



**TUGAS AKHIR - KM184801**

**KENDALI GERAK KAPAL PERANG PADA MISI  
PENEMBAKAN MISIL MENGGUNAKAN NONLINEAR  
MODEL PREDICTIVE CONTROL (NMPC)**

**TRI WAHYU AGUS SETIORINI  
0611164000041**

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

Departemen Matematika  
Fakultas Sains dan Analitika Data  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019



**TUGAS AKHIR – KM184801**

**KENDALI GERAK KAPAL PERANG PADA MISI  
PENEMBAKAN MISIL MENGGUNAKAN  
*NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL*  
(NMPC)**

**TRI WAHYU AGUS SETIORINI  
0611164000041**

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

DEPARTEMEN MATEMATIKA  
Fakultas Sains dan Analitika Data  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





FINAL PROJECT – KM184801

***WARSHIP MOTION CONTROL IN MISSILE  
FIRING MISSION USING NONLINEAR MODEL  
PREDICTIVE CONTROL (NMPC)***

**TRI WAHYU AGUS SETIORINI  
O611164000041**

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

DEPARTEMENT OF MATHEMATICS  
Faculty of Science and Data Analytical  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2020



## LEMBAR PENGESAHAN

### KENDALI GERAK KAPAL PERANG PADA MISI PENEMBAKAN MISIL MENGGUNAKAN *NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL (NMPC)*

### *WARSHIP MOTION CONTROL IN MISSILE FIRING MISSION USING NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL (NMPC)*

#### TUGAS AKHIR

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

Oleh :

TRI WAHYU AGUS SETIORINI  
NRP. 0611164000041

Menyetujui,

Dosen Pembimbing II,



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

NIP. 19870728 201404 2 001

Dosen Pembimbing I,



Subchan, Ph.D

NIP. 19710513 199702 1 001

Mengetahui,

Kepala Departemen Matematika  
FSAD ITS



Subchan, Ph.D

NIP. 19710513 199702 1 001

Surabaya, Juni 2020



**KENDALI GERAK KAPAL PERANG PADA MISI  
PENEMBAKAN MISIL MENGGUNAKAN  
NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL  
(NMPC)**

Nama Mahasiswa : Tri Wahyu Agus Setiorini  
NRP : 0611164000041  
Departemen : Matematika  
Pembimbing : 1. Subchan, Ph.D  
2. Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si

**ABSTRAK**

Pada saat sebuah kapal perang menembakkan misil, maka akan berimbas pada timbulnya suatu gaya aksi reaksi. Hal tersebut akan mempengaruhi manuver kapal. Oleh karena itu, dibutuhkan kendali yang dapat memperbaiki error manuver gerak kapal akibat gangguan yang mungkin terjadi. Pada penelitian ini, akan dikaji model nonlinear arah gerak kapal. Model dinamik manuver kapal yang digunakan berdasarkan tiga derajat kebebasan kapal yaitu *sway*, *yaw*, dan *roll*. Selanjutnya, model didiskritkan dengan metode Runge-Kutta Orde 4. Selanjutnya, digunakan *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC) untuk mendapatkan kendali optimal sudut *rudder* kapal. Kendali diterapkan pada sistem agar kapal stabil dan bergerak sesuai sudut hadap kapal yang diinginkan. NMPC merupakan pengembangan dari *Model Predictive Control* (MPC). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa NMPC dapat menggiring sudut *heading* kapal menuju sudut referensi yang diinginkan.

