



TUGAS AKHIR - KM184801

**KENDALI SUDUT HADAP KAPAL TANPA AWAK
DENGAN *MOVING HORIZON ESTIMATION* -
NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL (MHE -
NMPC)**

**ULFA INAS SAYEKTI
0611164000017**

Dosen Pembimbing
Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si

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



TUGAS AKHIR - KM184801

**KENDALI SUDUT HADAP KAPAL TANPA AWAK
DENGAN *MOVING HORIZON ESTIMATION* -
NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL (MHE -
NMPC)**

ULFA INAS SAYEKTI
06111640000017

Dosen Pembimbing :
Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si

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



FINAL PROJECT - KM184801

***SHIP HEADING CONTROL OF UNMANNED SHIP USING
MOVING HORIZON ESTIMATION - NONLINEAR MODEL
PREDICTIVE CONTROL (MHE - NMPC)***

ULFA INAS SAYEKTI
06111640000017

Supervisor :
Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si

*Department of Mathematics
Faculty of Science and Data Analytics
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020*

LEMBAR PENGESAHAN

**KENDALI SUDUT HADAP KAPAL TANPA AWAK
DENGAN MOVING HORIZON ESTIMATION - NONLINEAR
MODEL PREDICTIVE CONTROL (MHE - NMPC)**

**SHIP HEADING CONTROL OF UNMANNED SHIP USING
MOVING HORIZON ESTIMATION - NONLINEAR MODEL
PREDICTIVE CONTROL (MHE - NMPC)**

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 :

ULFA INAS SAYEKTI
NRP. 0611164000017

Surabaya, 06 Agustus 2020
Menyetujui,

Dosen Pembimbing,



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

Mengetahui,

Kepala Departemen Matematika
FSAD ITS



Subchan, Ph.D

NIP. 19710513 199702 1 001



KENDALI SUDUT HADAP KAPAL TANPA AWAK DENGAN *MOVING HORIZON ESTIMATION - NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL* (MHE - NMPC)

Nama Mahasiswa : Ulfa Inas Sayekti
NRP : 06111640000017
Jurusan : Matematika FSAD-ITS
Pembimbing : Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si

Abstrak

Sistem kendali merupakan hal vital pada kapal tanpa awak. Kendali haluan pada kapal merupakan salah satu masalah kendali kapal dalam pertahanan dan keamanan wilayah perairan Indonesia. Kapal membutuhkan sistem navigasi, panduan, dan kendali yang mampu mengarahkan kapal untuk menghadap ke sudut hadap yang diinginkan, sehingga kondisi kapal tanpa awak dikendalikan secara autopilot. Metode yang digunakan untuk mengendalikan kemudi kapal menggunakan model matematika sistem nonlinear adalah metode nonlinear Model Predictive Control (NMPC). NMPC adalah salah satu metode yang tepat untuk sistem kendali karena NMPC bisa memprediksi output dari sistem. Agar input kendali lebih akurat maka dilakukan estimasi state model dengan menggunakan estimator Moving Horizon Estimator (MHE). Hasil estimasi yang diperoleh kemudian digunakan pada metode kendali NMPC. Berdasarkan metode yang telah diterapkan pada model kapal, diperoleh hasil bahwa MHE - NMPC dapat mengendalikan sistem yang mula-mula berada pada sudut yaw 30 derajat dapat mencapai sudut referensi 0 derajat.

Kata-kunci : *nonlinear model predictive control, moving horizon estimation, kendali, estimasi, kapal*

**SHIP HEADING CONTROL OF
UNMANNED SHIP USING MOVING
HORIZON ESTIMATION - NONLINEAR
MODEL PREDICTIVE CONTROL (MHE -
NMPC)**

Name : Ulfa Inas Sayekti
NRP : 06111640000017
Department : Mathematics FSAD-ITS
Supervisor : Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si

Abstract

The control system is one of vital factor on the unmanned ship. The heading control for ships is one of the ship control problems in the defense and security of Indonesian waters. The ship requires a navigation system, guidance, and control, which capable of steering the ship to the desired viewpoint, so that the condition of the unmanned ship is controlled with autopilot. The method used to control the rudder of the ship using a nonlinear system mathematical model is the Nonlinear Model Predictive Control (NMPC) method. NMPC is one of the correct methods to control systems because NMPC can predict output of the system. So that the control input is more accurate, a model estimation is performed using the Moving Horizon Estimation (MHE) estimator. Then the estimation results are used in the NMPC control method. Based on the method that has been applied for the ship model, the results show that MHE - MPC can control the system from a yaw angle of 30 degrees to a reference angle of 0 degrees.

Keywords : *nonlinear model predictive control, moving horizon estimation, control, estimation, ship.*

KATA PENGANTAR

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

KENDALI SUDUT HADAP KAPAL TANPA AWAK DENGAN *MOVING HORIZON* *ESTIMATION - NONLINEAR MODEL* *PREDICTIVE CONTROL* (MHE - NMPC)

sebagai salah satu syarat kelulusan Program Sarjana Departemen Matematika, Fakultas Sains dan Analitika Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, penulis menyampaikan terimakasih kepada berbagai pihak yang telah membantu terwujudnya Tugas Akhir ini, antara lain kepada :

1. Kedua orang tua tercinta yang selalu memberikan doa serta dukungan kepada penulis selama menempuh program studi Sarjana Matematika. Semoga beliau diberikan kesehatan dan limpahan rahmat-Nya, aamiin ya Allah.
2. Subchan, Ph.D sebagai Kepala Departemen Matematika, Fakultas Sains dan Analitika Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
3. Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si sebagai dosen pembimbing, yang telah memberikan banyak ide dan saran kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.

4. Dr. Dieky Adzkiya, S.Si, M.Si sebagai dosen matematika, yang telah ikut membantu penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Mas Yasya, Mas Heri dan Mbak Baity yang telah bersedia meluangkan waktunya dan bantuan selama mengerjakan Tugas Akhir.
6. Sahabat penulis (Syifa, Palupi, Anggi, Ria dan Khusnul) yang telah mendengarkan keluh kesah penulis dan saling memberikan support selama mengerjakan Tugas Akhir.
7. Teman-teman penulis di S1 Matematika ITS yang telah menemani hari-hari penulis selama menuntut ilmu.
8. Teman-teman penulis di FORMASTA Surabaya yang telah memotivasi dan berjuang bersama-sama penulis.
9. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, semoga Allah SWT mengerahkan rasa ikhlas dan rendah diri kepada semua pihak yang telah membantu penulis, baik secara langsung ataupun tidak langsung, serta kepada penulis sendiri.

Penulis menyadari bahwa dalam Tugas Akhir ini masih banyak terdapat kekurangan yang disebabkan kelemahan dan keterbatasan penulis. Oleh karena itu penulis sangat terbuka menerima saran dan kritik demi perbaikan di masa mendatang. Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua dan semua yang dikerjakan ini mendapatkan ridho dari Allah SWT. Aamiin.

Tulungagung, Juni 2020
Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR SIMBOL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Penelitian Terdahulu	7
2.2 Model Matematika Dinamika Kapal	9
2.3 Metode Runge-Kutta Orde Empat	14
2.4 <i>Moving Horizon Estimation</i> (MHE)	15
2.5 <i>Model Predictive Control</i> (MPC)	18
2.6 <i>Nonlinear Model Predictive Control</i> (NMPC)	20
BAB III METODE PENELITIAN	23

BAB IV	ANALISIS DAN PEMBAHASAN	29
4.1	Analisis Model Matematika Dinamika Kapal.	29
4.2	Pendiskritan Model Sistem Kapal Menggunakan Runge-Kutta 4.....	34
4.3	Estimasi <i>State</i> Model Kapal dengan <i>Moving Horizon Estimation</i> (MHE)	36
4.4	Kendali Kontrol Sudut Hadap Kapal dengan <i>Nonlinear Model Predictive Control</i> (NMPC)	37
	4.4.1 Formulasi Plan Model	37
	4.4.2 Formulasi Fungsi Objektif	38
	4.4.3 Formulasi Kendala	39
4.5	Diagram Blok Gabungan <i>Moving Horizon Estimation - Nonlinear Model Predictive Control</i> (MHE-NMPC)	40
4.6	Simulasi dan Analisis Penerapan MHE- NMPC pada Kendali Sudut Hadap Kapal ...	42
BAB V	PENUTUP	51
5.1	Kesimpulan	51
5.2	Saran	52
	DAFTAR PUSTAKA	53
	BIODATA PENULIS	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Sistem Koordinat Kapal dan Bumi	2
Gambar 2.1	Diagram Blok MHE	16
Gambar 2.2	Skema <i>Receding Horizon Control</i>	19
Gambar 2.3	Diagram Blok MPC	19
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	26
Gambar 3.2	Diagram Alir MHE - NMPC	27
Gambar 4.1	Kendali Haluan Kapal dan Sudut Kemudi	31
Gambar 4.2	Diagram Blok MHE-NMPC	40
Gambar 4.3	Pengukuran dan Hasil Estimasi Sudut <i>Roll</i>	44
Gambar 4.4	Pengukuran dan Hasil Estimasi Sudut <i>Yaw</i>	45
Gambar 4.5	Hasil Estimasi Kecepatan <i>Sway</i>	45
Gambar 4.6	Hasil Estimasi Kecepatan <i>Roll</i>	46
Gambar 4.7	Hasil Estimasi Kecepatan <i>Yaw</i>	46
Gambar 4.8	Simulasi Kecepatan <i>Yaw</i> dengan MHE - NMPC	47
Gambar 4.9	Simulasi Sudut <i>Yaw</i> dengan MHE - NMPC	47
Gambar 4.10	Simulasi Pergerakan <i>rudder</i> dengan MHE - NMPC	48
Gambar 4.11	Simulasi dengan Variasi Sudut <i>Yaw</i> . . .	49

Daftar Simbol

m	massa
v	kecepatan <i>sway</i>
p	kecepatan <i>roll</i>
r	kecepatan <i>yaw</i>
x_G	posisi x pusat gravitasi
z_G	posisi z pusat gravitasi
I_x	momen inersia pada sumbu x
I_z	momen inersia pada sumbu z
$Y_{\dot{v}}$	koefisien gaya massa tambahan pada v sepanjang sumbu y
$Y_{\dot{p}}$	koefisien gaya massa tambahan pada p sepanjang sumbu y
$Y_{\dot{r}}$	koefisien gaya massa tambahan pada r sepanjang sumbu y
$K_{\dot{p}}$	koefisien gaya momen sepanjang sumbu y terhadap p
$K_{\dot{v}}$	koefisien gaya momen sepanjang sumbu y terhadap v
$N_{\dot{v}}$	koefisien gaya momen sepanjang sumbu z terhadap v
$N_{\dot{r}}$	koefisien gaya momen sepanjang sumbu z terhadap r
Y	gaya dan momen <i>sway</i>
K	gaya dan momen <i>roll</i>
N	gaya dan momen <i>yaw</i>
Y_{uv}	turunan gaya <i>sway</i> terhadap u dan v pada sumbu x dan y
Y_{ur}	turunan gaya <i>sway</i> terhadap u dan r pada sumbu x dan z
Y_v	turunan gaya <i>sway</i> terhadap v pada sumbu y
Y_{vr}	turunan gaya <i>sway</i> terhadap v dan r pada sumbu y dan z

Y_r	turunan gaya <i>sway</i> terhadap r pada sumbu z
$Y_{\phi\phi\phi}$	turunan gaya <i>sway</i> terhadap ϕ pada sumbu x
Y_p	turunan gaya <i>sway</i> terhadap p pada sumbu x
ρ	massa jenis air laut
g	konstanta gravitasi
∇	volume <i>displacement</i>
$GZ(\phi)$	metacenter
$\sum F$	Resultan Gaya (kg m/s ²)
a	Percepatan (m/s ²)
τ	Momen Gaya / Torsi (m kg $\frac{rad}{s^2}$)
r	Posisi Benda (m)
α	Percepatan (m/s ²)

