



TESIS - SM092306

PENERAPAN *DISTURBANCE COMPENSATING MODEL PREDICTIVE CONTROL* (DC-MPC) PADA SISTEM KENDALI KAPAL

SARI CAHYANINGTIAS
NRP 1211201208

Dosen Pembimbing:
Subchan, Ph.D

PROGRAM MAGISTER
JURUSAN MATEMATIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2014



THESIS - SM092306

**DISTURBANCE COMPENSATING MODEL PREDICTIVE
CONTROL (DC-MPC) APPLICATION IN SHIP CONTROL
SYSTEM**

SARI CAHYANINGTIAS
NRP 1211201208

Supervisor:
Subchan, Ph.D

MASTER'S DEGREE
MATHEMATICS DEPARTMENT
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2014

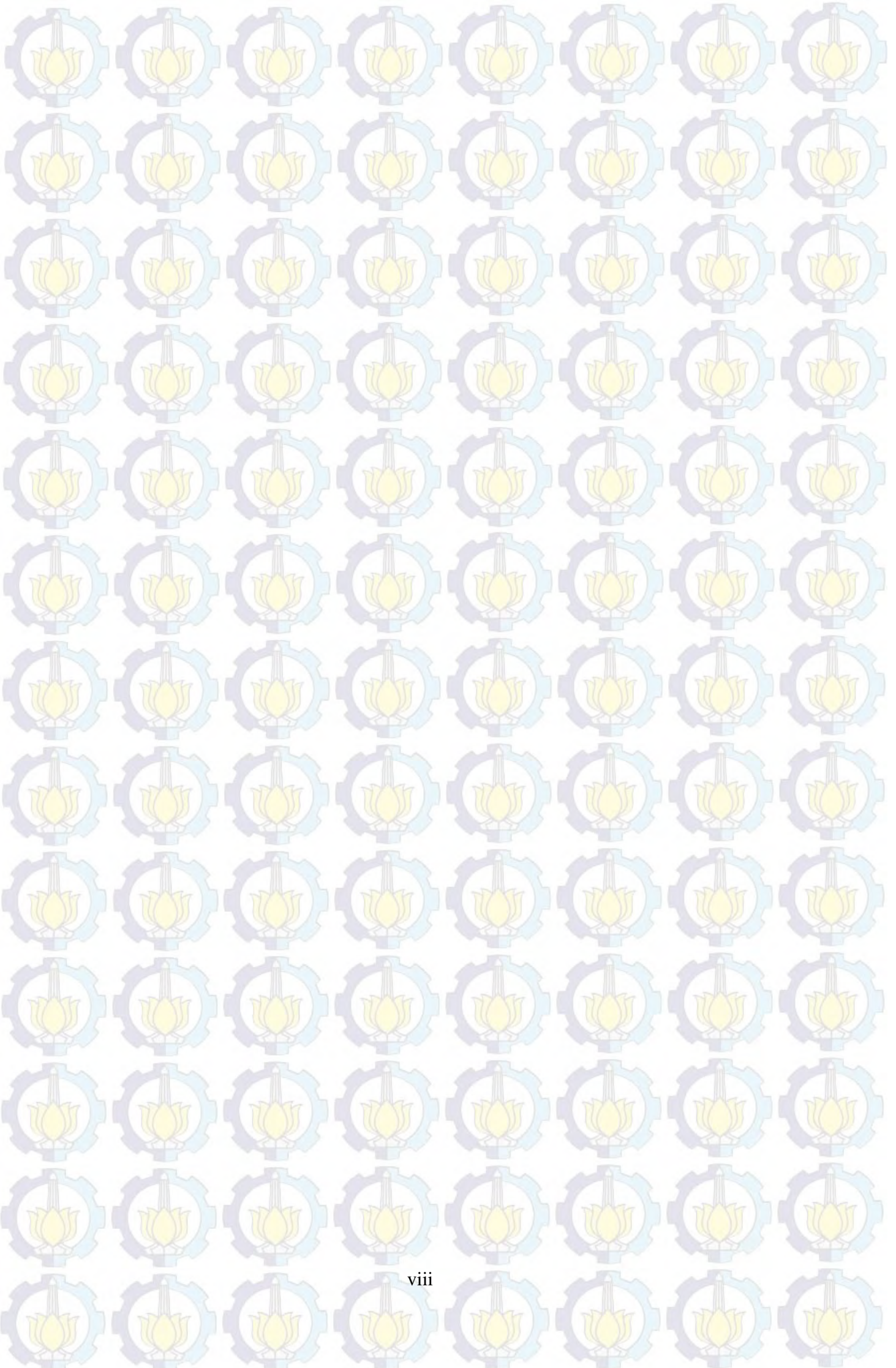
PENERAPAN *DISTURBANCE COMPENSATING MODEL PREDICTIVE CONTROL* (DC-MPC) PADA SISTEM KENDALI KAPAL

Nama Mahasiswa : Sari Cahyaningtias
NRP : 1211201208
Pembimbing : Subchan, Ph.D

ABSTRAK

Pada penelitian ini dibahas permasalahan pengendalian manuver kapal dengan mempertimbangkan empat derajat kebebasan, yaitu: *yaw*, *roll*, *sway*, dan *surge* dengan *rudder* sebagai kendali pada sistem. Model dinamik manuver kapal membentuk sistem persamaan diferensial tak linier. Pengendalian sistem gerak kapal dilakukan dengan metode *Disturbance Compensating Model Predictive Control* (DC-MPC). Metode DC-MPC diterapkan dengan membentuk kompensasi kendali dan dilakukan optimasi dengan mempertimbangan gangguan yang ada. Selanjutnya kompensasi kendali optimal digunakan sebagai faktor yang mempengaruhi batas atas pada kendala ke- k . Kompensasi kendali optimal digunakan juga sebagai faktor pengaruh hasil *output* dari kendali optimal pada proses optimasi dengan metode *Model Predictive Control* (MPC). Hasil analisis penerapan DC-MPC menunjukkan bahwa gangguan yang diberikan dapat diminimumkan pengaruhnya terhadap perilaku gerak kapal, sehingga pergerakan kapal relatif stabil dan mengikuti referensi lintasan.

Kata kunci: *MPC*, *DC-MPC*, kompensasi kendali gangguan, manuver kapal, gangguan laut, sudut kemudi





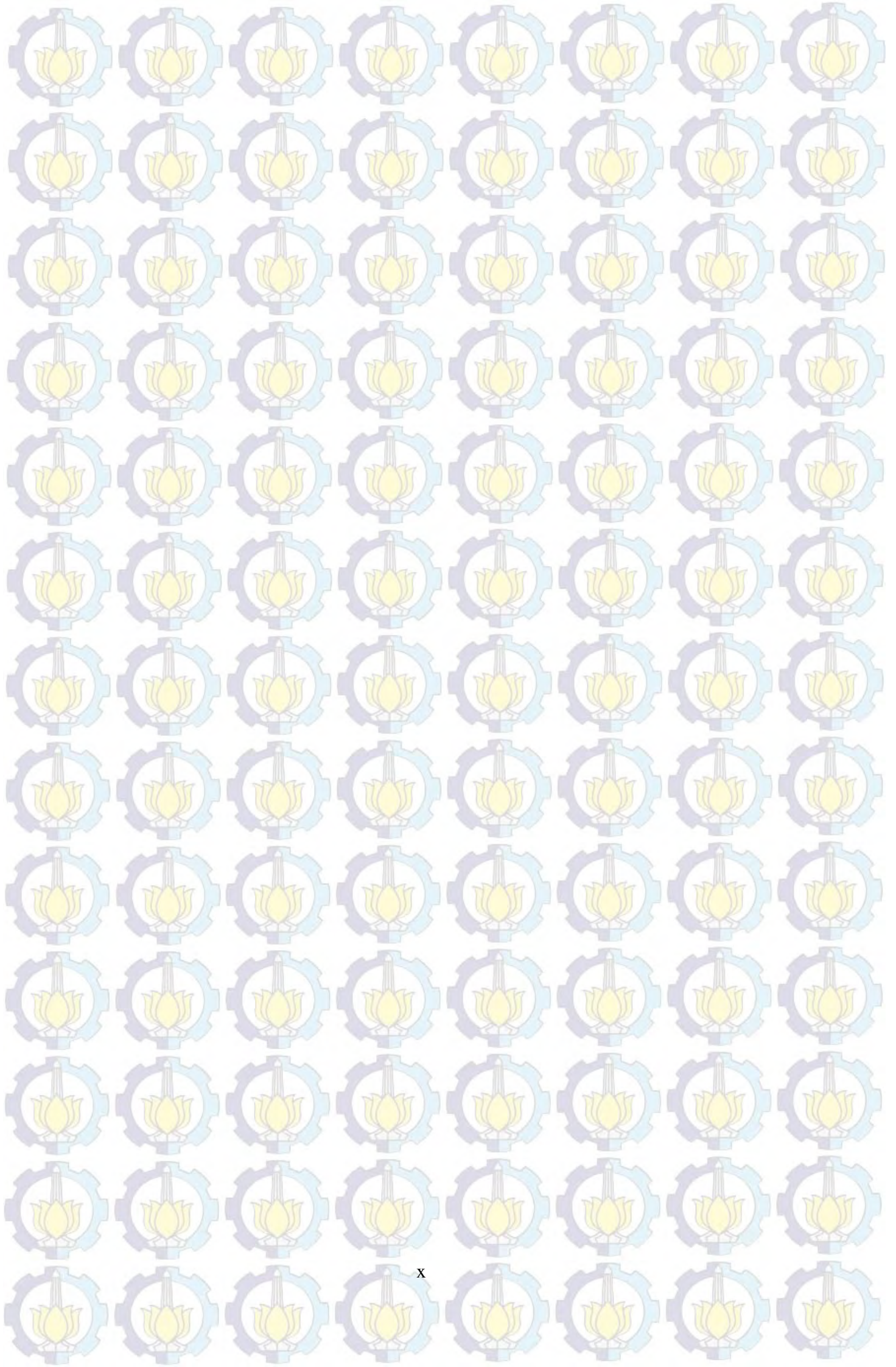
DISTURBANCE COMPENSATING MODEL PREDICTIVE CONTROL (DC-MPC) APPLICATION IN SHIP CONTROL SYSTEM

Name : Sari Cahyaningtias
NRP : 1211201208
Supervisor : Subchan, Ph.D

ABSTRACT

This research studied ship motion control by considering four degree of freedom (DoF), namely surging, swaying, yawing, and rolling. The control of system is rudder. The model of ship maneuver form non-linear differential equations. Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC) method is used for controlling the system. The DC-MPC method is applied by forming control compensation and then optimizing by considering some constraints. Furthermore control compensation is applied as influence factor for boundary conditions. The control compensation influence the output of Model Predictive Control (MPC) process in optimization. The simulation results showed that the influence of disturbance on the ship can be minimized. So, the ship motion relative stable and follow the reference trajectory.

Keywords: *DC-MPC, rudder angle, ship maneuver, sea waves, disturbance compensating control*



PENERAPAN DISTURBANCE COMPENSATING MODEL PREDICTIVE CONTROL (DC-MPC) PADA SISTEM KENDALI KAPAL

**Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Sains (M.Si)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**


**Oleh:
SARI CAHYANINGTIAS
NRP. 1211 201 208**

**Tanggal ujian : 21 Januari 2014
Periode Wisuda : Maret 2014**

Disetujui oleh:

- 
1. **Subchan, Ph.D** (Pembimbing)
NIP. 19710513 199702 1 001
- 
2. **Prof. Dr. Mohammad Isa Irawan, MT** (Penguji)
NIP. 19631225 198903 1 001
- 
3. **Dr. Erna Apriliani, M.Si** (Penguji)
NIP. 19660414 199102 2 001
- 
4. **Dr. Dwi Ratna Sulistyanningrum, S.Si, MT** (Penguji)
NIP. 19690405 199403 2 003

Direktur Program Pascasarjana,



Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT
NIP. 19640405 199002 1 001

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah. Segala puji syukur Penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena hanya dengan rahmat serta hidayah-Nya lah penulis dapat menyelesaikan Tesis dengan judul:

”Penerapan *Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC)* pada Sistem Kendali Kapal”

Sebagai salah satu syarat kelulusan program study Magister (S-2) di jurusan Matematika Fakultas Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) ITS Surabaya.

Penulis sepenuhnya menyadari, dalam penyelesaian Tesis ini, tidak lepas dari bantuan banyak pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Erna Apriliani, M.Si selaku Ketua Jurusan Matematika FMIPA ITS serta Dosen Penguji.
2. Bapak Dr. Subiono, MS selaku Ketua Prodi Pascasarjana Jurusan Matematika FMIPA ITS yang sabar dan selalu membantu ketika penulis mengalami kesulitan.
3. Bapak Subchan, Ph.D selaku Dosen Pembimbing Tesis yang telah memberikan kesempatan, kepercayaan, arahan, nasehat serta motivasi dalam tiap proses penyusunan Tesis ini.
4. Bapak Dr. Darmadji, M.Si selaku dosen wali Penulis yang telah memberikan perhatian dan bimbingan selama penulis menempuh studi.
5. Bapak Prof.Dr. Mohammad Isa Irawan, M.T dan Ibu Dr. Dwi Ratna S. M.Si selaku dosen Penguji Tesis.
6. Bapak/Ibu Dosen serta staf Tata Usaha Program Studi Pascasarjana Jurusan Matematika ITS.
7. Seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan motivasi, yang tidak dapat Penulis sebut satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan Tesis ini masih banyak celah kesalahan dan ketidaksempurnaan didalamnya. Oleh karena itu, kritik dan sarat sangat dibutuhkan untuk perbaikan kedepannya. Penulis berharap, Tesis ini dapat bermanfaat bagi semua pihak. Terima kasih.

Surabaya, Januari, 2014
Penulis

Special Thank to:

1. Kedua Orang tua: Ibu tiada kata yang cukup mengurai rasa syukur penulis memiliki Ibu hebat seperti Ibu. Terima kasih untuk air mata, tawa, doa, rasa percaya dan bangga kepada penulis. Bapak (Alm) terima kasih untuk semua prinsip yang Bapak tanamkan. Semoga Allah menjaga kalian selalu dimanapun. Saya mencintai Kalian teramat sangat.
2. Mbak, Mas, dan adik terkasih, untuk support dan penjagaan kalian semua selama ini. Maaf, untuk dosa kecil yang kerap penulis lemparkan sengaja ataupun tidak. I love you. Mbak Diah, Mbak Inis, Mbak Atik, Mas Yayah, Yu Pong, Iwik.
3. Kakak iparku yang selalu memberikan perhatian dan semangat selama ini.
4. Penyemangat kecil penulis: Reyfan, Zahir, Ibra, Nisa, Arum, Bilqish, Hani, Fahat, Icha, Nabil.
5. My co-supervisor, Tahiyatul Asihani, untuk kepercayaan dan kesabaran dalam membimbing penulis. You have another style for directing me.
6. Bpk. Drs. M. Setijo Winarko, M.Si dan Bpk. Ir. Wisnu Wardhana, M.Si untuk waktu diskusi yang diberikan ditengah kesibukan Beliau.
7. Fauziah dan Wawan untuk tulisan yang sangat inspiratif. Semoga kalian tidak berhenti menulis. Mbak Fa, diskusi interlokal kita sangat mengagumkan.
8. Teman-teman pasca sarjana angkatan 2011 semester genap. Kenangan indah yang takkan terlupa. Wajib reuni ya Rek. Mbak Wid dan Mbak Risa, keep fighting! Evita, semangat pantang menyerah kita teramat memukau seperti :)
9. Risshikan team tanpa terkecuali, untuk pengertian dan dukungannya. Special my beloved partner Mbak Nora, Nevy, dan Dyah. Untuk semua tawa ditengah kegilaan yang semakin menggila. Thank for giving me day off. (not really off actually lol)
10. Para penghuni Lab. Pemodelan dan Simulasi. Wawan, Paul, Fahim, Ipin untuk bantuan pemrograman dan solusi untuk latex yang kurang bersahabat. One day maen lagi ya :p

DAFTAR ISI

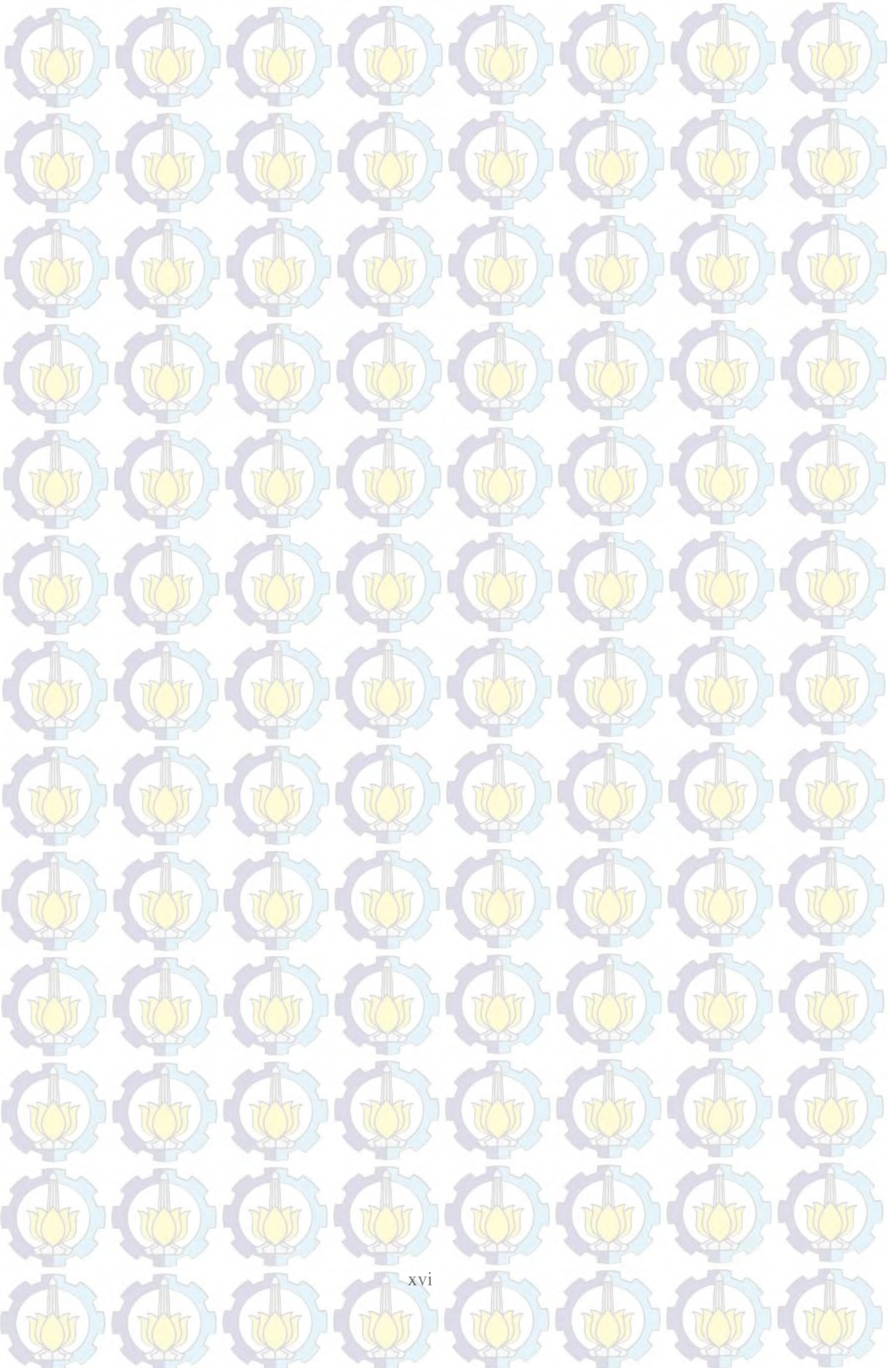
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR SIMBOL	xix
BAB I Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Kontribusi Hasil Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Kajian Pustaka	5
2.2 Model Matematika Manuver Kapal	6
2.2.1 Normalisasi Sistem Kendali Kapal	8
2.3 Gangguan Lingkungan pada Kapal	10
2.4 Model Predictive Control (MPC)	11
2.4.1 Ide Model Predictive Control	11
2.4.2 Metodologi MPC	12
2.5 Formulasi MPC	13
2.5.1 Model Predictive Control Linear	13
2.5.2 Pembentukan Kendala	13
2.5.3 Fungsi Objektif	14
2.5.4 Optimasi pada MPC	15
2.6 Optimasi Kompensasi Gangguan	16
2.7 Pelinieran	18
BAB III METODE PENELITIAN	21

BAB IV	ANALISIS DAN PEMBAHASAN	23
4.1	Model Matematika Manuver Kapal	23
4.1.1	Pelinieran Sistem Dinamik Kapal	28
4.1.2	Pendiskritan sistem keadaan	40
4.2	Penerapan <i>Disturbance Compensating-Model Predictive Control</i> Pada Kendali Haluan Kapal	43
4.2.1	Inisialisasi Awal Penerapan MPC	43
4.2.2	Perhitungan <i>Constraint</i> pada Kendali Haluan Kapal	43
4.2.3	Optimasi Kompensasi Gelombang	44
4.2.4	Prediksi Kendali Optimal dengan Menggunakan DC-MPC	46
4.2.5	Prediksi Posisi Kendali Gerak Kapal	47
4.3	Simulasi dan Analisis Penerapan DC-MPC pada kendali kapal	48
4.3.1	Perbandingan antara DC-MPC dan MPC dengan Gangguan	53
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	57
	DAFTAR PUSTAKA	59
	LAMPIRAN	61
A	Data-Data Hasil Simulasi	63
B	Program Simulasi Penerapan DC-MPC	73
C	Biodata Penulis	79



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Notasi Standard dan Tanda Konvensi pada Deskripsi Gerakan Kapal (Fossen, 1994)	6
Gambar 2.2	Definisi Sudut (Li dkk, 2010)	10
Gambar 2.3	Struktur Pengendali Optimal (Camacho, 1999)	12
Gambar 4.1	Rotasi dari <i>Roll</i> (Fossen, 1994)	23
Gambar 4.2	Definisi Sistem Dinamik Kapal (Ghaemi, 2006)	24
Gambar 4.3	Perilaku Kestabilan Sudut Kemudi dengan Jumlah N_p bervariasi	50
Gambar 4.4	Perilaku Kestabilan Kecepatan Sudut <i>Yaw</i> dengan N_p bervariasi	50
Gambar 4.5	Perbandingan Perilaku Kecepatan <i>Roll</i> dengan N_p Bervariasi	53
Gambar 4.6	Perbandingan Perilaku Sudut Kemudi	54
Gambar 4.7	Perbandingan Perilaku Kecepatan <i>Yaw</i>	54
Gambar 4.8	Perbandingan Perilaku Kecepatan <i>Roll</i>	55

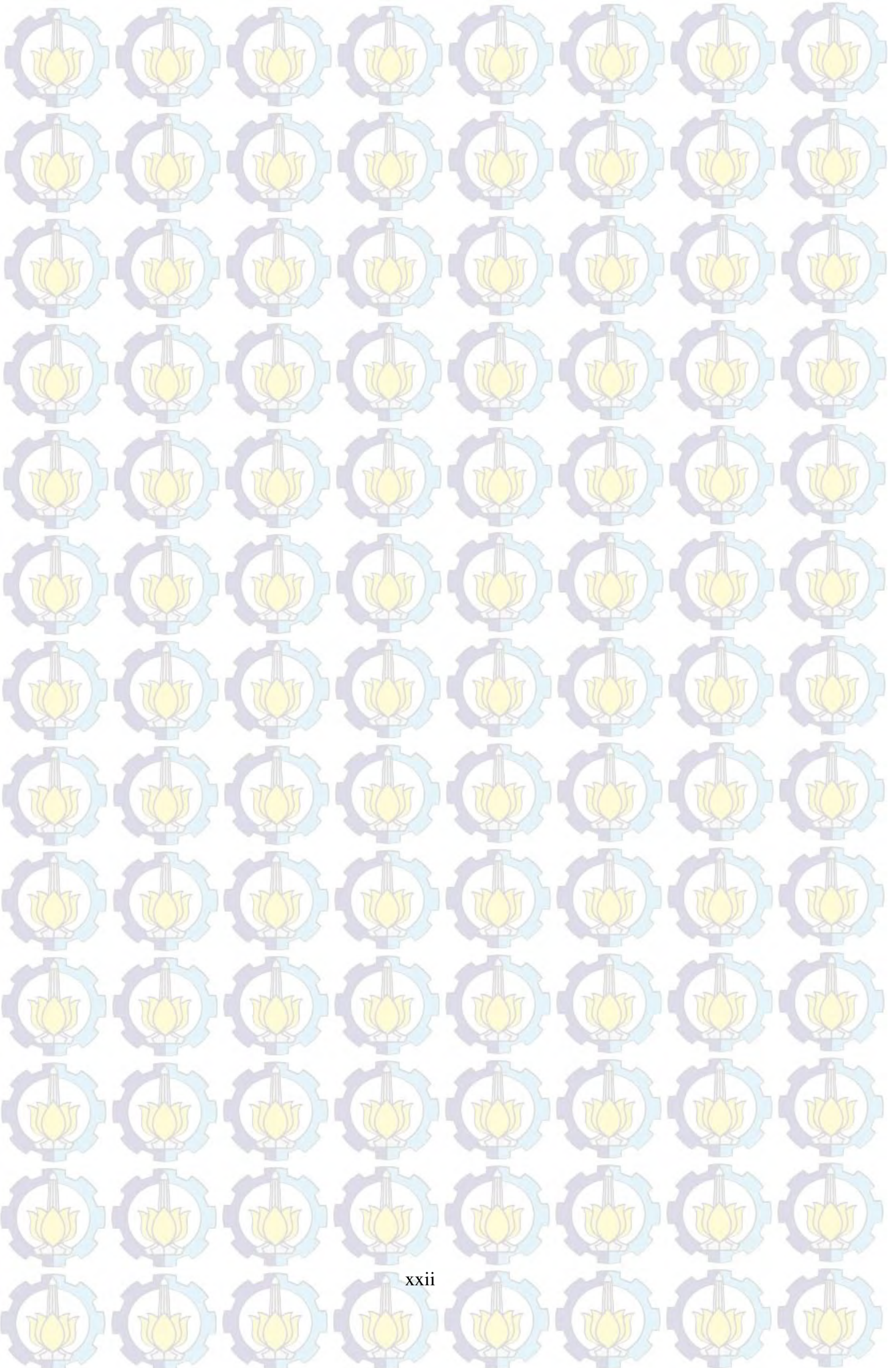


DAFTAR SIMBOL

X	Gerak translasi pada arah sumbu- x
Y	Gerak translasi pada arah sumbu- y
K	Gerak rotasi pada sumbu- y
N	Gerak rotasi pada sumbu- z
u'	Kecepatan <i>surge</i>
v'	Kecepatan <i>sway</i>
r'	Kecepatan sudut <i>yaw</i>
p'	Kecepatan sudut <i>roll</i>
ψ'	Sudut <i>yaw</i>
ϕ'	Sudut <i>roll</i>
n'	Kecapatan <i>propeller</i>
δ'	Sudut kemudi
m'	Massa kapal
m'_x	Penambahan massa pada sumbu- x
m'_y	Penambahan massa pada sumbu- y
I'_x	Momen inersia pada sumbu- x
I'_z	Momen inersia pada sumbu- z
J'_x	Penambahan momen inersia pada sumbu- x
J'_z	Penambahan momen inersia pada sumbu- z
k'	Radius putaran
ρ	Massa jenis
x'_G	Pusat gravitasi
L	Panjang badan kapal
β'	Sudut datang gelombang dengan haluan kapal
W'	Berat kapal
GM'	Berat metasentrik
X'_{uu}	Koefisien dari turunan dua kali gaya hidrodinamika terhadap u sepanjang sumbu- x
X'_{vv}	Koefisien dari turunan dua kali gaya hidrodinamika terhadap v sepanjang sumbu- x
X'_{vr}	Koefisien dari turunan gaya hidrodinamika terhadap u dan v sepanjang sumbu- x
X'_{rr}	Koefisien dari turunan dua kali gaya hidrodinamika terhadap r sepanjang sumbu- x
$X'_{\phi\phi}$	Koefisien dari turunan dua kali gaya hidrodinamika terhadap ϕ sepanjang sumbu- x
Y'_v	Koefisien dari turunan gaya Hidrodinamika terhadap v sepanjang sumbu- y
Y'_r	Koefisien dari turunan gaya Hidrodinamika terhadap r sepanjang sumbu- y
Y'_p	Koefisien dari turunan gaya Hidrodinamika terhadap p sepanjang sumbu- y
Y'_ϕ	Koefisien dari turunan gaya Hidrodinamika terhadap ϕ sepanjang sumbu- y
Y'_{vvv}	Koefisien dari turunan tiga kali gaya Hidrodinamika terhadap v sepanjang sumbu- y
Y'_{vvr}	Koefisien dari turunan dua kali gaya Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap v kemudian diturunkan lagi terhadap r
Y'_{vrr}	Koefisien dari turunan gaya Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap v kemudian diturunkan lagi dua kali terhadap r
Y'_{rrr}	Koefisien dari turunan dua kali gaya Hidrodinamika terhadap v sepanjang sumbu- y

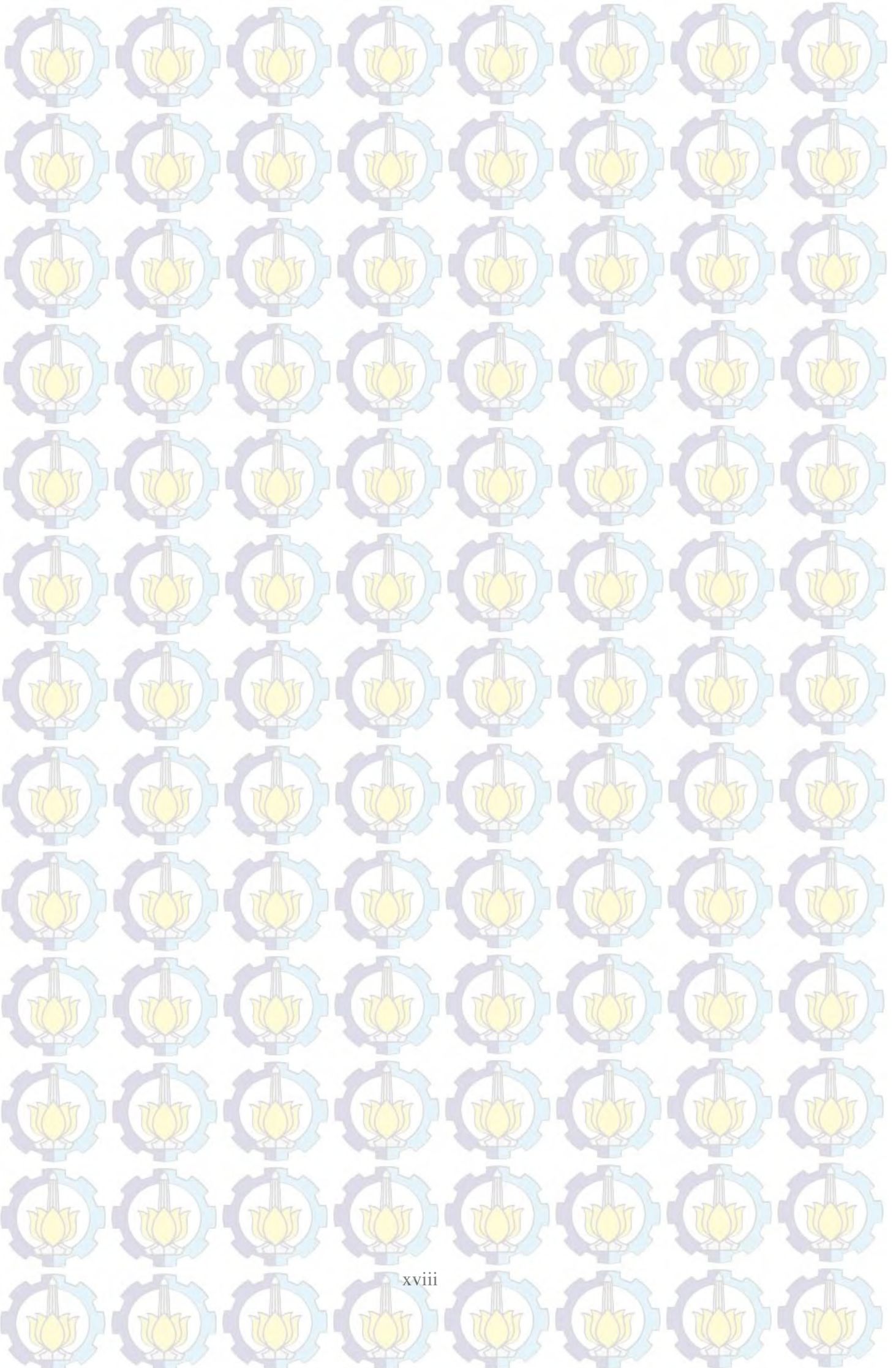
$Y'_{vv\phi}$	Koefisien dari turunan dua kali gaya Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap v kemudian diturunkan lagi terhadap ϕ
$Y'_{v\phi\phi}$	Koefisien dari turunan gaya Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap v kemudian diturunkan lagi dua kali terhadap ϕ
$Y'_{rr\phi}$	Koefisien dari turunan dua kali gaya Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap r kemudian diturunkan lagi terhadap ϕ
$Y'_{r\phi\phi}$	Koefisien dari turunan gaya Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap r kemudian diturunkan lagi dua kali terhadap ϕ
K'_v	Koefisien dari turunan momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap v
K'_r	Koefisien dari turunan momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap r
K'_p	Koefisien dari turunan momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap p
K'_ϕ	Koefisien dari turunan momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap ϕ
K'_{vvv}	Koefisien dari turunan tiga kali momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap v
K'_{vvr}	Koefisien dari turunan dua kali momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap v kemudian diturunkan lagi terhadap r
K'_{vrr}	Koefisien dari turunan momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap v kemudian diturunkan dua kali terhadap r
K'_{rrr}	Koefisien dari turunan tiga kali momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap r
$K'_{vv\phi}$	Koefisien dari turunan dua kali momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap v kemudian diturunkan dua kali terhadap ϕ
$K'_{v\phi\phi}$	Koefisien dari turunan momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap v kemudian diturunkan dua kali terhadap ϕ
$K'_{rr\phi}$	Koefisien dari turunan dua kali momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap r kemudian diturunkan lagi terhadap ϕ
$K'_{r\phi\phi}$	Koefisien dari turunan momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- y terhadap r kemudian diturunkan lagi terhadap ϕ
N'_v	Koefisien dari turunan momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- z terhadap v
N'_r	Koefisien dari turunan momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- z terhadap r
N'_p	Koefisien dari turunan momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- z terhadap p
N'_ϕ	Koefisien dari turunan momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- z terhadap ϕ
N'_{vvv}	Koefisien dari turunan tiga kali momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- z terhadap v
N'_{vvr}	Koefisien dari turunan dua kali momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- z terhadap v kemudian diturunkan lagi terhadap r
N'_{vrr}	Koefisien dari turunan momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- z terhadap v kemudian diturunkan dua kali terhadap r
N'_{rrr}	Koefisien dari turunan tiga kali momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- z terhadap r
$N'_{vv\phi}$	Koefisien dari turunan dua kali momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- z terhadap v kemudian diturunkan terhadap ϕ
$N'_{v\phi\phi}$	Koefisien dari turunan momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- z terhadap v kemudian diturunkan dua kali terhadap ϕ
$N'_{rr\phi}$	Koefisien dari turunan dua kali momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- z terhadap r kemudian diturunkan lagi terhadap ϕ
$N'_{r\phi\phi}$	Koefisien dari turunan momen Hidrodinamika sepanjang sumbu- z terhadap r kemudian diturunkan dua kali terhadap ϕ