**Kata kunci :** *Nonlinear Model Predictive Control*, Model arah gerak kapal, Penembakan misil, Runge-Kutta Orde 4

# WARSHIP MOTION CONTROL IN MISSILE FIRING MISSION USING NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL (NMPC)

Name : Tri Wahyu Agus Setiorini  
NRP : 06111640000041  
Department : Matematika  
Supervisors : 1. Subchan, Ph.D  
2. Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si

## ABSTRACT

When a warship fires a missile, it will create an action-reaction force. It will affect the maneuver of the ship. Therefore, it needs a control that can fix the error ship movement due to possibly disturbances. In this research, nonlinear model of ship movements will be defined. The dynamic model of ship maneuver used based on 3 degree of freedom which are sway, yaw, dan roll. Next, the model is discretized by Runge-Kutta 4<sup>th</sup> Order. Then, *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC) is used to get the optimal control of rudder angle of the ship. The control will be applied to the system so the ship can be stable and move as the expected reference angle. The NMPC method is the development of *Model Predictive Control* (MPC). The result shows that NMPC method can lead heading angle of the ship to the expected reference.

**Keywords** : Ship movement model, Missile Firing, Nonlinear Model Predictive Control, Runge-Kutta 4<sup>th</sup> Order.



## **KATA PENGANTAR**

Segala puji dan syukur penulis curahkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul

### **KENDALI GERAK KAPAL PERANG PADA MISI PENEMBAKAN MISIL MENGGUNAKAN *NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL* (NMPC)**

Tugas akhir ini sebagai salah satu syarat kelulusan Program Sarjana Matematika, Fakultas Matematika, Komputasi, dan Sains Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik berkat dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng. selaku Rektor Institut Teknologi Sepuluh Nopember periode 2019-2024.
2. Bapak Subchan, Ph.D selaku Kepala Departemen Matematika ITS dan Ibu Dr. Dwi Ratna Sulistyaningrum, MT selaku Sekretaris Departemen Matematika ITS
3. Bapak Subchan, Ph.D dan Ibu Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si selaku dosen pembimbing atas segala arahan dan motivasi yang diberikan selama pengerjaan tugas akhir ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik.

4. Bapak Dr. Chairul Imron, MI.Komp, Bapak Drs. Lukman Hanafi, M.Sc, dan Bapak Sadjidon, M.Si selaku dosen penguji atas segala saran membangun yang diberikan demi perbaikan tugas akhir ini.
5. Bapak Drs. Nurul Hidayat, M.Kom selaku dosen wali dan Bapak Dr. Drs. Soehardjoepri, M.Si. selaku mantan dosen wali yang telah memberikan arahan akademik selama masa perkuliahan penulis.
6. Bapak dan Ibu Dosen Departemen Matematika ITS yang telah membagikan ilmunya selama masa perkuliahan penulis.
7. Staf Departemen Matematika ITS yang telah membantu dalam penyelenggaraan fasilitas selama perkuliahan penulis.
8. Teman-teman Matematika ITS 2016 yang selalu saling memotivasi dan mendoakan satu sama lain.
9. Semua pihak yang tidak dapat penulis tuliskan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih terdapat kekurangan sehingga penulis menerima kritik dan saran yang diberikan. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pihak yang membutuhkan.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

|                                                                                       |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| LEMBAR PENGESAHAN .....                                                               | i    |
| ABSTRAK .....                                                                         | iii  |
| ABSTRACT .....                                                                        | v    |
| KATA PENGANTAR.....                                                                   | vii  |
| DAFTAR ISI.....                                                                       | ix   |
| DAFTAR TABEL .....                                                                    | xi   |
| DAFTAR GAMBAR.....                                                                    | xiii |
| BAB I PENDAHULUAN .....                                                               | 1    |
| 1.1 Latar Belakang .....                                                              | 1    |
| 1.2 Rumusan Masalah .....                                                             | 3    |
| 1.3 Batasan Masalah.....                                                              | 3    |
| 1.4 Tujuan.....                                                                       | 4    |
| 1.5 Manfaat.....                                                                      | 4    |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....                                                         | 5    |
| 2.1 Penelitian Terdahulu.....                                                         | 5    |
| 2.2 Model Matematika Kapal 3 Derajat Kebebasan.....                                   | 7    |
| 2.3 Kendali <i>Augmented Proportional Navigation</i> (APN)<br>untuk Gerak Kapal ..... | 12   |
| 2.4 Metode Runge Kutta Orde 4.....                                                    | 14   |
| 2.5 <i>Model Predictive Control</i> (MPC).....                                        | 15   |
| 2.6 <i>Nonlinear Model Predictive Control</i> (NMPC).....                             | 18   |
| 2.7 <i>Mean Absolute Error</i> (MAE) .....                                            | 20   |
| BAB III METODE PENELITIAN .....                                                       | 21   |
| 3.1 Studi Literatur.....                                                              | 21   |
| 3.2 Pengkajian Gaya dan Momen Gaya Impact Misil....                                   | 21   |
| 3.2.1 Gaya Impact Misil.....                                                          | 21   |