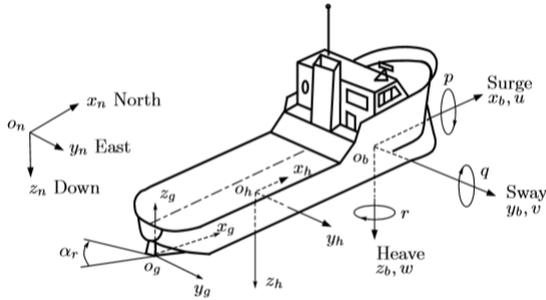
BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Sistem keselamatan dan keamanan menjadi faktor penting yang harus diperhatikan dalam pelayaran baik dilihat dari sisi sarana berupa kapal dan prasarana seperti sistem navigasi serta sumber daya manusia yang terlibat didalamnya. Salah satu kegiatan pelayaran adalah melakukan patroli untuk menjaga keutuhan wilayah perairan. Banyak contoh kasus terjadinya kecelakaan laut yang disebabkan atas kelalaian pengemudi dalam mengendalikan kapal. Oleh karena itu, kapal membutuhkan sistem navigasi, panduan dan kendali dengan menggunakan sistem kendali autopilot, sehingga mampu mengarahkan kapal untuk bergerak ke sudut hadap yang diinginkan [1]. Alat yang digunakan untuk mengarahkan sudut hadap kapal adalah kemudi (*rudder*). Kapal merupakan transportasi laut yang memiliki 6 derajat kebebasan dalam bergerak, yaitu *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw* yang dapat dilihat pada Gambar 1.1. Pergerakan ini berpusat pada tiga sumbu utama, yaitu sumbu longitudinal yang terdiri dari gerak *surge* sebagai translasi dan *roll* sebagai rotasi, sumbu transversal adalah *sway* sebagai gerak translasinya dan *pitch* sebagai rotasi. Gerak *heave* dan *yaw* masing-masing sebagai translasi dan rotasi pada sumbu normal bumi [2].

Salah satu metode pengendali yang banyak dikembangkan dibidang kendali sistem kapal adalah *Model Predictive Control* (MPC) [3]. Beberapa penelitian mengenai kendali haluan kapal dengan menggunakan MPC, diantaranya adalah penelitian tentang kendali haluan kapal dengan



Gambar 1.1: Sistem Koordinat Kapal dan Bumi

menggunakan metode *Unscented Model Predictive Control* (UMPC). Pada penelitian ini dibahas kendali haluan kapal dengan mempertimbangkan 4 derajat kebebasan, yaitu *surge*, *sway*, *yaw* dan *roll*, yang mana gangguan lingkungan diabaikan. Selanjutnya, penelitian tentang pengendalian misi kapal perang. Pada penelitian ini, diperkenalkan metode *Disturbance Compensating Model Predictive Control* (DC-MPC) untuk menyelesaikan permasalahan kendali haluan kapal dengan mempertimbangkan gangguan yang ada.

MPC memiliki beberapa kelebihan dibandingkan metode lain diantaranya dapat digunakan untuk mengendalikan berbagai macam proses, mulai dari sistem dengan dinamika yang relatif sederhana hingga sistem yang memiliki kompleksitas lebih tinggi termasuk sistem waktu tunda yang lama dan sistem yang tidak stabil, kasus multivariabel juga dapat diselesaikan dengan mudah, dapat menangani berbagai macam *constraint* (kendala) yang terdapat pada sistem, sehingga dapat dimasukkan dalam proses desain, serta kemampuannya dalam proses optimasi [4]. Selain itu, MPC juga mempunyai tahapan prediksi *output* yang akan datang sehingga bisa digunakan untuk memperbaiki

perhitungan *input* kendali. Dalam penelitian ini, sistem yang digunakan merupakan sistem nonlinear, maka metode yang digunakan adalah *Nonlinear Model Predictive Control*. NMPC merupakan pengembangan dari metode MPC, sehingga sistem nonlinear tidak perlu dilinearisasikan terlebih dahulu.

Dengan adanya sistem pengendali otomatis (sistem autopilot), sebuah sistem pengendalian gerak kapal membutuhkan tingkat keakurasian yang lebih baik, sehingga dibutuhkan estimator yang digunakan untuk mengestimasi gerak kapal. Dari beberapa penelitian sebelumnya, estimasi dilakukan dengan metode Kalman Filter. Kelebihan dari metode tersebut adalah kemampuan mengestimasi suatu keadaan berdasarkan data yang minim [5]. Namun, metode tersebut hanya dapat diterapkan pada sistem stokastik.

Sedangkan sistem yang digunakan dalam penelitian ini adalah sistem nonlinear deterministik, sehingga metode yang cocok dalam mengestimasi *state* pada sistem ini adalah *Moving Horizon Estimation*. MHE adalah metode estimasi berbasis optimasi yang efisien untuk estimasi keadaan terbatas dalam sistem nonlinear [6]. MHE memiliki dua keunggulan dibandingkan dengan dengan estimator lain, yaitu dapat mempertimbangkan kondisi dan gangguan dari sistem karena MHE berbasis optimisasi. Selain itu, MHE juga memiliki kemampuan untuk menangani sistem nonlinear deterministik.

Oleh karena itu, pada Tugas Akhir ini akan dibahas masalah kendali haluan kapal dengan mempertimbangkan tiga derajat kebebasan, yaitu *sway*, *yaw* dan *roll* menggunakan *Moving Horizon Estimation - Nonlinear Model Predictive Control* (MHE - NMPC). Kedua metode tersebut dikombinasikan dalam pengendalian kapal karena saling berbagi model ruang yang sama [7].

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana estimasi *state* pada kapal tanpa awak menggunakan estimator MHE ?
2. Bagaimana kendali haluan kapal tanpa awak untuk mengarahkan sudut hadap kapal menggunakan metode NMPC ?
3. Bagaimana analisis hasil simulasi dari penerapan MHE-NMPC pada kapal tanpa awak ?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Model matematika manuver kapal membentuk sistem persamaan dengan mempertimbangkan tiga derajat kebebasan, yaitu *sway*, *yaw* dan *roll*.
2. Gangguan lingkungan diabaikan karena diasumsikan sangat kecil.
3. Data parameter hidrodinamika kapal berdasarkan pada penelitian Blanke & Christensen, 2005.

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk menerapkan estimator *Moving Horizon Estimation* (MHE) dalam mengestimasi *state* pada kapal.

2. Untuk menerapkan metode *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC) dalam mengendalikan haluan pada kapal.
3. Untuk menganalisis hasil simulasi sistem setelah dikendalikan dengan metode *Moving Horizon Estimation - Nonlinear Model Predictive Control* (MHE - NMPC).

1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Memberikan metode alternatif yang lebih baik pada kendali haluan kapal dengan menggunakan metode *Moving Horizon Estimation - Nonlinear Model Predictive Control* (MHE - NMPC).
2. Sebagai dasar pengembangan penelitian terkait dibidang desain kendali kapal di lautan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam Tugas Akhir ini penulis melihat dari beberapa penelitian-penelitian sebelumnya yang sesuai dengan topik yang diambil. Pertama, penelitian yang dilakukan oleh dosen Matematika, yaitu Tahiyatul Asfihani 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)*. Pada penelitian ini dibahas mengenai sistem kendali dan estimasi pada kapal tanpa awak dengan mempertimbangkan 2 derajat kebebasan, yaitu *surge* dan *yaw*. Metode yang digunakan untuk mengendalikan kapal tanpa awak sehingga posisi kapal dapat mengikuti lintasan yang diharapkan adalah metode Model Predictive Control (MPC). Agar *input* kendali lebih akurat maka dilakukan estimasi *state* model dan parameter yang tidak pasti dengan menggunakan metode Akar Kuadrat-Unscented Kalman Filter (AK-UKF). Simulasi dari kendali dan estimasi menunjukkan kevalidan dari hukum kendali yang didapat dan lintasan kapal dapat mengikuti lintasan yang diharapkan [8].

Kedua, penelitian yang dilakukan oleh T. Kraus, dkk (2013) dengan judul *Moving Horizon Estimation and Nonlinear Model Predictive Control for Autonomous Agricultural Vehicles*. Pada penelitian tersebut dijelaskan tentang metode *Moving Horizon Estimation* dan *Model Predictive Control* pada sistem nonlinear, dimana sistem tersebut adalah traktor. Hasilnya, kerangka MHE-NMPC

mampu menunjukkan kinerja pelacakan referensi yang akurat di lapangan rumput berbasah dan bergelombang [9].

Penelitian lain mengenai metode MHE-NMPC juga tertulis dalam jurnal yang berjudul *Real-time MHE-based nonlinear MPC of a Pendubot system* (2015). Pada penelitian ini dibahas kontrol optimal *real-time* dari Pendubot menggunakan nonlinear *Model Predictive Control* (NMPC) yang dikombinasikan dengan estimator *Moving Horizon Estimation* (MHE). Hasil simulasi dengan menggunakan *ACADO Code Generation* menunjukkan bahwa pendekatan solusi secara eksperimental lebih cepat daripada penyebaran waktu nyata pada sebuah laboratorium sistem Pendubot, yang mengarah ke waktu komputasi yang layak dan kinerja estimasi / kontrol yang baik [10].

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Heri Purnawan (2018) yang berjudul *Disturbance Compensating Model Predictive Control* untuk Kendali Gerak Kapal Perang dengan Misi Penembakan Misil. Pada penelitian ini dibahas permasalahan pengendalian misi kapal perang. Pengendalian sistem gerak kapal dilakukan dengan metode *Disturbance Compensating Model Predictive Control* (DC-MPC). Metode DC-MPC dilakukan optimasi dengan mempertimbangkan gangguan yang ada. Gangguan yang dimaksud adalah *impact* dari penembakan misil. Hasilnya, DC-MPC pada sistem nonlinear menghasilkan respon yang lebih lambat dibandingkan dengan respon sudut hadap dari sistem linear. Namun, jika menginginkan respon yang lebih baik, dapat dicoba metode kontrol yang lain seperti kendali *adaptive* atau *nonlinear model predictive control* (NMPC), karena sistem dinamik kapal berbentuk sistem nonlinear [11].

Selain itu, pada penelitian lain yang dilakukan oleh Baity Jannaty (2020) dengan judul Desain Kendali Haluan Kapal dengan *Unscented Model Predictive Control* (UMPC).

Pada penelitian ini dibahas mengenai kendali haluan kapal dengan mempertimbangkan 4 derajat kebebasan, yaitu *surge*, *sway*, *yaw* dan *roll* menggunakan metode *Unscented Model Predictive Control* (UMPC). Pada sistem ini gangguan lingkungan diabaikan karena diasumsikan sangat kecil, sehingga tidak ada yang mempengaruhi gerak *roll* pada kapal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa UMPC dapat mengatasi permasalahan dengan gangguan yang bersifat stokastik [12].

2.2 Model Matematika Dinamika Kapal

Model matematika dinamika kapal muncul akibat dari pergerakan kapal yang disebabkan baik dari kapal itu sendiri (*maneuver*) maupun faktor luar yang mempengaruhinya (*seakeeping*). *Maneuver* merupakan suatu gerakan yang menyebabkan kapal memberikan respon gerakan sebagai reaksi dari aksi yang diberikan oleh sistem autopilot. Faktor yang mempengaruhinya adalah dimensi kapal, bentuk lambung kapal dan berat kapal. Sedangkan *seakeeping* adalah suatu gerakan kapal yang terjadi berhubungan dengan gerakan aksi gelombang, seperti gaya-gaya luar yang disebabkan oleh kondisi air laut. Ada 5 bentuk arah datangnya gelombang terhadap kapal, yaitu : *headseas* (tepat didepan haluan), *bowseas* (samping haluan), *beamseas* (dari arah lambung kapal), *quarteningseas* (dari samping buritan) dan *followingseas* (dari buritan). Sementara, gerak sebuah kapal ketika berada di lautan dibagi menjadi dua macam, yaitu gerak translasi dan gerak rotasi. Gerak translasi meliputi *surge*, *sway* dan *heave*, sedangkan gerak rotasi meliputi *pitch*, *roll* dan *yaw*. Gerakan inilah yang kemudian dikenal dengan *six degree of freedom* (6 derajat kebebasan). Berdasarkan Gambar 1.1, 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 dan *yaw* merupakan rotasi kapal terhadap sumbu- Z_0 .