X_{wave}	Gelombang laut sepanjang sumbu- x
Y_{wave}	Gelombang laut sepanjang sumbu- y
K_{wave}	Gelombang laut sepanjang sumbu- y
N_{wave}	Gelombang laut sepanjang sumbu- z
A	Matriks ruang keadaan sistem dinamik kapal berukuran 6×6
B	Matriks kendali <i>input</i> sistem dinamik kapal berukuran 6×1
Q	Matriks semi definit positif berukuran $n \times n$, n jumlah keadaan
R	Matriks definit positif berukuran $m \times m$, m jumlah kendali
F_1	Kendala pada keadaan
f_1	<i>boundary condition</i>
F_2	Kendala pada kendali
f_2	<i>boundary condition</i>
FN'	Gaya normal <i>rudder</i>
U'_R	Perubahan kecepatan longitudinal
V'_R	Perubahan kecepatan lateral
AR	Area <i>rudder</i>
∇	Aspek rasio <i>rudder</i>
$\hat{w}(k-1)$	Estimasi gangguan pada saat $(k-1)$
ϵ	Selisih antara gangguan <i>real</i> ke (k) dengan gangguan estimasi ke- $(k-1)$
Δu	Kompensasi gangguan
Δu^*	Kompensasi gangguan optimal
Δt	Waktu sampling
D	Diameter baling-baling
$(1-tt)$	Faktor deduksi antara lambung kapal dan baling-baling
x_R	Lokasi kemudi terhadap pusat massa
γ	Faktor kekuatan aliran dari lambung kapal
KT'	Koefisien dorongan baling-baling
a_H, x_H	Koefisien gaya interaktif antara lambung kapal dan baling-baling



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Enam Derajat Kebebasan Gerakan Kapal	6
Tabel 2.2	Normalisasi dengan menerapkan <i>Prime System I</i> (Fossen, 1994) ...	8
Tabel 4.1	Hasil Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Sudut Kemudi dengan Jumlah N_p Bervariasi	49
Tabel 4.2	Hasil Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Kecepatan Sudut <i>Yaw</i> untuk Jumlah N_p Bervariasi	51
Tabel 4.3	Hasil Penerapan DC-MPC pada Kecepatan Sudut <i>Roll</i> untuk Jumlah N_p Bervariasi	52
Tabel 1.1	Perbandingan Hasil Simulasi antara Metode DC-MPC dan MPC-D untuk Jumlah N_p sebanyak 60	63
Tabel 1.2	Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Sudut Kemudi untuk Jumlah N_p Bervariasi Mulai detik 1-10	64
Tabel 1.3	Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Sudut Kemudi untuk Jumlah N_p Bervariasi Mulai detik 11-20	65
Tabel 1.4	Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Sudut Kemudi untuk Jumlah N_p Bervariasi Mulai detik 21-30	66
Tabel 1.5	Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Kecepatan Sudut <i>Roll</i> untuk Jumlah N_p yang Bervariasi Mulai detik 1-10	67
Tabel 1.6	Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Kecepatan Sudut <i>Roll</i> untuk Jumlah N_p yang Bervariasi Mulai detik 11-20	68
Tabel 1.7	Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Kecepatan Sudut <i>Roll</i> untuk Jumlah N_p Bervariasi Mulai detik 21-30	69
Tabel 1.8	Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Kecepatan Sudut <i>Yaw</i> untuk Jumlah N_p Bervariasi Mulai detik 1-10	70
Tabel 1.9	Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Kecepatan Sudut <i>Yaw</i> untuk Jumlah N_p Bervariasi Mulai detik 11-20	71
Tabel 1.10	Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Kecepatan Sudut <i>Yaw</i> untuk Jumlah N_p Bervariasi Mulai detik 21-30	72



BAB I PENDAHULUAN

Dalam bab ini, dibahas mengenai latar belakang yang mendasari penelitian. Ruang lingkup pembahasannya adalah hal-hal yang mendasari penelitian termasuk didalamnya tujuan, manfaat, serta kontribusi penelitian dalam ilmu terkait.

1.1 Latar Belakang Penelitian

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan dua pertiga wilayah berupa lautan. Sehingga diperlukan adanya pertahanan dan keamanan yang kokoh terutama pada wilayah lautan yang membentang luas dari sabang sampai Merauke. Dalam hal ini, kapal merupakan salah satu pilihan tepat untuk transportasi industri (dalam bidang perdagangan) ataupun patroli rutin wilayah laut. Oleh karena itu diperlukan adanya tingkat keamanan serta akurasi yang tepat dalam pergerakannya. Wilayah laut rentan terhadap berbagai gangguan lingkungan untuk itu dibutuhkan pengendalian terhadap gerak kapal agar dapat menjaga kestabilan di lautan.

Ketika melakukan manuver di lautan, sebuah kapal mempunyai enam derajat kebebasan (Fossen, 2005). Pergerakan ini berpusat pada tiga sumbu utama, antara lain: sumbu *longitudinal* (dari buritan ke depan), sumbu *transversal* (samping), dan sumbu normal bumi (atas ke bawah). Pada masing-masing sumbu ini terdapat gerakan rotasi serta translasi. Gerakan pada sumbu *longitudinal* adalah *surge* sebagai translasi dan *roll* sebagai rotasi. Sedangkan pada sumbu transversal adalah *sway* (translasi) dan *pitch* (rotasi). *Heave* dan *pitch* masing-masing sebagai translasi dan rotasi pada sumbu normal bumi. Umumnya, sistem gerak kapal yang digunakan adalah tiga derajat kebebasan yaitu *surge*, *yaw*, dan *sway*. Pada saat kecepatan *surge*, *sway*, dan *yaw* tak terkendali, dapat menghasilkan gerakan lain seperti *pitch*, *heave*, dan *roll* yang dapat menyebabkan guncangan keras dan kerusakan kargo pada kapal (Li, 2012).

Selain pengendalian gerak kapal, dalam praktek lapangan masalah lain yang membawa dampak besar dalam sistem kendali kapal adalah gangguan lingkungan. Terdapat tiga macam gangguan lingkungan di lautan, antara lain: gelombang, angin, dan arus laut. Umumnya gangguan lingkungan ini, diabaikan karena kompleksitas struktur interaksi gelombang laut itu sendiri. Sedangkan dalam penelitian ini diperhitungkan adanya faktor lingkungan yang mempengaruhi pergerakan yaitu gelombang laut yang dibangkitkan oleh angin. Faktor ini dipilih karena secara fisik berhubungan langsung dengan gerak kapal dan menjadi faktor dominan diantara kedua faktor yang lain.

Metode pengendali yang banyak dikembangkan dibidang kendali sistem kapal adalah *Model Predictive Control* (MPC). Penerapan metode ini, dapat memenuhi permasalahan berdasarkan analisis hasil simulasi pada penelitian-penelitian terdahulu.

DC-MPC merupakan pengembangan dari MPC *Model Predictive Control*, berbasis pada kontrol umpan balik (*feedback control*). Metode ini merupakan salah satu alternatif penyelesaian desain kendali lanjutan untuk mengatasi gangguan yang diberikan secara langsung. Pada metode ini, dilakukan pendefinisian gangguan yang diberikan pada sistem terlebih dahulu. Kemudian dilakukan optimasi pada sistem sehingga mendapatkan *disturbance compensating*, kompensasi gangguan. Proses inilah yang membedakan dari MPC pada umumnya, kompensasi gangguan yang diperoleh selanjutnya dijadikan input pada algoritma MPC. Ide pengembangan metode DC-MPC diperkenalkan oleh Li dan Sun (2012) dalam penelitiannya mengenai *ship heading control*. Pada penelitian tersebut dilakukan perbandingan dengan metode-metode MPC yang telah ada sebelumnya. Hasilnya, DC-MPC dapat mengatasi masalah gangguan lingkungan sehingga gerakan kapal dapat dikendalikan sesuai kendala yang ditetapkan.

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, pada penelitian ini dilakukan pengembangan pengendalian gerak kapal dengan mempertimbangkan empat derajat kebebasan yaitu: *surge*, *sway*, *yaw*, dan *roll*. Diasumsikan bahwa *pitch* dan *heave* tidak mempengaruhi manuver kapal. Model tak linier empat derajat kebebasan adalah model paling komprehensif yang dipaparkan dalam literatur-literatur terbuka, dan dapat mencakup fundamental karakteristik dari dinamik kapal dan menuju ketelitian yang lebih memuaskan (Li, 2010). Kecepatan sudut *roll* diperhitungkan karena pada kondisi kapal dengan kecepatan tinggi maka gerakan *rolling* tidak dapat diabaikan lagi. Model yang didapatkan dari sistem dinamik ini adalah sistem *differensial* tak linier.

Ruang lingkup penelitian ini, dikembangkan pada sistem kendali gerakan kapal dengan empat derajat kebebasan. Kapal yang bergerak dengan kecepatan tinggi di lautan maka, kecepatan Berdasarkan uraian diatas maka pada penelitian ini, akan dikaji mengenai pengendalian gerakan kapal di permukaan laut. Penelitian ini akan dikembangkan pada lintasan yang ditentukan dengan menerapkan metode DC-MPC. Selanjutnya dilakukan simulasi dan analisis untuk mendapatkan keakuratan metode yang diterapkan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang ada, permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana penerapan *Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC)* untuk kendali kapal.
2. Bagaimana hasil simulasi serta analisis penerapan *Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC)* untuk kendali kapal.

1.3 Batasan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini dibatasi sebagai berikut:

1. Model matematika gerak kapal membentuk sistem persamaan tak linier yang dipengaruhi oleh empat derajat kebebasan, yaitu *surge*, *sway*, *roll*, dan *yaw*.
2. Kendali sistem gerak kapal adalah sudut kemudi.
3. Gangguan yang diberikan pada sistem merupakan gangguan gelombang laut dengan asumsi faktor lain tidak mempengaruhi.
4. Model gangguan berupa gelombang laut sinusoidal (Fossen, 1994)
5. Simulasi dilakukan dengan mengambil data kapal kontainer (Fossen, 1994)

1.4 Tujuan Penelitian

Dari perumusan masalah yang ada, maka tujuan dari penelitian ini adalah

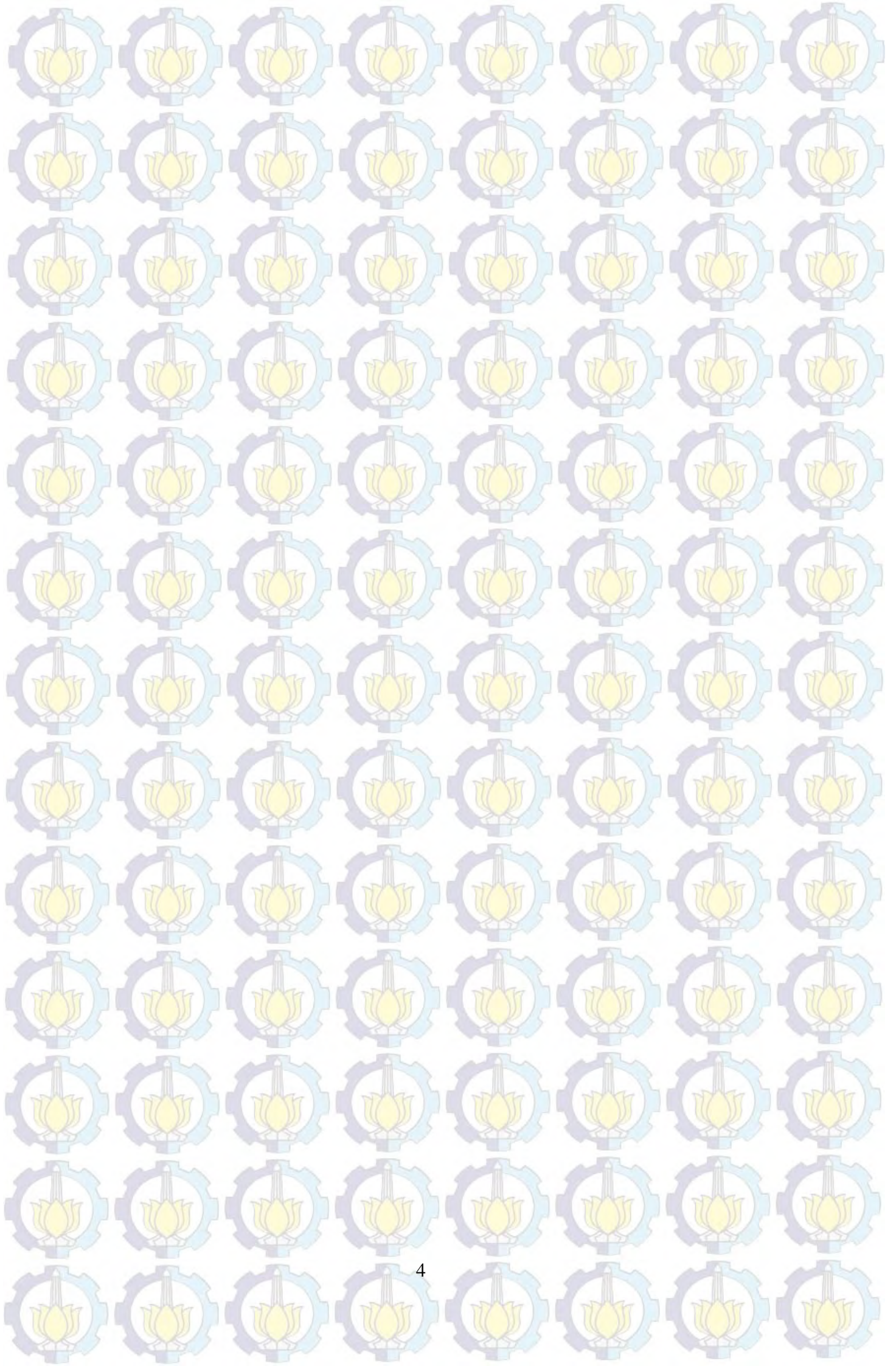
1. Menerapkan *Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC)* untuk kendali kapal.
2. Simulasi dan analisis hasil penerapan *Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC)* untuk kendali kapal
3. Membandingkan hasil penerapan DC-MPC dengan MPC

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari Penelitian ini adalah memberikan metode alternatif yang lebih baik dalam kendali kapal dengan memperhitungkan faktor gangguan dari lingkungan. Selain itu dapat digunakan sebagai dasar pada pengembangan penelitian terkait dibidang desain kendali kapal di lautan.

1.6 Kontribusi Hasil Penelitian

Kontribusi hasil penelitian ini terhadap pengembangan ilmu adalah sebagai informasi yang dapat menunjang kemandirian pertahanan dan keamanan negara.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bagian ini dibahas mengenai penelitian-penelitian yang telah ada sebelumnya baik tentang obyek maupun metode terkait penelitian yang dilakukan. Selain itu dijelaskan juga latar belakang *Model Predictive Control* (MPC) serta pengembangan metode tersebut yakni, *Disturbance Compensating Model Predictive control* (DC-MPC), model matematika untuk manuver kapal di lautan, jenis gangguan lingkungan serta teori pelinieran.

2.1 Kajian Pustaka

Permasalahan pengendalian kapal telah banyak dikaji diberbagai penelitian. Pada tahun 2013 Syaifuddin melakukan penelitian pengendalian haluan kapal dengan menerapkan metode MPC. Pada penelitian tersebut model matematika yang dipilih adalah Model penurunan Nomoto orde satu dengan mempertimbangkan satu derajat kebebasan yaitu *yaw*. Simulasi dilakukan pada kapal perang *convert sigma*. Hasil analisis dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode MPC dapat mengendalikan sudut haluan kapal bergerak stabil didalam kendala yang diberikan dan jumlah N_p yang diberikan pada proses pengendalian dapat mempercepat kestabilan sudut haluan. Selanjutnya, pengembangan penelitian tentang pengendalian haluan kapal dilakukan kembali oleh Fauziyah (2013). Pengendalian ini, dilakukan dengan menerapkan metode gabungan (*Model Predictive Control-Kalman Filter*) MPC-KF sebagai pembanding antara MPC dengan MPC gabungan Kalman Filter. Permasalahan yang dikaji pada penelitian tersebut dibatasi pada tiga derajat kebebasan yakni, kecepatan *yaw*, kecepatan *sway*, dan kecepatan *surge* dengan kontrol input berupa sudut kemudi.

Metode MPC telah banyak diterapkan diberbagai bidang pengendalian obyek bergerak, antara lain: pengendalian robot mobil, pengendalian gerak kapal dst. Selanjutnya, sebuah ide metode DC-MPC mengenai perkembangan MPC dengan mengintegrasikan pada gangguan. DC-MPC dikembangkan untuk mengatasi suatu sistem kendali haluan kapal dengan gangguan (Li, 2012). Model yang digunakan adalah model matematika penurunan nomoto orde ke-2. Model ini, menggambarkan gerak kapal dengan satu derajat kebebasan yaitu *yaw* dan satu kendali input berupa sudut kemudi. Pada penelitian Li dkk tersebut dipilih dua jenis gelombang laut yaitu, gelombang laut tetap dan gelombang laut sinusiodal sebagai gangguan pada sistem. Pada penelitian tersebut dilakukan dua metode penyelesaian dari permasalahan yang ada, yaitu dengan menerapkan MPC dengan gangguan dan DC-MPC. Selanjutnya dilakukan analisis dari masing-masing hasil simulasi yang diperoleh. Hasilnya dengan menerapkan metode DC-MPC didapatkan hasil yang lebih memuaskan.

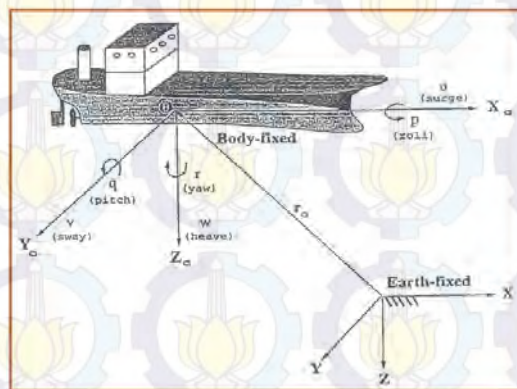
2.2 Model Matematika Manuver Kapal

Secara umum gerakan yang dialami sebuah kapal ketika melaju di lautan ada dua macam, yaitu gerakan translasi dan rotasi. Gerakan ini dikenal dengan *six-degree of freedom* (6 derajat kebebasan), keenam gerakan ini akan dijelaskan melalui Tabel (2.1) (Fossen, 1994) sebagai berikut:

Tabel 2.1: Enam Derajat Kebebasan Gerakan Kapal

Gerakan	Gaya dan Moment	Kec. Linear dan Angular	Posisi dan Sudut Euler
<i>Surge</i> (gerak translasi terhadap sumbu x)	X	u	x
<i>Sway</i> (gerak translasi terhadap sumbu y)	Y	v	y
<i>Heave</i> (gerak translasi terhadap sumbu Z)	Z	w	z
<i>Roll</i> (gerak rotasi terhadap sumbu x)	K	p	Φ
<i>Pitch</i> (gerak rotasi terhadap sumbu y)	M	q	θ
<i>Yaw</i> (gerak rotasi terhadap sumbu Z)	N	r	ψ

Secara umum model matematika untuk sistem gerak kapal memiliki enam derajat kebebasan, yaitu *sway*, *pitch*, *yaw*, *heave*, *roll*, serta *surge*. Gerakan translasi antara lain: *sway* (gerakan kesamping), *surge* (gerakan longitudinal), *heave* (gerakan vertikal). Sedangkan gerakan rotasi (putarannya) adalah *yaw* (rotasi pada sumbu vertikal), *roll* (rotasi pada sumbu/gerakan longitudinal), dan *pitch* (rotasi pada sumbu transversal/ gerakan kesamping) (Fossen, 1994). Sebagaimana dapat terlihat pada Gambar 2.1 sebagai berikut:



Gambar 2.1: Notasi Standard dan Tanda Konvensi pada Deskripsi Gerakan Kapal (Fossen, 1994)

Pada penelitian ini, model matematika untuk sistem gerak kapal dilautan adalah dengan mempertimbangkan empat derajat kebebasan. Model ini berbentuk sistem tak linier dan merupakan salah satu model kapal komprehensif yang di berikan pada literatur bebas. Model ini menggambarkan karakter dasar dari sistem dinamik kapal dan memiliki keakuratan yang lebih memuaskan.

Pada penelitian ini, model matematika untuk sistem persamaan gerak kapal dibentuk dengan mempertimbangkan empat derajat kebebasan. Model matematika dalam penelitian ini didefinisikan sebagai berikut (Fossen, 1994):

$$(m' + m'_x)u' - (m' + m'_y)v'r' = X' \quad (2.1a)$$

$$(m' + m'_y)v' + (m' + m'_x)v'r' + m'_y a'_y r' - m'_y l'_y p' = Y' \quad (2.1b)$$

$$(I'_x + J'_x)p' - m'_x I'_x u'r' - W'GM'\phi = K' \quad (2.1c)$$

$$(I'_z + J'_z)r' - m'_y a'_y v' = N' - Y'x'_G \quad (2.1d)$$

dengan gaya dan momen hidrodinamika diberikan sebagai berikut:

$$X' = X'_{uu}u'^2 + (1 - tt')T'(J') + X'_{vr}v'r' + X'_{vv}v'^2 + X'_{rr}r'^2 + X'_{\phi\phi}\phi'^2 + C'_{RX}FN'\sin\delta' \quad (2.2a)$$

$$Y' = Y'_v v' + Y'_r r' + Y'_p p' + Y'_\phi \phi' + Y'_{vvv} v'^3 + Y'_{vvr} v'^2 r' + Y'_{vrr} v' r'^2 + Y'_{vv\phi} v'^2 \phi' + Y'_{v\phi\phi} v' \phi'^2 + Y'_{rr\phi} r'^2 \phi' + Y'_{r\phi\phi} r' \phi'^2 + (1 + a'_H)FN'\cos\delta' \quad (2.2b)$$

$$K' = K'_v v' + K'_r r' + K'_p p' + K'_\phi \phi' + K'_{vvv} v'^3 + K'_{vvr} v'^2 r' + K'_{vrr} v' r'^2 + K'_{vv\phi} v'^2 \phi' + K'_{v\phi\phi} v' \phi'^2 + K'_{rr\phi} r'^2 \phi' + K'_{r\phi\phi} r' \phi'^2 - (1 + a'_H)z'_R FN'\cos\delta' \quad (2.2c)$$

$$N' = N'_v v' + N'_r r' + N'_p p' + Y'_\phi \phi' + N'_{vvv} v'^3 + N'_{vvr} v'^2 r' + N'_{vrr} v' r'^2 + N'_{vv\phi} v'^2 \phi' + N'_{v\phi\phi} v' \phi'^2 + N'_{rr\phi} r'^2 \phi' + N'_{r\phi\phi} r' \phi'^2 + (x'_R + a'_H x'_H)FN'\cos\delta' \quad (2.2d)$$

dengan FN' adalah gaya sudut kemudi yang mempengaruhi gerak kapal pada masing-masing sumbu pusatnya. Didefinisikan sebagai berikut (Fossen, 1994):

$$FN' = - \left(\frac{6.13\Delta}{\Delta + 2.25} \frac{AR}{L^2} \right) (U_R^2 + V_R^2) \sin(\alpha'_R)$$

dengan

$$V'_R = \gamma'v' + c'_{Rr}r' + C'_{Rrrr}r'^3 + C'_{Rrrv}r'^2v'$$

$$U'_p = \cos v \left((1 - w'_p) + \tau' \left((v' + x'_p r')^2 + c'_{pv}v' + c'_{pr}r' \right) \right)$$

$$J' = \frac{U_p \sqrt{u'^2 + v'^2}}{nD}$$

$$KT' = 0.527 - 0.455J$$

$$U'_R = U'_p \epsilon \sqrt{1 + \frac{8k'KT'}{\pi J^2}}$$

$$\alpha'_R = \delta' + \arctan \left(\frac{V'_R}{U'_R} \right)$$

$$T' = \frac{2\rho D^4}{(u'^2 + v'^2)L^2\rho} KT'n'^2$$

Semua variabel dan koefisien komponen gaya dan momen hidrodinamika pada Persamaan (2.1) dan (2.2) adalah bentuk *non-dimensional* **Appendix E.1.3** (Fossen, 1994)

Pada model sistem dinamik kapal persamaan (2.1) berbasis pada daerah tanpa gangguan dan tidak ada interaksi antara kapal dengan gelombang laut ataupun faktor-faktor lingkungan lain.

2.2.1 Normalisasi Sistem Kendali Kapal

Proses normalisasi dilakukan untuk mendapatkan sistem persamaan baru sesuai dengan kebutuhan baik persamaan dalam bentuk tak berdimensi ataupun berdimensi. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, bahwa sistem persamaan yang digunakan dalam penelitian ini adalah bentuk tak berdimensi baik variabel ataupun koefisien yang digunakan. Sehingga dibutuhkan proses normalisasi untuk memperoleh sistem secara *real* (pada hasil simulasi). Sedangkan pada penelitian ini, normalisasi dilakukan dengan menerapkan *Prime system I* berdasarkan SNAME 1950 (Fossen, 1994), dengan ketentuan sebagai berikut:

Tabel 2.2: Normalisasi dengan menerapkan *Prime System I* (Fossen, 1994)

Unit	Normalisasi
Panjang	L
Massa	$\frac{\rho}{2}L^3$
Momen inersia	$\frac{\rho}{2}L^5$
Referensi are	L^2
Posisi	L
Sudut	1
Kecepatan linier	U
Kecepatan sudut	$\frac{U}{L}$
Percepatan linier	$\frac{U^2}{L}$
Percepatan sudut	$\frac{U^2}{L^2}$
Hambatan	$\frac{\rho}{2}U^2L^2$
Momen	$\frac{\rho}{2}U^2L^3$

Sedangkan sistem *non-dimensional* didapatkan dengan melakukan transformasi sederhana sebagai berikut:

$$v = Uv' ; r = \frac{U}{L}r' ; \delta = \delta'$$

dengan v' , r' , dan δ' bentuk tak berdimensi. Sehingga, didapatkan Sistem dinamik kapal linier sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \frac{L}{U^2} \dot{u}' \\ \frac{L}{U^2} \dot{v}' \\ \frac{L}{U^2} \dot{r}' \\ \frac{L}{U^2} \dot{p}' \\ \frac{L}{U} \dot{\phi}' \\ \frac{L}{U} \dot{\psi}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{U} u' \\ \frac{1}{U} v' \\ \frac{L}{U} r' \\ \frac{L}{U} p' \\ \phi' \\ \psi' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ b_{41} \\ b_{51} \\ b_{61} \end{bmatrix} [\delta] \quad (2.3)$$

Sehingga untuk mendapatkan persamaan perubahan keadaan dengan normalisasi dilakukan pada matriks pembobot variabel keadaan A dan matriks pembobot pada kendali input B, maka kedua ruas dikalikan dengan

$$\begin{bmatrix} \frac{U^2}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{U^2}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{U^2}{L^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{U^2}{L^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{U}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & U \end{bmatrix}$$

selanjutnya didapatkan,

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{p} \\ \dot{\phi} \\ \dot{z}e \\ \dot{\psi}e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} \frac{U}{L} & a_{12} \frac{U}{L} & a_{13} \cdot U & a_{14} U & a_{15} \frac{U^2}{L} & a_{16} \frac{U^2}{L} \\ a_{21} \frac{U}{L} & a_{22} \frac{U}{L} & a_{23} \cdot U & a_{24} \cdot U & a_{25} \frac{U^2}{L} & a_{26} \frac{U^2}{L} \\ a_{31} \frac{U}{L^2} & a_{32} \frac{U}{L^2} & a_{33} \frac{U}{L} & a_{34} \frac{U}{L} & a_{35} \frac{U^2}{L^2} & a_{36} \frac{U^2}{L^2} \\ a_{41} \frac{U}{L^2} & a_{42} \frac{U}{L^2} & a_{43} \frac{U}{L} & a_{44} \frac{U}{L} & a_{45} \frac{U^2}{L^2} & a_{46} \frac{U^2}{L^2} \\ a_{51} \frac{1}{L} & a_{52} \frac{1}{L} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \frac{U}{L} & a_{56} \frac{U}{L} \\ a_{61} \frac{1}{L} & a_{62} \frac{1}{L} & a_{63} & a_{64} & a_{65} \frac{U}{L} & a_{66} \frac{U}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \\ p \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b'_{11} \frac{U^2}{L} \\ b'_{21} \frac{U^2}{L} \\ b'_{31} \frac{U^2}{L^2} \\ b'_{41} \frac{U^2}{L^2} \\ b'_{51} \frac{U}{L} \\ b'_{61} \frac{U}{L} \end{bmatrix} [\delta] \quad (2.4)$$

Persamaan (2.4) digunakan sebagai normalisasi keadaan *non-dimensional* untuk mendapatkan keadaan sesungguhnya.

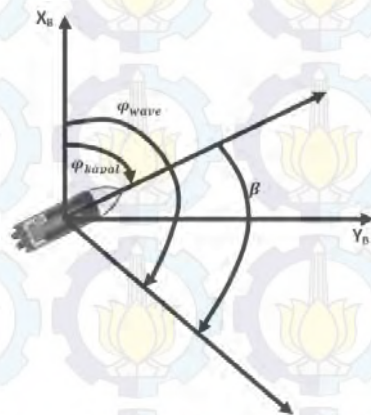
2.3 Gangguan Lingkungan pada Kapal

Sekitar sistem merupakan faktor terkuat yang mempengaruhi kestabilan sistem tersebut (Subiono, 2013). Ketika bermanuver, sebuah kapal akan berinteraksi dengan lingkungan. Dalam pergerakan sebuah kapal gangguan lingkungan merupakan faktor yang harus diperhitungkan khususnya pada kapal tanpa awak. Tipe dari gangguan lingkungan di laut antara lain: gelombang, angin, dan arus laut (Fossen, 1994). Pada penelitian ini, gangguan yang diberikan berasal dari gelombang laut. Gangguan ini, merupakan akibat dari pergerakan angin sehingga menimbulkan gelombang pada permukaan laut.