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.2 Momen Gaya Impact Misil .....                                                          | 21 |
| 3.3 Pengkajian Model <i>Nonlinear</i> Kapal 3 derajat<br>kebebasan beserta gangguannya ..... | 22 |
| 3.3.1 Perhitungan Gangguan.....                                                              | 22 |
| 3.3.2 Pendefinisian Model Kapal dengan Gangguan                                              | 22 |
| 3.4 Desain dan Simulasi NMPC .....                                                           | 22 |
| 3.5 Analisis dan Penarikan Kesimpulan Hasil Simulasi.                                        | 23 |
| BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN .....                                                         | 25 |
| 4.1 Model Nonlinear Kapal .....                                                              | 25 |
| 4.2 Pendiskritan Model.....                                                                  | 29 |
| 4.3 Pengkajian Gaya dan Momen Gaya Impact<br>Penembakan Misil.....                           | 31 |
| 4.4 Desain Kendali NMPC.....                                                                 | 39 |
| 4.5 Perhitungan Gangguan .....                                                               | 45 |
| 4.6 Hasil Simulasi.....                                                                      | 47 |
| BAB V PENUTUP .....                                                                          | 65 |
| 5.1 Kesimpulan.....                                                                          | 65 |
| 5.2 Saran.....                                                                               | 65 |
| DAFTAR PUSTAKA.....                                                                          | 67 |
| LAMPIRAN .....                                                                               | 71 |

## DAFTAR TABEL

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2.1 Notasi untuk kendaraan laut .....                                 | 8  |
| Tabel 4.1 Perbandingan nilai MAE dengan variasi bobot $Q$ dan<br>$Np$ ..... | 48 |



## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2.1 Earth fixed dan Body Fixed kapal 6 DOF .....                                          | 7  |
| Gambar 2.2 Ilustrasi 2D misil-target .....                                                       | 13 |
| Gambar 2.3 Strukur Dasar MPC .....                                                               | 23 |
| Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian.....                                                            | 21 |
| Gambar 4.1 Ilustrasi 2D kapal setelah penembakan misil tampak<br>atas .....                      | 32 |
| Gambar 4.2 Ilustrasi 2D kapal setelah penembakan misil pada<br>bidang- $xz$ .....                | 33 |
| Gambar 4.3 Ilustrasi 2D arah penembakan misil pada bidang- $xz$<br>searah surge kapal .....      | 35 |
| Gambar 4.4 Ilustrasi 2D arah penembakan misil pada bidang- $xz$<br>searah sway kapal .....       | 36 |
| Gambar 4.5 Ilustrasi 2D arah penembakan misil pada bidang- $xz$<br>searah heave kapal .....      | 37 |
| Gambar 4.6 Kecepatan $yaw$ sistem tanpa gangguan dengan waktu<br>sampling 0.5 dan $t=1000$ ..... | 49 |
| Gambar 4.7 Sudut $rudder$ sistem tanpa gangguan dengan waktu<br>sampling 0.5 dan $t=1000$ .....  | 50 |
| Gambar 4.8 Sudut hadap sistem tanpa gangguan dengan waktu<br>sampling 0.5 dan $t=1000$ .....     | 50 |
| Gambar 4.9 Kecepatan $yaw$ skenario 1 dengan waktu sampling 0.5<br>dan $t=1000$ .....            | 52 |
| Gambar 4.10 Sudut $rudder$ skenario 1 dengan waktu sampling 0.5<br>dan $t=1000$ .....            | 53 |
| Gambar 4.11 Sudut hadap skenario 1 dengan waktu sampling 0.5<br>dan $t=1000$ .....               | 54 |
| Gambar 4.12 Sudut hadap skenario 2 dengan waktu sampling 0.5<br>dan $t=1000$ .....               | 56 |