Dasar dari dinamika *maneuver* dan *seakeeping* dapat dijelaskan dan dianalisa dengan menggunakan hukum gerak Newton. Hukum gerak Newton terdiri dari tiga, yaitu hukum Newton I, hukum Newton II dan hukum Newton III.

Hukum Newton I, "jika resultan gaya yang bekerja pada benda yang sama dengan nol, maka benda yang mula-mula diam akan tetap diam. Benda yang mula-mula bergerak lurus beraturan akan tetap lurus beraturan dengan kecepatan tetap".

$$\sum F = 0 \quad (2.1)$$

Hukum Newton II, "sebuah benda bermassa m yang mendapat resultan gaya sebesar F akan memperoleh percepatan sebanding dengan resultan gaya tersebut dan berbanding terbalik dengan massanya".

$$\sum F = ma \quad (2.2)$$

Jika ruas kanan dan ruas kiri diturunkan terhadap waktu t , maka dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\sum F = ma = m \frac{da}{dt} = m\dot{v} \quad (2.3)$$

sehingga dari Persamaan (2.3) dapat dituliskan menjadi

$$m\dot{v} = f_c \quad (2.4)$$

dimana, \dot{v} adalah turunan dari kecepatan, yang berarti percepatan suatu benda.

Hukum Newton III, "jika dua benda berinteraksi, gaya yang dilakukan oleh benda pertama pada benda kedua sama dan berlawanan arah dengan gaya yang dilakukan oleh benda

kedua pada benda pertama". Hukum ini disebut sebagai hukum gaya aksi reaksi.

$$\sum F_{aksi} = - \sum F_{reaksi} \quad (2.5)$$

Selain itu pada gerak kapal terdapat gaya yang bergerak secara rotasi atau disebut dengan Momen Gaya / Torsi. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\tau = rF = I\alpha = mr^2\alpha \quad (2.6)$$

Berdasarkan hukum Newton II, gaya *sway*, gerakan menyamping (kanan/kiri) pada kapal sepanjang sumbu Y_0 dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Y = m\dot{v} - mz_G\dot{p} + mx_G\dot{r} \quad (2.7)$$

dimana Y adalah gaya dan momen *sway*, m adalah massa, \dot{v} adalah turunan percepatan gerak *sway*, \dot{r} adalah turunan percepatan gerak *yaw*, \dot{p} adalah turunan percepatan gerak *roll*, x_G dan z_G adalah koordinat dari *center of gravity* pada kapal.

Momen dan gaya hidrodinamika tergantung pada gerakan kapal melalui air dan merupakan fungsi dari kecepatan dan percepatan kapal relatif terhadap air. Dengan kata lain dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Y &= Y(v, r, \dot{v}, \dot{r}, \delta) \\ K &= K(v, r, \dot{v}, \dot{r}, \delta) \\ N &= N(v, r, \dot{v}, \dot{r}, \delta) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Persamaan (2.8) dapat dihitung dengan mengekspansi deret Taylor pada sekitar titik nominal dan tetap mempertahankannya pada order pertama, maka akan didapatkan,

$$Y = Y(v, r, \dot{v}, \dot{r}, \delta) + (v - v_1) \frac{\partial Y}{\partial v} + \dots + (\dot{r} - \dot{r}_1) \frac{\partial Y}{\partial \dot{r}} \quad (2.9)$$

dimana keseluruhan dari turunan parsial akan dievaluasi pada kondisi nominal. Demikian juga halnya untuk Persamaan (2.9) yang diturunkan dari K dan N . Kondisi nominal yang dimaksud adalah gerak lurus dengan kecepatan konstan, sehingga Persamaan (2.9) disederhanakan menjadi

$$Y = \frac{\partial Y}{\partial v}v + \frac{\partial Y}{\partial r}r + \frac{\partial Y}{\partial \dot{v}}\dot{v} + \dots \quad (2.10)$$

Turunan dalam ekspansi tersebut disebut dengan koefisien hidrodinamika dan dinotasikan dengan $Y_v, Y_{\dot{v}}, Y_r, \dots$

Kemudian mensubstitusikan ke dalam Persamaan (2.7), persamaan dari gerak *sway* dengan tanpa adanya gangguan luar dari lingkungan menjadi

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - (mz_G + Y_{\dot{p}})\dot{p} + (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} = -mur + Y \quad (2.11)$$

Secara matematis, besar nilai Y yang ditimbulkan oleh gerak *sway* dapat didefinisikan sebagai berikut

$$Y = Y_{hyd} + Y_{eks} \quad (2.12)$$

dimana, Y_{hyd} merupakan gaya-gaya hidrodinamika yang bekerja terhadap gaya *sway* Y dan Y_{eks} adalah gaya dorong yang dihasilkan kapal berupa *rudder* pada kapal, dengan notasi Y_{δ} yang dihitung dari persamaan berikut [13]:

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

Nilai $K_{\delta} = -l_{\delta_z} Y_{\delta}$ dan $N_{\delta} = -l_{\delta_x} Y_{\delta}$

Pada penelitian ini, model matematika untuk sistem persamaan gerak kapal, dibentuk dengan mempertimbangkan tiga derajat kebebasan, yaitu *sway*, *yaw* dan *roll*. Model

matematika dalam penelitian ini didefinisikan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - (mz_G + Y_{\dot{p}})\dot{p} + (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} &= -mur + Y_{hyd} + Y_{eks} \\
-(mz_G + K_{\dot{v}})\dot{v} + (I_x - K_{\dot{p}})\dot{p} &= mz_Gur + K_{hyd} + K_{eks} \\
(mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} &= -mx_Gur + N_{hyd} + N_{eks}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Y_{eks} , K_{eks} dan N_{eks} pada Persamaan (2.13) merupakan gaya dorong yang dihasilkan dari kapal berupa *rudder*, *propeller* dan *bow thrusters*. Namun, pada Tugas Akhir ini hanya gaya *rudder* yang diperhitungkan. Sedangkan Y_{hyd} , K_{hyd} dan N_{hyd} pada Persamaan (2.14)-(2.16) merupakan gaya dan momen hidrodinamika yang bekerja pada *sway* (Y), *roll* (K) dan *yaw* (N) diberikan sebagai berikut

$$\begin{aligned}
Y_{hyd} &= Y_{|u|v}|u|v + Y_{ur}ur + Y_{v|v}|v|v + Y_{v|r}|v|r + Y_{r|v}|r|v| + \\
&Y_{\phi|uv}|\phi|uv| + Y_{\phi|ur}|\phi|ur| + Y_{\phi uu}\phi u^2
\end{aligned} \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned}
K_{hyd} &= K_{|u|v}|u|v + K_{ur}ur + K_{v|v}|v|v + K_{v|r}|v|r + K_{r|v}|r|v| + \\
&K_{\phi|uv}|\phi|uv| + K_{\phi|ur}|\phi|ur| + K_{\phi uu}\phi u^2 + K_{|u|p}|u|p| + \\
&K_{p|p}|p|p| + K_p p + K_{\phi\phi\phi}\phi^3 - \rho g \nabla GZ(\phi)
\end{aligned} \tag{2.15}$$

$$\begin{aligned}
N_{hyd} = & N_{|u|v}|u|v + N_{|u|r}|u|r + N_{r|r}|r|r + N_{r|v}|r|v| + \\
& N_{\phi|uv}|\phi|uv| + N_{\phi u|r}|\phi u|r| + N_p p + N_{|p|p}|p|p + \\
& N_{|u|p}|u|p + N_{\phi u|u}|\phi u|u|
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Dalam rangka mengendalikan sudut kemudi (*rudder*) kapal agar sudut hadap kapal sesuai dengan yang diharapkan, maka diperlukan model kinematika kapal berdasarkan definisi sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
\dot{\phi} &= p \\
\dot{\psi} &= r \cos \phi
\end{aligned} \tag{2.17}$$

ϕ dan ψ masing-masing menotasikan sudut *roll* dan sudut *yaw*.

2.3 Metode Runge-Kutta Orde Empat

Metode Runge Kutta adalah suatu metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial biasa dengan ketelitian yang cukup tinggi. Metode ini merupakan pengembangan dari Euler, dimana penyelesaiannya dilakukan secara bertahap.

Diberikan sistem persamaan differensial,

$$\begin{aligned}
\frac{dx}{dt} &= f(t, x, y) \\
\frac{dy}{dt} &= g(t, x, y)
\end{aligned} \tag{2.18}$$

dengan titik awal $x(t) = x_0$ dan $y(t) = y_0$, maka penyelesaian

integrasinya akan diperoleh :

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= x_n + \frac{1}{6}(k_{1,x} + 2k_{2,x} + 2k_{3,x} + k_{4,x}) \\y_{n+1} &= y_n + \frac{1}{6}(k_{1,y} + 2k_{2,y} + 2k_{3,y} + k_{4,y})\end{aligned}\tag{2.19}$$

dengan

$$k_{1,x} = hf(t_n, x_n, y_n)$$

$$k_{1,y} = hg(t_n, x_n, y_n)$$

$$k_{2,x} = hf\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{k_1}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right)$$

$$k_{2,y} = hg\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{k_1}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right)$$

$$k_{3,x} = hf\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{k_2}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right)$$

$$k_{3,y} = hg\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{k_2}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right)$$

$$k_{4,x} = hf(t_n + h, x_n + k_3, y_n + k_3)$$

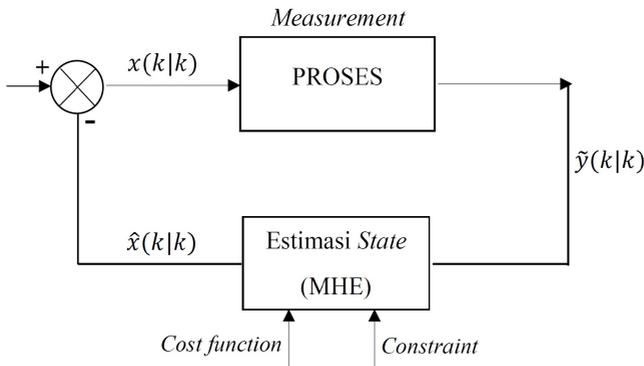
$$k_{4,y} = hg(t_n + h, x_n + k_3, y_n + k_3)$$

dimana, n adalah banyaknya langkah, t_0 waktu awal, t_f waktu akhir dan h adalah ukuran langkah dengan $h = \frac{t_f - t_0}{n}$.

2.4 *Moving Horizon Estimation* (MHE)

Gagasan tentang *Moving Horizon Estimation* (MHE) kembali pada tahun 1960-an [14]. MHE adalah strategi yang efisien untuk estimasi keadaan terbatas dalam sistem nonlinier. MHE juga merupakan metode estimasi yang cocok

untuk memperkirakan keadaan sistem dinamis terhadap nonlinear dan gangguan. Kelebihan MHE dengan metode lainnya adalah mampu menangani masalah optimisasi untuk model linear dan nonlinear yang terdapat kendala batas serta model yang lebih kompleks, seperti sistem persamaan differensial biasa atau nonlinear [15]. Dengan demikian, tujuan MHE adalah untuk meminimalkan fungsi tujuan yang telah ditentukan pada model, dimana fungsi tujuan terdiri dari kesalahan prediksi yang dihitung pada bagian *input* dan *output*.



Gambar 2.1: Diagram Blok MHE

Berdasarkan Gambar 2.1, *input measurement* masuk ke dalam suatu sistem untuk didapatkan suatu *output* yang berupa *state measurement*. Sedangkan *input predictive* yang masuk ke dalam suatu model akan menghasilkan *output predictive* berupa *state predictive*. Hal ini beriterasi terus menerus sampai N (panjang *prediction horizon* dalam MHE). Selisih antara kedua *state* dinamakan *error*. Semakin kecil *error* yang diperoleh, maka iterasi dapat dihentikan karena

telah diperoleh hasil yang paling optimal.