Sistem koordinat yang digunakan dalam perhitungan hambatan gelombang laut dapat dilihat pada Gambar 2.2 dengan sudut haluan kapal, didefinisikan sebagai berikut:

$$\beta = \psi_{wave} - \psi_{kapal}$$

dengan ψ_{wave} dan ψ_{kapal} adalah gelombang pada haluan dan sudut haluan kapal terhadap sumbu bumi.



Gambar 2.2: Definisi Sudut (Li dkk, 2010)

Gaya dan momen hidrodinamika dengan gangguan berupa gelombang laut dituliskan sebagai berikut:

$$X' = X' + X'_{wave} \quad (2.5a)$$

$$Y' = Y' + Y'_{wave} \quad (2.5b)$$

$$K' = K' + K'_{wave} \quad (2.5c)$$

$$N' = N' + N'_{wave} \quad (2.5d)$$

dengan X', Y', K', N' adalah turunan komponen gaya dan momen hidrodinamika kapal. $X_{wave}, Y_{wave}, K_{wave}, N_{wave}$ merupakan model gelombang yang mempengaruhi pergerakan kapal di lautan masing-masing bidang. Definisi gelombang laut yang digunakan dalam penelitian ini adalah gelombang laut regular sinusoidal untuk

tiap-tiap bidang, sebagai berikut:

$$X_{wave} = \rho g B L d_x \cos \beta A k \sin(\omega t) \quad (2.6)$$

$$Y_{wave} = -\rho g B L d_y \sin \beta A k \sin(\omega t) \quad (2.7)$$

$$N_{wave} = \frac{1}{24} \rho g B L (L^2 - B^2) \sin 2\beta A k \sin(\omega t) \quad (2.8)$$

dengan β adalah sudut datang gelombang dengan haluan kapal. A adalah amplitudo gelombang sedangkan k adalah faktor pengali *RAO* (*Response Amplitude Operation*). Dalam penelitian ini, tidak dibahas secara detail mengenai pemilihan *RAO* yang digunakan. Besar perkalian antara amplitudo dan pengali *RAO* adalah 0.001 dari penelitian sebelumnya (Li, 2012).

Diasumsikan bahwa untuk gaya luar searah sumbu- x untuk gerak rotasi tidak dipengaruhi oleh gelombang laut, sehingga $K_{wave} = 0$. Pada Persamaan (2.3) model gelombang masih berdimensi maka harus dikalikan dengan faktor normalisasi (Tabel 2.2)

$$X'_{wave} = \frac{2gBd_x}{U^2L^2} \cos \beta A k \sin(\omega t) \quad (2.9)$$

$$Y'_{wave} = -\frac{2gBd_y}{U^2L^2} \sin \beta A k \sin(\omega t) \quad (2.10)$$

$$N'_{wave} = \frac{gB(L^2 - B^2)}{2} \sin 2\beta A k \sin(\omega t) \quad (2.11)$$

Persamaan (2.3) adalah persamaan gelombang yang akan digunakan untuk mendapatkan gangguan dari masing-masing perubahan variabel keadaan.

2.4 Model Predictive Control (MPC)

MPC dikenal pada akhir abad XVII dan masih digunakan sampai sekarang. MPC merupakan strategi mendesain suatu metode pengendalian untuk mendapatkan sinyal kendali dengan cara meminimumkan suatu fungsi objektif (Camacho, 1999)

2.4.1 Ide Model Predictive Control

Adapun ide yang menjadi dasar dari MPC adalah sebagai berikut (Camacho, 1999)

1. Untuk memprediksi *output* proses yang akan datang dalam rentang waktu tertentu (*prediction horizon*) digunakan model secara *eksplisit*.
2. Perhitungan rangkaian sinyal kendali dengan cara meminimasi suatu fungsi objektif.
3. Pada setiap waktu pengambilan data (saat ke- k), horizon dialihkan menuju waktu pengambilan data berikutnya (saat ke- $(k + 1)$) dengan mengikutsertakan penggunaan sinyal kendali pertama (yaitu $u(k)$) untuk pengendalian proses. Kedua prosedur di atas diulang dengan menggunakan informasi terakhir.

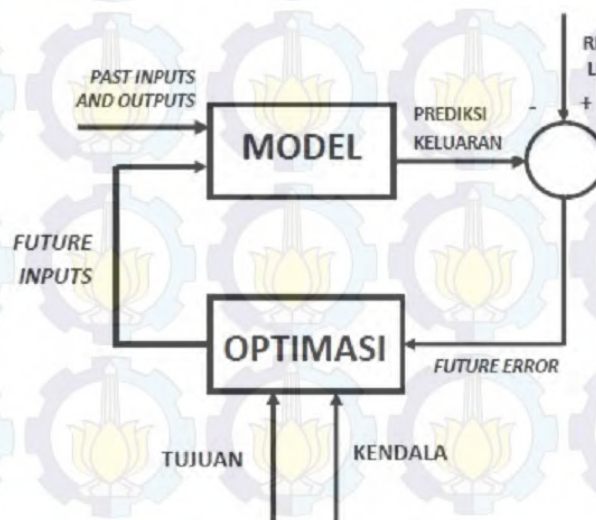
Keluaran proses dan pengendalian terprediksi pada MPC menggunakan konsep *prediction horizon*, hal ini yang membedakan MPC dengan desain prediksi yang lainnya. *Prediction horizon* dalam MPC, digunakan sebagai alat untuk mendapatkan prediksi nilai pengendali pada saat k sampai $k + N$ sehingga dapat menghasilkan nilai yang semakin baik sesuai dengan target yang telah ditetapkan. Penjelasan tersebut dapat diilustrasikan pada

2.4.2 Metodologi MPC

MPC merupakan metode kendali optimal yang berbasis pada *close loop* yakni, output yang didapatkan digunakan lagi sebagai input baru. Proses *feedback control* dapat diuraikan sebagai berikut:

Data *input* dan *output* pada saat $(k - 1)$ masuk ke dalam model *plant* sebagai masukan awal, yang sudah didefinisikan sebelumnya. Kemudian didapatkan prediksi untuk keadaan ke- k . Hasil dari prediksi (*predicted output*) akan dibandingkan dengan referensi lintasan. Perbandingan ini akan menghasilkan kesalahan yang disebut *future error*. *Future error* masuk ke dalam proses optimasi. Optimizer bekerja di dalam rentang kendala yang telah diberikan dengan tujuan meminimumkan tujuan. Tujuan disini merupakan fungsi objektif yang dibentuk dari fungsi kuadrat kesalahan antara sinyal prediksi keluaran dan lintasan referensi. Disini MPC mengambil peran untuk meminimumkan *future error* dengan mempertimbangkan kendala, sehingga menghasilkan input yang baru (*future input*), kemudian hasil yang didapat dikembalikan lagi bersama *input* dan *output* lampau untuk diprediksi kembali. Perhitungan ini berlangsung terus menerus dan berulang. Karena adanya prediksi input berdasarkan output terprediksi, sehingga MPC mampu bekerja menghasilkan respon yang semakin mendekati referensi yang diinginkan.

Metodologi yang telah dijelaskan diatas dapat diilustrasikan oleh Gambar (2.3).



Gambar 2.3: Struktur Pengendali Optimal (Camacho, 1999)

2.5 Formulasi MPC

Dalam formulasi MPC terdapat beberapa asumsi yang dibuat yaitu model bersifat linear, fungsi objektif merupakan fungsi kuadratik, dan kendala berbentuk pertidaksamaan linear.

2.5.1 Model Predictive Control Linear

Persamaan MPC untuk sistem linear diskrit memiliki bentuk umum sebagai berikut (Wang, 2008)

$$\mathbf{x}(k+1|k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k|k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k|k) \quad (2.12)$$

dengan

$\mathbf{x}(k)$: variabel *state* berdimensi- n pada saat ke- k

$\mathbf{u}(k)$: variabel kendali *input* berdimensi- r pada saat ke- k

\mathbf{A} : matriks *state space* berdimensi $n \times n$ pada saat ke- k

\mathbf{B} : matriks *input* berdimensi $n \times r$ pada saat ke- k

$\mathbf{x}(k+1|k)$: variabel *state* pada saat ke $(k+1)$ yang dipengaruhi oleh nilai *state* saat ke- k

Persamaan *state space* (2.12) merupakan kondisi yang ideal, karena sistem tersebut tidak terdapat gangguan (*disturbance*). Sedangkan untuk kondisi dengan gangguan didefinisikan sebagai berikut:

$$\mathbf{x}(k+1|k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k|k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k|k) + \mathbf{w}(k) \quad (2.13)$$

dengan $\mathbf{w}(k)$ adalah gangguan pada sistem.

Dalam perhitungan prediksi *output* dengan MPC, sinyal yang digunakan sebagai *input* adalah $\mathbf{u}(k)$. Sebelum melangkah lebih jauh, hal pertama yang dilakukan adalah memprediksi nilai variabel keadaan dengan melakukan iterasi Persamaan (2.12). Perhitungan prediksi variabel *state* adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(k+1|k) &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k|k) + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}(k|k) \\ \hat{\mathbf{x}}(k+2|k) &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}(k+1|k) \\ &= \mathbf{A}^2\hat{\mathbf{x}}(k|k) + \mathbf{A}\mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}(k|k) + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}(k+1|k) \\ &\vdots \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(k+N|k) &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k+N-1|k) + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}(k+N-1|k) \\ &= \mathbf{A}^N\hat{\mathbf{x}}(k|k) + \mathbf{A}^{N-1}\mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}(k|k) + \dots + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}(k+N-1|k) \end{aligned} \quad (2.15)$$

untuk selanjutnya, penulisan $\hat{\mathbf{x}}(k|k)$ dapat ditulis $\hat{\mathbf{x}}(k)$.

2.5.2 Pembentukan Kendala

Pada dasarnya sinyal dengan *range* yang tidak terbatas sangat tidak realistis, karena dalam kondisi nyata semua proses memiliki batasan (kendala). Pada tesis

ini, terdapat dua macam kendala yaitu kendala/batasan pada keadaan dan kendala pada pengendali sistem yang didefinisikan (Wang, 2008)

$$-\mathbf{f}_1 \leq \mathbf{F}_1 \hat{\mathbf{x}}(k) \leq \mathbf{f}_1 \quad (2.16)$$

$$-\mathbf{f}_2 \leq \mathbf{f}_2 \hat{\mathbf{u}}(k) \leq \mathbf{f}_2 \quad (2.17)$$

dengan

\mathbf{F}_1 merupakan matriks pertidaksamaan kendala untuk keadaan

\mathbf{f}_1 merupakan RHS pertidaksamaan kendala untuk keadaan

\mathbf{F}_2 merupakan matriks pertidaksamaan kendala untuk kendali

\mathbf{f}_2 RHS pertidaksamaan kendala untuk kendali

Pertidaksamaan (2.16) merupakan kendala pada keadaan berupa kecepatan *yaw* sedangkan Pertidaksamaan (2.17) merupakan kendala pada pengendali sistem berupa sudut kemudi. Pertidaksamaan (2.16)-(2.17) digunakan dalam perhitungan nilai optimal perubahan sinyal kendali pada MPC.

2.5.3 Fungsi Objektif

Penyelesaian metode pengendali optimal yang digunakan pada MPC linear adalah *quadratic programming*. Dalam MPC didefinisikan fungsi objektif sebagai berikut (Li, 2012)

$$\mathbf{J}(k) = \sum_{i=1}^n [\hat{\mathbf{x}}(k+i)^T \mathbf{Q} \hat{\mathbf{x}}(k+i) + \hat{\mathbf{u}}(k+i-1)^T \mathbf{R} \hat{\mathbf{u}}(k+i-1)] \quad (2.18)$$

Untuk membentuk fungsi objektif yang standar, didefinisikan vektor $\hat{\mathbf{x}}(k+1)$ dan $\hat{\mathbf{u}}(k)$

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}(k+1) \\ \hat{\mathbf{x}}(k+2) \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}(k+n) \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad \hat{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{u}}(k) \\ \hat{\mathbf{u}}(k+1) \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{u}}(k+n-1) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Sehingga dengan mensubstitusikan Persamaan (2.19) ke dalam Persamaan (2.18), didapatkan kembali persamaan baru fungsi objektif sebagai berikut:

$$\mathbf{J}(k) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{u}}(k) \\ \hat{\mathbf{x}}(k+1) \\ \hat{\mathbf{u}}(k+1) \\ \hat{\mathbf{x}}(k+2) \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{u}}(k+n-1) \\ \hat{\mathbf{x}}(k+n) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{R} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Q} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{R} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{Q} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{R} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{u}}(k) \\ \hat{\mathbf{x}}(k+1) \\ \hat{\mathbf{u}}(k+1) \\ \hat{\mathbf{x}}(k+2) \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{u}}(k+n-1) \\ \hat{\mathbf{x}}(k+n) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

dengan \mathbf{Q} berukuran $n \times n$, n adalah jumlah variabel keadaan dalam sistem. Sedangkan \mathbf{R} berukuran $m \times 1$, m adalah jumlah kendali input dalam sistem. Dalam penelitian ini, terdapat enam variabel keadaan yaitu kecepatan *surge* (u'), kecepatan *sway* (v'), kecepatan sudut *yaw* (r'), kecepatan sudut *roll* (p'), sudut *roll* (ϕ'), dan sudut *yaw* (ψ'). Keenam variabel keadaan ini dikendalikan oleh satu kendali yaitu sudut kemudi (δ').

2.5.4 Optimasi pada MPC

Dengan menggunakan Persamaan (2.16)-(2.20), nilai kendali pada saat ke- k dapat dicari dengan menyelesaikan optimasi berikut (Wang, 2008) meminimumkan

$$\mathbf{J} = \hat{\mathbf{x}}(k+1)^T \mathbf{Q} \hat{\mathbf{x}}(k+1) + \hat{\mathbf{u}}(k)^T \mathbf{R} \hat{\mathbf{u}}(k) \quad (2.21)$$

dengan kendala

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{F}_1 \hat{\mathbf{x}}(k+1) &\leq \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{f}_2 \hat{\mathbf{u}}(k) &\leq \mathbf{f}_2 \\ \hat{\mathbf{x}}(k+1) &= \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B} \hat{\mathbf{u}}(k) \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

Jika hasil dari optimasi diatas *feasible*, maka hasil penyelesaian (2.21) dan (2.22) menghasilkan *state* optimal

$$\hat{\mathbf{x}}^*(k+1), \hat{\mathbf{x}}^*(k+2), \dots, \hat{\mathbf{x}}^*(k+n)$$

dan kendali optimal adalah

$$\hat{\mathbf{u}}^*(k), \hat{\mathbf{u}}^*(k+1), \dots, \hat{\mathbf{u}}^*(k+n-1)$$

Dengan menerapkan prinsip *receding horizon* pada MPC, nilai kendali optimal yang diberikan pada sistem merupakan vektor awal dari penyelesaian optimalnya. Nilai pengendali yang digunakan sebagai masukan Persamaan (2.12) adalah

$$\hat{\mathbf{u}}(k) = \hat{\mathbf{u}}^*(k) \quad (2.23)$$

dengan $\hat{\mathbf{u}}^*(k)$ adalah nilai pengendali optimal pada saat ke- k .

Pada Tesis ini, digunakan *quadprog* yang terdapat dalam *software* MATLAB untuk menyelesaikan optimasi, sehingga (2.21) dan (2.22) secara matematis dapat ditulis kembali dalam bentuk *quadratic programming* (Wang, 2008) meminimumkan fungsi objektif

$$\mathbf{J} = \mathbf{z}^T \mathbf{H} \mathbf{z} + \mathbf{g}^T \mathbf{z} \quad (2.24)$$

dengan kendala

$$\mathbf{P} \mathbf{z} \leq \mathbf{h} \quad (2.25)$$

$$\mathbf{Y} \mathbf{z} = \mathbf{b} \quad (2.26)$$

dengan

$$\mathbf{z} = [\hat{\mathbf{u}}(k), \hat{\mathbf{x}}(k+1), \hat{\mathbf{u}}(k+1), \hat{\mathbf{x}}(k+2), \dots, \hat{\mathbf{u}}(k+n-1), \hat{\mathbf{x}}(k+n)]$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Q} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{R} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{R} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{Q} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{F}_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{F}_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{F}_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{F}_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{h} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_2 \\ \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{f}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{f}_2 \\ \mathbf{f}_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} -\mathbf{B} & \mathbf{I} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -\mathbf{A} & -\mathbf{B} & \mathbf{I} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\mathbf{A} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mathbf{B} & \mathbf{I} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mathbf{A} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Setelah mendefinisikan matriks \mathbf{H} sebagai matriks pembobot (matriks simetri), vektor \mathbf{g} , matriks \mathbf{P} sebagai matriks pertidaksamaan kendala, vektor \mathbf{h} sebagai *Right Hand Side* (RHS) dari pertidaksamaan kendala, matriks \mathbf{Y} sebagai matriks persamaan kendala dan vektor \mathbf{b} sebagai RHS dari persamaan kendala, dengan menggunakan *quadprog* yang ada dalam MATLAB maka didapatkan nilai kendali optimal ($\hat{\mathbf{u}}^*(k)$). Nilai optimal yang didapat kemudian disubstitusikan ke dalam Persamaan (2.14) sebagai *input* dalam MPC.

2.6 Optimasi Kompensasi Gangguan

Kompensasi gangguan (Δu) merupakan suatu faktor yang digunakan dalam meminimalisir gangguan yang diterima oleh sistem pada metode MPC. Tahapan yang dilakukan dalam optimasi kompensasi gangguan ini adalah sebagai berikut:

$$\min \|\mathbf{F}_1 \mathbf{B} \Delta u + \mathbf{F}_1 \hat{\mathbf{w}}(k-1)\| \quad (2.27)$$

Kendala

$$\mathbf{F}_1 \mathbf{B} \Delta u \leq -\mathbf{F}_1 \hat{\mathbf{w}}(k-1) - E \quad (2.28)$$

$$\mathbf{F}_2 \Delta u \leq \mathbf{f}_2 \quad (2.29)$$

dengan

$$\hat{\mathbf{w}}(k-1) = \mathbf{x}(k) - \mathbf{A}\mathbf{x}(k-1) - \mathbf{B}\mathbf{u}(k-1) \quad (2.30)$$

$$E = \max(\mathbf{F}_1\epsilon) \quad (2.31)$$

$$\epsilon = \mathbf{w}(k) - \hat{\mathbf{w}}(k-1) \quad (2.32)$$

dengan $\hat{\mathbf{w}}(k-1)$ adalah estimasi gangguan untuk waktu ke- $(k-1)$ didapatkan untuk nilai pada saat $\mathbf{x}(k)$, $\mathbf{x}(k-1)$, $\mathbf{u}(k-1)$ memiliki nilai. dengan ϵ adalah *error* antara estimasi gangguan ke- $(k-1)$ dan gangguan *real* ke- k . Keluaran dari optimasi ini adalah kompensasi gangguan optimal (Δu^*). Selanjutnya nilai ini menjadi kendala tambahan pada optimasi MPC (Persamaan (2.22)) menjadi:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_1\mathbf{x}(k+1) &\leq \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{F}_2\mathbf{u}(k) &\leq \mathbf{f}_2 - \mathbf{F}_2\Delta u^* \\ \mathbf{F}_2\mathbf{u}(k+1) &\leq \mathbf{f}_2 \\ \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \end{aligned} \quad (2.33)$$

Sehingga, didapatkan kendali optimal dengan mempertimbangkan gangguan luar berupa gelombang laut sebagai berikut:

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}^*(k) + \Delta u^* \quad (2.34)$$

dengan $\mathbf{u}^*(k)$ adalah nilai pengendali optimal pada saat ke- k . Jika masalah optimasi $P_\Delta(\hat{\mathbf{w}}(k-1))$ dan $\wp_\Delta(x(k), \Delta u^*)$ memiliki penyelesaian, maka kendala-kendala yang diberikan terpenuhi. Hal ini dibuktikan dengan adanya penyelesaian pada Persamaan (2.27) dan (2.21) ada, maka solusi optimal memenuhi kendala dibawah ini:

$$\mathbf{F}_1\mathbf{B}\Delta u \leq -\mathbf{F}_1\hat{\mathbf{w}}(k-1) - E \quad (2.35)$$

$$\mathbf{F}_1\mathbf{x}^*(k+1|k) \leq \mathbf{f}_1 \quad (2.36)$$

$$\mathbf{F}_2\mathbf{u}^*(k|k) \leq \mathbf{f}_2 - \mathbf{F}_2\Delta u^* \quad (2.37)$$

Dari Persamaan (2.37) dapat dibentuk $\mathbf{F}_2(\mathbf{u}^*(k|k) + \Delta u^*) \leq \mathbf{f}_2$ sehingga kendala $\mathbf{F}_2\mathbf{u}(k) \leq \mathbf{f}_2$ (Persamaan (2.22)) terpenuhi.

Kemudian, dengan menerapkan kendali optimal yang didapat pada Persamaan (2.34), sehingga keadaan untuk $x(k+1)$ diberikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + w(k) \\ &= Ax(k) + B(\mathbf{u}^*(k|k) + \Delta u^*) + w(k) \\ &= x^*(k+1|k) + B\Delta u^* + \hat{\mathbf{w}}(k-1) + \epsilon \end{aligned} \quad (2.38)$$

Pertidaksamaan (2.31) dan (2.36) terpenuhi untuk kondisi optimal, maka dengan menambahkan masing-masing ruas dari (2.31) dan (2.36), didapatkan bentuk:

$$\mathbf{F}_1\mathbf{B}\Delta u^* + \mathbf{F}_1\mathbf{x}^*(k+1|k) \leq -\mathbf{F}_1\hat{\mathbf{w}}(k-1) - E + \mathbf{f}_1 \quad (2.39)$$

Selanjutnya, dengan menambahkan kedua ruas dengan $\mathbf{F}_1\hat{\mathbf{w}}(k-1)$ dan E maka didapatkan bentuk baru dari Pertidaksamaan (2.39)

$$\mathbf{F}_1\mathbf{B}\Delta u^* + \mathbf{F}_1\mathbf{x}^*(k+1|k) + \mathbf{F}_1\hat{\mathbf{w}}(k-1) + E \leq \mathbf{f}_1 \quad (2.40)$$

telah didefinisikan sebelumnya pada Persamaan (2.31) dan $C\epsilon \leq E$, maka didapatkan:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_1 \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{F}_1 \mathbf{x}^*(k+1|k) + \mathbf{F}_1 B \Delta u^* + \mathbf{F}_1 \hat{w}(k-1) + \mathbf{F}_1 \epsilon \\ &\leq \mathbf{F}_1 \mathbf{x}^*(k+1|k) + \mathbf{F}_1 B \Delta u^* + \mathbf{F}_1 \hat{w}(k-1) + E \\ &\leq \mathbf{f}_1 \end{aligned} \quad (2.41)$$

Sehingga kendala untuk $\mathbf{F}_1 \mathbf{x}(k+1) \leq \mathbf{f}_1$ juga terpenuhi. Dengan demikian terbukti bahwa kedua optimasi (DC dan MPC) memiliki penyelesaian.

2.7 Pelinieran

Pelinieran adalah proses hampiran persamaan diferensial tak linier dengan bentuk linier. Keuntungan dari sistem persamaan linier adalah secara analitik menarik sehingga banyak sistem berbentuk linier atau didekati secara linier (Subiono, 2013). Pada penelitian ini, sistem dinamik kapal berbentuk tak linier sehingga perlu dilinierkan terlebih dahulu sebelum dianalisis lebih lanjut dengan melakukan proses pelinieran.

Secara umum, bentuk persamaan linier dari suatu sistem adalah sebagai berikut:

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

$$y = Cx + Du$$

dengan x adalah variabel keadaan, \dot{x} menunjukkan perubahan keadaan dan u adalah kontrol input dari sistem. Sedangkan y adalah keluaran (output) sistem dan A , B , C , dan D adalah koefisien pembobot.

Pelinieran dilakukan dengan ekspansi deret *Taylor* disekitar titik kesetimbangan. Didefinisikan suatu sistem persamaan diferensial tak linier sebagai berikut:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y) \quad (2.42)$$

$$\frac{dy}{dt} = g(x, y) \quad (2.43)$$

dengan f dan g adalah fungsi-fungsi tak linier. Jika (x_0, y_0) adalah titik setimbang dari persamaan (2.42) dan (2.43), maka:

$$f(x_0, y_0) = 0$$

$$g(x_0, y_0) = 0$$

Selanjutnya, dicari pendekatan sistem linier jika (x, y) di sekitar (x_0, y_0) . Dengan melakukan ekspansi deret *Taylor* di sekitar titik (x_0, y_0) maka persamaan menjadi:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= f(x_0, y_0) + \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{(x_0, y_0)} (x - x_0) + \frac{\partial f}{\partial y} \Big|_{(x_0, y_0)} (y - y_0) \\ &+ \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} (x - x_0)^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} (x - x_0)(y - y_0) + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} (y - y_0)^2 \right) + \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= g(x_0, y_0) + \frac{\partial g}{\partial x}|_{(x_0, y_0)}(x - x_0) + \frac{\partial g}{\partial y}|_{(x_0, y_0)}(y - y_0) \\ &+ \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x - x_0)^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(x - x_0)(y - y_0) + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(y - y_0)^2 \right) + \dots \end{aligned}$$

misalkan: $x - x_0 = u$ dan $y - y_0 = v$ dengan u dan v adalah *error* yang cukup kecil, maka perkalian antara keduanya akan menghasilkan sesuatu yang sangat kecil (mendekati nol). Sehingga suku-suku dengan derajat lebih besar dari dua dapat diabaikan.

dengan demikian persamaan diatas menjadi:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{\partial f}{\partial x}|_{x_0, y_0} u + \frac{\partial f}{\partial y}|_{x_0, y_0} v \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{\partial g}{\partial x}|_{x_0, y_0} u + \frac{\partial g}{\partial y}|_{x_0, y_0} v \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

Persamaan (2.44) dapat ditulis kembali dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \frac{du}{dt} \\ \frac{dv}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial g}{\partial x} & \frac{\partial g}{\partial y} \end{bmatrix} \Big|_{(x_0, y_0)} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Persamaan (2.45) adalah bentuk umum persamaan linier tanpa kontrol input.

BAB III

METODE PENELITIAN

Dalam bab ini dijelaskan beberapa tahapan yang dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan yang diangkat pada penelitian. Adapun tahapan penelitian penerapan metode DC-MPC untuk kendali kapal dengan gangguan berupa gelombang laut adalah sebagai berikut:

1. Studi Pendahuluan

Pada tahap ini, dilakukan studi literatur mengenai sistem gerak kapal, dan gangguan lingkungan baik melalui buku-buku, jurnal, laporan tugas akhir/ thesis terdahulu ataupun artikel dari internet yang dapat menunjang penelitian. Model yang didapatkan adalah sistem gerak dengan empat derajat kebebasan, yakni *surge*, *sway*, *yaw*, dan *roll*. Didapatkan juga gangguan terbesar dalam gerak kapal di lautan yaitu gelombang laut, sehingga dipilih sebagai gangguan yang mempengaruhi sistem gerak kapal. Kajian tentang metode kendali optimal, khususnya MPC.

2. Membentuk Model Kendali pada DC-MPC

Pada tahap ini, dilakukan pendefinisian model matematika untuk sistem gerak kapal tak linier dengan empat derajat kebebasan. Kemudian dilakukan pelinieran terhadap sistem dinamik dan pendiskritan untuk mendapatkan Model waktu diskrit. Terdapat sub tahapan dalam optimasi dengan metode DC-MPC, antara lain:

- a Optimasi kendali kompensasi pada gangguan. Pada proses ini, terlebih dahulu dilakukan tahapan estimasi gangguan waktu ke- $k - 1$. Selanjutnya diminimumkan fungsi tujuan yang dibentuk dengan meminimumkan gangguan estimasi. Optimasi ini dilakukan untuk memperoleh kompensasi kendali yang nantinya mempengaruhi kendali ke- k pada proses MPC.
- b Optimasi yang kedua (MPC) dilakukan pada sistem persamaan gerak kapal. Pada tahapan ini, pertama kali yang perlu dilakukan adalah inialisasi nilai awal dan membentuk batasan-batasan dari variabel keadaan dan kendali yang ada. Optimasi dilakukan dengan memasukkan kendali optimal untuk kompensasi gangguan dari tahapan sebelumnya. Optimasi dilakukan dengan meminimumkan kuadrat *error* untuk mendapatkan kendali optimal waktu ke- k . Selanjutnya kendali input digunakan untuk mendapatkan kondisi saat ke- $k + 1$ dari sini akan didapatkan *error* dengan membandingkan hasil prediksi dengan nilai referensi. Sehingga kembali dilakukan optimasi untuk mendapatkan kendali optimal saat ke- $k + 1$.



3. Simulasi numerik dan analisis penerapan metode DC-MPC

Pada tahap ini, setelah didapatkan model kendali sistem maka dilakukan simulasi akhir dengan menggunakan *software Matlab 2012* untuk mendapatkan grafik pergerakan kendali dan keluaran masing-masing variabel. Selanjutnya dilakukan analisis terhadap hasil simulasi yang diperoleh.

4. Penarikan kesimpulan dan saran

Pada tahap ini dilakukan penarikan kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya selanjutnya diberikan saran perbaikan yang dapat dilakukan pada penelitian yang dilakukan sehingga dapat diperbaiki pada penelitian selanjutnya.

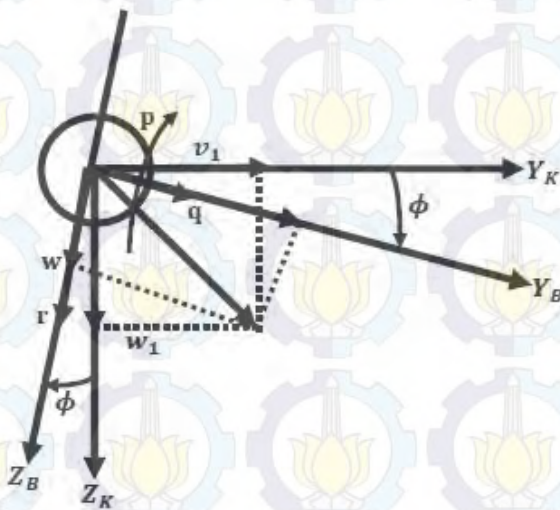
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada Bab ini, dilakukan analisis model umum dinamik kapal sehingga didapatkan sistem persamaan differensial gerak kapal model yang didapatkan berupa sistem tak linier, sehingga dilakukan pelinieran untuk mendapatkan matriks ruang keadaan. Selanjutnya dilakukan pendiskritan terlebih dahulu sebelum diterapkan pada metode DC-MPC. Pada bagian ini, juga dilakukan analisis hasil penerapan dan pengaruh jumlah *horizon prediction* terhadap kestabilan sistem.

4.1 Model Matematika Manuver Kapal

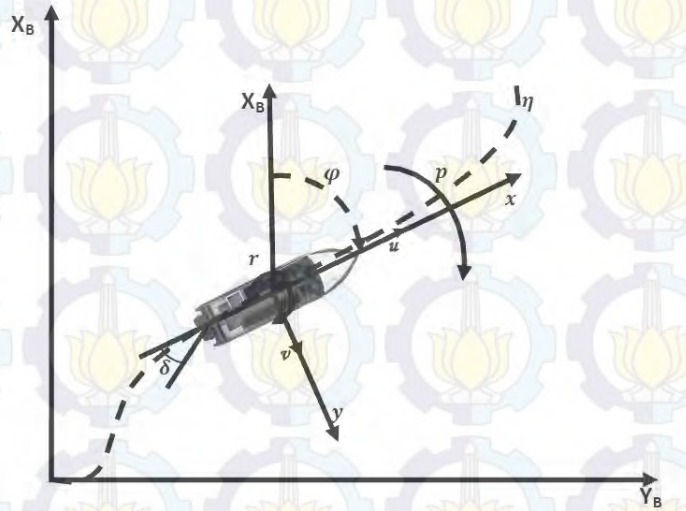
Penelitian ini, berfokus pada pengendalian pergerakan kapal di permukaan laut dengan mempertimbangkan empat derajat kebebasan seperti yang dijelaskan pada sub bab 2.1, yaitu: *surge*, *sway*, *yaw*, *roll*. Rotasi *roll* diperhitungkan karena pada saat kapal bermanuver dengan kecepatan tinggi, maka kondisi (*roll*) tidak dapat diabaikan lagi (Li, 2012).