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 4.13 Kecepatan <i>yaw</i> skenario 2 dengan waktu sampling<br>0.5 dan t=1000 .....                      | 57 |
| Gambar 4.14 Sudut <i>rudder</i> skenario 2 dengan waktu sampling 0.5<br>dan t=1000 .....                       | 58 |
| Gambar 4.15 Sudut hadap skenario 3 dengan waktu sampling 0.5<br>dan t=1000 .....                               | 59 |
| Gambar 4.15a Perbesaran gambar sudut hadap dengan $\delta = 20^\circ$ ,<br>waktu sampling 0.5 dan t=1000 ..... | 60 |
| Gambar 4.16 Kecepatan <i>yaw</i> skenario 3 dengan waktu sampling<br>0.5 dan t=1000 .....                      | 61 |
| Gambar 4.16a Perbesaran gambar kecepatan <i>yaw</i> dengan waktu<br>sampling 0.5 dan t=1000 .....              | 62 |
| Gambar 4.17 Sudut Rudder skenario 3 dengan waktu sampling<br>0.5 dan t=1000 .....                              | 63 |

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

Pada bab ini, dipaparkan latar belakang permasalahan yang diangkat dalam Tugas Akhir ini. Selanjutnya, permasalahan tersebut diringkas dalam rumusan masalah beserta batasan masalah. Kemudian, dijelaskan tujuan yang sesuai dengan rumusan masalah yang diangkat beserta manfaatnya.

### **1.1 Latar Belakang Masalah**

Poros maritim dunia adalah visi Indonesia untuk menjadi sebuah negara maritim yang berdaulat, maju, mandiri, kuat, serta mampu memberikan kontribusi positif bagi keamanan dan perdamaian kawasan dan dunia sesuai dengan kepentingan nasional [1]. Salah satu jalan yang dapat ditempuh untuk mencapai cita-cita tersebut yaitu modernisasi pada setiap aspek kemaritiman melalui pengembangan IPTEK atau penelitian yang berkaitan. Pada era ini, penelitian dibidang kemaritiman telah banyak dilakukan salah satunya adalah penelitian pada kendali kapal perang. Kapal perang merupakan instrumen penunjang yang berguna untuk menjaga keamanan di wilayah perairan Indonesia mengingat banyaknya permasalahan di wilayah maritim Indonesia contohnya sengketa wilayah perairan yang terjadi khususnya di wilayah perbatasan negara [2].

Sebuah kapal perang umumnya dipersenjatai dengan penembak misil untuk melengkapi dan mengoptimalkan fungsinya sebagai kapal perang. Pada saat sebuah kapal perang menembakkan misil, maka berimbas pada timbulnya suatu gaya aksi reaksi. Kapal tersebut akan otomatis bergerak menolak berlawanan arah dengan arah tembakan misil. Hal tersebut mempengaruhi manuver kapal. Oleh karena itu, dibutuhkan kendali yang dapat memperbaiki error manuver gerak kapal akibat gangguan yang mungkin terjadi agar kapal bergerak stabil sesuai arah yang dikehendaki. Penelitian-penelitian terkait kendali kapal telah banyak dilakukan. Metode yang umum digunakan

adalah metode *Model Predictive Control* (MPC) dan pengembangannya. Penggunaan metode ini disesuaikan dengan permasalahan yang diselesaikan.