Diberikan suatu sistem nonlinear berikut

$$\begin{aligned}x_{t+1} &= f(x_t) + w_t \\y_t &= h(x_t) + v_t\end{aligned}\tag{2.20}$$

dimana $x_t \in \mathbb{X} \subset \mathbb{R}^n$ adalah variabel keadaan (*state*), $y_t \in \mathbb{Y} \subset \mathbb{R}^m$ adalah variabel pengukuran, $w_t \in \mathbb{W} \subset \mathbb{R}^n$ adalah gangguan dari sistem dan $v_t \in \mathbb{V} \subset \mathbb{R}^m$ adalah *noise* dari pengukuran. Karena gangguan dari luar sistem diabaikan, maka $w_t = 0$, sehingga Persamaan (2.20) dapat disederhanakan menjadi

$$x_{t+1} = f(x_t)\tag{2.21}$$

$$y_t = h(x_t) + v_t\tag{2.22}$$

Masalah optimisasi yang diselesaikan pada setiap langkah waktu adalah dengan meminimumkan fungsi objektif berikut

$$\min_{x_0, x_1, \dots, x_N} \|\hat{x}_k - x_R\|_{P_L}^2 + \sum_{k=N}^k \|\tilde{y}_t - h(x_k)\|_{V_L}^2\tag{2.23}$$

dengan kendala

$$x(k+j|k) = f(x(k+j-1|k), u(k+j-1|k), k+j-1)$$

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

Fungsi f dan h adalah fungsi dari sistem nonlinear. Vektor \hat{x}_0 menunjukkan nilai dugaan awal dari kovarian dan keadaan sistem. Matriks P_L menunjukkan kovarian dari keadaan sistem dan matriks V_L adalah kovarian dari pengukuran.

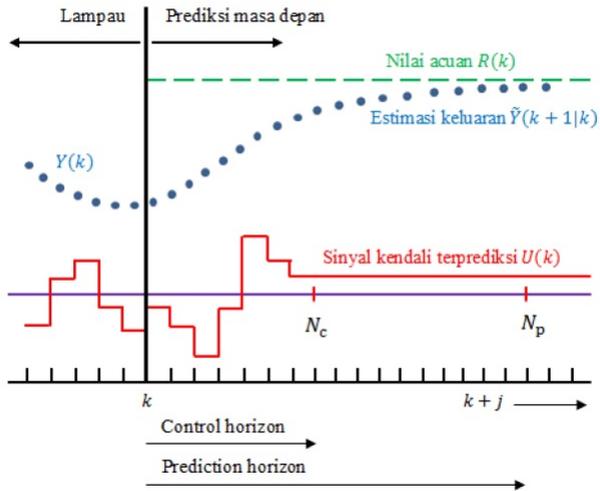
2.5 Model Predictive Control (MPC)

Model Predictive Control (MPC) adalah salah satu pengendalian dengan menggunakan metode prediksi yang berdasarkan pada model proses. Model tersebut digunakan secara eksplisit untuk menghitung suatu prediksi output dari proses yang akan datang. Berdasarkan prediksi tersebut, sinyal kendali yang akan diberikan ke proses dihitung dengan cara meminimalkan suatu *objective function* [16].

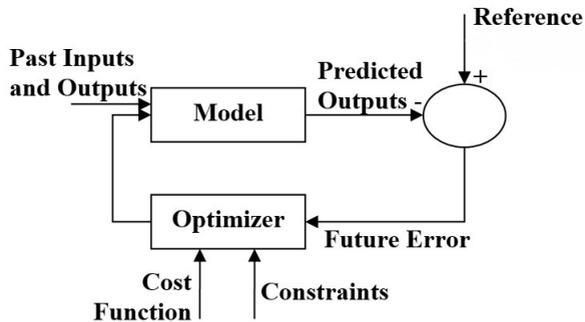
MPC memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan metode pengendali lainnya. Diantaranya yaitu mampu menangani sistem multivariabel, memiliki kemampuan untuk mengantisipasi peristiwa di masa depan dan dapat mengambil tindakan kontrol yang sesuai. Secara umum, ada dua tipe MPC, yaitu MPC Linear dan MPC Non Linear. Dalam MPC Nonlinear, model prediksi diperoleh dari kinematika sistem dinamik nonlinear dari kapal, *objective function* bisa berupa nonkuadratik $F = (x, u)$ dengan kendala nonlinear dan akan diselesaikan dengan menggunakan *nonlinear programming* [17].

Konsep dari MPC dapat dilihat pada Gambar 2.2. Pada waktu k nilai *state* dan input dijadikan sebagai sampel dan *optimizer* menghitung nilai $u^*(k)$ berdasarkan jumlah prediksi horizon N_p . Kemudian untuk dilakukan proses optimasi berikutnya, hanya input pertama yang akan disubstitusikan ke dalam model sistem. Proses ini akan berlangsung sampai total waktu yang ditentukan. Urutan kontrol waktu input adalah $u(k), \dots, u(k + N_p - 1)$. Hal ini yang disebut dengan konsep **receding horizon control**. Parameter N_p, N_c dan λ adalah tiga parameter dasar MPC, yaitu prediksi horizon N_p adalah panjang langkah dari proses, dan interval waktu $(1, N_p)$ berisi dinamika dari proses [18].

Langkah kerja dari MPC seperti pada Gambar 2.3 dapat diilustrasikan sebagai berikut :



Gambar 2.2: Skema *Receding Horizon Control*



Gambar 2.3: Diagram Blok MPC

Pertama, sistem telah memiliki model dari *plant*. Data *input* dan *output* sebelumnya masuk melalui *port input* MPC. Dari *input* dan *output* ini dilakukan estimasi berdasarkan model *plant* yang telah didefinisikan sebelumnya. Estimasi ini menghasilkan *output* yang disebut *predicted output* yang kemudian nilainya dibandingkan dengan referensi.

Dari hasil perbandingan ini, akan menghasilkan *error* yang disebut *future error*. Kemudian *future error* masuk ke dalam blok *optimizer*. Di sini *optimizer* berfungsi untuk bekerja di dalam rentang *constraint* yang telah diberikan untuk meminimalkan *cost function*, dimana fungsi kriteria yang terbentuk dari fungsi kuadratik adalah kesalahan antara sinyal *predicted output* dengan referensi.

MPC kemudian mengambil keputusan untuk meminimalkan *future error* tersebut dengan keputusan yang masih berada dalam *constraint* yang telah ditetapkan. Hasil dari blok ini disebut *future input* yang dikembalikan bersama dengan data *input* dan *output* sebelumnya untuk diestimasi kembali. Perhitungan ini berlangsung seterusnya dan berulang-ulang. Karena adanya koreksi *input* berdasarkan *output predicted* inilah yang membuat MPC mampu bekerja menghasilkan respon yang semakin mendekati referensi.

2.6 *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC)

Nonlinear Model Predictive Control (NMPC) adalah sebuah optimisasi berdasarkan metode untuk kontrol umpan balik sistem nonlinier. Ide dari *model predictive control* baik linier maupun nonlinear adalah untuk menggunakan model proses saat ini dalam rangka untuk memprediksi dan mengoptimasi perilaku sistem masa mendatang. Diberikan persamaan sistem nonlinear berikut

$$\dot{x}(k+1) = f(x(k), u(k), k)$$

$$y = h(x(k))$$

dengan $x \in \mathbb{R}$ adalah vektor keadaan, u adalah *input* kendali vektor dan y adalah *output* (vektor pengukuran).

Tujuan NMPC adalah mengoptimasi $J(x(k), u^*(k))$ sebagai berikut :

$$\min_{u(\cdot|k)} \sum_{j=1}^{N_p} [\|y_d(k+j|k) - y(k+j|k)\|_Q^2 + \|u(k+j-1|k)\|_R^2] \quad (2.24)$$

dengan kendala

$$\begin{aligned} x(k+j|k) &= f(x(k+j-1|k), u(k+j-1|k), k+j-1) \\ x_{min} &\leq x(k+j|k) \leq x_{max}; j = 1, \dots, N_p \\ u_{min} &\leq u(k+j-1|k) \leq u_{max}; j = 1, \dots, N_p \end{aligned} \quad (2.25)$$

dimana

$$\begin{aligned} \|y_d(k+j|k) - y(k+j|k)\|_Q^2 &= [y_d(k+j|k) - y(k+j|k)]^T \\ &Q[y_d(k+j|k) - y(k+j|k)] \\ \|u(k+j-1|k)\|_R^2 &= u(k+j-1|k)^T R u(k+j-1|k) \end{aligned} \quad (2.26)$$

Dari Persamaan (2.26), T adalah waktu prediksi, $y_d(k+j|k)$ prediksi dari keluaran sistem dan $y(k+j|k)$ trayektori referensi masa mendatang. Q dan R adalah matriks-matriks definit positif yang mempengaruhi respon pada sistem kendali. N_p adalah prediksi horizon, $x(k+j|k)$ dan $u(k+j|k)$ berturut-turut menyatakan *state* dan *input*, langkah ke $(k+j)$ pada waktu ke k dan $x(k)$ adalah *state* pengukuran pada waktu k .

Selanjutnya, fungsi tujuan pada Persamaan (2.24) diminimalkan dengan kendala pada Persamaan (2.25). Dari proses optimasi, dapat dihasilkan barisan kontrol optimal u

sebanyak N_p untuk waktu k sebagai berikut

$$u(\cdot|k) = \{u^*(k|k), u^*(k+1|k), \dots, u^*(k+N_p-1|k)\} \quad (2.27)$$

Dengan menggunakan konsep *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

$$u(k|k) = u^*(k|k) \quad (2.28)$$

BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan langkah – langkah dalam mengerjakan Tugas Akhir yang berjudul "Kendali Sudut Hadap Kapal Tanpa Awak dengan *Moving Horizon Estimation - Nonlinear Model Predictive Control* (MHE - NMPC)" agar proses pengerjaan dapat terstruktur dengan baik dan dapat mencapai tujuan yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Berikut ini langkah – langkah yang akan dilaksanakan pada penelitian ini terdiri atas:

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan studi referensi mengenai model gerak kapal, metode *Moving Horizon Estimation* (MHE) - *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC). Referensi yang digunakan adalah buku-buku, Tesis, Tugas Akhir dan jurnal ilmiah yang berkaitan dengan topik pada Tugas Akhir ini.

2. Analisis Model Matematika Dinamika Kapal

Pada tahap ini, dilakukan analisis model matematika untuk kendali kapal, dimana model matematika untuk sistem gerak kapal berupa sistem nonlinear dan kontinue dengan mempertimbangkan tiga derajat kebebasan, yaitu *surge*, *sway*, *yaw* dan *roll*. Setelah didapatkan ruang keadaan model matematika dinamika kapal, melakukan pendiskritan.

3. Estimasi *State Model Kapal dengan Moving Horizon Estimation (MHE)*

Selanjutnya adalah mengestimasi *state* model kapal dengan estimator *moving horizon estimation (MHE)*. Langkah awal yang dilakukan adalah menentukan panjang *prediction horizon* N dan estimasi *state* awal \hat{x}_0 . Kemudian jika $k < N$, maka estimasi $\hat{x}_{k+1|k}$ diperoleh dari Persamaan (2.21). Jika $k \geq N$, maka estimasi $\hat{x}_{k+1|k}$ diperoleh dengan menyelesaikan optimasi Persamaan (2.23) dengan pengukuran diperoleh dari Persamaan (2.22) ditambah *noise*. Hasil estimasi yang diperoleh kemudian digunakan pada metode kendali NMPC.