Pengaruh *roll* pada manuver dapat disajikan pada Gambar 4.1 berikut ini :



Gambar 4.1: Rotasi dari *Roll* (Fossen, 1994)

Pada Gambar 4.1 menunjukkan bahwa sudut *roll* berpengaruh pada pergerakan *swaying* dan *heaving* sedangkan untuk translasi *surgings* tidak mengalami perubahan. Sehingga dari sini dapat dibentuk perubahan posisi kapal pada koordinat $-x$ dan $-y$ sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.2 berikut ini:



Gambar 4.2: Definisi Sistem Dinamik Kapal (Ghaemi, 2006)

Berdasarkan pada Gambar 4.2, maka dapat didefinisikan kecepatan kapal pada posisi vertikal, horisontal, berubah sudut *roll* serta perubahan sudut *yaw* sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}' &= (u' \cos \psi' - v' \sin \psi' \cos \phi') \\ \dot{y}' &= (u' \sin \psi' - v' \cos \psi' \cos \phi') \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Sedangkan untuk kecepatan sudut *roll* dan *yaw* didapatkan sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi}' &= r' \cos \phi' \\ \dot{\phi}' &= p' \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

Pada penelitian ini, sistem yang dibahas pada manuver kapal dilautan dengan tidak mengendalikan kecepatan terhadap bidang horisontal dan vertikal sehingga persamaan (4.1) dapat diabaikan.

Pada Bab 2 telah dipaparkan mengenai model matematika manuver kapal dengan empat derajat kebebasan, adalah sebagai berikut:

$$(m' + m'_x)\dot{u}' - (m' + m'_y)v'r' = X' \quad (4.3a)$$

$$(m' + m'_y)\dot{v}' + (m' + m'_x)u'r' + m'_y\alpha'_y r' - m'_y l'_y \dot{p}' = Y' \quad (4.3b)$$

$$(I'_x + J'_x)\dot{p}' - m'_y l'_y \dot{v}' - m'_x I'_x u'r' - W'GM'\phi' = K' \quad (4.3c)$$

$$(I'_z + J'_z)\dot{r}' - m'_y \alpha'_y \dot{v}' = N' - Y'x'_G \quad (4.3d)$$

didefinisikan ulang perkalian antar koefisien pada persamaan (4.3):

$$\left. \begin{aligned} a &= m' + m'_x; & b &= m' + m'_y; & c &= m'_y \alpha'_y; \\ d &= m'_y l'_y; & e &= I'_x + J'_x; & f &= m'_x I'_x; \\ g &= I'_z + J'_z \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

dengan komponen gaya dan momen hidrodinamika diberikan sebagai berikut:

$$X' = X'_{uu}u'^2 + (1 - tt)'T'(J) + X'_{vr}v'r' + X'_{vv}v'^2 + X'_{rr}r'^2 + X'_{\phi\phi}\phi'^2 + C'_{RX}F_N \sin \delta' \quad (4.5a)$$

$$Y' = Y'_v v' + Y'_r r' + Y'_p p' + Y'_\phi \phi' + Y'_{vvv}v'^3 + Y'_{vvr}v'^2 r' + Y'_{vrr}v' r'^2 + Y'_{vv\phi}v'^2 \phi' + Y'_{v\phi\phi}v' \phi'^2 + Y'_{rr\phi}r'^2 \phi' + Y'_{r\phi\phi}r' \phi'^2 + (1 + a'_H)F_N \cos \delta' \quad (4.5b)$$

$$K' = K'_v v' + K'_r r' + K'_p p' + K'_\phi \phi' + K'_{vvv}v'^3 + K'_{vvr}v'^2 r' + K'_{vrr}v' r'^2 + K'_{vv\phi}v'^2 \phi' + K'_{v\phi\phi}v' \phi'^2 + K'_{rr\phi}r'^2 \phi' + K'_{r\phi\phi}r' \phi'^2 - (1 + a'_H) z'_R F_N \cos \delta' \quad (4.5c)$$

$$N' = N'_v v' + N'_r r' + N'_p p' + Y'_\phi \phi' + N'_{vvv}v'^3 + N'_{vvr}v'^2 r' + N'_{vrr}v' r'^2 + N'_{vv\phi}v'^2 \phi' + N'_{v\phi\phi}v' \phi'^2 + N'_{rr\phi}r'^2 \phi' + N'_{r\phi\phi}r' \phi'^2 + (x'_R + a'_H x'_H) F_N \cos \delta' \quad (4.5d)$$

Persamaan-persamaan (4.5) dan (4.3) adalah persamaan tak linier yang cukup rumit untuk diselesaikan sehingga untuk memudahkan proses analisis terhadap perilaku manuver kapal maka dilakukan pelinieran terhadap persamaan-persamaan tersebut.

Sebelum melakukan proses pelinieran, terlebih dahulu dibentuk persamaan laju perubahan keadaan. Dari persamaan (4.3a) dapat diperoleh perubahan keadaan terhadap kecepatan *surge* (\dot{u})

$$\dot{u}' = \frac{1}{a} (X'_{uu}u'^2 + T + X'_{vr}v'r' + X'_{vv}v'^2 + X'_{rr}r'^2 + X'_{\phi\phi}\phi'^2 + C'_{RX}F_N \sin \delta' + bv'r') \quad (4.6)$$

Sedangkan dari persamaan (4.3b)-(4.3d) masing-masing akan didapatkan tiga persamaan baru dengan memisahkan tiap-tiap keadaan yang ada:

$$\dot{v}' = \frac{1}{b} (Y' + dp' - cr' - au'r') \quad (4.7a)$$

$$\dot{p}' = \frac{K' - W'GM'\phi' + dv' + fu'r'}{e} \quad (4.7b)$$

$$\dot{r}' = \frac{N' - x'_G Y' - cv'}{g} \quad (4.7c)$$

Selanjutnya disubstitusikan persamaan (4.7b) dan (4.7c) pada persamaan (4.7a) untuk mendapatkan persamaan perubahan keadaan kecepatan *sway*

$$bv' = Y' + \frac{d}{e} (K' - W'GM'\phi' + dv' + fu'r') - \frac{c}{g} (N' - x'_G Y' - cv') - au'r' \\ \dot{v}' = \frac{(eg + cex'_G) Y' + dg(K' - W'GM'\phi') - ceN' + (dfg - aeg) u'r'}{beg - d^2g - c^2e} \quad (4.8)$$

Persamaan (4.8) disubstitusikan balik ke persamaan (4.7b) sehingga didapatkan persamaan perubahan keadaan kecepatan *roll*

$$\begin{aligned} \dot{p}' &= d \left(\frac{(eg + cex'_G) Y' + dg(K' - W'GM'\phi) - ceN' + (dfg - aeg)u'r'}{be^2 + d^2eg - c^2e^2} \right) + \\ &\quad \frac{K' - W'GM'\phi' + fu'r'}{e} \\ &= \frac{1}{be^2g + d^2eg - c^2e^2} \left((beg - 2d^2g - c^2e) (K' - W'GM'\phi') + \right. \\ &\quad \left. (befg - c^2ef - adeg) ur + (deg + cdex'_G) Y' - cdeN' \right) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Sedangkan Persamaan (4.8) disubstitusikan kembali ke Persamaan (4.7c) untuk mendapatkan persamaan perubahan keadaan kecepatan sudut *yaw*

$$\begin{aligned} \dot{r}' &= \frac{N' - x'_G Y'}{g} - \frac{c(eg + cex'_G) Y' + dg(K' - W'GM'\phi) - ceN' + (dfg - aeg) u'r'}{beg - d^2g - c^2e} \\ &= \frac{1}{beg^2 - d^2g - c^2eg} \left((beg - d^2g) N' - ((beg - d^2g) x'_G + ceg) Y' - \right. \\ &\quad \left. cdg(K' - W'GM'\phi) - (cdfg - aceg) u'r' \right) \end{aligned} \quad (4.10)$$

Selanjutnya, didefinisikan ulang parameter-parameter untuk menyederhanakan persamaan-persamaan perubahan keadaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{1}{beg - d^2g - c^2e} &= Q \\ \frac{1}{beg^2 - d^2g - c^2eg} &= R \\ \frac{1}{be^2g + d^2eg - c^2e^2} &= S \end{aligned}$$

Sehingga persamaan (4.8) - (4.10) dapat ditulis kembali kedalam bentuk yang lebih sederhana sebagai berikut:

$$\dot{v}' = R((eg + cex'_G) Y' + dg(K' - W'GM'\phi) - ceN' + (dfg - aeg) u'r') \quad (4.11a)$$

$$\dot{p}' = S \left((beg - 2d^2g - c^2e) (K' - W'GM'\phi) + (befg - c^2ef - adeg) u'r' + (deg + cdex'_G) Y' - cdeN' \right) \quad (4.11b)$$

$$\dot{r}' = S \left((beg - d^2g) N' - ((beg - d^2g) x'_G + ceg) Y' - cdg(K - WGM\phi) - (cdfg - aceg) ur \right) \quad (4.11c)$$

Persamaan (4.11) adalah persamaan perubahan keadaan untuk kecepatan *sway*, *yaw*, dan *roll* dengan Y', K', N' adalah gaya dan momen hidrodinamika pada persamaan (4.5). Sehingga dengan mensubstitusikan Persamaan (4.5), didapatkan: Laju perubahan keadaan untuk kecepatan *surging*:

$$\dot{u}' = \left(\frac{1}{a} \right) (X'_{uu} u'^2 + T' + X'_{vr} v' r' + X'_{vv} v'^2 + X'_{rr} r'^2 + X'_{\phi\phi} \phi'^2 + C'_{RX} FN \sin \delta + b v' r') \quad (4.12)$$

Laju perubahan keadaan untuk kecepatan *swaying* (v'), adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{v}' = & Q(v' (Y'_v (eg + cex'_G) + dgK'_v - ceN'_v) + r' (Y'_r (eg + cex'_G) + dgK'_r - \\ & ceN'_r) + (Y'_\phi (eg + cex_G) + dg(K_\phi - WGM) - ceN'_\phi) \phi' + (Y'_p (eg + \\ & cex'_G) + dgK'_p - ceN'_p) p' + (Y'_{vvv} (eg + cex_G) + dgK'_{vvv} - ceN'_{vvv}) \\ & v'^3 + (Y'_{rrr} (eg + cex'_G) + dgK'_{rrr} - ceN'_{rrr}) r'^3 + (Y'_{vvr} (eg + cex_G) + \\ & dgK'_{vvr} - ceN'_{vvr}) v'^2 r' + (Y'_{vrr} (eg + cex'_G) + dgK'_{vrr} - ceN'_{vrr}) v' r'^2 + \\ & (Y'_{vv\phi} (eg + cex'_G) + dgK'_{vv\phi} - ceN'_{vv\phi}) v'^2 \phi' + (Y'_{v\phi\phi} (eg + cex'_G) + \\ & dgK'_{v\phi\phi} - ceN'_{v\phi\phi}) v' \phi'^2 + (Y'_{rr\phi} (eg + cex'_G) + dgK'_{rr\phi} - ceN'_{rr\phi}) r'^2 \phi' + \\ & (Y'_{r\phi\phi} (eg + cex'_G) + dgK'_{r\phi\phi} - ceN'_{r\phi\phi}) r \phi'^2 + (dfg - aeg) u' r' + \\ & ((eg + cex'_G - dgz'_R) (1 + a'_H) - ce (x'_R + a'_H x'_H)) FN \cos \delta') \end{aligned} \quad (4.13)$$

Berikut ini, disajikan laju perubahan keadaan untuk kecepatan sudut *yawing*:

$$\begin{aligned} \dot{r}' = & R([(beg - d^2g) (x'_R + a'_H x'_H) - (x'_G (beg - d^2g) + ceg - cdgz'_R) \\ & (1 + a'_H)] FN \cos \delta' - (cdfg - aceg) u' r' \\ & (N'_v (beg - d^2g) - (x'_G (beg - d^2g) + ceg) Y'_v - cdgK'_v) v' + \\ & (N'_r (beg - d^2g) - Y'_r (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_r) r' + \\ & (N'_p (beg - d^2g) - Y'_p (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_p) p' + \\ & (N'_\phi (beg - d^2g) - Y'_\phi (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdg (K'_\phi + W'GM')) \phi' + \\ & (N'_{vvv} (beg - d^2g) - Y'_{vvv} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{vvv}) v'^3 + \\ & (N'_{vvr} (beg - d^2g) - Y'_{vvr} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{vvr}) v'^2 r' + \\ & (N'_{vrr} (beg - d^2g) - Y'_{vrr} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{vrr}) v' r'^2 + \\ & (N'_{rrr} (beg - d^2g) - Y'_{rrr} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{rrr}) r'^3 + \\ & (N'_{vv\phi} (beg - d^2g) - Y'_{vv\phi} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{vv\phi}) v'^2 \phi' + \\ & (N'_{v\phi\phi} (beg - d^2g) - Y'_{v\phi\phi} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{v\phi\phi}) v' \phi'^2 + \\ & (N'_{rr\phi} (beg - d^2g) - Y'_{rr\phi} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{rr\phi}) r'^2 \phi' + \\ & (N'_{r\phi\phi} (beg - d^2g) - Y'_{r\phi\phi} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{r\phi\phi}) r' \phi'^2) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Selanjutnya didapatkan pula laju perubahan keadaan untuk kecepatan sudut *roll* sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\dot{p}' = & S([(beg - d^2g) (x'_R + a'_H x'_H) - (x'_G (beg - d^2g) + ceg - cdgz'_R) \\
& (1 + a'_H)] FN \cos \delta' - (cdfg - aceg) u'r' + \\
& (K'_v (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_v (deg + cdex'_G) - cdeN'_v) v' + \\
& (K'_r (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_r (deg + cdex'_G) - cdeN'_r) r' + \\
& (K'_p (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_p (deg + cdex'_G) - cdeN'_p) p' + \\
& ((K'_\phi - W'GM') (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_\phi (deg + cdex'_G) - cdeN'_\phi) \phi' + \\
& (K'_{vvv} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{vvv} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{vvv}) v'^3 + \\
& (K'_{vvr} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{vvr} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{vvr}) v'^2 r' + \\
& (K'_{vrr} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{vrr} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{vrr}) v' r'^2 + \\
& (K'_{rrr} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{rrr} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{rrr}) r'^3 + \\
& (K'_{vv\phi} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{vv\phi} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{vv\phi}) v'^2 \phi' + \\
& (K'_{v\phi\phi} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{v\phi\phi} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{v\phi\phi}) v' \phi'^2 + \\
& (K'_{rr\phi} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{rr\phi} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{rr\phi}) r^2 \phi + \\
& (K'_{r\phi\phi} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{r\phi\phi} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{r\phi\phi}) r \phi^2)
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Selanjutnya dengan menuliskan kembali laju perubahan besar sudut *yaw* dan *roll* pada Persamaan (4.2) sebagai berikut:

$$\dot{\phi}' = p' \tag{4.16}$$

$$\dot{\psi}' = r' \cos \phi' \tag{4.17}$$

Persamaan (4.12)-(4.17) merupakan persamaan perubahan keadaan, selanjutnya sebelum diterapkan pada metode DC-MPC terlebih dahulu dibentuk matriks ruang keadaan dengan melakukan pelinieran terhadap pada sistem persamaan ini.

4.1.1 Pelinieran Sistem Dinamik Kapal

Model persamaan gerak kapal dengan empat derajat kebebasan ini (Persamaan (4.12)-(4.17)) merupakan sistem persamaan tak linier, seperti yang telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya. Sistem persamaan tak linier ini dilinierkan untuk mendapatkan sistem baru yang lebih sederhana sehingga memudahkan dalam proses analisis serta simulasi (Subiono, 2013).

Pelinieran dilakukan membentuk dengan matriks *Jacobian* dari titik-titik kesetimbangannya, $(u_0, v_0, r_0, p_0, \delta_0, \psi_0, \phi_0)$. Pada kondisi setimbang, resultan kecepatan kapal dipengaruhi oleh kecepatan awal *surge* tanpa adanya perubahan kecepatan baik untuk *surge* ataupun *sway* (Fossen, 1994).

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} = \sqrt{(u_0 + \Delta u)^2 + \Delta v^2} \tag{4.18}$$

Pada keadaan setimbang, kapal berjalan konstan sesuai dengan kecepatan referensi yang diberikan. Pada kondisi ini, tidak terjadi perubahan kecepatan baik untuk *surging* ataupun *swaying*. Sehingga titik setimbang untuk kecepatan *surging* $= u_0 = 15 \text{ knot}$ dan untuk kecepatan *swaying* $v = 0$. Sedangkan untuk gerakan rotasi juga tidak mengalami perubahan (diabaikan) dengan mempertimbangkan kondisi tersebut, maka titik setimbang untuk variabel yang lain berturut-turut adalah $r_0 = 0$, $p_0 = 0$, $\phi_0 = 0$, $\psi_0 = 0$ dan untuk kendali *rudder* adalah $\delta_0 = 0$.

Didefinisikan fungsional dari perubahan keadaan yaitu: $u' = f_u, v' = f_v, r' = f_r, p' = f_p, \phi' = f_\phi, \psi' = f_\psi$. Selanjutnya tiap-tiap fungsi perubahan keadaan didiferensialkan terhadap masing-masing keadaan dan masing-masing kontrol. Sebagai pembuktian balik apakah titik-titik yang dipilih adalah merupakan titik kesetimbangan, maka dilakukan substitusi titik-titik kesetimbangan pada persamaan (4.12)-(4.17). Berdasarkan perhitungan, didapatkan $f_v = f_r = f_p = f_\phi = f_\psi = 0$ dan untuk f_u cukup kecil. Dari sini dapat ditarik kesimpulan bahwa titik setimbang yang didefinisikan sebelumnya adalah titik penyelesaian masing-masing fungsional.

Sebagaimana telah didefinisikan di Bab II Persamaan (2.2) bahwa persamaan untuk gaya normal *rudder* merupakan penjumlahan dari beberapa fungsi. Sehingga, berdasarkan sifat turunan dari penjumlahan fungsi, yaitu:

$$h(x) = g(x) + f(x) \Leftrightarrow \frac{dh}{dx} = \frac{dg(x)}{dx} \quad (4.19)$$

dengan $\frac{dh(x)}{dx}$ menunjukkan turunan fungsi terhadap variabel x . Sehingga untuk memudahkan penurunan gaya normal *rudder* pada Persamaan (2.2), dilakukan dengan menerapkan prinsip penurunan pada Persamaan (4.19). Hasil yang didapatkan untuk memperoleh turunan dari tiap-tiap fungsional terhadap perubahan keadaan.

Penurunan seluruh komponen sistem dinamik kapal tak linier terhadap kecepatan *surge* (u') adalah dengan terlebih dahulu menurunkan komponen gaya normal *rudder* terhadap variabel u'

$$\frac{\partial V'_R}{\partial u'} = 0$$

$$\frac{\partial U'_p}{\partial u'} = 0$$

$$\frac{\partial J'}{\partial u'} = \frac{\frac{\partial U'_p}{\partial u'}(u'^2 + v'^2) + U_p u'}{\sqrt{u'^2 + v'^2}(nD)^2}$$

$$\frac{\partial KT'}{\partial u'} = -0.455 \frac{\partial J'}{\partial u'}$$

$$\frac{\partial U'_R}{\partial u'} = \frac{\partial U'_p}{\partial u'} \varepsilon \sqrt{1 + \frac{8kKT}{\pi} J^2} + 4k\varepsilon U_p \left(1 + \frac{8kKT}{\pi J^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\frac{\partial KT'}{\partial u'} J'^2 - KT'}{\pi J'^4} \frac{\partial J'}{\partial u'} \right)$$

$$\frac{\partial \alpha'_R}{\partial u'} = \frac{\frac{\partial V'_R}{\partial u'} U_R - \frac{\partial U'_R}{\partial u'} V_R}{U_R^2 + V_R^2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial u} = \frac{2D^4 n^2}{L^2} \left(\frac{\frac{\partial KT'}{\partial u'} (u'^2 + v'^2) - 2u' KT'}{(u'^2 + v'^2)^2} \right)$$

$$\frac{\partial FN'}{\partial u'} = - \left(\frac{6.13 \nabla}{\nabla + 2.25} \right) \frac{A_R}{L^2} \left(\left(2U'_R \frac{\partial U'_R}{\partial u'} + 2V'_R \frac{\partial V'_R}{\partial u'} \right) \sin \alpha'_R + (U_R^2 + V_R^2) \cos \alpha'_R \alpha'_{Ru} \right)$$

Sehingga dari sini didapatkan penurunan fungsional f_u , f_v , f_r , f_p , f_ϕ , f_ψ , terhadap variabel u' sebagai berikut:

$$\frac{df_u}{du} = \frac{2X'_{uu} u' + (1 - tt) \frac{\partial T'}{\partial u'} J' + C'_{RX} \frac{\partial FN'}{\partial u'} \sin \delta}{a} \quad (4.20a)$$

$$\frac{df_v}{du} = Q \left((-dgW_u GM) \phi' + (dfg - aeg) u' r' + ((eg + ce x'_G - dg z'_R) (1 + a'_H) - ce (x'_R + a'_H x'_H)) \frac{\partial FN'}{\partial u'} \cos \delta' \right) \quad (4.20b)$$

$$\frac{df_r}{du} = R \left([(beg - d^2 g) (x'_R + a'_H x'_H) - (x'_G (beg - d^2 g) + ceg - cdg z'_R) (1 + a'_H)] \frac{\partial FN'}{\partial u'} \cos \delta' - (cdfg - aceg) r' - cdg W'_u GM' \phi' \right) \quad (4.20c)$$

$$\frac{df_p}{du} = S \left([(beg - d^2 g) (x'_R + a'_H x'_H) - (x'_G (beg - d^2 g) + ceg - cdg z'_R) (1 + a'_H)] \frac{\partial FN'}{\partial u'} \cos \delta' - (cdfg - aceg) r' - (beg - 2d^2 g - c^2 e) W'_u GM' \phi' \right) \quad (4.20d)$$

$$\frac{df_\phi}{du} = 0 \quad (4.20e)$$

$$\frac{df_\psi}{du} = 0 \quad (4.20f)$$

Langkah selanjutnya adalah penurunan terhadap komponen gaya dan momen normal *rudder* terhadap kecepatan *swaying* v sebagai berikut:

$$\frac{\partial V'_R}{\partial v'} = \gamma' + C_{Rrrv} r'^2$$

$$\frac{\partial U'_p}{\partial v'} = \cos v \left(\tau' (2(v' + x'_p r') + c'_{pv}) \right) - \sin v \left((1 - w'_p) + \tau' \left((v' + x'_p r')^2 + c'_{pv} v' + c'_{pr} r' \right) \right) \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial J'}{\partial v} = \frac{\frac{\partial U'_p}{\partial v'} (u'^2 + v'^2) + U_{pv}}{\sqrt{u'^2 + v'^2} (nD)^2}$$

$$\frac{\partial KT'}{\partial v} = -0.455 \frac{\partial J'}{\partial v}$$

$$\frac{\partial U_R}{\partial v} = \frac{\partial U'_p}{\partial v'} \varepsilon \sqrt{1 + \frac{8kKT}{\pi} J^2 + 4k\varepsilon U_p \left(1 + \frac{8kKT}{\pi J^2}\right)^{-\frac{1}{2}}} \left(\frac{\partial KT'}{\partial v} \frac{J^2 - KT}{\pi J^4} \frac{\partial J'}{\partial v} \right)$$

$$\frac{\partial \alpha'_R}{\partial v'} = \frac{\frac{\partial V'_R}{\partial v'} U_R - \frac{\partial U_R}{\partial v} V_R}{U_R^2 + V_R^2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial v} = \frac{2D^4 n^2}{L^2} \left(\frac{\partial KT'}{\partial v} \frac{(u'^2 + v'^2) - 2v'KT}{(u'^2 + v'^2)^2} \right)$$

$$\frac{\partial FN'}{\partial v'} = - \left(\frac{6.13 \nabla}{\nabla + 2.25} \right) \frac{A_R}{L^2} \left(\left(2U'_R \frac{\partial U_R}{\partial v} + 2V'_R \frac{\partial V'_R}{\partial v'} \right) \sin \alpha'_R + (U_R^2 + V_R^2) \cos \alpha'_R \frac{\partial \alpha'_R}{\partial v'} \right)$$

Setelah mendapatkan turunan terhadap variabel v dari gaya normal pada *rudder* kemudian dilakukan penurunan tiap-tiap fungsional dari sistem dinamik kapal tak linier terhadap variabel v

$$\frac{df_u}{dv} = \frac{(1 - tt) \frac{\partial T}{\partial v} J + X'_{vr} r' + X'_{vv} 2v' + C'_{RX} \frac{\partial FN'}{\partial v'} \sin \delta + bv'}{a} \quad (4.22a)$$

$$\frac{df_v}{dv} = Q \left((Y'_v (eg + ce x'_G) + dg K'_v - ce N'_v) + \right. \quad (4.22b)$$

$$\begin{aligned} & (Y'_{vvv} (eg + ce x'_G) + dg K'_{vvv} - ce N'_{vvv}) 3v'^2 + \\ & (Y'_{vvr} (eg + ce x'_G) + dg K'_{vvr} - ce N'_{vvr}) 2v' r' + \\ & (Y'_{vrr} (eg + ce x'_G) + dg K'_{vrr} - ce N'_{vrr}) r'^2 + \\ & (Y'_{vv\phi} (eg + ce x'_G) + dg K'_{vv\phi} - ce N'_{vv\phi}) 2v' \phi' + \\ & (Y'_{v\phi\phi} (eg + ce x'_G) + dg K'_{v\phi\phi} - ce N'_{v\phi\phi}) \phi'^2 + \end{aligned}$$

$$\left. \left((eg + ce x'_G - dg z'_R) (1 + a'_H) - ce (x'_R + a'_H x'_H) \right) \frac{\partial FN'}{\partial v'} \cos \delta' \right) \quad (4.22c)$$

$$\begin{aligned} \frac{df_r}{dv} = R \left(\right. & \left. \left[(beg - d^2 g) (x'_R + a'_H x'_H) - (x'_G (beg - d^2 g) + ceg - cdg z'_R) \right. \right. \\ & \left. \left. (1 + a'_H) \right] FN_v \cos \delta' - cdg W'_v GM' \phi' + \right. \\ & \left. (N'_v (beg - d^2 g) - (x'_G (beg - d^2 g) + ceg) Y'_v - cdg K'_v) + \right. \\ & \left. (N'_{vvv} (beg - d^2 g) - Y'_{vvv} (x'_G (beg - d^2 g) + ceg) - cdg K'_{vvv}) 3v'^2 + \right. \\ & \left. (N'_{vvr} (beg - d^2 g) - Y'_{vvr} (x'_G (beg - d^2 g) + ceg) - cdg K'_{vvr}) 2v' r' + \right. \\ & \left. (N'_{vrr} (beg - d^2 g) - Y'_{vrr} (x'_G (beg - d^2 g) + ceg) - cdg K'_{vrr}) r'^2 + \right. \\ & \left. (N'_{vv\phi} (beg - d^2 g) - Y'_{vv\phi} (x'_G (beg - d^2 g) + ceg) - cdg K'_{vv\phi}) v' \phi' + \right. \\ & \left. (N'_{v\phi\phi} (beg - d^2 g) - Y'_{v\phi\phi} (x'_G (beg - d^2 g) + ceg) - cdg K'_{v\phi\phi}) \phi'^2 \right) \quad (4.22d) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{df_p}{dv} = & S([(beg - d^2g) (x'_R + a'_H x'_H) - (x'_G (beg - d^2g) + ceg - cdgz'_R) \\ & (1 + a'_H)] FN' \cos \delta' - W'_v GM' (beg - 2d^2g - c^2e) \phi' + \\ & (K'_{vvv} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{vvv} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{vvv}) 3v'^2 + \\ & (K'_{vvr} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{vvr} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{vvr}) 2v'r' + \\ & (K'_{vrr} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{vrr} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{vrr}) r'^2 + \\ & (K'_{vv\phi} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{vv\phi} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{vv\phi}) 2v'\phi' + \\ & (K'_{v\phi\phi} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{v\phi\phi} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{v\phi\phi}) \phi'^2) \end{aligned} \quad (4.22e)$$

$$\frac{df_\phi}{dv} = 0 \quad (4.22f)$$

$$\frac{df_\psi}{dv} = 0 \quad (4.22g)$$

Pada bagian ini dilakukan penurunan komponen fungsi gaya normal *rudder* terhadap kecepatan sudut *yaw* (r') untuk mendapatkan turunan gaya normal *rudder* terhadap variabel r' , sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V'_R}{\partial r} &= C'_{Rr} + 3C'_{Rrrr} r'^2 + 2C'_{Rrrv} r'v' \\ \frac{\partial U'_p}{\partial r} &= \cos v (\tau' (2x'_p (v' + x'_p r') + c'_{pr})) \\ \frac{\partial J'}{\partial r} &= \frac{\frac{\partial U'_p}{\partial r} \sqrt{u'^2 + v'^2}}{(nD)^2} \\ \frac{\partial KT'}{\partial r} &= -0.455 \frac{\partial J'}{\partial r} \\ \frac{\partial U'_R}{\partial r} &= \frac{\partial U'_p}{\partial r} \varepsilon \sqrt{1 + \frac{8kKT}{\pi} J^2} + 4k\varepsilon U_p \left(1 + \frac{8kKT}{\pi J^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \\ &\quad \left(\frac{\frac{\partial KT'}{\partial r} J^2 - KT}{\pi J^4} \frac{\partial J'}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha'_R}{\partial r} &= \frac{\frac{\partial V'_R}{\partial r} U_R - \frac{\partial U'_R}{\partial r} V_R}{U_R^2 + V_R^2} \\ \frac{\partial T}{\partial r} &= \frac{2D^4 n^2}{L^2} \left(\frac{\frac{\partial KT'}{\partial r} (u'^2 + v'^2)}{(u'^2 + v'^2)^2} \right) \\ \frac{\partial FN'}{\partial r} &= - \left(\frac{6.13\nabla}{\nabla + 2.25} \right) \frac{A_R}{L^2} \left(\left(2U_R \frac{\partial U'_R}{\partial r} + 2V_R \frac{\partial V'_R}{\partial r} \right) \sin \alpha_R + \right. \\ &\quad \left. (U_R^2 + V_R^2) \cos \alpha_R \frac{\partial \alpha'_R}{\partial r} \right) \end{aligned}$$

Dari Persamaan (4.23) didapatkan turunan dari gaya normal *rudder* terhadap variabel r' . Selanjutnya hasil ini, digunakan pada penurunan fungsional $f'_u, f'_v, f'_r, f'_p, f'_\phi, f'_\psi$, terhadap variabel r' sebagai berikut:

$$\frac{df_u}{dr} = \frac{(1-tt)(rJ + X'_{vr}r' + X'_{rr}2r' + C'_{RX} \frac{\partial FN'}{\partial r} \sin \delta + bv')}{a} \quad (4.24a)$$

$$\begin{aligned} \frac{d_v}{dr} = & Q \left((Y'_r (eg + cex'_G) + dgK'_r - ceN'_r) r' + (Y'_{rrr} (eg + cex'_G) + dgK'_{rrr} - \right. \\ & ceN'_{rrr}) 3r'^2 + (Y'_{vvr} (eg + cex'_G) + dgK'_{vvr} - ceN'_{vvr}) v'^2 + (Y'_{vrr} (eg + \\ & cex'_G) + dgK'_{vrr} - ceN'_{vrr}) 2v'r' + (Y'_{rr\phi} (eg + cex'_G) + dgK'_{rr\phi} - \\ & ceN'_{rr\phi}) 2r'\phi' + (Y'_{r\phi\phi} (eg + cex'_G) + dgK'_{r\phi\phi} - ceN'_{r\phi\phi}) \phi^2 + (dfg - \\ & aeg) u' + ((eg + cex'_G - dgz'_R) (1 + a'_H) - \\ & ce(x'_R + a'_H x'_H)) \frac{\partial FN'}{\partial r} \cos \delta' \end{aligned} \quad (4.24b)$$

$$\begin{aligned} \frac{d_r}{dr} = & R \left((N'_r (beg - d^2g) - Y'_r (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_r) + \right. \\ & (N'_{vvr} (beg - d^2g) - Y'_{vvr} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{vvr}) v'^2 + \\ & (N'_{vrr} (beg - d^2g) - Y'_{vrr} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{vrr}) 2v'r' + \\ & (N'_{rrr} (beg - d^2g) - Y'_{rrr} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{rrr}) 3r'^2 + \\ & (N'_{rr\phi} (beg - d^2g) - Y'_{rr\phi} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{rr\phi}) 2r'\phi' + \\ & (N'_{r\phi\phi} (beg - d^2g) - Y'_{r\phi\phi} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{r\phi\phi}) \phi^2 \\ & \left. [(beg - d^2g) (x'_R + a'_H x'_H) - (x'_G (beg - d^2g) + ceg - cdgz'_R) \right. \\ & \left. (1 + a'_H) \right] \frac{\partial FN'}{\partial r} \cos \delta' - (cdfg - aceg) r' \end{aligned} \quad (4.24c)$$

$$\begin{aligned} \frac{df_p}{dr} = & S \left([(beg - d^2g) (x'_R + a'_H x'_H) - (x'_G (beg - d^2g) + ceg - cdgz'_R) \right. \\ & \left. (1 + a'_H) \right] \frac{\partial FN'}{\partial r} \cos \delta' - (cdfg - aceg) u' + \\ & (K'_r (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_r (deg + cdex'_G) - cdeN'_r) + \\ & (K'_{vvr} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{vvr} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{vvr}) v'^2 + \\ & (K'_{vrr} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{vrr} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{vrr}) 2v'r' + \\ & (K'_{rrr} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{rrr} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{rrr}) 3r'^2 + \\ & (K'_{rr\phi} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{rr\phi} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{r\phi}) 2r\phi + \\ & (K'_{r\phi\phi} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{r\phi\phi} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{r\phi\phi}) \phi^2 \end{aligned} \quad (4.24d)$$

$$\frac{df_\phi}{dr} = 0 \quad (4.24e)$$

$$\frac{df_\psi}{dr} = \cos \phi' \quad (4.24f)$$

Selanjutnya, pada bagian ini dilakukan penurunan kembali komponen gaya normal *rudder* terhadap kecepatan *roll* (p). Karena gaya dan momen *rudder* tidak mengandung variabel p , maka penurunan terhadap variabel ini adalah 0

