48,no.2,pp.246 258 (2003).

[9] M. Breckpot, T. Blanco Barjas, and B. De Moor, "Flood control of rivers with nonlinear model predictive control and moving horizon estimation", in IEEE Conference on Decision and Control, (Atlanta, USA), pp. 61076112 (2010).

[10] A. Tahiyatul dan Subchan, "Panduan Dan Kendali Kapal Tanpa Awak Dengan Menggunakan Metode Model Predictive Control (MPC) Dan Akar Kuadrat-Unscented Kalman Filter (AK-UKF), Jurusan Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (2012).

[11] S. A Siti, Kamiran, dan Subchan, "Penerapan Model Predictive Control (MPC) pada Kapal Autopilot dengan Lintasan Tertentu", Jurnal Sains dan Seni, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (2012).

[12] Lima, B. M., Morato, M. M., Mendes, P. R. C., and Normey-Rico, J. E, "Moving Horizon Estimation of Faults in Renewable Microgrids". IFAC-PapersOnLine, 52(1), 311316 (2019). doi:10.1016/j.ifacol.2019.06.080.

[13] A. Zendhiastara, Subchan, dan kamiran, "Penerapan *Multi-Agent Model Predictive Control (MPC)* untuk Optimasi Waktu Hijau pada Jaringan Lalu Lintas Perkotaan", Jurnal, Jurusan Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (2016).

[14] Li, Z. and Sun, J. "Disturbance compensating model predictive control with application to ship heading control", IEEE transactions on control systems technology 20(1), 257265 (2012).

[15] L.G Nathanael, A.S Aulia, dan A Erna, "Estimasi Variabel Dinamik Kapal Menggunakan Metode Kalman Filter", Jurusan Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (2013).

[16] Thor I. Fossen dan Tristan Perez, "Kalman Filtering for Positioning and Heading Control of Ships and Offshore Rigs", Control System Magazine (2009).PP.32-46

[17] P. Heri, "Distrubance Compensating Model Predictive Control Untuk Kendali Gerak Kapal Perang Dengan misi Penembakan Misil", Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (2018).

[18] A. R Bayu, "Kendali Sudut Pada Gerak Kapal Untuk Pelacakan Lintasan Dubins Menggunakan Metode Distrubance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC)", Tugas Akhir, Departemen Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (2017).

[19] Ramalingam, K. Mohan, "Moving Horizon Estimation with Dynamic Programming" (2013).ETD Archive. 815.

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

[21] H. K. Yoon, N. S. Son, G. J. Lee "Estimation of the roll hydrodynamic moment model of a ship by using the system identification method and the free running

model test", IEEE Journal of Oceanic Engineering 32(4) 798806, (2007).

[22] T. Perez, "Ship Motion Control", Norwegian University of Science and Technology(NTNU), Marine Technology Centre, NO-7491, Trondheim, Norway, (2005).

[23] Blanke, M., Christensen, A. C., Rudder-roll damping autopilot robustness to sway-yaw-roll couplings, Aalborg Universitetscenter (1993).

[24] J.B. Rawlings, D. Q. Mayne., Model Predictive Control: Theory and Design, Madison; Wisconsin (2012).

[25] Zak, S. H., Systems and control, Vol. 198, Oxford University Press New York (2003).

[26] Ogata, K., Discrete Time Control System, Prentice-Hell, Inc:New Jersey (1995).

BIODATA PENULIS

Penulis memiliki nama lengkap Anggi Nurinda Pratiwi, lahir di Jakarta, pada 14 November 1998. Terlahir sebagai anak pertama dari 4 bersaudara. Sejak usia 5 tahun, penulis telah menempuh pendidikan formal dimulai dari TK Islam Darussalam (2003-2004), SD Negeri 03 Pagi Cipete Selatan (2004-2010), SMP Negeri 68 Jakarta (2010-2013), dan SMA Negeri 46 Jakarta (2013-2016). Kemudian pada tahun 2016, penulis melanjutkan studi ke jenjang S1 di Jurusan Matematika Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur Mandiri dengan NRP 06111640000116. Di Jurusan Matematika, penulis mengambil Bidang Minat Matematika Terapan yang terdiri dari bidang minat Pemodelan dan Riset Operasi dan Pengolahan Data.

Selama menempuh pendidikan di ITS, penulis aktif berorganisasi di Jamaah Masjid Manarul Ilmi (JMMI) ITS sebagai staf Badan Pelayanan Umat (BPU) (2016-2017) dan Staf ahli BPU (2017-2018), Lembaga Dakwah Jurusan Matematika sebagai staf Departemen Syiar (2017-2018) dan Sekretaris Departemen (SEKDEP) Syiar (2018-2019). Penulis adalah aktivis Salman ITB, Penulis mengikuti kegiatan kaderisasi Salman Spiritual Camp (SSC) ITB 2017, Latihan Mujtahid Dakwah (LMD) 2018, mengikuti kepanitiaan Idul Adha tepatnya Divisi Acara Bandung Adha Festival (BAF 2019). Penulis juga aktif diberbagai kepanitiaan ITS seperti SEMARAK Ibnu Muqlah 2016, kegiatan Buka Bersama 1000 Anak Yatim IKA ITS 2017,

Panitia ABC Ceria dan lain sebagainya.

Adapun informasi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini dapat ditujukan ke penulis melalui email anggipratiwi418@gmail.com