4. Kendali Kontrol Model Kapal dengan *Nonlinear Model Predictive Control (NMPC)*

Setelah melakukan estimasi terhadap *state* model, kemudian akan dilakukan langkah-langkah dalam optimasi dengan metode NMPC. Langkah pertama adalah memberikan nilai awal dari variabel keadaan, yaitu *sway*, *yaw* dan *roll*. Kemudian menentukan panjang *prediction horizon* N_p . Langkah berikutnya adalah menyelesaikan Persamaan (2.24) dengan kendala pada Persamaan (2.25). Tujuan kendali adalah untuk meminimumkan nilai *error* antara *output* sistem berupa sudut hadap kapal dengan sudut hadap yang diharapkan dengan energi yang digunakan untuk menggerakkan kemudi kapal seminimum mungkin. Hasil optimasi diperoleh barisan kontrol optimal pada Persamaan (2.27). Dengan menggunakan konsep *receding horizon*, nilai kontrol yang diberikan pada keluaran sistem adalah Persamaan (2.28).

5. Simulasi Penerapan Metode MHE-NMPC

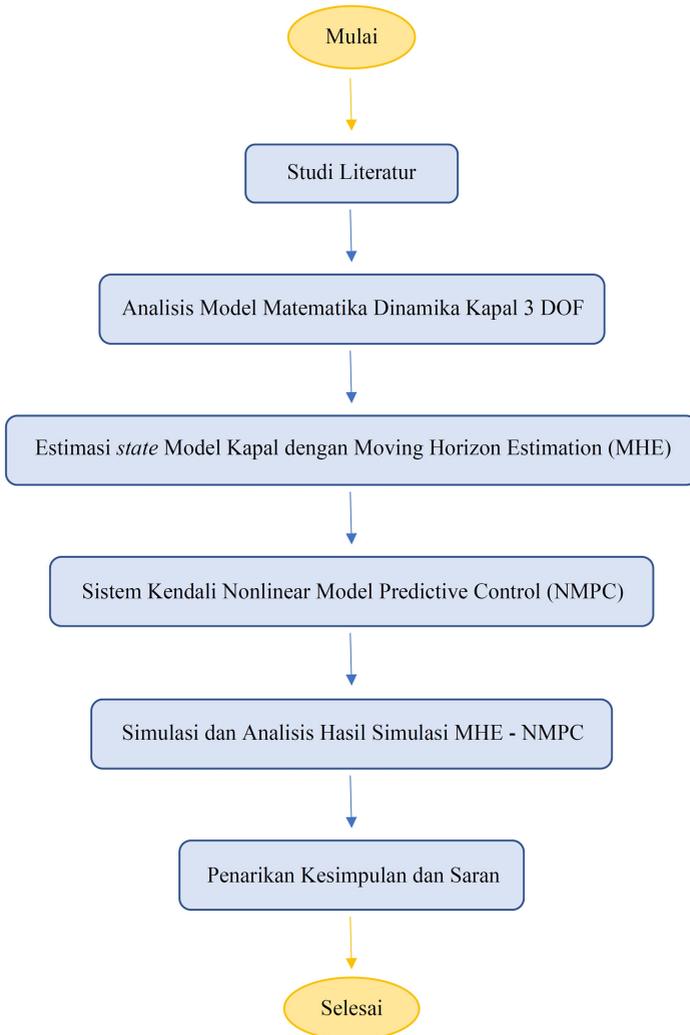
Pada tahap ini, setelah didapatkan model kendali sistem maka dilakukan simulasi akhir dengan menggunakan *software* MATLAB R2013a yang berlisensi dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember untuk mendapatkan grafik pergerakan kapal dan *output* dari masing-masing variabel.

6. Analisis Hasil Simulasi

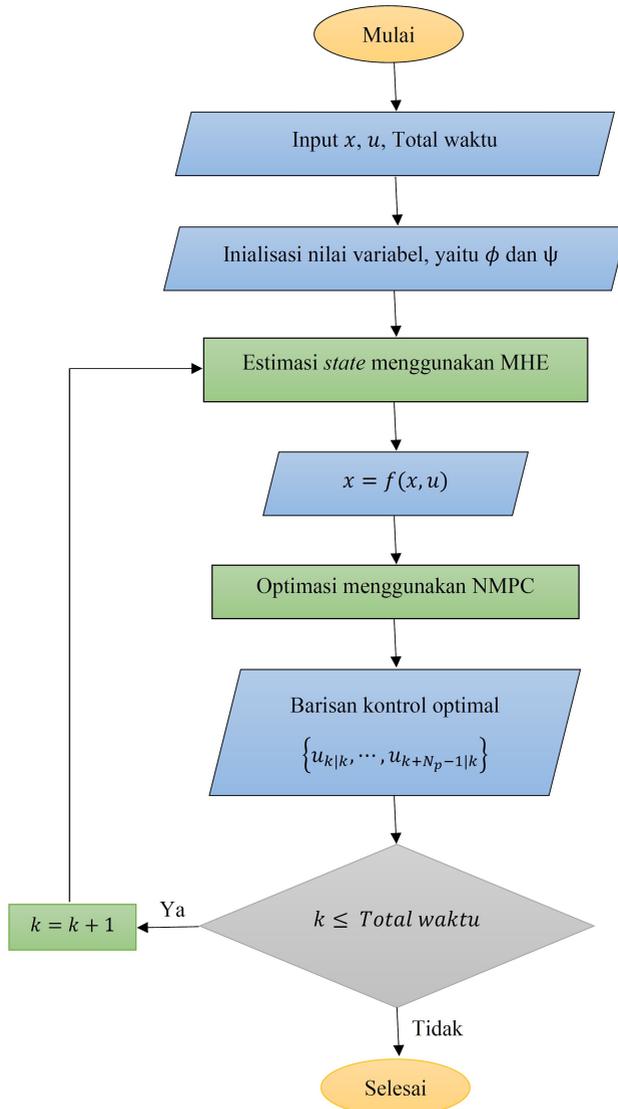
Analisis hasil simulasi dilakukan berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan pada tahap sebelumnya.

7. Penarikan Kesimpulan dan Saran Tugas Akhir

Pada tahap terakhir akan di tarik kesimpulan dari penelitian yang dilakukan sebelumnya dan saran untuk penelitian selanjutnya serta penulisan tugas akhir.



Gambar 3.1: Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2: Diagram Alir MHE - NMPC

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai kendali sudut hadap kapal tanpa awak dengan *Moving Horizon Estimation - Nonlinear Model Predictive Control* (MHE - NMPC). Pembahasan diawal dengan pembentukan model matematika kapal dengan gaya dorong yang dihasilkan dari kapal berupa *rudder*. Karena metode kendali yang digunakan hanya bisa diterapkan pada sistem diskrit, maka dilakukan pendiskritan dengan metode Runge-Kutta Empat. Pada penelitian ini, *Moving Horizon Estimation - Nonlinear Model Predictive Control* (MHE - NMPC) diterapkan sebagai metode kendali pada sistem kendali haluan kapal autopilot. Tahap terakhir dari bab ini yaitu simulasi dengan *software* MATLAB R2013a yang berlisensi dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan menganalisis hasil simulasi sistem setelah dikendalikan dengan metode *Moving Horizon Estimation - Nonlinear Model Predictive Control* (MHE - NMPC).

4.1 Analisis Model Matematika Dinamika Kapal

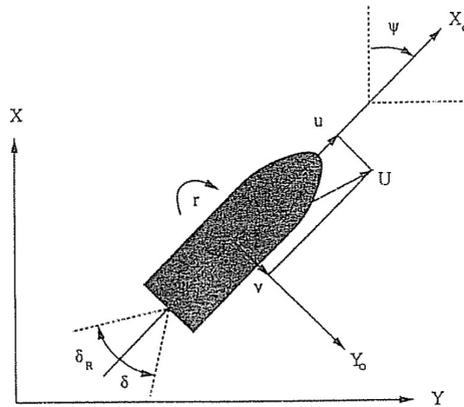
Pada penelitian ini, model matematika untuk sistem persamaan gerak kapal, dibentuk dengan mempertimbangkan tiga derajat kebebasan, yaitu *sway*, *yaw* dan *roll*. Ketika sistem tanpa gangguan, gaya dorong yang dihasilkan dari kapal hanya dipengaruhi oleh *rudder*, sehingga Persamaan (2.13) dapat dituliskan menjadi persamaan berikut :

$$\begin{aligned}
(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - (mz_G + Y_{\dot{p}})\dot{p} + (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} &= -mur + Y_{hyd} + Y_{\delta}\delta \\
-(mz_G + K_{\dot{v}})\dot{v} + (I_x - K_{\dot{p}})\dot{p} &= mz_Gur + K_{hyd} + K_{\delta}\delta \\
(mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} &= -mx_Gur + N_{hyd} + N_{\delta}\delta
\end{aligned} \tag{4.1}$$

dengan nilai Y_{hyd} , K_{hyd} dan N_{hyd} diberikan sebagai berikut :

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

Kendali yang dirancang pada Tugas Akhir ini bertujuan untuk mengendalikan sudut kemudi kapal (δ) 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. Berdasarkan Gambar 4.1, dapat didefinisikan model kinematika sebagai



Gambar 4.1: Kendali Haluan Kapal dan Sudut Kemudi

berikut :

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= p \\ \dot{\psi} &= r \cos \phi\end{aligned}\quad (4.3)$$

dimana, ϕ dan ψ masing-masing adalah laju perubahan sudut *roll* dan sudut *yaw*. p adalah kecepatan *roll* dan r adalah kecepatan *yaw*.

Berdasarkan model pada Persamaan (4.1) dan (4.3) dapat dituliskan dalam bentuk *state space* (ruang keadaan) sebagai

berikut :

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -(mz_G + Y_{\dot{p}}) & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 & 0 \\ -(mz_G + K_{\dot{v}}) & I_x - K_{\dot{p}} & 0 & 0 & 0 \\ mx_G - N_{\dot{v}} & 0 & I_z - N_{\dot{r}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \\
 \left\{ \begin{bmatrix} -mur + Y_{hyd} \\ mz_Gur + K_{hyd} \\ -mx_Gur + N_{hyd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{\delta} \\ K_{\delta} \\ N_{\delta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta \right\} \quad (4.4)$$

Kemudian dari Persamaan (4.4) dirubah menjadi bentuk $\dot{X} = A^{-1}B$, sehingga diperoleh sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -(mz_G + Y_{\dot{p}}) & mx_G - Y_{\dot{r}} & 0 & 0 \\ -(mz_G + K_{\dot{v}}) & I_x - K_{\dot{p}} & 0 & 0 & 0 \\ mx_G - N_{\dot{v}} & 0 & I_z - N_{\dot{r}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \\
 \left\{ \begin{bmatrix} -mur + Y_{hyd} \\ mz_Gur + K_{hyd} \\ -mx_Gur + N_{hyd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{\delta} \\ K_{\delta} \\ N_{\delta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta \right\} \quad (4.5)$$

Dengan data parameter dan nilai koefisien hidrodinamika yang terdapat pada Tabel 4.1 [13] :

Tabel 4.1 Data Parameter dan Koefisien Hidrodinamika

Kuantitas (simbol)	Nilai (satuan)
Panjang (L_{pp})	48 (meter)
Lebar (B)	8.6 (meter)
<i>Draft</i> (D)	2.2 (meter)
Massa (m)	359×10^3 (kg)
Volume <i>displacement</i> (∇)	350 (meter ³)
Inersia pada <i>yaw</i> (I_z)	33.7×10^6 (kgmeter ²)
Inersia pada <i>roll</i> (I_x)	3.4×10^6 (kgmeter ²)
Koordinat pusat gravitasi (x_G)	-3.38 (meter)
Koordinat pusat gravitasi (z_G)	-1.75 (meter)
Luas <i>rudder</i> (A_R)	0.73 (meter)
Koefisien gaya angkat (C_L)	1.15
Jarak CG-CP ($l_{\delta z}$)	1.2 (meter)
LCG ($l_{\delta x}$)	-23.5 (meter)
Metacenter (GZ)	0.776 (meter)
Konstanta gravitasi (g)	9.82 (meter/s ²)
Massa jenis air laut (ρ)	1025 (kg/meter ³)