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial V'_R}{\partial p'} &= 0 \\
 \frac{\partial U'_p}{\partial p'} &= 0 \\
 \frac{\partial J'}{\partial p'} &= 0 \\
 \frac{\partial KT'}{\partial p'} &= 0 \\
 \frac{\partial \alpha'_R}{\partial p'} &= 0 \\
 \frac{\partial T'}{\partial p'} &= 0 \\
 \frac{\partial FN'}{\partial p'} &= 0
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

Sehingga, pada penurunan fungsional $f'_u, f'_v, f'_r, f'_p, f'_\phi, f'_\psi$, terhadap variabel p yang didapatkan tidak dipengaruhi secara langsung oleh gaya dan momen *rudder* sebagai berikut:

$$\frac{df_u}{dp} = 0 \tag{4.26a}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{df_r}{dp} &= R([(beg - d^2g) (x'_R + a'_H x'_H) - (x'_G (beg - d^2g) + ceg - cdgz'_R) \\
 &\quad (N'_p (beg - d^2g) - Y'_p (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_p))
 \end{aligned} \tag{4.26b}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{df_p}{dp} &= S([(beg - d^2g) (x'_R + a'_H x'_H) - (x'_G (beg - d^2g) + ceg - cdgz'_R) \\
 &\quad (K'_p (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_p (deg + cde x'_G) - cdeN'_p) +)
 \end{aligned}$$

$$\frac{df_v}{dp} = Q((Y'_p (eg + ce x'_G) + dgK'_p - ceN'_p)) \tag{4.26c}$$

$$\frac{df_\phi}{dp} = 1 \tag{4.26d}$$

$$\frac{df_\psi}{dp} = 0 \tag{4.26e}$$

Selanjutnya, pada bagian ini dilakukan penurunan komponen gaya dan momen *rudder* terhadap sudut *roll* (ϕ) karena komponen-komponen fungsi ini juga tidak mengantung variabel ϕ' secara eksplisit, maka turunan terhadap variabel ini adalah 0.

$$\begin{aligned}\frac{\partial V'_R}{\partial \phi'} &= 0 \\ \frac{\partial U'_p}{\partial \phi'} &= 0 \\ \frac{\partial J'}{\partial \phi'} &= 0 \\ \frac{\partial KT'}{\partial \phi'} &= 0 \\ \frac{\partial \alpha'_R}{\partial \phi'} &= 0 \\ \frac{\partial T'}{\partial \phi'} &= 0 \\ \frac{\partial FN'}{\partial \phi'} &= 0\end{aligned}\tag{4.27}$$

Sehingga, pada penurunan fungsional $f'_u, f'_v, f'_r, f'_p, f'_\phi, f'_\psi$, terhadap variabel ϕ' yang didapatkan tidak dipengaruhi secara langsung oleh gaya dan momen *rudder* sebagai berikut:

$$\frac{df_u}{d\phi} = \frac{(1 - tt)(T_\phi J + T J_\phi) + X'_{\phi\phi} 2\phi'}{a}\tag{4.28a}$$

$$\begin{aligned}\frac{df_r}{d\phi} &= R((N'_\phi (beg - d^2g) - Y'_\phi (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdg (K'_\phi + W'GM')) + \\ & (N'_{vv\phi} (beg - d^2g) - Y'_{vv\phi} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{vv\phi}) v'^2 + \\ & (N'_{v\phi\phi} (beg - d^2g) - Y'_{v\phi\phi} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{v\phi\phi}) 2v'\phi' + \\ & (N'_{rr\phi} (beg - d^2g) - Y'_{rr\phi} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{rr\phi}) r'^2 + \\ & (N'_{r\phi\phi} (beg - d^2g) - Y'_{r\phi\phi} (x'_G (beg - d^2g) + ceg) - cdgK'_{r\phi\phi}) 2r'\phi' + \\ & [(beg - d^2g) (x'_R + a'_H x'_H) - (x'_G (beg - d^2g) + ceg - cdgz'_R) \\ & (1 + a'_H)] FN_\phi \cos \delta')\end{aligned}\tag{4.28b}$$

$$\begin{aligned} \frac{df_p}{d\phi} = & S(((K'_\phi - W'GM') (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_\phi (deg + cdex'_G) - cdeN'_\phi) + \\ & (K'_{vv\phi} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{vv\phi} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{vv\phi}) v'^2 + \\ & (K'_{v\phi\phi} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{v\phi\phi} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{v\phi\phi}) 2v'\phi' + \\ & (K'_{rr\phi} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{rr\phi} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{r\phi}) r^2 + \\ & (K'_{r\phi\phi} (beg - 2d^2g - c^2e) + Y'_{r\phi\phi} (deg + cdex'_G) - cdeN'_{r\phi\phi}) 2\phi + \\ & [(beg - d^2g) (x'_R + a'_H x'_H) - (x'_G (beg - d^2g) + ceg - cdgz'_R) \\ & (1 + a'_H)] FN_\phi \cos \delta' \end{aligned} \quad (4.28c)$$

$$\frac{df_\phi}{d\phi} = 0 \quad (4.28d)$$

$$\frac{df_\psi}{d\phi} = -r \sin \phi \quad (4.28e)$$

Selanjutnya, pada bagian ini dilakukan penurunan komponen gaya dan momen *rudder* terhadap sudut *roll* (ψ') karena komponen-komponen fungsi ini juga tidak mengantung variabel ψ' secara eksplisit, maka turunan terhadap variabel ini adalah 0.

$$\begin{aligned} \frac{\partial V'_R}{\partial \psi'} &= 0 \\ \frac{\partial U'_p}{\partial \psi'} &= 0 \\ \frac{\partial J'}{\partial \psi'} &= 0 \\ \frac{\partial KT'}{\partial \phi} &= 0 \\ \frac{\partial U'_R}{\partial \psi'} &= 0 \\ \frac{\partial \alpha'_R}{\partial \psi'} &= 0 \\ \frac{\partial T'}{\partial \psi'} &= 0 \\ \frac{\partial FN'}{\partial \psi'} &= 0 \end{aligned} \quad (4.29)$$

Sehingga, pada penurunan fungsional $f'_u, f'_v, f'_r, f'_p, f'_\phi, f'_\psi$, terhadap variabel ψ' yang didapatkan tidak dipengaruhi secara langsung oleh gaya dan momen *rudder* sebagai berikut:

$$\frac{df_u}{d\psi} = \frac{(1 - tt)(T_\psi J + TJ_\psi) + C'_{RX} FN_\psi \sin \delta}{a} \quad (4.30a)$$

$$(4.30b)$$

$$\frac{df_v}{d\psi} = 0 \quad (4.30c)$$

$$\frac{df_r}{d\psi} = 0 \quad (4.30d)$$

$$\frac{df_p}{d\psi} = 0 \quad (4.30e)$$

$$\frac{df_\phi}{d\psi} = 0 \quad (4.30f)$$

$$\frac{df_\psi}{d\psi} = 0 \quad (4.30g)$$

Sedangkan untuk mendapatkan matriks pada kendali *input*, terlebih dahulu dilakukan penurunan komponen-komponen fungsi pada gaya dan momen *rudder* terhadap kendali *input* (δ) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V'_R}{\partial \delta} &= 0 \\ \frac{\partial U'_p}{\partial \delta} &= 0 \\ \frac{\partial J'}{\partial \delta} &= 0 \\ \frac{\partial KT'}{\partial \delta} &= 0 \\ \frac{\partial U'_R}{\partial \delta} &= 0 \\ \frac{\partial \alpha'_R}{\partial \delta} &= 1 \\ \frac{\partial T}{\partial \delta} &= 0 \\ \frac{\partial FN'}{\partial \delta} &= - \left(\frac{6.13\nabla}{\nabla+2.25} \right) \frac{A_R}{L^2} ((U_R^2 + V_R^2) \cos \alpha_R \alpha_{R\delta}) \end{aligned} \quad (4.31)$$

Selanjutnya, penurunan fungsional f'_u , f'_v , f'_r , f'_p , f'_ϕ , f'_ψ , terhadap kendali *input* (δ) adalah sebagai berikut:

$$\frac{df_u}{d\delta} = \frac{C'_{RX} \left(\frac{\partial FN'}{\partial \delta} \sin \delta + FN' \cos \delta \right)}{a} \quad (4.32a)$$

$$\frac{df_v}{d\delta} = Q \left((eg + ce x'_G - dg z'_R) (1 + a'_H) - ce (x'_R + a'_H x'_H) \frac{\partial FN'}{\partial \delta} \cos \delta' \right) \quad (4.32b)$$

$$\begin{aligned} \frac{df_r}{d\delta} &= R \left((beg - d^2 g) (x'_R + a'_H x'_H) - (x'_G (beg - d^2 g) + ceg - cdg z'_R) \right. \\ &\quad \left. (1 + a'_H) \right) \left(\frac{\partial FN'}{\partial \delta} \cos \delta - FN' \sin \delta \right) \end{aligned} \quad (4.32c)$$

$$\frac{df_p}{d\delta} = S((beg - d^2g)(x'_R + a'_H x'_H) - (x'_G(beg - d^2g) + ceg - cdgz'_R)) \\ (1 + a'_H) \left(\frac{\partial FN'}{\partial \delta} \cos \delta' - FN' \sin \delta' \right) \quad (4.32d)$$

$$\frac{df_\psi}{d\phi} = 0 \quad (4.32e)$$

$$\frac{df_\psi}{d\psi} = 0 \quad (4.32f)$$

Kemudian, setelah dilakukan penurunan seluruh fungsi terhadap masing-masing variabel dan kendali. Selanjutnya dilakukan penyusunan untuk mendapatkan matriks ruang keadaan dari peubah keadaan dan kendali *input*. Sesuai dengan penjelasan yang telah diberikan di Sub Bab 2.7 sebelumnya, berikut ini disajikan Persamaan (4.20a) - (4.30):

$$A(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_u}{\partial u} & \frac{\partial f_u}{\partial v} & \frac{\partial f_u}{\partial r} & \frac{\partial f_u}{\partial p} & \frac{\partial f_u}{\partial \phi} & \frac{\partial f_u}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_v}{\partial u} & \frac{\partial f_v}{\partial v} & \frac{\partial f_v}{\partial r} & \frac{\partial f_v}{\partial p} & \frac{\partial f_v}{\partial \phi} & \frac{\partial f_v}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_r}{\partial u} & \frac{\partial f_r}{\partial v} & \frac{\partial f_r}{\partial r} & \frac{\partial f_r}{\partial p} & \frac{\partial f_r}{\partial \phi} & \frac{\partial f_r}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_p}{\partial u} & \frac{\partial f_p}{\partial v} & \frac{\partial f_p}{\partial r} & \frac{\partial f_p}{\partial p} & \frac{\partial f_p}{\partial \phi} & \frac{\partial f_p}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_\phi}{\partial u} & \frac{\partial f_\phi}{\partial v} & \frac{\partial f_\phi}{\partial r} & \frac{\partial f_\phi}{\partial p} & \frac{\partial f_\phi}{\partial \phi} & \frac{\partial f_\phi}{\partial \psi} \\ \frac{\partial f_\psi}{\partial u} & \frac{\partial f_\psi}{\partial v} & \frac{\partial f_\psi}{\partial r} & \frac{\partial f_\psi}{\partial p} & \frac{\partial f_\psi}{\partial \phi} & \frac{\partial f_\psi}{\partial \psi} \end{bmatrix}_{\bar{x}=x_0} \quad (4.33)$$

Sedangkan pada bagian ini, dilakukan penyusunan dari turunan-turunan fungsional terhadap kendali sudut kemudi (δ) dapat disajikan sebagai berikut:

$$B(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_u}{\partial \delta} \\ \frac{\partial f_v}{\partial \delta} \\ \frac{\partial f_r}{\partial \delta} \\ \frac{\partial f_p}{\partial \delta} \\ \frac{\partial f_\phi}{\partial \delta} \\ \frac{\partial f_\psi}{\partial \delta} \end{bmatrix}_{\bar{x}=x_0, \delta=\delta_0} \quad (4.34)$$

Dalam penelitian ini, simulasi dari penerapan metode DC-MPC adalah dengan menggunakan model berupa **Kapal Kontainer**. Koefisien serta parameter kapal yang digunakan adalah sebagai berikut (Fossen, 1994)

$$\begin{aligned} m &= 0.00792 & ; & & l_x &= 0.0313 & ; & & N_v &= -0.0038545 \\ m_x &= 0.000238 & ; & & l_y &= 0.0313 & ; & & N_r &= -0.00222 \\ m_y &= 0.007049 & ; & & X_{uu} &= -0.0004226 & ; & & N_p &= 0.000213 \\ I_x &= 0.0000176 & ; & & Y_v &= -0.0116 & ; & & N_\phi &= -0.0001424 \\ J_x &= 0.0000034 & ; & & Y_r &= 0.00242 & ; & & K_v &= 0.0003026 \end{aligned} \quad (4.35)$$

$$\begin{aligned}
I_z &= 0.000456 ; Y_p = 0.0 ; K_r = -0.0003026 \\
J_z &= 0.000419 ; Y_\phi = -0.000063 ; K_p = -0.0000075 \\
\alpha_y &= 0.05 ; x_G = 0 ; K_\phi = -0.000021
\end{aligned}$$

Koefisien dan parameter pada Baling-baling (propeller) dan *Rudder*, disajikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
(1 - tt) &= 0.825 ; C_{RX} = 0.71 ; k = 0.631 \\
(1 - w_p) &= 0.816 ; z_R = 0.033 ; \gamma = 0.193 \\
x_p &= -0.526 ; C_{pv} = 0.0 ; C_{Rr} = -0.156 \\
x_R &= -0.5 ; C_{pr} = 0.0 ; C_{Rrrr} = -0.275 \\
a_H &= 0.237 ; \tau = 1.09 ; C_{Rrrv} = 1.96 \\
x_H &= -0.48 ; \epsilon = 0.921 ; u_0 = 7.71 \\
& ; n_0 = 0.3
\end{aligned} \tag{4.36}$$

Langkah selanjutnya adalah dengan mensubstitusikan data-data kapal (seperti koefisien dan parameter) yang diperlukan kedalam Matriks 4.33 untuk mendapatkan matriks ruang keadaan dan Matriks 4.34 untuk mendapatkan matriks kendali *input*. Sehingga, hasil yang didapatkan adalah sebagai berikut: Selanjutnya,

$$\begin{bmatrix} \dot{u}' \\ \dot{v}' \\ \dot{r}' \\ \dot{p}' \\ \dot{\phi}' \\ \dot{\psi}'_{cm}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.3082 & 0 & -0.0537 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0060 & -0.5437 & -0.1316 & -2.3839 & 0 \\ 0 & 0.0177 & 0.0060 & -0.0012 & 12.8332 & 0 \\ 0 & 3.6011 & 1.5192 & -0.3628 & -0.8191 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ r' \\ p' \\ \phi' \\ \psi' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -0.4413 \\ 0.0183 \\ 1.7615 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta] \tag{4.37}$$

Persamaan (4.37) adalah persamaan ruang keadaan dari model dinamik kapal yang digunakan sebagai obyek simulasi dengan menerapkan DC-MPC. Sebelumnya, dilakukan pendiskritan terhadap persamaan tersebut. Penyelesaian metode ini, dilakukan dengan menggunakan QP sehingga sistem persamaan yang digunakan terlebih dulu harus berbentuk invarian waktu diskrit.

Sebelumnya dilakukan uji keterkontrol dengan menghitung jumlah *rank* pada sistem. Suatu sistem dikatakan terkontrol jika jumlah *rank* dari sistem sama dengan jumlah keadaan yang ada.

$$M_c = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & A^3B & A^4B & A^5B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -0.0002 & -0.0003 & -0.0762 & -0.2455 & -0.4605 \\ -0.2206 & -0.2804 & -0.8287 & -2.2987 & -4.6343 & -7.8298 \\ 0.0091 & 0.0067 & 2.8297 & 6.7517 & 9.4305 & 12.518 \\ 0.8808 & 0.3417 & -0.3864 & 0.1321 & 1.0417 & -0.2944 \\ 0 & 0.4404 & 0.6112 & 0.4180 & 0.4841 & 1.0049 \\ 0 & 0.0046 & 0.0079 & 1.4228 & 4.7986 & 9.5139 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

Matriks pada Persamaan (4.38) merupakan matriks keterkontrolan dari sistem dinamik linier manuver kapal. Suatu sistem dikatakan terkontrol ketika jumlah *rank* dari matriks keterkontrolannya sama dengan jumlah keadaan sistem tersebut (Subiono, 2013). Dapat diketahui bahwa $rank(M_c) = 6$ dengan jumlah keadaan adalah enam. Sehingga sistem dalam keadaan terkontrol (oleh *rudder*). Sebelum diterapkan metode DC-MPC, maka dilakukan pendiskritan terhadap matriks ruang keadaan Persamaan (4.37).

4.1.2 Pendiskritan sistem keadaan

Sebelum diskritisasi, terlebih dahulu dilakukan definisi ulang variabel keadaan: $u = x_1$, $v = x_2$, $r = x_3$, $p = x_4$, $\phi = x_5$, $\psi = x_6$ dan untuk kendali *rudder* $\delta = u$. Sehingga didapatkan vektor variabel keadaan $\mathbf{x} = [x_1; x_2; x_3; x_4; x_5; x_6]$ dan untuk kendali \mathbf{u} . Proses pendiskritan dilakukan dengan menerapkan metode beda maju, sebagai berikut:

$$\dot{x} = \frac{x(k+1) - x(k)}{\Delta t} \quad (4.39)$$

dengan Δt adalah waktu sampling. Proses pendiskritan dilakukan dengan menerapkan beda maju, hal ini ditujukan untuk mendapatkan data pada saat $k+1$ dengan data pada waktu ke- k diketahui. Kemudian dilakukan pendiskritan dengan hasil pendiskritan disajikan pada persamaan dibawah ini:

$$\begin{bmatrix} \frac{x_1(k+1) - x_1(k)}{\Delta t} \\ \frac{x_2(k+1) - x_2(k)}{\Delta t} \\ \frac{x_3(k+1) - x_3(k)}{\Delta t} \\ \frac{x_4(k+1) - x_4(k)}{\Delta t} \\ \frac{x_5(k+1) - x_5(k)}{\Delta t} \\ \frac{x_6(k+1) - x_6(k)}{\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.3082 & 0 & -0.0537 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0060 & -0.5437 & -0.1316 & -2.3839 & 0 \\ 0 & 0.0177 & 0.0060 & -0.0012 & 12.8332 & 0 \\ 0 & 3.6011 & 1.5192 & -0.3628 & -0.8191 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \\ x_6(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.4413 \\ 0.0183 \\ 1.7615 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{\mathbf{u}}$$

kemudian kedua ruas persamaan *state* di atas dikalikan dengan Δt

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) - x_1(k) \\ x_2(k+1) - x_2(k) \\ x_3(k+1) - x_3(k) \\ x_4(k+1) - x_4(k) \\ x_5(k+1) - x_5(k) \\ x_6(k+1) - x_6(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.3082\Delta t & 0\Delta t & -0.0537\Delta t & 0\Delta t & \dots \\ 0\Delta t & -0.0060\Delta t & -0.5437\Delta t & -0.1316\Delta t & \dots \\ 0\Delta t & 0.0177\Delta t & 0.0060\Delta t & -0.0012\Delta t & \dots \\ 0\Delta t & 3.6011\Delta t & 1.5192\Delta t & -0.3628\Delta t & \dots \\ 0\Delta t & 0\Delta t & 0\Delta t & 0\Delta t & 1\Delta t & \dots \\ 0\Delta t & 0\Delta t & 0\Delta t & 1\Delta t & 0\Delta t & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \\ x_6(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0\Delta t \\ -0.4413\Delta t \\ 0.0183\Delta t \\ 1.7615\Delta t \\ 0\Delta t \\ 0\Delta t \end{bmatrix} \hat{\mathbf{u}}$$

Kedua ruas ditambahkan dengan $\mathbf{x}(k)$ untuk memisahkan $\mathbf{x}(k+1)$ pada ruas kiri

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \\ x_4(k+1) \\ x_5(k+1) \\ x_6(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.3082\Delta t & 0\Delta t & -0.0537\Delta t & 0\Delta t & \dots \\ 0\Delta t & -0.0060\Delta t & -0.5437\Delta t & -0.1316\Delta t & \dots \\ 0\Delta t & 0.0177\Delta t & 0.0060\Delta t & -0.0012\Delta t & \dots \\ 0\Delta t & 3.6011\Delta t & 1.5192\Delta t & -0.3628\Delta t & \dots \\ 0\Delta t & 0\Delta t & 0\Delta t & 0\Delta t & 1\Delta t & \dots \\ 0\Delta t & 0\Delta t & 0\Delta t & 1\Delta t & 0\Delta t & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \\ x_6(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \\ x_6(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0\Delta t \\ -2.3839\Delta t & 0\Delta t \\ -2.3839\Delta t & 0\Delta t \\ -0.8191\Delta t & 0\Delta t \\ 0\Delta t & 0\Delta t \\ 0\Delta t & 0\Delta t \end{bmatrix} \hat{\mathbf{u}}$$

$$\begin{bmatrix} 0\Delta t \\ -0.4413\Delta t \\ 0.0183\Delta t \\ 1.7615\Delta t \\ 0\Delta t \\ 0\Delta t \end{bmatrix} \hat{u}$$

kemudian ruas kanan Persamaan diatas disederhanakan manjadi

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \\ x_4(k+1) \\ x_5(k+1) \\ x_6(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - 0.3082\Delta t & 0\Delta t & -0.0537\Delta t & 0\Delta t & \dots \\ 0\Delta t & 1 - 0.0060\Delta t & -0.5437\Delta t & -0.1316\Delta t & \dots \\ 0\Delta t & 0.0177\Delta t & 1 + 0.0060\Delta t & -0.0012\Delta t & \dots \\ 0\Delta t & 3.6011\Delta t & 1.5192\Delta t & 1 - 0.3628\Delta t & \dots \\ 0\Delta t & 0\Delta t & 0\Delta t & 0\Delta t & 1\Delta t & \dots \\ 0\Delta t & 0\Delta t & 0\Delta t & 1\Delta t & 0\Delta t & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \\ x_6(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0\Delta t \\ -0.4413\Delta t \\ 0.0183\Delta t \\ 1.7615\Delta t \\ 0\Delta t \\ 0\Delta t \end{bmatrix} \hat{u}$$

Pada penelitian ini, diambil waktu sampling, $\Delta t = 0.5$ dengan pembulatan empat digit dibelakang koma didapatkan persamaan ruang keadaan diskrit terhadap waktu sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \\ x_4(k+1) \\ x_5(k+1) \\ x_6(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8459 & 0 & -0.02681 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9969 & -0.2719 & -0.06578 & -1.1919 & 0 \\ 0 & 0.0088 & 1.0030 & -0.0006 & 6.4166 & 0 \\ 0 & 1.8005 & 0.7596 & 0.8186 & -0.4095 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5000 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \\ x_6(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -0.44197 \\ -0.01829 \\ 1.76430 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{u} \quad (4.40)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -0.44197 \\ -0.01829 \\ 1.76430 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{u} \quad (4.41)$$

Persamaan (4.40) merupakan ruang keadaan waktu diskrit yang akan digunakan dalam penerapan pada DC-MPC.

4.2 Penerapan *Disturbance Compensating-Model Predictive Control* Pada Kendali Haluan Kapal

Seperti yang dijelaskan sebelumnya pada bab 2, bahwa metode DC-MPC merupakan pengembangan dari MPC dengan mengantisipasi gangguan. Berikut akan dijelaskan tahapan-tahapan dalam menyelesaikan masalah kendali haluan kapal dengan menggunakan optimasi DC-MPC.

4.2.1 Inisialisasi Awal Penerapan MPC

Pada tahap ini, diberikan nilai awal kecepatan *surge* (u'), kecepatan *sway* (v), kecepatan *yaw* (r'), kecepatan *roll* (p'), sudut haluan kapal (ψ'), sudut *roll* dan nilai sudut kemudi (δ'). *Prediction horizon* (N_p) yang digunakan dalam tahap ini merupakan prediksi nilai kendali optimal pada saat ke- $k, k + 1, \dots, k + N_p$ dengan N_p bervariasi.

$$\begin{bmatrix} x(1) \\ x(1) \\ x(1) \\ x(1) \\ x(1) \\ x(1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.51 \\ 0 \\ 0.001 \\ 0.0001 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad [u(1)] = [0] \quad (4.42)$$

Selanjutnya didefinisikan untuk kondisi pada saat k sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} x(2) \\ x(2) \\ x(2) \\ x(2) \\ x(2) \\ x(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.3 \\ -0.0042 \\ 0.0224 \\ -0.0075 \\ 5.00 \cdot 10^{-5} \\ -0.0948 \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

Pendefinisian kondisi ke($k + 1$) ini digunakan sebagai perhitungan estimasi gelombang $\hat{w}(k - 1)$ pada optimasi kompensasi gangguan.

4.2.2 Perhitungan *Constraint* pada Kendali Haluan Kapal

Kendala yang digunakan dalam permasalahan kendali haluan kapal ada dua, yaitu kendala pada variabel keadaan dan kendala pada pengendali. Kendala pada keadaan berupa kecepatan *yaw*, kecepatan *roll*, dan sudut *yaw*. Ketiga keadaan ini diberi batas, karena ketika tidak terbatas maka gerak kapal tidak teratur. Sedangkan untuk kendala pada kendali sistem adalah sudut kemudi (δ'). Nilai-nilai kendala ini diperoleh dari penelitian terdahulu dan bergantung pada jenis kapal yang digunakan.

Dengan menggunakan Persamaan (2.16) dan (2.17), kendala untuk kecepatan sudut *yaw*, kecepatan sudut *roll*, dan besar sudut *yaw* dapat ditulis kembali menjadi

$$\mathbf{F}_1 \hat{\mathbf{x}}(k) \leq \mathbf{f}_1 \quad (4.44)$$

dengan

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}_1 = \begin{bmatrix} 0.006 \frac{L}{U} \\ 0.006 \frac{L}{U} \\ 0.006 \frac{L}{U} \\ 0.006 \frac{L}{U} \\ 0.875 \\ 0.875 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} w' \\ v' \\ r' \\ p' \\ \phi' \\ \psi' \end{bmatrix}$$

\mathbf{F}_1 merupakan matriks pertidaksamaan kendala untuk keadaan

\mathbf{f}_1 merupakan *RHS* pertidaksamaan kendala untuk kendali keadaan

Sedangkan kendala untuk kendali *input* sudut kemudi dapat ditulis kembali menjadi:

$$\mathbf{F}_2 \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{f}_2 \quad (4.45)$$

dengan

$$\mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}_2 = \begin{bmatrix} 0.175 \\ 0.175 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}(k) = \delta'$$

\mathbf{F}_2 merupakan matriks pertidaksamaan kendala untuk kendali

\mathbf{f}_2 merupakan *RHS* pertidaksamaan kendala untuk kendali

Pertidaksamaan (4.44) dan (4.45) digunakan dalam perhitungan nilai optimal perubahan sinyal kendali pada MPC.

4.2.3 Optimasi Kompensasi Gelombang

Optimasi yang digunakan adalah meminimumkan fungsi kompensasi gangguan dan gangguan (gelombang) sehingga didapatkan kompensasi gangguan yang optimal. Tahapan-tahapan yang digunakan agar mendapatkan kompensasi gangguan (Δu) adalah sebagai berikut:

Pendiskritan Gelombang Sinusoidal

Gelombang laut adalah berperan sebagai hambatan pada gaya luar (hidrodinamika) kapal. Persamaan (2.3) disubstitusikan pada Persamaan (4.6) dan (4.11), sehingga didapatkan persamaan gelombang untuk masing-masing keadaan sebagai berikut:

$$\dot{u}'_{wave} = \frac{2gBd_x}{aU^2L^2} \cos \beta Ak \sin(\omega t) \quad (4.46)$$

$$\dot{v}' = Q \left(g e \frac{2gBd_y}{U^2L^2} \sin(\beta) Ak \sin(\omega t) + c e \left(\frac{gB(L^2 - B^2)}{2} \sin(2\beta) Ak \sin(\omega t) + \frac{2gBd_y}{U^2L^2} \sin \beta Ak \sin(\omega t) x'_G \right) \right) \quad (4.47)$$

$$\begin{aligned} \dot{r}' = R \left((-beg + c^2e + d^2g - c^2eg) \frac{gB(L^2 - B^2)}{2} \sin(2\beta) Ak \sin(\omega t) + \right. \\ \left. (-beg + c^2e + d^2g - c^2eg) \frac{2gBd_y}{U^2L^2} \sin(\beta) Ak \sin(\omega t) x'_G - \right. \\ \left. ceg \frac{2gBd_y}{U^2L^2} \sin(\beta) Ak \sin(\omega t) \right) \end{aligned} \quad (4.48)$$

$$\begin{aligned} \dot{p}' = S \left(cde \left(\frac{gB(L^2 - B^2)}{2} \sin(2\beta) Ak \sin(\omega t) + \frac{2gBd_y}{U^2L^2} \sin(\beta) Ak \sin(\omega t) x'_G \right) + \right. \\ \left. deg \frac{2gBd_y}{U^2L^2} \sin(\beta) Ak \sin(\omega t) \right) \end{aligned} \quad (4.49)$$

Dengan mengambil perkalian antara amplitudo gelombang dengan RAO ($Ak = 0.001$), sudut datang gelombang ($\beta = 150^\circ$), dan $\omega = 0.01$ Serta memasukkan nilai-nilai koefisien kapal dari Persamaan 4.36. Karena gelombang mengikuti gaya dan momen hidrodinamika pada kapal, maka bernilai nol untuk variabel keadaan yang lain. Sehingga, didapatkan bentuk gangguan kapal dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} u'_{wave} \\ v'_{wave} \\ r'_{wave} \\ p'_{wave} \\ \phi'_{wave} \\ \psi'_{wave} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.32 \cdot 10^{-4} \\ 1.70 \cdot 10^{-4} \sin(0.1t) + 9.537 \cdot 10^{-6} (\sin(0.1t))^2 \\ -1.416 \cdot 10^{-5} \sin(0.1t) + 1.6 \cdot 10^{-6} (\sin(0.1t))^2 \\ -1.002 \cdot 10^{-4} \sin(0.1t) + 1.789 \cdot 10^{-3} (\sin(0.1t))^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

Meminimumkan Fungsi Gangguan pada Kapal

Perumusan kompensasi gangguan diadaptasi dari (Li, 2012) sebagai berikut:

Meminimumkan fungsi tujuan

$$\| F_1 B \Delta u + F_1 \hat{w}(k-1) \| \quad (4.51)$$

dengan kendala

$$F_1 B \Delta u \leq -F_1 \hat{w}(k-1) - E \quad (4.52)$$

$$F_2 \Delta u \leq f_2 \quad (4.53)$$

$$\hat{w}(k-1) = \mathbf{x}(k) - \mathbf{A}\mathbf{x}(k-1) - \mathbf{B}\mathbf{u}(k-1) \quad (4.54)$$

$$E = \max(\mathbf{F}_1 \epsilon) \quad (4.55)$$

$$\epsilon = \mathbf{w}(k) - \mathbf{w}(k-1) \quad (4.56)$$

dengan $\hat{w}(k-1)$ adalah estimasi gangguan untuk waktu ke- $(k-1)$ dipatkan untuk nilai pada saat $\mathbf{x}(k)$, $\mathbf{x}(k-1)$, $\mathbf{u}(k-1)$ memiliki nilai. dengan ϵ adalah selisih gangguan pada saat ke- k dan $k-1$. Keluaran dari optimasi ini adalah kompensasi

gangguan yang optimal (Δu). Sehingga, optimasi pada MPC dari Persamaan (2.18) dengan kendala pada Persamaan (2.22) dapat ditulis kembali seperti berikut:

$$x(k | k) = x(k) \quad (4.57)$$

$$x(k + j + 1 | k) = Ax(k + j | k) + Bu(k + j | k) \quad (4.58)$$

$$F_1 x(k + j + 1 | k) \leq f_1, \quad j = 0, 1, \dots, N_p - 1 \quad (4.59)$$

$$F_2 u(k | k) \leq f_2 - F_2 \Delta u^* \quad (4.60)$$

$$F_2 u(k + j | k) \leq f_2 \quad j = 1, \dots, N_p - 1 \quad (4.61)$$

Persamaan (4.60) merupakan faktor yang dipengaruhi oleh kompensasi gangguan optimal sebelumnya. Sehingga kendali optimal pada proses ini adalah $u(k) = u^*(k | k) + \Delta u^*$.