Koefisien untuk N	Koefisien untuk K	Koefisien untuk Y
$N_{\dot{v}} = 538000$	$K_{\dot{v}} = 296000$	$Y_{\dot{v}} = -0.393 \times 10^6$
$N_{\dot{r}} = -28.7 \times 10^6$	$K_{\dot{r}} = 0.0$	$Y_{\dot{r}} = -1.4 \times 10^6$
$N_{\dot{p}} = 0.0$	$K_{\dot{p}} = -0.674 \times 10^6$	$Y_{\dot{p}} = -0.296 \times 10^6$
$N_{ u v} = -92000$	$K_{ u v} = 9260$	$Y_{ u v} = -11800$
$N_{ u r} = -4.71 \times 10^6$	$K_{ur} = -102000$	$Y_{ur} = 131000$
$N_{v v } = 0.0$	$K_{v v } = 29300$	$Y_{v v } = -3700$
$N_{r r } = -202 \times 10^6$	$K_{r r } = 0.0$	$Y_{r r } = 0.0$
$N_{v r } = 0.0$	$K_{v r } = 0.621 \times 10^6$	$Y_{v r } = -0.794 \times 10^6$
$N_{r v } = -15.6 \times 10^6$	$K_{r v } = 0.142 \times 10^6$	$Y_{r v } = -0.182 \times 10^6$
$N_{\phi uv } = -0.214 \times 10^6$	$K_{\phi uv } = -8400$	$Y_{\phi uv } = 10800$
$N_{\phi u r } = -4.98 \times 10^6$	$K_{\phi ur } = -0.196 \times 10^6$	$Y_{\phi ur } = 0.251 \times 10^6$
$N_{\phi u u } = -8000$	$K_{\phi uu} = -1180$	$Y_{\phi uu} = -74$
$N_{ u p} = 0.0$	$K_{ u p} = -15500$	$Y_{ u p} = 0.0$
$N_{p p } = 0.0$	$K_{p p } = -0.416 \times 10^6$	$Y_{p p } = 0.0$
$N_p = 0.0$	$K_p = -0.5 \times 10^6$	$Y_p = 0.0$
$N_{\phi} = 0.0$	$K_{\phi} = 0.776\rho g \nabla$	$Y_{\phi} = 0.0$
$N_{\phi\phi\phi} = 0.0$	$K_{\phi\phi\phi} = -0.325\rho g \nabla$	$Y_{\phi\phi\phi} = 0.0$

4.2 Pendiskritan Model Sistem Kapal Menggunakan Runge-Kutta 4

Pada bagian ini dilakukan proses diskritisasi dengan menggunakan metode Runge-Kutta 4. Berikut adalah langkah-langkah dari Runge-Kutta 4 dalam menyelesaikan persamaan differensial dari model sistem :

1. Diketahui nilai awal

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ x &= [v, p, r, \phi, \psi]^T = [0, 0, 0.0853, 0, 30]^T \\ u &= 0 \\ h &= 1 \end{aligned}$$

dengan *output* berupa nilai pendekatan x

2. Untuk $i = 1 : N_p$, didefinisikan :

$$k_1 = hf(x, u)$$

$$k_2 = hf\left(x + \frac{k_1}{2}, u\right)$$

$$k_3 = hf\left(x + \frac{k_2}{2}, u\right)$$

$$k_4 = hf(x + k_3, u)$$

3. Menghitung nilai pendekatan x

$$x = x + \frac{k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4}{6}$$

4. *Update* nilai i

$$i = i + 1$$

5. Kemudian kembali ke Langkah 2

Berdasarkan langkah-langkah Runge-Kutta 4 diatas diperoleh hasil diskritisasi sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} v(k+1) \\ p(k+1) \\ r(k+1) \\ \phi(k+1) \\ \psi(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(k) + \frac{k_1(v(k)) + 2k_2(v(k)) + 2k_3(v(k)) + k_4(v(k))}{6} \\ p(k) + \frac{k_1(p(k)) + 2k_2(p(k)) + 2k_3(p(k)) + k_4(p(k))}{6} \\ r(k) + \frac{k_1(r(k)) + 2k_2(r(k)) + 2k_3(r(k)) + k_4(r(k))}{6} \\ \phi(k) + \frac{k_1(\phi(k)) + 2k_2(\phi(k)) + 2k_3(\phi(k)) + k_4(\phi(k))}{6} \\ \psi(k) + \frac{k_1(\psi(k)) + 2k_2(\psi(k)) + 2k_3(\psi(k)) + k_4(\psi(k))}{6} \end{bmatrix}$$

4.3 Estimasi *State Model Kapal dengan Moving Horizon Estimation* (MHE)

Moving Horizon Estimation adalah suatu metode estimasi yang tidak mempertimbangkan semua pengukuran masa lalu secara eksplisit, tetapi hanya meminimalkan ketidakcocokkan model prediksi dan pengukuran pada panjang *fixed horizon* $N > 0$. MHE sama halnya meminimumkan *least-squares error* pada masalah optimalisasi. Permasalahan optimasi pada pengukuran waktu k adalah sebagai berikut :

$$\min_{x_0, x_1, \dots, x_N} \|\hat{x}_k - x_R\|_{P_L}^2 + \sum_{k-N}^k \|\tilde{y}_t - h(x_k)\|_{V_L}^2 \quad (4.6)$$

dengan kendala

$$x(k+j) = f(x(k+j-1), u(k+j-1), k+j-1)$$

dimana \tilde{y}_t menunjukkan pengukuran sebenarnya dari proses *output* pada waktu k . P_L dan V_L adalah matriks kovarian definit positif.

Perkiraan referensi \hat{x}_k diambil dari solusi masalah MHE pada perkiraan sebelumnya. Berikut langkah-langkah *moving horizon estimation* :

1. Menentukan panjang *prediction horizon* N
2. Menentukan estimasi *state* awal \hat{x}_0
3. Pada saat $k \geq N$, dengan \tilde{y}_t tersedia, maka permasalahan optimasi berikut dapat diselesaikan

$$\min_{x_0, x_1, \dots, x_N} \|\hat{x}_k - x_R\|_{P_L}^2 + \sum_{k-N}^k \|\tilde{y}_t - h(x_k)\|_{V_L}^2$$

dengan kendala

$$x(k+j|k) = f(x(k+j-1|k), u(k+j-1|k), k+j-1)$$

4. Estimasi nilai *state* $\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k}^*$
5. Kembali ke langkah 3 dengan $k = k + 1$

4.4 Kendali Kontrol Sudut Hadap Kapal dengan *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC)

Pada Tugas Akhir ini dirancang suatu kendali autopilot dengan menggunakan *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC) untuk mengendalikan sudut kemudi (*rudder*), sehingga mampu mengarahkan kapal untuk bergerak ke sudut hadap yang diinginkan. Berikut adalah tahapan perancangan sebagai berikut :

4.4.1 Formulasi Plan Model

Suatu sistem diskrit diberikan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\dot{x}(k+1) &= f(x(k), u(k), k) \\ y &= h(x(k))\end{aligned}\tag{4.7}$$

Kendali dilakukan pada sudut *rudder* sehingga perubahan sudut hadap kapal perlu diketahui dari waktu ke waktu selama proses perjalanan kapal. Waktu yang diprediksi adalah sejumlah prediksi horizon (N_p) dengan kontrol yang diberikan sepanjang prediksi kontrol (N_c), dengan ($N_p = N_c$) maka diperoleh :

$$\begin{aligned}\dot{x}(k+1|k) &= f(x(k|k), u(k|k)) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \dot{x}(k+N_p|k) &= f(x(k+N_p-1|k), u(k+N_p-1|k))\end{aligned}\tag{4.8}$$

dengan prediksi *output* adalah

$$\begin{aligned}
 y(k|k) &= h(x(k)) \\
 y(k+1|k) &= h(x(k+1|k)) \\
 y(k+2|k) &= h(x(k+2|k)) \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 y(k+N_p|k) &= h(x(k+N_p|k))
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

4.4.2 Formulasi Fungsi Objektif

Selanjutnya dilakukan formulasi fungsi objektif yang digunakan untuk merancang desain kontrol, dimana fungsi objektifnya adalah untuk meminimumkan selisih antara keluaran prediksi berupa sudut *yaw* dengan referensi trayektorinya dan juga untuk meminimumkan energi untuk menginputkan kontrol u .

Pada Tugas Akhir ini, kasus yang diambil ialah ketika $N_p = N_c$, sehingga fungsi objektif dapat dituliskan kembali sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 J &= \sum_{j=1}^{N_p} \|y_d(k+j|k) - y(k+j|k)\|_Q^2 + \sum_{j=0}^{N_p-1} \|u(k+j-1|k)\|_R^2 \\
 &= \sum_{j=1}^{N_p} \|y_d(k+j|k) - y(k+j|k)\|_Q^2 + \|u(k+j-1|k)\|_R^2
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

dengan

$$\begin{aligned}
 \|y_d(k+j|k) - y(k+j|k)\|_Q^2 &= [y_d(k+j|k) - y(k+j|k)]^T \\
 &\quad Q[y_d(k+j|k) - y(k+j|k)] \\
 \|u(k+j-1|k)\|_R^2 &= u(k+j-1|k)^T R u(k+j-1|k)
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

dimana $y_d(k+j|k)$ 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 didefinisikan 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 *output* dari sistem. Karena *output* yang dikeluarkan dari 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 .

4.4.3 Formulasi Kendala

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

1. Formulasi kendala variabel keadaan

Kendala variabel keadaan pada Tugas Akhir ini adalah kecepatan *yaw*, yang dapat diekspresikan dalam bentuk sebagai berikut :

$$r_{min} \leq r \leq r_{max} \quad (4.12)$$

$$\begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} r \leq \begin{bmatrix} -r_{min} \\ r_{max} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Pada Pertidaksamaan (4.13) dimisalkan bahwa

$$C = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

dan

$$D = \begin{bmatrix} -r_{min} \\ r_{max} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

2. Formulasi kendala *input*

Kendala *input* pada Tugas Akhir ini berupa sudut *rudder*, yang dapat diekspresikan dalam bentuk sebagai berikut :

$$u_{min} \leq u \leq u_{max} \quad (4.16)$$

$$\begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} u \leq \begin{bmatrix} -u_{min} \\ u_{max} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Pada Pertidaksamaan (4.17) dimisalkan bahwa

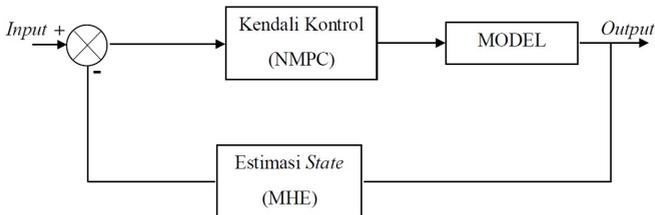
$$S = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

dan

$$T = \begin{bmatrix} -u_{min} \\ u_{max} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

4.5 Diagram Blok Gabungan *Moving Horizon Estimation - Nonlinear Model Predictive Control* (MHE-NMPC)

Pada bagian ini terdapat diagram blok gabungan antara *Moving Horizon Estimation* (MHE) dengan *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC) yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 sebagai berikut :



Gambar 4.2: Diagram Blok MHE-NMPC

Mula-mula suatu model dikenakan kendali kontrol dengan menggunakan metode *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC). Berdasarkan metode prediksi tersebut, sinyal kontrol diberikan untuk memperoleh tujuannya. Tujuan dari NMPC adalah meminimalkan selisih antara keluaran prediksi berupa sudut *yaw* dengan referensi trayektorinya dan juga meminimalkan energi untuk menginputkan kontrol u . Kemudian *output* dari proses NMPC disimpan sebagai data pengukuran yang nantinya dipakai sebagai inputan pada metode *Moving Horizon Estimation* (MHE) untuk mendapatkan estimasi *state*. Tujuan estimasi adalah untuk memperbaiki kontrol pada sistem. Hasil dari blok estimasi dikembalikan lagi bersama dengan data *input* dan *output* sebelumnya untuk dikontrol kembali. Perhitungan ini berlangsung seterusnya dan berulang-ulang, sehingga menghasilkan model yang optimal. Berikut dijelaskan juga langkah-langkah dalam metode *Moving Horizon Estimation - Nonlinear Model Predictive Control* (MHE - NMPC), yaitu :

1. Menentukan horizon N dan *total time*
2. Input \hat{x}_0 dan u_0
3. Langkah NMPC untuk semua k . Dengan menggunakan nilai *state* \hat{x}_0 , kita menyelesaikan permasalahan optimasi berikut dengan *fmincon*

$$\min_{u(\cdot|k)} \sum_{j=1}^{N_p} \|y_d(k+j|k) - y(k+j|k)\|_Q^2 + \|u(k+j-1|k)\|_R^2$$

dengan kendala

$$x(k+j|k) = f(x(k+j-1|k), u(k+j-1|k), k+j-1)$$

Dari proses optimasi tersebut diperoleh *input* yang optimal $u_{k+1|k}^*, u_{k+2|k}^*, \dots, u_{k+N_p-1|k}^*$.

Nilai *input* yang digunakan adalah *input* optimal yang pertama saja, yaitu $u_{k+1|k} = u_{k+1|k}^*$.

4. Jika $k < N$, maka menghitung $\hat{x}_{k+1|k}$ dengan menggunakan rumus $\hat{x}_{k+1|k} = f(\hat{x}_{k|k}, u_{k|k})$.
Jika $k > N$, maka permasalahan optimasi berikut dapat diselesaikan dengan penyelesaian *nonlinear programming* IPOPT

$$\min_{x_0, x_1, \dots, x_N} \|\hat{x}_k - x_R\|_{P_L}^2 + \sum_{k=N}^k \|\tilde{y}_t - h(x_k)\|_{V_L}^2$$

dengan kendala

$$x(k+j|k) = f(x(k+j-1|k), u(k+j-1|k)), k+j-1$$

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

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

4.6 Simulasi dan Analisis Penerapan MHE-NMPC pada Kendali Sudut Hadap Kapal

Pada bagian ini ditampilkan hasil simulasi dan analisis penerapan MHE-NMPC pada kendali sudut hadap kapal. Model yang digunakan berbentuk nonlinear, dengan *output* sistem berupa kecepatan *yaw* dan sudut *yaw*. Sistem yang dikendalikan adalah deterministik, yaitu tidak terdapat gangguan lingkungan pada model sistem.

Simulasi MHE-NMPC ini dilakukan untuk mencari penyelesaian fungsi objektif beserta kendala batas dalam bentuk *nonlinear programming* menggunakan *software* MATLAB R2013a yang berlisensi dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember, sehingga toolbox yang digunakan adalah *fmincon* dan IPOPT. Tahap awal dalam simulasi adalah dengan memberikan nilai *prediction horizon* N_p dan N

pada masing-masing NMPC dan MHE adalah 15. Waktu pengambilan sampel $Ts = 1s$ dan total waktu simulasi adalah 300 satuan waktu. Kemudian diberikan nilai awal dari variabel keadaan yang didefinisikan sebagai berikut :

$$x_0 = [0 \ 0 \ 0.0853 \ 0 \ 30^\circ]$$

Kendala sudut *rudder* adalah $|\delta| \leq 35^\circ$ dan batas keadaan kecepatan *yaw* 0.0932 rad/s , sehingga matriks yang bersesuaian dengan **C**, **D**, **Sa** dan **Ta** adalah

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} -r_{min} \\ r_{max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0932 \\ 0.0932 \end{bmatrix}$$

$$Sa = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}; Ta = \begin{bmatrix} -\delta_{max} \\ \delta_{min} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -35 \\ 35 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Selanjutnya, melakukan proses optimasi NMPC saat waktu $k = 1$ dengan fungsi tujuan pada Persamaan (4.10) dan batas kendala pada Persamaan (4.20). Hasil dari proses optimasi ini diperoleh barisan *input* kontrol $u_{k+1|k}, u_{k+2|k}, \dots, u_{k+N_p-1|k}$. Nilai *input* yang digunakan adalah *input* optimal yang baris pertama saja, yaitu $u_{k+1|k}^* = u_{k+1|k}$. Jika $k < N$, maka input kendali yang dihasilkan diterapkan pada model sistem

$$x_{k+1|k} = f(x_{k|k}, u_{k|k})$$

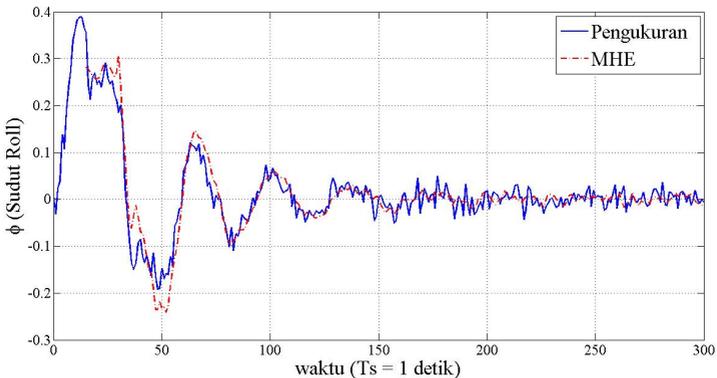
$$y_{k|k} = h(x_{k|k}, u_{k|k}) \quad (4.21)$$

untuk memperoleh prediksi $x_{k+1|k}$. Jika $k \geq N$, maka proses berikutnya adalah melakukan proses estimasi menggunakan MHE dengan fungsi tujuan pada Persamaan (4.6). Pada proses estimasi ini dibutuhkan pengukuran yang didapatkan dari proses optimasi NMPC.

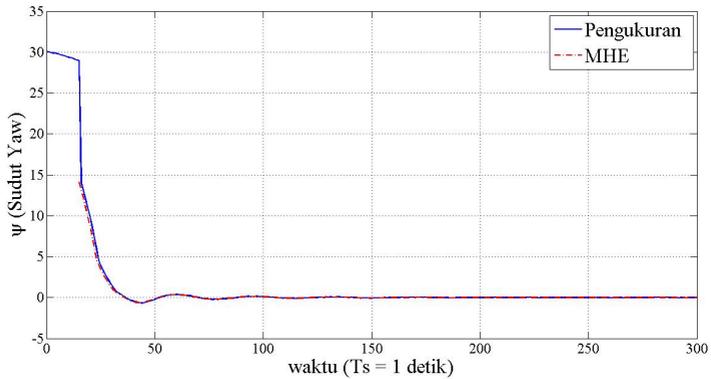
Pada Tugas Akhir ini tidak mempunyai pengukuran riil, sehingga pengukuran diambil dari nilai pengukuran (*measurement output*) yang diperoleh dari Persamaan (4.21) dengan ditambah *noise*, dimana keluaran sistem ini adalah sudut *roll* dan sudut *yaw*, yang dapat diekspresikan dalam bentuk sebagai berikut :

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

Tujuan dari proses estimasi ini adalah memperbaiki kontrol. Nilai keadaan hasil estimasi digunakan oleh NMPC untuk mendapatkan sinyal kontrol u . Kondisi pada Gambar 4.3 dan 4.4 dimuati *noise* pengukuran sebesar 0.88 radian. Dengan adanya *noise* pengukuran mengakibatkan terjadinya simpangan pada grafik estimasi dan grafik pengukuran dari kedua variabel, yaitu sudut *roll* dan sudut *yaw*. Error MAE yang dihasilkan oleh sudut *yaw* sebesar 0.1110, sedangkan error MAE yang dihasilkan oleh sudut *roll* sebesar 5.6566×10^{-5} .

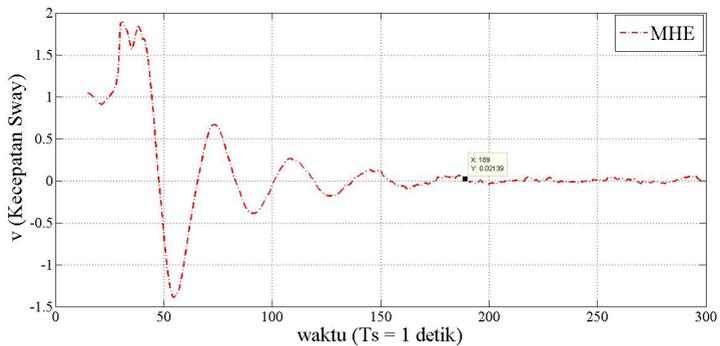


Gambar 4.3: Pengukuran dan Hasil Estimasi Sudut *Roll*

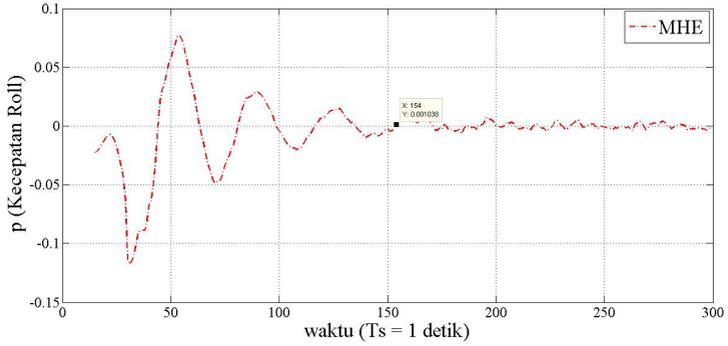
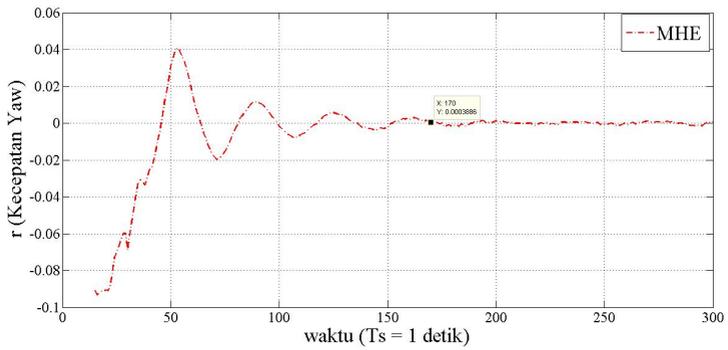


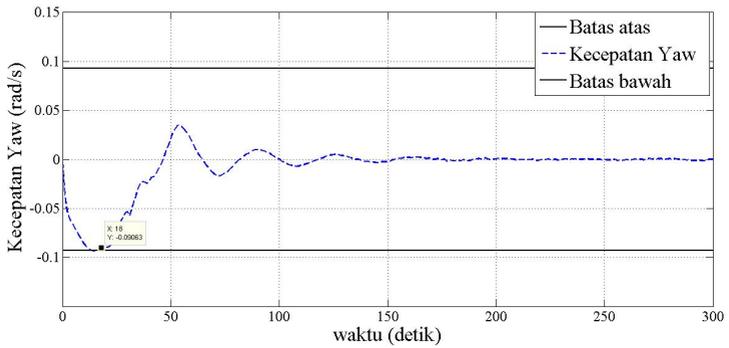
Gambar 4.4: Pengukuran dan Hasil Estimasi Sudut *Yaw*

Gambar 4.5, 4.6 dan 4.7 merupakan hasil estimasi pada keadaan yang tidak terukur lainnya, seperti kecepatan *sway*, kecepatan *roll* dan kecepatan *yaw*. Berdasarkan hasil estimasi tersebut terlihat bahwa terdapat adanya informasi pergerakan dimasa mendatang.