4.2.4 Prediksi Kendali Optimal dengan Menggunakan DC-MPC

Pada MPC, nilai optimal dapat dicari dengan menyelesaikan optimasi dalam bentuk *quadratic programming*, yaitu dengan cara: meminimumkan fungsi objektif

$$\mathbf{J} = \mathbf{z}^T \mathbf{H} \mathbf{z} + \mathbf{g}^T \mathbf{z} \quad (4.62)$$

dengan *constraint*

$$\mathbf{P} \mathbf{z} \leq \mathbf{h} \quad (4.63)$$

$$\mathbf{Y} \mathbf{z} = \mathbf{b} \quad (4.64)$$

dimana:

$$\mathbf{z} = [\hat{\mathbf{u}}(k), \hat{\mathbf{x}}(k + 1), \hat{\mathbf{u}}(k + 1), \dots, \hat{\mathbf{u}}(k + N_p - 1), \hat{\mathbf{x}}(k + N_p)]$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Q} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{R} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{R} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{Q} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{F}_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{F}_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{F}_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{F}_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{h} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_2 - \Delta u \mathbf{F}_2 \\ \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{f}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{f}_2 \\ \mathbf{f}_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} -\mathbf{B} & \mathbf{I} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -\mathbf{A} & -\mathbf{B} & \mathbf{I} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\mathbf{A} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mathbf{B} & \mathbf{I} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mathbf{A} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}(k) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Nilai dari matriks \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{F}_1 , \mathbf{F}_2 , vektor \mathbf{f}_1 , \mathbf{f}_2 telah didefinisikan pada sub bab sebelumnya. Matriks \mathbf{I} merupakan matriks identitas berukuran 6×6 , sedangkan matriks \mathbf{Q} dan \mathbf{R} adalah matriks diagonal semi definit positif yang masing-masing merupakan matriks pembobot pada *state* dan kendali. Ukuran dari matriks \mathbf{Q} dan \mathbf{R} disesuaikan dengan jumlah variabel dan jumlah kendalinya. Dalam tesis ini, variabel yang digunakan adalah kecepatan *surge*, kecepatan *sway*, kecepatan sudut *roll*, kecepatan sudut *yaw*, sudut *roll*, sudut *yaw* dan sudut haluan sehingga ukuran dari matriks \mathbf{Q} adalah 6×6 sedangkan yang dikendalikan adalah sudut kemudi sehingga matriks \mathbf{R} berukuran 1×1 . Nilai dari matriks \mathbf{Q} adalah $q_{11} = q_{22} = q_{33} = q_{44} = 1000$ dan $q_{55} = q_{66} = 300$ sedangkan nilai dari matriks \mathbf{R} adalah $r_{11} = 1$. Berdasarkan penelitian sebelumnya (Li, 2012) nilai parameter ini dipilih karena menunjukkan perilaku yang paling baik pada kendali kapal. Sehingga dapat didefinisikan Matriks \mathbf{Q} dan \mathbf{R} berturut-turut adalah

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 300 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 300 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = [1] \quad (4.65)$$

Kemudian hasil dari penyelesaian optimal sistem diatas adalah

$$\hat{\mathbf{u}}^*(k), \hat{\mathbf{u}}^*(k+1), \dots, \hat{\mathbf{u}}^*(k+N_p-1)$$

$$\hat{\mathbf{x}}^*(k+1), \hat{\mathbf{x}}^*(k+2), \dots, \hat{\mathbf{x}}^*(k+N_p)$$

Dengan menerapkan prinsip *receding horizon* pada MPC, yaitu nilai kendali optimal yang digunakan pada sistem merupakan vektor awal dari penyelesaian optimalnya, maka nilai pengendali yang digunakan sebagai masukan Persamaan (4.2.4) adalah $\hat{\mathbf{u}}^*(k)$.

4.2.5 Prediksi Posisi Kendali Gerak Kapal

Setelah mendapatkan nilai kendali optimal yaitu $\hat{\mathbf{u}}(k) = \hat{\mathbf{u}}^*(k)$ dengan $\mathbf{u}(k)$ adalah nilai kendali pada saat ke- k dan $\mathbf{u}^*(k)$ adalah nilai kendali optimal pada saat ke- k , langkah selanjutnya adalah memasukkan nilai tersebut ke dalam Persamaan (4.2.4)

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}(k) + \mathbf{C} \quad (4.66)$$

Berdasarkan algoritma MPC dan memasukkan nilai kendali ke dalam *state* maka diperoleh nilai prediksi *state* pada langkah selanjutnya. Kemudian, nilai dari $\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)$ dimasukkan ke dalam perhitungan optimasi berikutnya secara terus menerus sampai *output* dari sistem telah mengikuti trayektori acuan yang diinginkan.

4.3 Simulasi dan Analisis Penerapan DC-MPC pada kendali kapal

Setelah menganalisis beberapa tahapan dalam menyelesaikan masalah kendali haluan kapal dengan menggunakan MPC pada sub-bab 4.2, kemudian pada sub-bab ini akan dilakukan simulasi posisi kendali haluan kapal dengan menggunakan *software* MATLAB.

Dalam simulasi ini diberikan nilai awal $\bar{\mathbf{x}}(0) = [u', v', r', p', \phi', \psi'] = [5, 15 \text{ m/s}; 0; 0, 001 \text{ rad/s}; 0, 0001 \text{ rad/s}; 0; 0]$ dan $\hat{\mathbf{u}}(0) = 0$. Simulasi dilakukan dengan jumlah N_p dipilih secara random. Tujuan dari penerapan DC-MPC adalah mengendalikan kapal agar semakin stabil, membuat kecepatan *yaw*, kecepatan *roll*, sudut *yaw* dan sudut kemudi kapal berada dalam syarat batas serta mengendalikan sudut kemudi, kecepatan susut *yaw*, kecepatan sudut *roll* dan sudut *yaw* kapal menuju 0° sekalipun dikenai gangguan berupa gelombang laut

Kapal diasumsikan bergerak dengan kecepatan awal *surge* 10 knot. Dengan menggunakan acuan sudut haluan kapal (ψ) dihitung terhadap sumbu x bumi (X_e), sehingga kapal dikendalikan untuk bergerak sejajar dengan sumbu x bumi, atau dengan kata lain sudut haluan mencapai 0° . Setelah sudut haluan mencapai 0° kemudian kapal hanya melakukan gerakan lurus kedepan dengan kecepatan *surge* sebesar 10 knot.

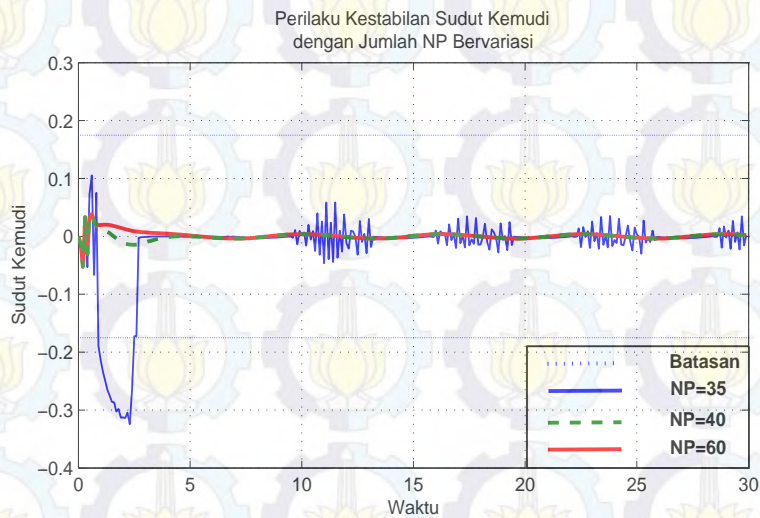
Nilai *prediction horizon* (N_p) yang bervariasi dapat mempengaruhi posisi haluan kapal, sehingga untuk mengetahui seberapa besar pengaruh nilai N_p terhadap haluan kapal akan dilakukan simulasi dengan beberapa variasi nilai N_p sedangkan parameter yang lainnya dibuat tetap. Nilai dari *prediction horizon* dipilih secara acak dengan 23 kali eksekusi program. Waktu simulasi yang digunakan 30 dengan waktu *sampling* $\Delta t = 0, 1$ detik.

Tabel (4.1) menunjukkan perbandingan kestabilan sudut kemudi terhadap nilai prediksi horison yang berbeda-beda. Terlihat bahwa tiap-tiap pemberian N_p yang berbeda memberi dampak kestabilan yang berbeda juga. Pada keadaan $N_p = 25$ sudut kemudi melewati batas bawah toleransi kendala (0.175 rad) yaitu pada detik ke 0.8-1.8 sedangkan pada detik ke-2.2 sudah mulai bergerak didalam kendala yang diberikan. Hal yang sama terjadi untuk perilaku dengan jumlah N_p sebanyak 35. Pada kondisi ini, besar sudut kemudi bergerak stabil dibawah 0.02 rad mendekati referensi yang diberikan pada detik ke 2.8. Sedangkan pada kondisi dengan jumlah N_p sebanyak: 40, 50, 60, 65, dan 72 sudut kemudi selalu bergerak didalam batasan yang diberikan dan bergerak stabil dibawah 0.02 rad mulai detik ke-1.0.

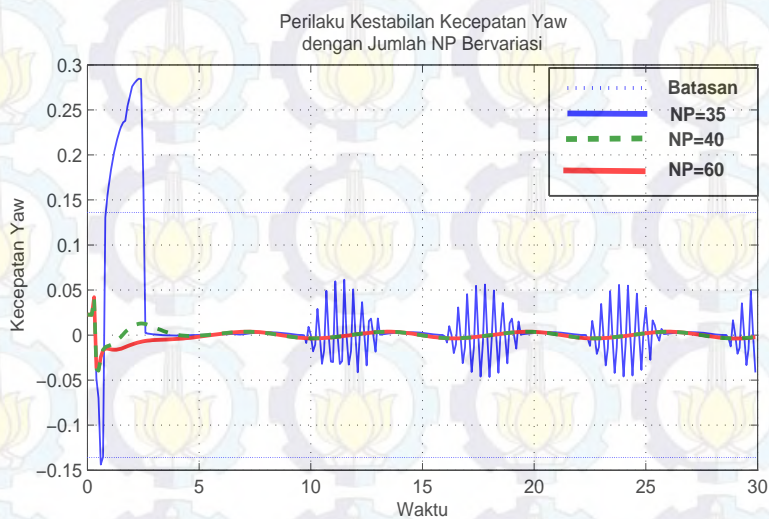
Tabel 4.1: Hasil Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Sudut Kemudi dengan Jumlah N_p Bervariasi

Waktu ke-(dtk)	Jumlah Horizon Prediksi (N_p)=						
	25	35	40	50	60	65	72
0.2	-9.84E-02	-1.46E-02	-1.33E-02	-1.30E-02	-1.30E-02	-1.30E-02	-1.30E-02
0.4	1.01E-01	2.80E-02	3.32E-02	3.31E-02	3.31E-02	3.31E-02	3.31E-02
0.6	-9.96E-02	7.32E-02	3.40E-02	3.36E-02	3.36E-02	3.36E-02	3.36E-02
0.8	-7.14E-01	-6.66E-02	2.59E-02	2.74E-02	2.74E-02	2.74E-02	2.74E-02
1.0	-1.40E+00	-1.89E-01	1.52E-02	1.93E-02	1.95E-02	1.95E-02	1.95E-02
1.2	-1.94E+00	-2.34E-01	1.21E-02	1.98E-02	2.00E-02	2.00E-02	2.00E-02
1.4	-1.43E+00	-2.65E-01	7.78E-03	1.99E-02	2.01E-02	2.01E-02	2.01E-02
1.6	-3.56E-01	-2.86E-01	2.25E-03	1.87E-02	1.89E-02	1.89E-02	1.89E-02
1.8	-2.49E-01	-3.02E-01	-3.40E-03	1.67E-02	1.69E-02	1.69E-02	1.69E-02
2.0	-1.74E-01	-3.13E-01	-8.86E-03	1.44E-02	1.45E-02	1.45E-02	1.45E-02
2.2	-1.21E-01	-3.14E-01	-1.26E-02	1.21E-02	1.23E-02	1.23E-02	1.23E-02
2.4	-8.42E-02	-3.24E-01	-1.42E-02	1.03E-02	1.04E-02	1.04E-02	1.04E-02
2.6	-5.85E-02	-1.72E-01	-1.47E-02	8.83E-03	8.89E-03	8.90E-03	8.90E-03
2.8	-4.05E-02	-2.29E-03	-1.34E-02	7.76E-03	7.80E-03	7.81E-03	7.81E-03
3.0	-2.80E-02	-1.27E-03	-1.12E-02	6.99E-03	7.02E-03	7.02E-03	7.02E-03
3.2	-1.93E-02	-6.42E-04	-9.03E-03	6.43E-03	6.46E-03	6.46E-03	6.46E-03
3.4	-1.32E-02	-2.51E-04	-6.92E-03	6.00E-03	6.02E-03	6.02E-03	6.02E-03
3.6	-9.09E-03	-4.59E-05	-4.90E-03	5.62E-03	5.64E-03	5.64E-03	5.64E-03
3.8	-6.27E-03	2.37E-05	-3.13E-03	5.25E-03	5.26E-03	5.26E-03	5.26E-03
4.0	-4.38E-03	-1.91E-06	-1.73E-03	4.83E-03	4.84E-03	4.84E-03	4.84E-03
4.2	-3.12E-03	-9.13E-05	-6.98E-04	4.36E-03	4.36E-03	4.36E-03	4.37E-03
4.4	-2.32E-03	-2.20E-04	-3.50E-05	3.82E-03	3.83E-03	3.83E-03	3.83E-03
4.6	-1.82E-03	-3.68E-04	3.04E-04	3.22E-03	3.22E-03	3.22E-03	3.22E-03
4.8	-1.52E-03	-5.22E-04	3.74E-04	2.57E-03	2.57E-03	2.57E-03	2.57E-03
5.0	-1.36E-03	-6.70E-04	2.29E-04	1.87E-03	1.87E-03	1.87E-03	1.87E-03

Gambar (4.3) menunjukkan perbandingan sudut kemudi terhadap waktu untuk jumlah N_p yang bervariasi, yaitu: 35, 40 dan 60. Jumlah ini dipilih, karena menunjukkan perbedaan yang cukup kontras. Keadaan sudut kemudi dengan $N_p = 35$ memperlihatkan perilaku tidak stabil ketika diberikan gangguan dan sebelum detik ke-5 sudut kemudi bergerak diluar batas yang diberikan. Hal ini berbeda dengan kondisi $N_p = 40$ dan 60 yang selalu bergerak dalam batasan yang ada. Sudut kemudi mendekati referensi sudut berbeda bergantung pada horison prediksi yang diberikan. Nilai N_p mempengaruhi lama tidaknya berjalan mendekati titik referensi. Ketika jumlah $N_p = 40$ sedikit lebih lama untuk mencapai kondisi stabil (mendekati referensi sudut yang diberikan) yaitu pada waktu ke 4.8. Sedangkan untuk pemberian $N_p = 60$ pada detik ke-3.8. Gangguan yang diberikan, juga relatif tidak berpengaruh pada kestabilan sudut kemudi.



Gambar 4.3: Perilaku Kestabilan Sudut Kemudi dengan Jumlah N_p bervariasi



Gambar 4.4: Perilaku Kestabilan Kecepatan Sudut Yaw dengan N_p bervariasi

Gambar (4.4) menunjukkan perbandingan kecepatan sudut yawing terhadap waktu untuk jumlah N_p bervariasi, yaitu $N_p = 35, 40, \text{ dan } 60$. Untuk kecepatan yawing dengan jumlah N_p sebesar 60, pergerakannya mendekati referensi yang diberikan pada waktu ke-4.9. Selanjutnya, tetap bergerak mendekati referensi sekalipun telah diberi gangguan. Demikian pula dengan N_p 40, bergerak ke arah referensi meskipun sedikit lebih lama dari pada N_p 50 dan 60. Akurasi pendekatan, dapat dilihat pada Tabel (4.2)

Tabel 4.2: Hasil Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Kecepatan Sudut *Yaw* untuk Jumlah N_p Bervariasi

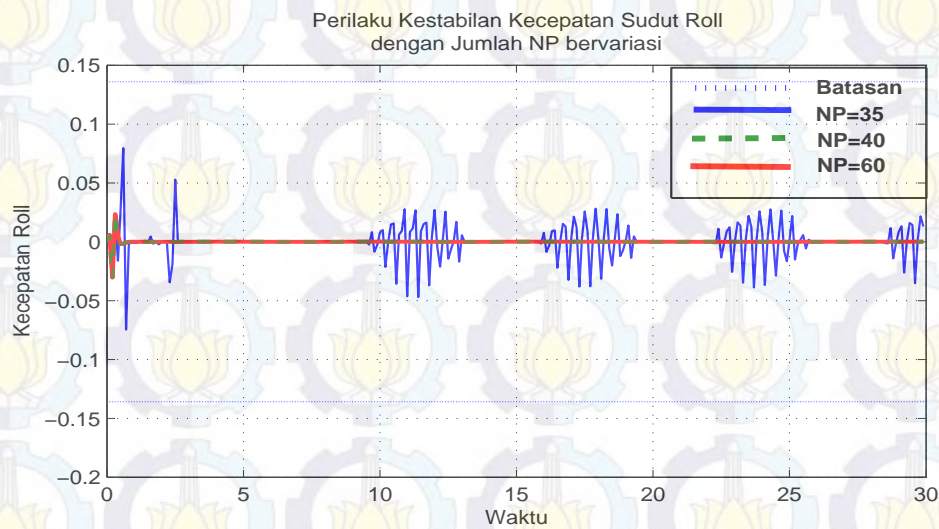
Waktu ke-(dtk)	Jumlah Horizon Prediksi (N_p)						
	25	35	40	50	60	65	72
0.2	9.63E-04	9.97E-04	9.98E-04	9.98E-04	9.98E-04	9.98E-04	9.98E-04
0.4	-8.76E-03	1.65E-03	1.81E-03	1.85E-03	1.85E-03	1.85E-03	1.85E-03
0.6	-2.57E-02	-3.08E-03	-1.74E-03	-1.70E-03	-1.70E-03	-1.70E-03	-1.70E-03
0.8	2.62E-02	-5.95E-03	-7.28E-04	-7.41E-04	-7.44E-04	-7.44E-04	-7.44E-04
1.0	6.48E-02	6.82E-03	-5.44E-04	-6.53E-04	-6.58E-04	-6.59E-04	-6.59E-04
1.2	8.40E-02	8.37E-03	-4.53E-04	-7.01E-04	-7.08E-04	-7.09E-04	-7.09E-04
1.4	3.63E-02	9.41E-03	-3.05E-04	-7.07E-04	-7.14E-04	-7.15E-04	-7.15E-04
1.6	1.26E-02	1.02E-02	-8.72E-05	-6.59E-04	-6.66E-04	-6.66E-04	-6.66E-04
1.8	8.82E-03	1.05E-02	1.52E-04	-5.80E-04	-5.86E-04	-5.86E-04	-5.86E-04
2.0	6.16E-03	1.17E-02	3.54E-04	-4.93E-04	-4.98E-04	-4.98E-04	-4.98E-04
2.2	4.30E-03	1.23E-02	4.82E-04	-4.15E-04	-4.18E-04	-4.19E-04	-4.19E-04
2.4	2.99E-03	1.25E-02	5.51E-04	-3.51E-04	-3.54E-04	-3.54E-04	-3.54E-04
2.6	2.08E-03	7.65E-03	5.61E-04	-3.03E-04	-3.05E-04	-3.06E-04	-3.06E-04
2.8	1.44E-03	7.41E-05	5.03E-04	-2.70E-04	-2.72E-04	-2.72E-04	-2.72E-04
3.0	9.87E-04	4.38E-05	4.10E-04	-2.49E-04	-2.50E-04	-2.50E-04	-2.50E-04
3.2	6.74E-04	1.54E-05	3.27E-04	-2.35E-04	-2.36E-04	-2.37E-04	-2.37E-04
3.4	4.55E-04	-3.46E-06	2.44E-04	-2.26E-04	-2.27E-04	-2.27E-04	-2.27E-04
3.6	3.05E-04	-1.51E-05	1.62E-04	-2.18E-04	-2.19E-04	-2.19E-04	-2.19E-04
3.8	2.01E-04	-2.13E-05	9.31E-05	-2.09E-04	-2.10E-04	-2.10E-04	-2.10E-04
4.0	1.31E-04	-2.32E-05	3.80E-05	-1.98E-04	-1.98E-04	-1.98E-04	-1.98E-04
4.2	8.51E-05	-2.21E-05	-2.24E-06	-1.84E-04	-1.84E-04	-1.84E-04	-1.84E-04
4.4	5.56E-05	-1.85E-05	-2.80E-05	-1.66E-04	-1.66E-04	-1.66E-04	-1.66E-04
4.6	3.78E-05	-1.33E-05	-4.08E-05	-1.45E-04	-1.45E-04	-1.45E-04	-1.45E-04
4.8	2.83E-05	-7.01E-06	-4.28E-05	-1.21E-04	-1.21E-04	-1.21E-04	-1.21E-04
5.0	2.44E-05	8.96E-08	-3.60E-05	-9.48E-05	-9.48E-05	-9.48E-05	-9.48E-05

Tabel (4.2) menunjukkan pengaruh N_p bervariasi terhadap kecepatan sudut *yawing*. Dari tabel dapat diketahui bahwa untuk jumlah N_p sebanyak 25 dan 35 melewati batas yang diberikan, yaitu $|r| \leq .0059$ rad/dtk sampai waktu ke-1.8 (untuk $N_p = 25$) dan pada waktu ke-2.0 (untuk $N_p = 35$). Sedangkan untuk $N_p = 40$ mulai stabil bergerak mendekati referensi pada waktu ke-3.4 dan untuk jumlah N_p sebanyak 50, 60, 65, dan 72 pada waktu ke-2.8.

Tabel 4.3: Hasil Penerapan DC-MPC pada Kecepatan Sudut *Roll* untuk Jumlah N_p Bervariasi

Waktu ke-(dtk)	Nilai Horizon Prediksi (N_p)						
	25	35	40	50	60	65	72
0.2	-3.05E-03	1.96E-04	2.45E-04	2.58E-04	2.58E-04	2.58E-04	2.58E-04
0.4	5.34E-03	8.59E-04	1.05E-03	1.03E-03	1.03E-03	1.03E-03	1.03E-03
0.6	-5.92E-03	1.15E-03	-8.65E-05	-8.89E-05	-8.90E-05	-8.90E-05	-8.90E-05
0.8	-3.56E-04	-3.29E-03	-2.62E-05	-2.92E-05	-2.91E-05	-2.91E-05	-2.91E-05
1.0	-1.05E-03	-3.75E-05	5.05E-06	8.97E-07	1.02E-06	1.02E-06	1.03E-06
1.2	-8.78E-03	-4.06E-05	6.76E-06	4.65E-06	4.73E-06	4.74E-06	4.74E-06
1.4	5.79E-03	-3.59E-05	-1.80E-06	3.51E-06	3.55E-06	3.55E-06	3.55E-06
1.6	1.01E-04	-4.58E-05	-2.24E-06	1.49E-06	1.50E-06	1.50E-06	1.51E-06
1.8	7.09E-05	-7.94E-05	9.68E-07	-5.46E-08	-5.42E-08	-5.42E-08	-5.42E-08
2.0	4.97E-05	-9.96E-05	-1.32E-05	-9.14E-07	-9.21E-07	-9.22E-07	-9.22E-07
2.2	3.48E-05	-5.10E-06	-2.29E-06	-1.23E-06	-1.24E-06	-1.24E-06	-1.24E-06
2.4	2.44E-05	-1.52E-03	-5.70E-06	-1.21E-06	-1.22E-06	-1.22E-06	-1.22E-06
2.6	1.71E-05	2.33E-03	-6.12E-06	-1.01E-06	-1.02E-06	-1.02E-06	-1.02E-06
2.8	1.20E-05	-1.76E-06	1.25E-06	-7.35E-07	-7.44E-07	-7.44E-07	-7.44E-07
3.0	8.47E-06	7.93E-07	-4.49E-08	-4.57E-07	-4.64E-07	-4.64E-07	-4.64E-07
3.2	5.97E-06	6.06E-07	-1.40E-07	-2.11E-07	-2.17E-07	-2.17E-07	-2.17E-07
3.4	4.21E-06	4.64E-07	6.29E-07	-1.55E-08	-1.97E-08	-1.99E-08	-1.99E-08
3.6	2.97E-06	3.55E-07	9.57E-07	1.26E-07	1.23E-07	1.23E-07	1.23E-07
3.8	2.10E-06	2.69E-07	1.09E-06	2.17E-07	2.15E-07	2.14E-07	2.14E-07
4.0	1.48E-06	2.02E-07	1.12E-06	2.65E-07	2.63E-07	2.63E-07	2.63E-07
4.2	1.05E-06	1.50E-07	1.05E-06	2.78E-07	2.77E-07	2.77E-07	2.77E-07
4.4	7.38E-07	1.10E-07	9.16E-07	2.68E-07	2.67E-07	2.67E-07	2.67E-07
4.6	5.20E-07	7.96E-08	7.64E-07	2.42E-07	2.41E-07	2.41E-07	2.41E-07
4.8	3.65E-07	5.60E-08	6.13E-07	2.05E-07	2.05E-07	2.05E-07	2.05E-07
5.0	2.54E-07	3.65E-08	4.74E-07	1.64E-07	1.63E-07	1.63E-07	1.63E-07

Tabel (4.3) menunjukkan pengaruh N_p yang bervariasi terhadap perilaku kecepatan sudut *rolling*. Dari Tabel diketahui bahwa pada N_p 25 sampai detik ke-1.2 kecepatan sudut *rolling* masih berada diluar batas yang ditetapkan dan mulai mendekati sudut referensi pada detik ke-2.8. Sedangkan untuk jumlah N_p sebesar 40 mendekati referensi pada waktu ke-2.8. Sedangkan pada saat jumlah N_p sebanyak 50, 60, 65 dan 72 kecepatan sudut *rolling* stabil menuju referensi pada detik ke-1.6 dan setelah waktu tersebut, tetap berjalan mendekati referensi dengan tingkat kesalahan yang relatif kecil.



Gambar 4.5: Perbandingan Perilaku Kecepatan *Roll* dengan N_p Bervariasi

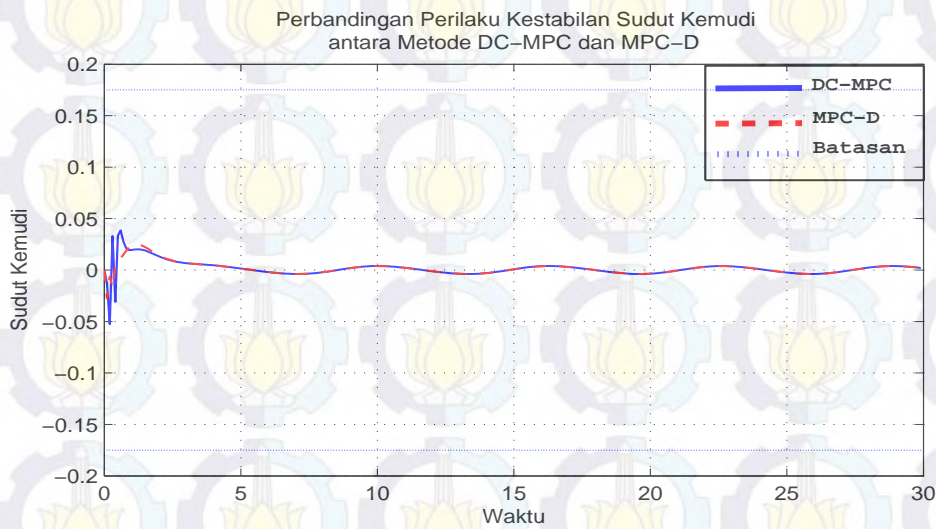
Gambar (4.5) menunjukkan tampilan fisik perbandingan kecepatan sudut *rolling* terhadap waktu untuk nilai N_p 35, 40, dan 60. Dari hasil simulasi terlihat bahwa untuk N_p 60 kecepatan *rolling* mencapai referensi sudut pada waktu ke-1.6 dan kemudian berjalan stabil mendekati nol (referensi sudut). Sedangkan untuk N_p 40, mendekati referensi pada waktu ke-2.8 dan pada rentang 1.6-2.8 memiliki error yang cukup tinggi dengan referensinya. Pada kedua perlakuan ini, perilaku kecepatan sudut *rolling* masih berjalan dalam rentang batas yang diberikan, yaitu $|p| \leq 0.0106$ rad/dtk berbeda dengan pemberian N_p sebanyak 35.

Dari Tabel (4.1)-(4.3) terlihat bahwa nilai N_p yang bervariasi berpengaruh pada pergerakan kapal. Semakin tinggi nilai N_p yang diberikan maka akan semakin cepat mendekati referensi yang diberikan. Sedangkan pemberian N_p 60, 65, 72 memberikan hasil yang sama baik untuk sudut kemudi, kecepatan *yawing*, dan kecepatan *rolling* hal ini menunjukkan bahwa dengan pemberian N_p sebanyak 60 telah dapat membuat sistem stabil dan berjalan mendekati referensi yang diharapkan.

4.3.1 Perbandingan antara DC-MPC dan MPC dengan Gangguan

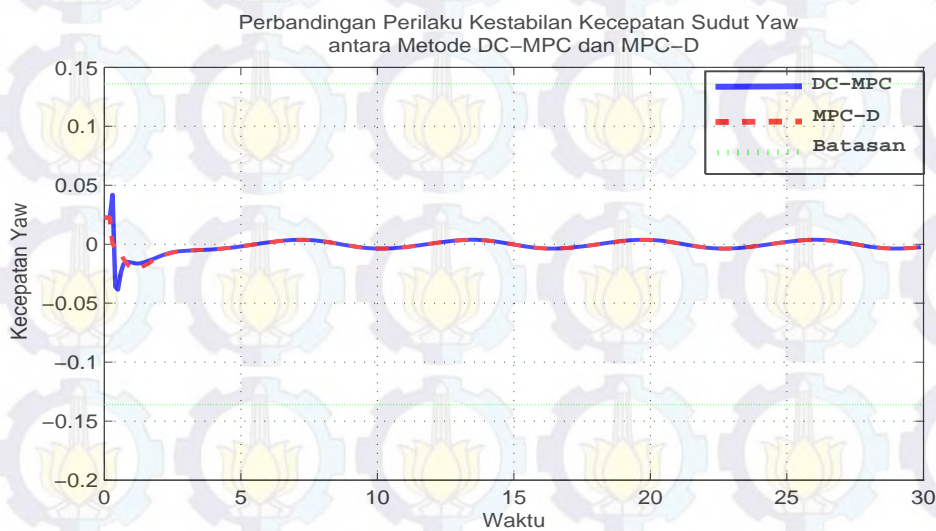
Pada bagian ini, dilakukan perbandingan hasil simulasi dari beberapa Metode selanjutnya dianalisis perbedaan perilaku gerak kapal yang diberi perlakuan (metode) berbeda. Perbandingan dilakukan dengan mengambil N_p sebanyak 60, ini dipilih karena dari hasil percobaan pada N_p tersebut adalah batas minimum tiap-tiap keadaan telah mencapai kondisi optimal. **Lampiran A**

Gangguan yang diberikan pada MPC dengan gangguan dalam simulasi ini adalah yang dihasilkan dalam perhitungan sebelumnya (4.50), gangguan ini diberikan pada sistem. Sedangkan kondisi untuk inialisasi nilai awal, waktu sampling, batasan kendali dan variabel keadaan sama dengan simulai pada DC-MPC sebelumnya. Hasil dari perbandingan ini secara fisik, disajikan pada Gambar (4.6)-(4.8) berikut ini:



Gambar 4.6: Perbandingan Perilaku Sudut Kemudi

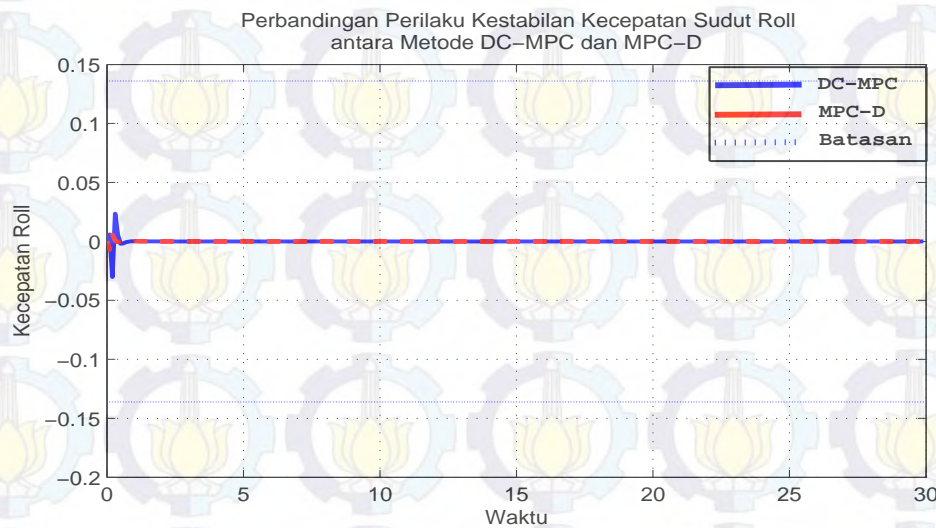
Gambar (4.6) menunjukkan perbandingan sudut kemudi terhadap waktu untuk MPC dengan gangguan pada sistem (MPC-D) dan DC-MPC dengan nilai N_p sebanyak 60. Gambar tersebut menunjukkan bahwa baik metode MPC dengan gangguan ataupun DC-MPC sama-sama mendekati nilai referensi yang diberikan dan memiliki kestabilan yang hampir sama. Namun, untuk metode DC-MPC perilaku sudut kemudi stabil lebih cepat dari pada MPC-D yaitu 1.8 detik.