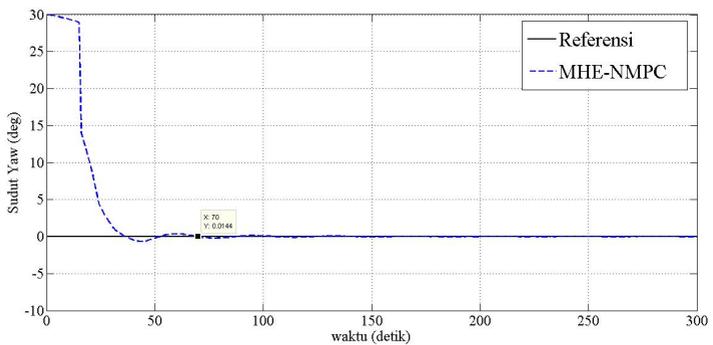


Gambar 4.5: Hasil Estimasi Kecepatan *Sway*

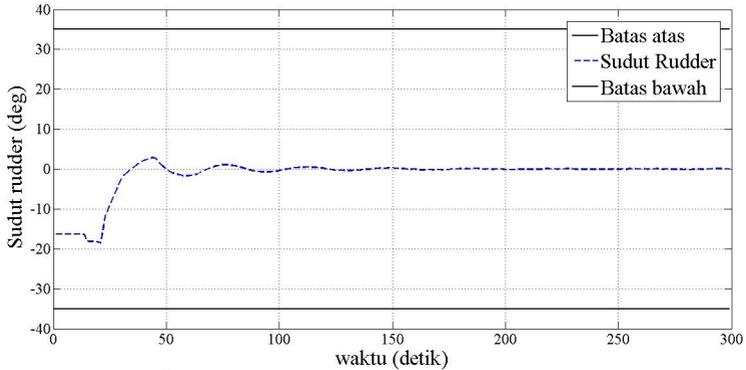
Gambar 4.6: Hasil Estimasi Kecepatan *Roll*Gambar 4.7: Hasil Estimasi Kecepatan *Yaw*



Gambar 4.8: Simulasi Kecepatan *Yaw* dengan MHE - NMPC



Gambar 4.9: Simulasi Sudut *Yaw* dengan MHE - NMPC



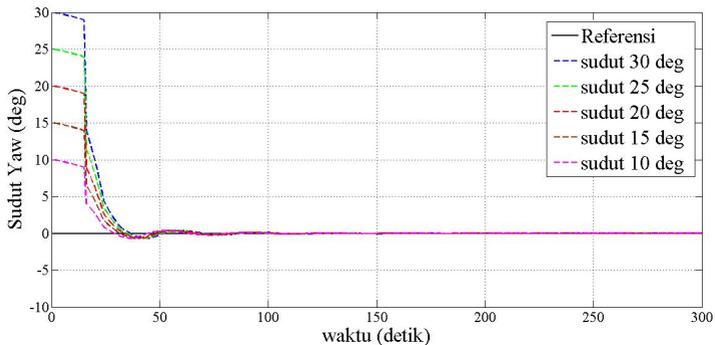
Gambar 4.10: Simulasi Pergerakan *rudder* dengan MHE - NMPC

Gambar 4.8 menunjukkan grafik kecepatan *yaw* yang bergerak dalam batas yang diberikan, yaitu batas atas 0.0932 rad/s dan batas bawah -0.0932 rad/s . Kecepatan *yaw* mula-mula bernilai 0 rad/s kemudian bergerak ke nilai negatif, lalu pada detik ke-18 kembali bergerak ke nilai positif hingga akhirnya mencapai nilai 0 rad/s . Hal ini dapat dikatakan bahwa kapal mulai bergerak stabil.

Gambar 4.9 terlihat bahwa sudut *yaw* yang bergerak dari sudut 30 derajat mencapai nilai yang diharapkan, yaitu 0 derajat pada detik ke-70. Selanjutnya nilai dari sudut *yaw* konstan hingga detik ke-300. Pergerakan kapal masih memenuhi kendala yang diberikan pada kecepatan *yaw*.

Gambar 4.10 ditampilkan sudut *rudder* setelah dikendalikan dengan MHE - NMPC. Mula-mula *rudder* bergerak dengan kondisi tidak stabil. Kemudian nilai sudut *rudder* naik menuju suatu nilai konstan pada detik ke-121. Hal tersebut sesuai dengan kemudi yang digerakkan searah jarum jam untuk mengendalikan sudut *yaw* dari 30 derajat

ke 0 derajat. Pergerakan ini terjadi akibat sistem *maneuver* kapal mengambil tindakan untuk berbelok hingga kapal mencapai kestabilan. Kemudi tidak lagi digerakkan setelah mencapai sudut referensi. Pada simulasi ini menunjukkan bahwa kecepatan *yaw* dan sudut *yaw* berpengaruh terhadap pergerakan sudut *rudder*.



Gambar 4.11: Simulasi dengan Variasi Sudut *Yaw*

Variasi pada sudut *yaw* diberikan dalam rangka mengetahui rata-rata waktu yang dibutuhkan selama mencapai sudut referensi 0 derajat. Gambar 4.11 menunjukkan bahwa sudut *yaw* yang diberikan pada kendali MHE - NMPC berpengaruh terhadap waktu sistem dalam mencapai referensi. Semakin kecil sudut pada *yaw* yang diberikan, semakin kecil juga waktu yang dibutuhkan untuk mencapai referensi. Pada sudut *yaw* mula-mula 30 derajat membutuhkan waktu selama 70 detik dalam mencapai referensi. Sudut *yaw* 25 derajat membutuhkan waktu selama 68 detik untuk mencapai referensi. Waktu 67 detik adalah waktu yang dibutuhkan sudut *yaw* dengan mula-mula 20 derajat menuju referensi 0 derajat. Sudut *yaw* yang mula-mula bergerak dari sudut 15 derajat membutuhkan waktu

selama 65 detik menuju referensi. Sedangkan sudut *yaw* 10 derajat membutuhkan waktu 63 detik untuk mencapai referensi.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa dan pembahasan mengenai penerapan MHE - NMPC pada sistem nonlinear kapal, diperoleh hasil sebagai berikut :

1. Berdasarkan estimasi *state* dengan Moving Horizon Estimation (MHE) diperoleh estimasi pada 5 keadaan variabel, yaitu kecepatan *sway*, kecepatan *roll*, kecepatan *yaw*, sudut *roll* dan sudut *yaw*.
2. Berdasarkan kendali haluan kapal dengan NMPC diperoleh desain kontrol NMPC dalam mengendalikan sudut hadap kapal agar bergerak ke sudut hadap yang diinginkan.
3. Berdasarkan hasil simulasi dari MHE - NMPC diperoleh bahwa
 - (a) sudut *yaw* yang bergerak dari sudut mula-mula 30° menuju sudut referensi 0 derajat membutuhkan waktu selama 70 detik.
 - (b) sudut *yaw* yang bergerak dari sudut mula-mula 25° menuju sudut referensi 0 derajat membutuhkan waktu selama 68 detik.
 - (c) sudut *yaw* yang bergerak dari sudut mula-mula 20° menuju sudut referensi 0 derajat membutuhkan waktu selama 67 detik.

- (d) sudut *yaw* yang bergerak dari sudut mula-mula 15° menuju sudut referensi 0 derajat membutuhkan waktu selama 65 detik.
- (e) sudut *yaw* yang bergerak dari sudut mula-mula 10° menuju sudut referensi 0 derajat membutuhkan waktu selama 63 detik.

5.2 Saran

Saran yang dapat dikemukakan untuk penelitian selanjutnya, diantaranya menambahkan gangguan lingkungan yang ada pada sistem seperti gelombang air laut dan angin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Subchan dan Zbikowski, R. 2007. *Computational optimal control of the terminal bunt manoeuvre — Part 2: minimum-time case*, *Optim. Control Appl. Meth.* 28: 355-379.
- [2] Fossen, T.I. 1994. *Guidance and control of ocean vehicles*. 5-6. Hoboken: Wiley
- [3] Elrosa, I. 2015. *Nonlinear Model Predictive Control for Nonlinear Systems based on a Takagi-Sugeno Fuzzy Model*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [4] Subchan, Syaifudin, W. dan Asfihani, T. 2014. *Ship heading control of corvette-sigma with disturbances using model predictive control*. *Far East Journal of Applied Mathematics*. 87(3): 245.
- [5] Masduki, A. dan Apriliani, E. 2008. *Estimation of Surabaya River Water Quality Using Kalman Filter Algorithm*. *The Journal for Technology and Science*. 19(3): 87-91
- [6] Kang *et al.* 2018. *A Simultaneous Parameter and State Estimator for Polymerization Process Based on Molecular Weight Distribution*. 28th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. 1117–1122.
- [7] Fang, Y. dan Armaou, A. 2018. *Output feedback receding horizon regulation via moving horizon*

- estimation and model predictive control*. Journal of Process Control. 69: 114–127.
- [8] Subchan dan Asfihani, T. 2013. Panduan dan Kendali Kapal Tanpa Awak dengan Menggunakan Metode Predictive Control (MPC) dan Akar Kuadrat-Unscented Kalman Filter (AK-UKF). 149-162. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [9] Kraus *et al.* 2013. *Moving horizon estimation and nonlinear model predictive control for autonomous agricultural vehicles*. Computers and Electronics in Agriculture. 98: 25–33.
- [10] Gulan *et al.* 2015. *Real-time MHE-based nonlinear MPC of a Pendubot system*. IFAC-PapersOnLine. 48(23): 422–427.
- [11] Purnawan, H. 2018. *Disturbance Compensating Model Predictive Control* untuk Kendali Gerak Kapal Perang dengan Misi Penembakan Misil. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [12] Jannaty, B. 2020. Desain Kendali Haluan Kapal dengan *Unscented Model Predictive Control* (UMPC). Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [13] Blanke, M. dan Christensen, A. C. 1993. *Rudder-Roll Damping Autopilot Robustness to Sway-Yaw-Roll Couplings*. 10th Ship Control Systems Symposium.
- [14] Alessandri *et al.* 2010. *Advances in moving horizon estimation for nonlinear systems*. 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC).

- [15] Lima *et al.* 2019. *Moving Horizon Estimation of Faults in Renewable Microgrids*. IFAC-PapersOnLine. 52(1): 311–316.
- [16] Bordons, E. F. 2007. *Model Predictive Control*. London: Springer-Verlag London Limited
- [17] Orukpe, P. E. 2005. *Basics of Model Predictive Control*. ICM, EEE-CAP. 1-27. London: Imperial College.
- [18] Imam Fauzi, D. A. 2016. Penerapan *Model Predictive Control* (MPC) pada *Flow Line* Sistem Produksi Menggunakan Aljabar Max-Plus. 9-11. Surabaya: Jurusan Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

BIODATA PENULIS



Nama lengkap penulis Ulfa Inas Sayekti, lahir di Tulungagung pada tanggal 09 Juni 1997. Sebelum menempuh bangku perkuliahan, penulis memulai pendidikan formal mulai dari TK Mardisiwi (2002 - 2004), SDN 2 Ngrendeng (2004 - 2010), SMP Negeri 1 Kauman (2010 - 2013), SMA Negeri 1 Kedungwaru (2013 - 2016). Pada tahun 2016, penulis meneruskan pendidikan ke jenjang strata-1 di Departemen Matematika,

Fakultas Sains dan Analitika Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), melalui jalur SNMPTN dengan nomor registrasi peserta (NRP) 06111640000017. Dimasa perkuliahan penulis aktif dalam berbagai organisasi antara lain Forum Mahasiswa Tulungagung se-Surabaya sebagai Staff di Departemen Hubungan Luar (2017 - 2018), Jamaah Masjid Manarul Ilmi (JMMI) sebagai staff di Islamic Press 'PENA' (2017 - 2018), Forum Mahasiswa Tulungagung se-Surabaya sebagai Sekretaris 1 (2018 - 2019), UKM Penalaran sebagai Sekretaris Departemen Media dan Jaringan (2018 - 2019), Lembaga Dakwah Jurusan Matematika Ibnu Muqhlah sebagai Sekretaris Bendahara (2018 - 2019). Penulis juga memiliki pengalaman sebagai asisten dosen mata kuliah Matematika 1 dan 2. Selain itu, penulis juga memiliki bakat di bidang fotografi dan media.

Selama di Departemen Matematika, penulis mengambil Bidang Studi Pemodelan dan Simulasi Data. Adapun informasi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini dapat ditujukan ke penulis melalui email inass.ulfa09@gmail.com