Gambar 4.7: Perbandingan Perilaku Kecepatan Yaw

Gambar (4.7) menunjukkan perbandingan kecepatan sudut yawing terhadap waktu untuk MPC dengan gangguan (MPC-D) dan DC-MPC dengan nilai N_p 60. Dari gambar terlihat bahwa untuk MPC dengan gangguan dan DC-MPC sama-sama memiliki simpangan terhadap sudut referensinya. Namun, terlihat bahwa DC-MPC memiliki simpangan yang lebih kecil dari pada MPC dengan

gangguan. Kestabilan yang yang dicapai dengan Metode DC-MPC cenderung lebih cepat 2 detik jika dibandingkan dengan MPC-D sekalipun sebelum detik ke-1 DC-MPC memiliki simpangan yang lebih besar jika dibandingkan dengan MPC-D. Selain itu perubahan kecepatan sudut *yawing* relatif lebih stabil dari pada MPC dengan gangguan



Gambar 4.8: Perbandingan Perilaku Kecepatan *Roll*

Gambar (4.8) menunjukkan perilaku kecepatan *roll* dengan penerapan metode yang berbeda. Baik Metode MPC dengan gangguan maupun metode DC-MPC dapat mengendalikan perilaku kecepatan sudut *roll* stabil berada dalam syarat batas yang diberikan. Sedangkan metode DC-MPC dapat mengendalikan perilaku kecepatan sudut *roll* relatif stabil pada referensi yang ada. Dalam hal ini, pengendalian kecepatan sudut *rolling* dengan metode DC-MPC sangat efektif, terlihat dari besar kecepatan sudut yang dihasilkan lebih kecil dari pada MPC-D. Hal ini dapat meminimumkan guncangan pada cargo kapal.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini, diberikan kesimpulan dari hasil analisis pengendali *Model Predictive Control* dan *Disturbance Compensating Model Predictive Control* pada permasalahan kendali manuver kapal dilautan beserta perbandingan antara keduanya. Selain itu, diberikan juga saran untuk penelitian berikutnya.

5.1 Kesimpulan

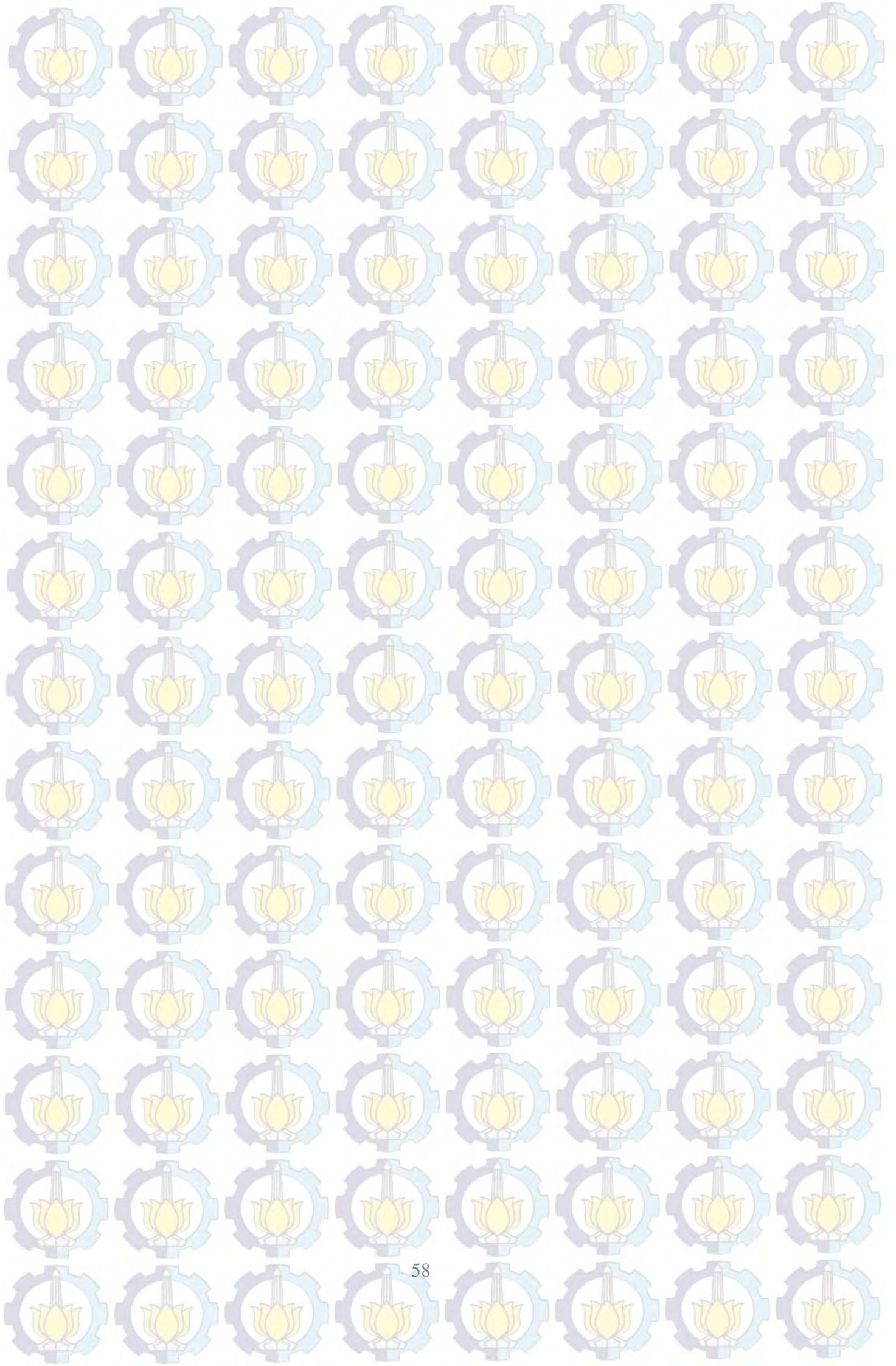
Berdasarkan analisis dari hasil pembahasan perilaku kapal maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode DC-MPC dapat diterapkan dengan baik pada kendali sistem gerak kapal dengan gangguan berupa gelombang laut. Hal ini terlihat dari sistem terkendali secara baik dan berada didalam batasan yang diberikan dengan memberikan N_p yang sesuai. Dari hasil simulasi pada **Kapal Kontainer** (Fossen, 1994) menunjukkan semakin banyak jumlah prediksi horizon yang diberikan dengan batas maksimal N_p sebanyak 60 maka semakin baik perilaku kestabilan sistem. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan DC-MPC dalam meminimumkan *error* teraplikasi dengan baik. Sedangkan pengendalian gangguan yang diberikan dengan adanya kompensasi gangguan juga dapat mengendalikan gangguan pada sistem dan gangguan luar yang diberikan.
2. Analisis hasil perbandingan pengendalian dengan pemberian gelombang antara DC-MPC dan MPC dengan gangguan (MPC-D) memperlihatkan bahwa metode DC-MPC lebih baik dalam mengendalikan gerak kapal, antara lain: 2 detik lebih cepat stabil jika dibandingkan dengan MPC-D sedangkan untuk pengendalian kecepatan *rolling* dari detik pertama sampai detik ke 30 simpangan terhadap referensi rata-rata 10^{-5} rad/dtk lebih baik (lebih kecil) dari MPC-D.

5.2 Saran

Saran yang diberikan penulis untuk penelitian kedepannya adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan bentuk model yang lebih mendekati perilaku real kapal serta mempertimbangkan gangguan lingkungan lain seperti arus air, angin.
2. Dalam penelitian ini, pengendalian dilakukan dengan memberikan kendali berupa sudut kemudi, sehingga pada penelitian selanjutnya dapat menambahkan jumlah kendali.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini, diberikan kesimpulan dari hasil analisis pengendali *Model Predictive Control* dan *Disturbance Compensating Model Predictive Control* pada permasalahan kendali manuver kapal dilautan beserta perbandingan antara keduanya. Selain itu, diberikan juga saran untuk penelitian berikutnya.

5.1 Kesimpulan

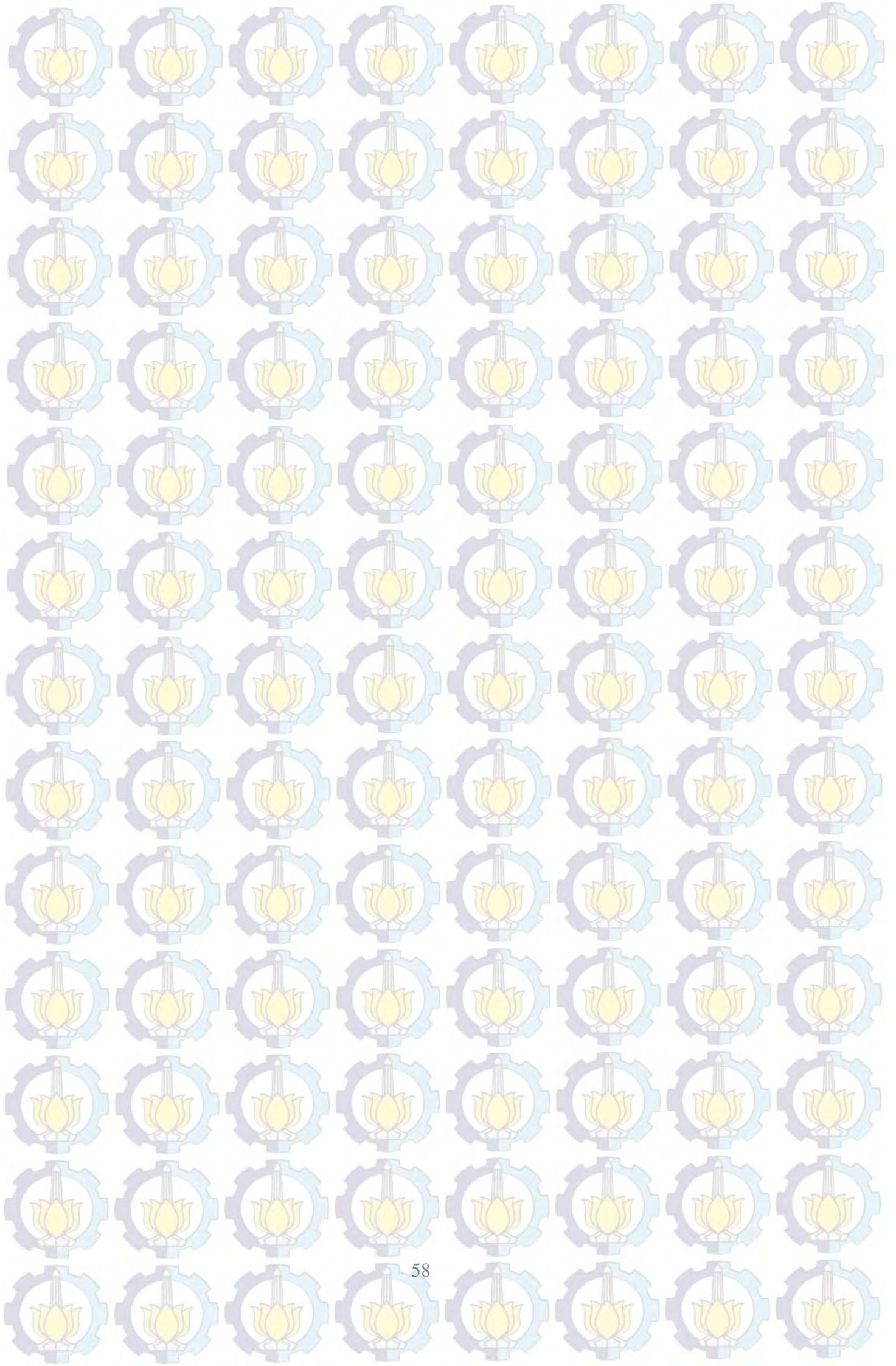
Berdasarkan analisis dari hasil pembahasan perilaku kapal maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode DC-MPC dapat diterapkan dengan baik pada kendali sistem gerak kapal dengan gangguan berupa gelombang laut. Hal ini terlihat dari sistem terkendali secara baik dan berada didalam batasan yang diberikan dengan memberikan N_p yang sesuai. Dari hasil simulasi pada **Kapal Kontainer** (Fossen, 1994) menunjukkan semakin banyak jumlah prediksi horizon yang diberikan dengan batas maksimal N_p sebanyak 60 maka semakin baik perilaku kestabilan sistem. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan DC-MPC dalam meminimumkan *error* teraplikasi dengan baik. Sedangkan pengendalian gangguan yang diberikan dengan adanya kompensasi gangguan juga dapat mengendalikan gangguan pada sistem dan gangguan luar yang diberikan.
2. Analisis hasil perbandingan pengendalian dengan pemberian gelombang antara DC-MPC dan MPC dengan gangguan (MPC-D) memperlihatkan bahwa metode DC-MPC lebih baik dalam mengendalikan gerak kapal, antara lain: 2 detik lebih cepat stabil jika dibandingkan dengan MPC-D sedangkan untuk pengendalian kecepatan *rolling* dari detik pertama sampai detik ke 30 simpangan terhadap referensi rata-rata 10^{-5} rad/dtk lebih baik (lebih kecil) dari MPC-D.

5.2 Saran

Saran yang diberikan penulis untuk penelitian kedepannya adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan bentuk model yang lebih mendekati perilaku real kapal serta mempertimbangkan gangguan lingkungan lain seperti arus air, angin.
2. Dalam penelitian ini, pengendalian dilakukan dengan memberikan kendali berupa sudut kemudi, sehingga pada penelitian selanjutnya dapat menambahkan jumlah kendali.



DAFTAR PUSTAKA

Camacho, E. F. dan Bordons, C. (1999), *Model Predictive Control*, Springer-Verlag London Limited, Sevilla.

Fauziyah (2013), *Aplikasi MPC-KF pada Kendali Haluan Kapal*, Tesis Jurusan Matematika ITS Surabaya, Surabaya.

Fossen, T. I. (1994), *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Willey & Son Ltd, England.

Fossen, T. I. (2005), 'A nonlinear Unified State-Space Model for Ship Maneuvering and Control in a Seaway', *Keynote Lecture at the 5th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference*.

Fraga, R. dan Sheng, L. (2012), 'An Effective State-Space Feedback Autopilot for Ship Motion Control', *Journal of Control Engineering and Technology (JCET)*

Ghaemi, R. e. a. (2006), 'Computationally Efficient Model Predictive Control with Explicit Disturbance Mitigation and Constraint Enforcement', *IEEE Conference on Decision and Control*.

Li, Z. dan Sun, J. (2012), 'Disturbance Compensating Model Predictive Control with Application to Ship Heading Control', *IEEE Transaction on Control System Technology* **20**(01), 257–264.

Li, Z., e. a. (2010), 'Evaluation and Modification of a Robust Path Following Controller for Marine Surface Vessels in Wave Field', *Ship Research* **54**(02), 141–147.

Subiono (2013), *Sistem Linier dan Kontrol Optimal*, Diktat Kuliah Jurusan Matematika ITS, Surabaya.

Syaifuddin, W. (2013), *Penerapan metode MPC pada Kendali Haluan Kapal*, Tugas Akhir Jurusan Matematika ITS Surabaya, Surabaya.

Wang, Y. dan Boyd, S. (2008), Fast Model Predictive Control using Online Optimization, *dalam Proceedings of the 17th World Congress*, International Federation of Automatic Control, 6974–6979.

LAMPIRAN C

Biodata Penulis



Penulis menempuh pendidikan pasca sarjana diusia 23 tahun, tepat setelah menyelesaikan studinya di jurusan yang sama, Matematika pada tahun 2011. Penulis lahir di Sidoarjo pada 23 Maret 1988 dan merupakan anak ke delapan dari 10 bersaudara. Penulis mengambil bidang minat Pemodelan dan Simulasi sejak semester 5 pada kuliah Strata satu dan melanjutkan dibidang yang sama ketika kuliah Magister. Penulis mengambil topik kendali optimal untuk Tugas Akhir dan Tesis. Informasi mengenai Tesis ini dapat disampaikan melalui email penulis: cahyaningtiass@gmail.com

LAMPIRAN A

Data-Data Hasil Simulasi

Tabel 1.1: Perbandingan Hasil Simulasi antara Metode DC-MPC dan MPC-D untuk Jumlah N_p sebanyak 60

Waktu (dtk)	Sudut Kemudi (rad)		Kec. <i>Yaw</i> (rad/dtk)		Kec. <i>Roll</i> (rad/dtk)	
	DC-MPC	MPC-D	DC-MPC	MPC-D	DC-MPC	MPC-D
1	1.95E-02	2.18E-02	-6.58E-04	-8.10E-04	1.02E-06	1.20E-05
2	1.45E-02	1.59E-02	-4.98E-04	-5.48E-04	-9.21E-07	-1.54E-06
3	7.02E-03	7.06E-03	-2.50E-04	-2.52E-04	-4.64E-07	-5.37E-07
4	4.84E-03	4.79E-03	-1.98E-04	-1.97E-04	2.63E-07	2.56E-07
5	1.87E-03	1.89E-03	-9.48E-05	-9.55E-05	1.63E-07	1.69E-07
6	-1.67E-03	-1.61E-03	5.36E-05	5.11E-05	-1.15E-07	-1.05E-07
7	-3.78E-03	-3.71E-03	1.59E-04	1.57E-04	-4.97E-07	-4.87E-07
8	-2.45E-03	-2.44E-03	1.21E-04	1.21E-04	-4.37E-07	-4.40E-07
9	1.51E-03	1.44E-03	-4.40E-05	-4.12E-05	2.00E-07	1.84E-07
10	3.90E-03	3.83E-03	-1.59E-04	-1.57E-04	5.13E-07	5.05E-07
11	2.54E-03	2.53E-03	-1.21E-04	-1.21E-04	2.94E-07	2.98E-07
12	-7.78E-04	-7.23E-04	1.36E-05	1.14E-05	-5.66E-09	3.55E-09
13	-3.48E-03	-3.40E-03	1.41E-04	1.38E-04	-3.98E-07	-3.86E-07
14	-3.22E-03	-3.19E-03	1.49E-04	1.49E-04	-5.33E-07	-5.31E-07
15	3.51E-04	2.96E-04	6.44E-06	8.67E-06	1.03E-08	-4.01E-09
16	3.60E-03	3.52E-03	-1.42E-04	-1.39E-04	4.96E-07	4.84E-07
17	3.24E-03	3.21E-03	-1.46E-04	-1.45E-04	3.77E-07	3.79E-07
18	2.04E-04	2.43E-04	-2.82E-05	-2.99E-05	8.32E-08	9.14E-08
19	-2.92E-03	-2.84E-03	1.12E-04	1.09E-04	-2.82E-07	-2.70E-07
20	-3.69E-03	-3.64E-03	1.64E-04	1.63E-04	-5.64E-07	-5.58E-07
21	-8.40E-04	-8.72E-04	5.64E-05	5.79E-05	-1.87E-07	-1.97E-07
22	2.98E-03	2.90E-03	-1.11E-04	-1.08E-04	4.21E-07	4.06E-07
23	3.72E-03	3.67E-03	-1.61E-04	-1.59E-04	4.51E-07	4.50E-07
24	1.18E-03	1.20E-03	-6.82E-05	-6.93E-05	1.66E-07	1.73E-07
25	-2.17E-03	-2.10E-03	7.59E-05	7.33E-05	-1.65E-07	-1.54E-07
26	-3.84E-03	-3.77E-03	1.65E-04	1.63E-04	-5.33E-07	-5.23E-07
27	-1.94E-03	-1.95E-03	1.01E-04	1.02E-04	-3.61E-07	-3.68E-07
28	2.08E-03	2.00E-03	-6.92E-05	-6.62E-05	2.90E-07	2.73E-07
29	3.92E-03	3.86E-03	-1.63E-04	-1.61E-04	5.02E-07	4.96E-07
30	2.10E-03	2.10E-03	-1.04E-04	-1.04E-04	2.49E-07	2.54E-07

Tabel 1.2: Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Sudut Kemudi untuk Jumlah N_p Bervariasi Mulai detik 1-10

Jumlah N_p	Sudut Kemudi (Rad) pada Waktu ke- (detik)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	1.95E-02	1.45E-02	7.02E-03	4.84E-03	1.87E-03	-1.67E-03	-3.78E-03	-2.45E-03	1.51E-03	3.90E-03
7	-1.32E-03	6.01E-04	1.90E-03	1.50E-03	-1.94E-04	-1.77E-03	-1.70E-03	3.46E-05	1.69E-03	1.79E-03
10	-1.85E+01	1.31E-02	1.70E-03	1.24E-03	-1.95E-04	-1.50E-03	-1.45E-03	6.47E-05	1.49E-03	1.50E-03
12	-1.50E+01	-1.62E-01	-3.01E-03	9.14E-04	-2.50E-04	-1.34E-03	-1.25E-03	1.25E-04	1.38E-03	1.30E-03
15	-1.08E+01	-4.34E-01	-3.30E-02	-1.91E-03	-5.63E-04	-1.22E-03	-1.03E-03	2.32E-04	1.29E-03	1.08E-03
25	-1.40E+00	-1.74E-01	-2.80E-02	-4.38E-03	-1.36E-03	-1.23E-03	-7.55E-04	4.24E-04	1.24E-03	8.08E-04
30	-4.42E-01	-6.09E-02	-1.07E-02	-1.67E-03	-9.57E-04	-1.15E-03	-4.09E-04	-2.89E-03	-1.86E-03	6.89E-03
35	-1.89E-01	-3.13E-01	-1.27E-03	-1.91E-06	-6.70E-04	-1.10E-03	-3.65E-04	-2.90E-03	-1.91E-03	9.38E-03
40	1.52E-02	-8.86E-03	-1.12E-02	-1.73E-03	2.29E-04	-2.01E-03	-3.71E-03	-2.24E-03	1.62E-03	3.79E-03
50	1.93E-02	1.44E-02	6.99E-03	4.83E-03	1.87E-03	-1.67E-03	-3.78E-03	-2.45E-03	1.51E-03	3.90E-03
55	1.95E-02	1.45E-02	7.02E-03	4.84E-03	1.87E-03	-1.67E-03	-3.78E-03	-2.45E-03	1.51E-03	3.90E-03
60	1.95E-02	1.45E-02	7.02E-03	4.84E-03	1.87E-03	-1.67E-03	-3.78E-03	-2.45E-03	1.51E-03	3.90E-03
61	1.95E-02	1.45E-02	7.02E-03	4.84E-03	1.87E-03	-1.67E-03	-3.78E-03	-2.45E-03	1.51E-03	3.90E-03
62	1.95E-02	1.45E-02	7.02E-03	4.84E-03	1.87E-03	-1.67E-03	-3.78E-03	-2.45E-03	1.51E-03	3.90E-03
63	1.95E-02	1.45E-02	7.02E-03	4.84E-03	1.87E-03	-1.67E-03	-3.78E-03	-2.45E-03	1.51E-03	3.90E-03
64	1.95E-02	1.45E-02	7.02E-03	4.84E-03	1.87E-03	-1.67E-03	-3.78E-03	-2.45E-03	1.51E-03	3.90E-03
65	1.95E-02	1.45E-02	7.02E-03	4.84E-03	1.87E-03	-1.67E-03	-3.78E-03	-2.45E-03	1.51E-03	3.90E-03
72	1.95E-02	1.45E-02	7.02E-03	4.84E-03	1.87E-03	-1.67E-03	-3.78E-03	-2.45E-03	1.51E-03	3.90E-03
73	1.95E-02	1.45E-02	7.02E-03	4.84E-03	1.87E-03	-1.67E-03	-3.78E-03	-2.45E-03	1.51E-03	3.90E-03
80	1.95E-02	1.45E-02	7.02E-03	4.84E-03	1.87E-03	-1.67E-03	-3.78E-03	-2.45E-03	1.51E-03	3.90E-03
81	1.95E-02	1.45E-02	7.02E-03	4.84E-03	1.87E-03	-1.67E-03	-3.78E-03	-2.45E-03	1.51E-03	3.90E-03
90	1.95E-02	1.45E-02	7.02E-03	4.84E-03	1.87E-03	-1.67E-03	-3.78E-03	-2.45E-03	1.51E-03	3.90E-03
91	1.95E-02	1.45E-02	7.02E-03	4.84E-03	1.87E-03	-1.67E-03	-3.78E-03	-2.45E-03	1.51E-03	3.90E-03

Tabel 1.3: Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Sudut Kemudi untuk Jumlah N_p Bervariasi Mulai detik 11-20

Jumlah N_p	Sudut Kemudi (Rad) pada Waktu ke- (detik)									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
4	2.54E-03	-7.78E-04	-3.48E-03	-3.22E-03	3.51E-04	3.60E-03	3.24E-03	2.04E-04	-2.92E-03	-3.69E-03
7	3.48E-04	-1.44E-03	-1.93E-03	-5.40E-04	1.34E-03	1.94E-03	8.58E-04	-9.94E-04	-1.99E-03	-1.07E-03
10	2.53E-04	-1.22E-03	-1.64E-03	-4.39E-04	1.20E-03	1.65E-03	6.80E-04	-8.54E-04	-1.69E-03	-9.04E-04
12	1.44E-04	-1.11E-03	-1.44E-03	-3.32E-04	1.14E-03	1.46E-03	5.25E-04	-8.08E-04	-1.49E-03	-7.56E-04
15	-1.40E-05	-1.04E-03	-1.21E-03	-1.77E-04	1.10E-03	1.27E-03	3.26E-04	-8.03E-04	-1.29E-03	-5.62E-04
25	-2.65E-04	-1.02E-03	-9.39E-04	7.05E-05	1.12E-03	1.04E-03	3.85E-05	-8.71E-04	-1.06E-03	-2.80E-04
30	-1.63E-02	-8.49E-03	3.56E-02	-2.48E-03	-2.51E-03	6.36E-03	2.58E-02	-1.54E-02	-8.16E-03	-1.79E-03
35	2.57E-02	3.77E-02	-2.91E-02	-2.57E-03	-2.86E-03	-1.07E-03	-2.01E-02	-1.45E-02	2.26E-02	-1.93E-03
40	2.33E-03	-8.97E-04	-3.41E-03	-3.01E-03	5.09E-04	3.55E-03	3.04E-03	4.43E-05	-2.90E-03	-3.51E-03
50	2.54E-03	-7.78E-04	-3.48E-03	-3.22E-03	3.51E-04	3.60E-03	3.24E-03	2.04E-04	-2.92E-03	-3.69E-03
55	2.54E-03	-7.78E-04	-3.48E-03	-3.22E-03	3.51E-04	3.60E-03	3.24E-03	2.04E-04	-2.92E-03	-3.69E-03
60	2.54E-03	-7.78E-04	-3.48E-03	-3.22E-03	3.51E-04	3.60E-03	3.24E-03	2.04E-04	-2.92E-03	-3.69E-03
61	2.54E-03	-7.78E-04	-3.48E-03	-3.22E-03	3.51E-04	3.60E-03	3.24E-03	2.04E-04	-2.92E-03	-3.69E-03
62	2.54E-03	-7.78E-04	-3.48E-03	-3.22E-03	3.51E-04	3.60E-03	3.24E-03	2.04E-04	-2.92E-03	-3.69E-03
63	2.54E-03	-7.78E-04	-3.48E-03	-3.22E-03	3.51E-04	3.60E-03	3.24E-03	2.04E-04	-2.92E-03	-3.69E-03
64	2.54E-03	-7.78E-04	-3.48E-03	-3.22E-03	3.51E-04	3.60E-03	3.24E-03	2.04E-04	-2.92E-03	-3.69E-03
65	2.54E-03	-7.78E-04	-3.48E-03	-3.22E-03	3.51E-04	3.60E-03	3.24E-03	2.04E-04	-2.92E-03	-3.69E-03
72	2.54E-03	-7.78E-04	-3.48E-03	-3.22E-03	3.51E-04	3.60E-03	3.24E-03	2.04E-04	-2.92E-03	-3.69E-03
73	2.54E-03	-7.78E-04	-3.48E-03	-3.22E-03	3.51E-04	3.60E-03	3.24E-03	2.04E-04	-2.92E-03	-3.69E-03
80	2.54E-03	-7.78E-04	-3.48E-03	-3.22E-03	3.51E-04	3.60E-03	3.24E-03	2.04E-04	-2.92E-03	-3.69E-03
81	2.54E-03	-7.78E-04	-3.48E-03	-3.22E-03	3.51E-04	3.60E-03	3.24E-03	2.04E-04	-2.92E-03	-3.69E-03
90	2.54E-03	-7.78E-04	-3.48E-03	-3.22E-03	3.51E-04	3.60E-03	3.24E-03	2.04E-04	-2.92E-03	-3.69E-03
91	2.54E-03	-7.78E-04	-3.48E-03	-3.22E-03	3.51E-04	3.60E-03	3.24E-03	2.04E-04	-2.92E-03	-3.69E-03

Tabel 1.4: Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Sudut Kemudi untuk Jumlah N_p Bervariasi Mulai detik 21-30

Jumlah N_p	Sudut Kemudi (Rad) pada Waktu ke- (detik)										
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
4	-8.40E-04	2.98E-03	3.72E-03	1.18E-03	-2.17E-03	-3.84E-03	-1.94E-03	2.08E-03	3.92E-03	2.10E-03	
7	8.81E-04	1.96E-03	1.30E-03	-4.81E-04	-1.89E-03	-1.52E-03	3.40E-04	1.82E-03	1.65E-03	6.18E-05	
10	8.03E-04	1.69E-03	1.06E-03	-4.32E-04	-1.60E-03	-1.29E-03	3.32E-04	1.59E-03	1.37E-03	1.55E-05	
12	7.88E-04	1.52E-03	8.75E-04	-4.49E-04	-1.43E-03	-1.11E-03	3.66E-04	1.46E-03	1.17E-03	-6.35E-05	
15	8.11E-04	1.36E-03	6.52E-04	-5.15E-04	-1.26E-03	-8.87E-04	4.45E-04	1.35E-03	9.43E-04	-1.93E-04	
25	9.05E-04	1.20E-03	3.54E-04	-6.68E-04	-1.10E-03	-5.91E-04	6.07E-04	1.25E-03	6.59E-04	-4.16E-04	
30	-2.88E-03	-3.09E-04	-5.27E-04	-1.02E-02	-7.78E-05	-8.90E-04	-2.94E-03	-1.36E-03	-1.13E-02	-1.09E-02	
35	-3.07E-03	-5.91E-04	-2.00E-02	-1.66E-02	1.50E-02	-1.11E-03	-3.19E-03	-1.64E-03	1.70E-02	1.83E-03	
40	-6.45E-04	2.99E-03	3.54E-03	9.91E-04	-2.21E-03	-3.69E-03	-1.73E-03	2.16E-03	3.78E-03	1.89E-03	
50	-8.39E-04	2.98E-03	3.72E-03	1.18E-03	-2.17E-03	-3.84E-03	-1.94E-03	2.08E-03	3.92E-03	2.10E-03	
55	-8.39E-04	2.98E-03	3.72E-03	1.18E-03	-2.17E-03	-3.84E-03	-1.94E-03	2.08E-03	3.92E-03	2.10E-03	
60	-8.40E-04	2.98E-03	3.72E-03	1.18E-03	-2.17E-03	-3.84E-03	-1.94E-03	2.08E-03	3.92E-03	2.10E-03	
61	-8.40E-04	2.98E-03	3.72E-03	1.18E-03	-2.17E-03	-3.84E-03	-1.94E-03	2.08E-03	3.92E-03	2.10E-03	
62	-8.40E-04	2.98E-03	3.72E-03	1.18E-03	-2.17E-03	-3.84E-03	-1.94E-03	2.08E-03	3.92E-03	2.10E-03	
63	-8.40E-04	2.98E-03	3.72E-03	1.18E-03	-2.17E-03	-3.84E-03	-1.94E-03	2.08E-03	3.92E-03	2.10E-03	
64	-8.40E-04	2.98E-03	3.72E-03	1.18E-03	-2.17E-03	-3.84E-03	-1.94E-03	2.08E-03	3.92E-03	2.10E-03	
65	-8.40E-04	2.98E-03	3.72E-03	1.18E-03	-2.17E-03	-3.84E-03	-1.94E-03	2.08E-03	3.92E-03	2.10E-03	
72	-8.40E-04	2.98E-03	3.72E-03	1.18E-03	-2.17E-03	-3.84E-03	-1.94E-03	2.08E-03	3.92E-03	2.10E-03	
73	-8.40E-04	2.98E-03	3.72E-03	1.18E-03	-2.17E-03	-3.84E-03	-1.94E-03	2.08E-03	3.92E-03	2.10E-03	
80	-8.40E-04	2.98E-03	3.72E-03	1.18E-03	-2.17E-03	-3.84E-03	-1.94E-03	2.08E-03	3.92E-03	2.10E-03	
81	-8.40E-04	2.98E-03	3.72E-03	1.18E-03	-2.17E-03	-3.84E-03	-1.94E-03	2.08E-03	3.92E-03	2.10E-03	
90	-8.40E-04	2.98E-03	3.72E-03	1.18E-03	-2.17E-03	-3.84E-03	-1.94E-03	2.08E-03	3.92E-03	2.10E-03	
91	-8.40E-04	2.98E-03	3.72E-03	1.18E-03	-2.17E-03	-3.84E-03	-1.94E-03	2.08E-03	3.92E-03	2.10E-03	

Tabel 1.5: Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Kecepatan Sudut *Roll* untuk Jumlah N_p yang Bervariasi Mulai detik 1-10

Jumlah N_p	Kecepatan Sudut <i>Roll</i> (Rad/dtk) pada Waktu ke- (detik)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	1.02E-06	-9.22E-07	-4.64E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
7	-2.43E-07	9.28E-09	2.08E-07	2.14E-07	6.94E-08	-1.76E-07	-2.75E-07	-7.13E-08	1.72E-07	2.29E-07
10	2.13E-01	-1.95E-05	1.07E-07	-1.76E-07	6.94E-08	-1.38E-07	-2.52E-07	-7.03E-08	1.56E-07	1.91E-07
12	1.35E-01	1.47E-04	4.24E-06	2.63E-07	6.48E-08	-1.15E-07	-2.32E-07	-6.66E-08	1.49E-07	1.68E-07
15	-5.39E-03	2.28E-04	1.82E-05	1.55E-06	1.60E-07	-8.54E-08	-2.06E-07	-5.87E-08	1.43E-07	1.43E-07
25	-1.05E-03	4.97E-05	8.47E-06	1.48E-06	2.54E-07	-3.78E-08	-1.65E-07	-4.07E-08	1.40E-07	1.15E-07
30	1.78E-04	1.75E-05	3.30E-06	6.52E-07	1.18E-07	-5.70E-08	-1.66E-07	-5.49E-07	-3.07E-07	2.95E-04
35	5.05E-06	-1.32E-05	-4.49E-08	1.12E-06	4.74E-07	-5.10E-08	-4.74E-07	-4.08E-07	2.15E-07	4.97E-07
40	8.97E-07	-9.14E-07	-4.57E-07	2.65E-07	1.64E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
50	1.00E-06	-9.20E-07	-4.63E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
55	1.02E-06	-9.21E-07	-4.64E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
60	1.02E-06	-9.21E-07	-4.64E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
61	1.02E-06	-9.21E-07	-4.64E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
62	1.02E-06	-9.22E-07	-4.64E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
63	1.02E-06	-9.22E-07	-4.64E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
64	1.02E-06	-9.22E-07	-4.64E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
65	1.03E-06	-9.22E-07	-4.64E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
72	1.03E-06	-9.22E-07	-4.64E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
72	1.03E-06	-9.22E-07	-4.64E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
73	1.03E-06	-9.22E-07	-4.64E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
80	1.03E-06	-9.22E-07	-4.64E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
81	1.03E-06	-9.22E-07	-4.64E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
90	1.03E-06	-9.22E-07	-4.64E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07
91	1.02E-06	-9.21E-07	-4.64E-07	2.63E-07	1.63E-07	-1.15E-07	-4.97E-07	-4.37E-07	2.00E-07	5.13E-07

Tabel 1.6: Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Kecepatan Sudut *Roll* untuk Jumlah N_p yang Bervariasi Mulai detik 11-20

Jumlah N_p	Kecepatan Sudut <i>Roll</i> (Rad/dtk) pada Waktu ke- (detik)									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
4	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
7	1.25E-07	-1.07E-07	-2.79E-07	-1.49E-07	1.18E-07	2.32E-07	1.69E-07	-3.41E-08	-2.55E-07	-2.16E-07
10	1.10E-07	-7.41E-08	-2.48E-07	-1.44E-07	1.09E-07	1.98E-07	1.42E-07	-1.17E-08	-2.19E-07	-2.04E-07
12	9.35E-08	-5.76E-08	-2.24E-07	-1.37E-07	1.05E-07	1.78E-07	1.19E-07	-4.10E-09	-1.93E-07	-1.92E-07
15	7.07E-08	-4.57E-08	-1.96E-07	-1.24E-07	1.03E-07	1.59E-07	9.14E-08	-2.77E-09	-1.65E-07	-1.74E-07
25	3.65E-08	-4.09E-08	-1.61E-07	-1.01E-07	1.06E-07	1.38E-07	5.40E-08	-1.15E-08	-1.34E-07	-1.45E-07
30	-1.61E-03	1.34E-03	2.12E-04	-4.81E-07	-4.30E-07	2.03E-04	9.34E-06	9.47E-05	-1.79E-05	-3.89E-07
35	2.71E-07	-1.66E-08	-3.93E-07	-5.09E-07	3.14E-08	4.87E-07	3.53E-07	6.84E-08	-2.82E-07	-5.45E-07
40	2.94E-07	-5.67E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
50	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
55	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
60	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
61	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
62	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
63	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
64	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
65	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
72	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
72	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
73	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
80	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
81	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
90	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07
91	2.94E-07	-5.66E-09	-3.98E-07	-5.33E-07	1.03E-08	4.96E-07	3.77E-07	8.32E-08	-2.82E-07	-5.64E-07

Tabel 1.7: Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Kecepatan Sudut *Roll* untuk Jumlah N_p Bervariasi Mulai detik 21-30

Jumlah N_p	Kecepatan Sudut <i>Roll</i> (Rad/dtk) pada Waktu ke- (detik)										
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
4	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
7	5.01E-08	2.20E-07	2.02E-07	3.56E-08	-2.08E-07	-2.61E-07	-2.82E-08	1.93E-07	2.23E-07	9.69E-08	
10	4.54E-08	1.94E-07	1.66E-07	4.38E-08	-1.69E-07	-2.43E-07	-2.91E-08	1.74E-07	1.84E-07	8.96E-08	
12	4.45E-08	1.79E-07	1.40E-07	4.13E-08	-1.44E-07	-2.25E-07	-2.72E-08	1.64E-07	1.59E-07	7.75E-08	
15	4.63E-08	1.65E-07	1.12E-07	3.18E-08	-1.20E-07	-2.02E-07	-2.15E-08	1.55E-07	1.33E-07	5.86E-08	
25	5.45E-08	1.52E-07	7.56E-08	1.07E-08	-9.73E-08	-1.69E-07	-7.73E-09	1.49E-07	1.01E-07	2.79E-08	
30	-5.17E-07	4.87E-06	7.26E-04	-1.67E-03	1.24E-03	-2.51E-07	-5.51E-07	-2.31E-07	-7.15E-04	1.20E-03	
35	-1.61E-07	4.21E-07	4.28E-07	1.48E-07	-1.69E-07	-5.19E-07	-3.34E-07	2.99E-07	4.82E-07	2.27E-07	
40	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
50	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
55	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
60	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
61	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
62	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
63	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
64	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
65	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
72	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
72	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
73	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
80	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
81	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
90	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	
91	-1.87E-07	4.21E-07	4.51E-07	1.66E-07	-1.65E-07	-5.33E-07	-3.61E-07	2.90E-07	5.02E-07	2.49E-07	

Tabel 1.8: Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Kecepatan Sudut *Yaw* untuk Jumlah N_p Bervariasi Mulai detik 1-10

Jumlah N_p	Kecepatan Sudut <i>Yaw</i> (Rad/dtk) pada Waktu ke- (detik)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	-6.59E-04	-4.98E-04	-2.50E-04	-1.98E-04	-9.48E-05	5.36E-05	1.59E-04	1.21E-04	-4.40E-05	-1.59E-04
7	7.63E-05	3.82E-06	-6.92E-05	-7.79E-05	-1.85E-05	6.01E-05	8.52E-05	2.83E-05	-5.33E-05	-8.33E-05
10	6.15E-01	-3.47E-04	-6.17E-05	-6.80E-05	-1.81E-05	5.04E-05	7.58E-05	2.69E-05	-4.61E-05	-7.26E-05
12	7.91E-01	5.28E-03	9.12E-05	-5.67E-05	-1.58E-05	4.49E-05	6.87E-05	2.45E-05	-4.24E-05	-6.53E-05
15	5.23E-01	1.49E-02	1.13E-03	4.10E-05	-4.58E-06	4.06E-05	6.04E-05	2.04E-05	-3.94E-05	-5.73E-05
25	6.48E-02	6.16E-03	9.87E-04	1.31E-04	2.44E-05	4.11E-05	5.05E-05	1.32E-05	-3.77E-05	-4.77E-05
30	1.50E-02	2.34E-03	3.77E-04	3.58E-05	1.02E-05	3.84E-05	3.32E-05	1.33E-04	7.89E-05	3.64E-07
35	6.82E-03	1.17E-02	4.38E-05	-2.32E-05	8.96E-08	3.64E-05	3.17E-05	1.33E-04	8.10E-05	3.63E-07
40	-5.44E-04	3.54E-04	4.10E-04	3.80E-05	-3.60E-05	6.59E-05	1.57E-04	1.13E-04	-4.81E-05	-1.55E-04
50	-6.53E-04	-4.93E-04	-2.49E-04	-1.98E-04	-9.48E-05	5.37E-05	1.59E-04	1.21E-04	-4.40E-05	-1.59E-04
55	-6.57E-04	-4.97E-04	-2.50E-04	-1.98E-04	-9.48E-05	5.36E-05	1.59E-04	1.21E-04	-4.40E-05	-1.59E-04
60	-6.58E-04	-4.98E-04	-2.50E-04	-1.98E-04	-9.48E-05	5.36E-05	1.59E-04	1.21E-04	-4.40E-05	-1.59E-04
61	-6.58E-04	-4.98E-04	-2.50E-04	-1.98E-04	-9.48E-05	5.36E-05	1.59E-04	1.21E-04	-4.40E-05	-1.59E-04
62	-6.59E-04	-4.98E-04	-2.50E-04	-1.98E-04	-9.48E-05	5.36E-05	1.59E-04	1.21E-04	-4.40E-05	-1.59E-04
63	-6.59E-04	-4.98E-04	-2.50E-04	-1.98E-04	-9.48E-05	5.36E-05	1.59E-04	1.21E-04	-4.40E-05	-1.59E-04
64	-6.59E-04	-4.98E-04	-2.50E-04	-1.98E-04	-9.48E-05	5.36E-05	1.59E-04	1.21E-04	-4.40E-05	-1.59E-04
65	-6.59E-04	-4.98E-04	-2.50E-04	-1.98E-04	-9.48E-05	5.36E-05	1.59E-04	1.21E-04	-4.40E-05	-1.59E-04
72	-6.59E-04	-4.98E-04	-2.50E-04	-1.98E-04	-9.48E-05	5.36E-05	1.59E-04	1.21E-04	-4.40E-05	-1.59E-04
73	-6.59E-04	-4.98E-04	-2.50E-04	-1.98E-04	-9.48E-05	5.36E-05	1.59E-04	1.21E-04	-4.40E-05	-1.59E-04
80	-6.59E-04	-4.98E-04	-2.50E-04	-1.98E-04	-9.48E-05	5.36E-05	1.59E-04	1.21E-04	-4.40E-05	-1.59E-04
81	-6.59E-04	-4.98E-04	-2.50E-04	-1.98E-04	-9.48E-05	5.36E-05	1.59E-04	1.21E-04	-4.40E-05	-1.59E-04
90	-6.59E-04	-4.98E-04	-2.50E-04	-1.98E-04	-9.48E-05	5.36E-05	1.59E-04	1.21E-04	-4.40E-05	-1.59E-04
91	-6.59E-04	-4.98E-04	-2.50E-04	-1.98E-04	-9.48E-05	5.36E-05	1.59E-04	1.21E-04	-4.40E-05	-1.59E-04

Tabel 1.9: Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Kecepatan Sudut *Yaw* untuk Jumlah N_p Bervariasi Mulai detik 11-20

Jumlah N_p	Kecepatan Sudut <i>Yaw</i> (Rad/dtk) pada Waktu ke- (detik)										
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
4	-1.21E-04	1.36E-05	1.41E-04	1.49E-04	6.44E-06	-1.42E-04	-1.46E-04	-2.82E-05	1.12E-04	1.64E-04	
7	-4.02E-05	4.02E-05	8.68E-05	5.06E-05	-3.28E-05	-8.25E-05	-5.86E-05	1.75E-05	8.12E-05	6.89E-05	
10	-3.63E-05	3.26E-05	7.62E-05	4.67E-05	-2.78E-05	-7.19E-05	-5.18E-05	1.27E-05	7.02E-05	6.25E-05	
12	-3.21E-05	2.89E-05	6.87E-05	4.26E-05	-2.58E-05	-6.51E-05	-4.59E-05	1.12E-05	6.29E-05	5.70E-05	
15	-2.61E-05	2.64E-05	6.05E-05	3.68E-05	-2.48E-05	-5.80E-05	-3.85E-05	1.13E-05	5.55E-05	4.98E-05	
25	-1.67E-05	2.59E-05	5.07E-05	2.76E-05	-2.58E-05	-5.01E-05	-2.79E-05	1.42E-05	4.76E-05	3.94E-05	
30	-5.16E-04	3.59E-07	9.49E-04	1.18E-04	1.09E-04	-2.29E-06	1.86E-03	-2.19E-03	9.89E-04	9.08E-05	
35	-7.46E-04	3.57E-07	9.83E-04	1.21E-04	1.14E-04	-3.24E-05	1.84E-03	-2.09E-03	9.63E-04	9.41E-05	
40	-1.13E-04	1.81E-05	1.38E-04	1.42E-04	4.55E-07	-1.40E-04	-1.38E-04	-2.23E-05	1.12E-04	1.58E-04	
50	-1.21E-04	1.36E-05	1.41E-04	1.49E-04	6.43E-06	-1.42E-04	-1.46E-04	-2.82E-05	1.12E-04	1.64E-04	
55	-1.21E-04	1.36E-05	1.41E-04	1.49E-04	6.44E-06	-1.42E-04	-1.46E-04	-2.82E-05	1.12E-04	1.64E-04	
60	-1.21E-04	1.36E-05	1.41E-04	1.49E-04	6.44E-06	-1.42E-04	-1.46E-04	-2.82E-05	1.12E-04	1.64E-04	
61	-1.21E-04	1.36E-05	1.41E-04	1.49E-04	6.44E-06	-1.42E-04	-1.46E-04	-2.82E-05	1.12E-04	1.64E-04	
62	-1.21E-04	1.36E-05	1.41E-04	1.49E-04	6.44E-06	-1.42E-04	-1.46E-04	-2.82E-05	1.12E-04	1.64E-04	
63	-1.21E-04	1.36E-05	1.41E-04	1.49E-04	6.44E-06	-1.42E-04	-1.46E-04	-2.82E-05	1.12E-04	1.64E-04	
64	-1.21E-04	1.36E-05	1.41E-04	1.49E-04	6.44E-06	-1.42E-04	-1.46E-04	-2.82E-05	1.12E-04	1.64E-04	
65	-1.21E-04	1.36E-05	1.41E-04	1.49E-04	6.44E-06	-1.42E-04	-1.46E-04	-2.82E-05	1.12E-04	1.64E-04	
72	-1.21E-04	1.36E-05	1.41E-04	1.49E-04	6.44E-06	-1.42E-04	-1.46E-04	-2.82E-05	1.12E-04	1.64E-04	
73	-1.21E-04	1.36E-05	1.41E-04	1.49E-04	6.44E-06	-1.42E-04	-1.46E-04	-2.82E-05	1.12E-04	1.64E-04	
80	-1.21E-04	1.36E-05	1.41E-04	1.49E-04	6.44E-06	-1.42E-04	-1.46E-04	-2.82E-05	1.12E-04	1.64E-04	
81	-1.21E-04	1.36E-05	1.41E-04	1.49E-04	6.44E-06	-1.42E-04	-1.46E-04	-2.82E-05	1.12E-04	1.64E-04	
90	-1.21E-04	1.36E-05	1.41E-04	1.49E-04	6.44E-06	-1.42E-04	-1.46E-04	-2.82E-05	1.12E-04	1.64E-04	
91	-1.21E-04	1.36E-05	1.41E-04	1.49E-04	6.44E-06	-1.42E-04	-1.46E-04	-2.82E-05	1.12E-04	1.64E-04	

Tabel 1.10: Hasil Simulasi Penerapan DC-MPC pada Kestabilan Kecepatan Sudut *Yaw* untuk Jumlah N_p Bervariasi Mulai detik 21-30

Jumlah N_p	Kecepatan Sudut <i>Yaw</i> (Rad/dtk) pada Waktu ke- (detik)										
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
4	5.64E-05	-1.11E-04	-1.61E-04	-6.82E-05	7.59E-05	1.65E-04	1.01E-04	-6.92E-05	-1.63E-04	-1.04E-04	
7	-9.28E-06	-7.55E-05	-7.26E-05	-6.15E-06	6.89E-05	8.13E-05	1.54E-05	-6.24E-05	-8.12E-05	-2.90E-05	
10	-6.74E-06	-6.57E-05	-6.35E-05	-7.59E-06	5.85E-05	7.28E-05	1.54E-05	-5.42E-05	-7.08E-05	-2.69E-05	
12	-6.40E-06	-5.99E-05	-5.66E-05	-6.70E-06	5.22E-05	6.62E-05	1.39E-05	-4.97E-05	-6.35E-05	-2.38E-05	
15	-7.46E-06	-5.42E-05	-4.84E-05	-4.00E-06	4.63E-05	5.81E-05	1.09E-05	-4.57E-05	-5.52E-05	-1.88E-05	
25	-1.12E-05	-4.85E-05	-3.75E-05	1.92E-06	4.09E-05	4.73E-05	4.71E-06	-4.26E-05	-4.49E-05	-1.03E-05	
30	1.28E-04	1.61E-05	5.82E-07	-3.56E-04	8.78E-08	5.38E-05	1.34E-04	5.69E-05	-3.43E-04	6.89E-07	
35	1.35E-04	2.41E-05	1.28E-03	-2.03E-03	1.48E-03	6.19E-05	1.43E-04	6.74E-05	4.47E-07	-5.64E-04	
40	4.92E-05	-1.11E-04	-1.54E-04	-6.12E-05	7.77E-05	1.60E-04	9.31E-05	-7.21E-05	-1.58E-04	-9.65E-05	
50	5.64E-05	-1.11E-04	-1.61E-04	-6.82E-05	7.59E-05	1.65E-04	1.01E-04	-6.92E-05	-1.63E-04	-1.04E-04	
55	5.64E-05	-1.11E-04	-1.61E-04	-6.82E-05	7.59E-05	1.65E-04	1.01E-04	-6.92E-05	-1.63E-04	-1.04E-04	
60	5.64E-05	-1.11E-04	-1.61E-04	-6.82E-05	7.59E-05	1.65E-04	1.01E-04	-6.92E-05	-1.63E-04	-1.04E-04	
61	5.64E-05	-1.11E-04	-1.61E-04	-6.82E-05	7.59E-05	1.65E-04	1.01E-04	-6.92E-05	-1.63E-04	-1.04E-04	
62	5.64E-05	-1.11E-04	-1.61E-04	-6.82E-05	7.59E-05	1.65E-04	1.01E-04	-6.92E-05	-1.63E-04	-1.04E-04	
63	5.64E-05	-1.11E-04	-1.61E-04	-6.82E-05	7.59E-05	1.65E-04	1.01E-04	-6.92E-05	-1.63E-04	-1.04E-04	
64	5.64E-05	-1.11E-04	-1.61E-04	-6.82E-05	7.59E-05	1.65E-04	1.01E-04	-6.92E-05	-1.63E-04	-1.04E-04	
65	5.64E-05	-1.11E-04	-1.61E-04	-6.82E-05	7.59E-05	1.65E-04	1.01E-04	-6.92E-05	-1.63E-04	-1.04E-04	
72	5.64E-05	-1.11E-04	-1.61E-04	-6.82E-05	7.59E-05	1.65E-04	1.01E-04	-6.92E-05	-1.63E-04	-1.04E-04	
73	5.64E-05	-1.11E-04	-1.61E-04	-6.82E-05	7.59E-05	1.65E-04	1.01E-04	-6.92E-05	-1.63E-04	-1.04E-04	
80	5.64E-05	-1.11E-04	-1.61E-04	-6.82E-05	7.59E-05	1.65E-04	1.01E-04	-6.92E-05	-1.63E-04	-1.04E-04	
81	5.64E-05	-1.11E-04	-1.61E-04	-6.82E-05	7.59E-05	1.65E-04	1.01E-04	-6.92E-05	-1.63E-04	-1.04E-04	
90	5.64E-05	-1.11E-04	-1.61E-04	-6.82E-05	7.59E-05	1.65E-04	1.01E-04	-6.92E-05	-1.63E-04	-1.04E-04	
91	5.64E-05	-1.11E-04	-1.61E-04	-6.82E-05	7.59E-05	1.65E-04	1.01E-04	-6.92E-05	-1.63E-04	-1.04E-04	

LAMPIRAN B

Program Simulasi Penerapan DC-MPC

Program Simulasi Penerapan DC-MPC pada Sistem Kendali Kapal

```
%      DEFINISI VARIABEL KEADAAN
%Kecepatan Surge (u) --> x1;
%Kecepatan sway (v) --> x2
%Kecepatan sudur yaw --> x3
%Kecepatan sudut roll --> x4
%Sudut Roll (\phi) --> x5
%Sudut yaw (\psi) --> x6
%      DEFINISI KONTROL INPUT
%Sudut rudder (\delta) --> u

clc
clear all
format long

%FAKTOR NON-DIMENSIONAL%
U=7.71;
L=175;

%MATRIKS A PADA MATRIKS RUANG KEADAAN%
AA=[-0.308149 0 -0.0536275 0 0 0;
    0 -0.00601114 -0.543744 -0.13156 -2.38385 0;
    0 0.0176735 0.006022 -0.00119 12.8332 0;
    0 3.60107 1.51923 -0.3628 -0.819081 0;
    0 0 0 1 0 0;
    0 0 1 0 0 0];

%      MATRIKS B PADA MATRIKS RUANG KEADAAN
BB=[0;-0.441277;0.01826;1.76151;0;0];
AL=eye(6,6)+(0.5*AA); %dikritisasi time sampling 0.5
BL=0.5*BB;

%DEFINISI KENDALA PADA STATE
C=[0 0 1 0 0 0; 0 0 -1 0 0 0; 0 0 0 1 0 0;...
   0 0 0 -1 0 0; 0 0 0 0 0 1; 0 0 0 0 0 -1;]
%batas yaw dari hitung momen yaw. batas yaw rate dan
D=[0.006*L/U;0.006*L/U;0.006*L/U;0.006*L/U;1.75;1.75];

%DEFINISI KENDALA PADA KENDALI
S=[1;-1];
```



```
T=[deg2rad(10);deg2rad(10)];
```

```
%definisikan time sampling (Ts) dan time (t)
```

```
Ts=0.1;
```

```
t=30;
```

```
N=t/Ts;
```

```
time=0:Ts:t-Ts;
```

```
%definisikan Np
```

```
Np=35;
```

```
%definisikan referensi posisi dan kontrol di bawah ini
```

```
%mendefinisikan referensi state
```

```
x1r=15*0.514/U;
```

```
x2r=0*0.514/U;
```

```
x3r=0*U/L;
```

```
x4r=0;
```

```
x5r=0;
```

```
x6r=0;
```

```
xr=[x1r;x2r;x3r;x4r;x5r;x6r];
```

```
%mendefinisikan referensi kontrol (rudder angle)
```

```
ur=zeros(1*Np,1)
```

```
%definisikan posisi awal X di bawah ini
```

```
x1(1)=10*0.514/U; %u
```

```
x2(1)=0*0.514/U; %v
```

```
x3(1)=0.001*L/U; %r
```

```
x4(1)=0.0001; %p
```

```
x5(1)=0; %phi
```

```
x6(1)=0; %psi
```

```
%w(1)=0;
```

```
x1t=[x1(1);x2(1);x3(1);x4(1);x5(1);x6(1)];
```

```
x1u=[x1(1);x2(1);x3(1);x4(1);x5(1);x6(1)];
```

```
%definisikan posisi awal X di bawah ini
```

```
x1(2)=-8.396633483; %u
```

```
x2(2)=-0.004241707; %v
```

```
x3(2)=0.022487787; %r
```

```
x4(2)=-0.007486231; %p
```

```
x5(2)=5.00*10^-5; %phi
```

```
x6(2)=-0.094779645; %psi
```

```
%w(2)=0;
```

```
x1s=[x1(2);x2(2);x3(2);x4(2);x5(2);x6(2)];
```

```
%definisikan posisi awal U di bawah ini
```

```
u1=deg2rad(0);
```

```
ua=[u1];
```



```
u2=-0.028142241
```

```
%definisikan nilai Q dan R
```

```
R=1*eye(1,1)
```

```
Q=[1000 0 0 0 0 0;
```

```
    0 1000 0 0 0 0;
```

```
    0 0 1000 0 0 0;
```

```
    0 0 0 1000 0 0;
```

```
    0 0 0 0 300 0;
```

```
    0 0 0 0 0 300]
```

```
I=1*eye(6,6)
```

```
%definisikan matriks H kumpulan dari meminimumkan
```

```
nul1=zeros(1,6);
```

```
nul2=zeros(6,1);
```

```
K=[R,nul1;nul2,Q];
```

```
H=K;
```

```
for i=2:(Np)
```

```
    p=size(H);
```

```
    H=[H,zeros(p(1),7);zeros(7,p(2)),K];
```

```
end
```

```
matriks_H=H;
```

```
ukuran_H =size(H)
```

```
%definisikan matriks g
```

```
g=zeros(7*Np,1);
```

```
matriks_g=g;
```

```
ukuran_g = size(g)
```

```
%definisikan matriks P
```

```
nul3=zeros(2,6); %
```

```
nul4=zeros(6,1);
```

```
P1=[S nul3;nul4 C];
```

```
size(P1);
```

```
P=P1;
```

```
for i=2:(Np);
```

```
    j=size(P);
```

```
    P=[P,zeros(j(1),7);zeros(8,j(2)),P1];
```

```
end
```

```
matriks_P=P;
```

```
ukuran_P = size(P)
```

```
h=[T;D];
```

```
for i=2:Np
```

```
    h=[h;T;D];
```

```
end
```



```

I=eye(6,6);
Y=zeros(2*Np,7*Np)
X=[-BL,I;zeros(6,1),-AL];
for i=1:(Np-1)
Y((6*i-5):(6*i+6),(7*i-6):(7*i))=X;
end
matriks_Y=Y;
ukuran_Y=size(Y)

```

```

xt=xlt;
ut=ones(Np,1)*u1;
us=ut-ur;
usb(1)=us(1,1);
usbk(1)=usb(1);

x11(1)=xlt(1);
x12(1)=xlt(2);
x13(1)=xlt(3);
x14(1)=xlt(4);
x15(1)=xlt(5);
x16(1)=xlt(6);

global n wkk
for n=2:N
x1(n)=x11(n-1)-x1r;
x2(n)=x12(n-1)-x2r;
x3(n)=x13(n-1)-x3r;
x4(n)=x14(n-1)-x4r;
x5(n)=x15(n-1)-x5r;
x6(n)=x16(n-1)-x6r;
xlt2=[x11(n-1);x12(n-1);x13(n-1);x14(n-1);x15(n-1);x16(n-1)];

wk1(n)=-2.32*10^-4*sin(0.1*n);
wk2(n)=1.70*10^-4*sin(0.1*n)+9.537*10^-6*(sin(0.1*n))^2;
wk3(n)=-1.416*10^-5*sin(0.1*n)+1.6*10^-6*(sin(0.1*n))^2;
wk4(n)=-1.002*10^-4*sin(0.1*n)+1.789*10^-13*(sin(0.1*n));
wk5(n)=0;
wk6(n)=0;
wk=[wk1(n);wk2(n);wk3(n);wk4(n);wk5(n);wk6(n)];

```

```

wkk=xls-AL*xlu-BL*ua;
err=wk-wkk;
E=ones(6,1)*max(C*err);
AF=[C*BB;S];
bb=[-C*wkk-E;T];
l0=0.000006;
options=optimset('Display','notify','TolX',10^-3,'TolFun',10^-4,
'TolCon',10^-3);

```



```

l = fmincon(@sari,l0,AF,bb,[],[],[],[],[],options);

%definisikan matriks h
h(1:2)=T-S*1; %kendala untuk kontrol ke k=1
xt=xlt-xr;
b=zeros(6*Np,1);
b(1:6,1)=AL*xt;
m=zeros(7*Np,1);
ukuran_m=size(m);
options=optimset('largescale','on');
ut=quadprog(H,g,P,h,Y,b,[],[],m,options);
usb(n)=ut(1,1);
%
usbk(n)=usb(n);
usbk(n)=usb(n)+1;

xx2=AL*xt+BL*usbk(n)+wk;
x11(n)=xx2(1);
x12(n)=xx2(2);
x13(n)=xx2(3);
x14(n)=xx2(4);
x15(n)=xx2(5);
x16(n)=xx2(6);
xxd=[xx2(1);xx2(2);xx2(3);xx2(4);xx2(5);xx2(6)];
xls=xxd;
ua=usbk(n);
xlu=xlt2;
xx3=AL*xt+BL*usbk(n)+wk;
l0=1;

end;
#####CEK KETERKONTROLAN
rank([BL AL*BL AL^2*BL AL^3*BL AL^3*BL AL^4*BL AL^5*BL]);
figure(1)
plot(time,x13,'m-',time,0.136,'b-',time,-0.136,'b-'),xlabel('Waktu'),
ylabel('Kecepatan Yaw')
legend('60')
grid on
figure(2)
plot(time,x14,'m-',time,0.136,'b-',time,-0.136,'b-'),xlabel('Waktu'),
ylabel('Kecepatan Roll')
legend('60')
grid on
figure(4)
plot(time,usbk,'b-',time, 0.175,'b-',time,-0.175,'b-'),xlabel('Waktu'),
ylabel('Sudut Kemudi')
legend('60')
grid on
figure(6)

```



```

plot(time,x12,'r-',time,0),xlabel('Waktu'),ylabel('Kecepatan Sway')
legend('60')
grid on
figure(7)
plot(time,x15,'r-',time,0),xlabel('Waktu'),ylabel('Sudut Roll')
legend('60')
grid on
figure(8)
plot(time,x16,'r-',time,1.75,'b-',time,-1.75,'b-'),xlabel('Waktu'),
ylabel('Sudut Yaw')
legend('60')
grid on

```

Fungsi fmincon

```

function fo=sari(1)
global wkk
fo=(2*(0.01826*1+wkk(3))^2+2*(1.76151*1+wkk(4))^2+2*(wkk(6))^2)^(1/2);
% fs=(2*(0.01826*1(1)+1(4))^2+2*(1.76151*1(1)+1(4))^2+2*(1(7))^2);

```