Penelitian-penelitian terkait kendali gerak kapal diantaranya adalah penelitian oleh Dian K, dkk mengenai kendali arah gerak kapal dengan menggunakan MPC untuk melacak lintasan dubins dan penghindaran tabrakan [3]. Selanjutnya yaitu penelitian oleh Subchan, dkk tentang penerapan DC-MPC pada kendali gerak kapal dengan misi penembakan misil dengan mempertimbangkan 2 derajat kebebasan yaitu *sway* dan *yaw* [4]. DC-MPC adalah pengembangan dari metode MPC. Masih berhubungan dengan kendali kapal perang saat penembakan, telah dilakukan penelitian oleh Heri P tentang penerapan DC-MPC pada kendali gerak kapal dengan misi penembakan misil. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian oleh Subchan, dkk adalah adanya penambahan derajat kebebasan yang mempengaruhi gerak kapal. Pada penelitian ini, terdapat 3 derajat kebebasan yang dipertimbangkan yaitu *sway*, *yaw*, dan *roll* [5].

Dilihat dari sisi model gerak kapal, model 6 derajat kebebasan pada kapal pada dasarnya adalah model *nonlinear* [6]. Penggunaan strategi kendali seperti MPC dan DC-MPC untuk model *nonlinear* membutuhkan pelinearan terlebih dahulu. Pada kenyataannya, telah terdapat strategi kendali yang dapat diterapkan pada model *nonlinear* tanpa harus dilakukan pelinearan model. Strategi kendali yang dimaksud adalah *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC). Telah terdapat beberapa penelitian terkait kendali kendaraan laut dengan menggunakan NMPC. Penelitian tersebut diantaranya adalah penelitian oleh Mohamed Abdelaal, dkk mengenai penerapan NMPC pada pelacakan lintasan dan penghindaran tabrakan dengan memperhatikan 2 derajat kebebasan yaitu *surge* dan *yaw*[7]. Selanjutnya terdapat penelitian yang dilakukan oleh Anindya D.R. mengenai pengaplikasian NMPC pada simulasi dan desain gerak kendali kedalaman kapal selam MARES AUV [8]. Oleh karena itu, berdasarkan permasalahan dan penelitian

terdahulu yang telah dipaparkan, maka pada penelitian ini diusulkan penyelesaian permasalahan terkait tentang kendali gerak kapal pada saat menembakkan misil dengan menggunakan NMPC dengan mempertimbangkan 3 derajat kebebasan yaitu *sway*, *yaw*, dan *roll*.

NMPC adalah pengembangan dari metode MPC. NMPC merupakan teknik kendali yang mampu mengatasi permasalahan kendali dengan *multivariable constraint* [9]. Dalam penggunaannya metode NMPC digunakan untuk model yang *nonlinear*. kelebihan NMPC dibandingkan dengan strategi kendali yang lain terletak pada implementasi metodenya yang mana tidak membutuhkan pelinearan model terlebih dahulu karena metode ini memang dikhususkan untuk permasalahan nonlinear [8].

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, rumusan masalah yang akan diselesaikan pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana desain *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC) untuk gerak kapal perang saat penembakan misil?
2. Bagaimana analisis hasil simulasi penerapan *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC) untuk gerak kapal perang saat penembakan misil?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang akan digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Model manuver kapal yang digunakan adalah model yang mempertimbangkan 3 DOF yaitu *sway*, *yaw*, dan *roll* dengan variabel kendali adalah *rudder*.
2. Data parameter hidrodinamika kapal berdasarkan pada penelitian sebelumnya [5].
3. Gangguan yang dipertimbangkan adalah gangguan gaya yang timbul akibat penembakan misil.

4. Sudut tembak misil dan sudut hadap launcher misil relatif terhadap surge kapal berturut-turut adalah  $45^\circ$  dan  $30^\circ$

#### **1.4 Tujuan**

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah

1. Mendesain *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC) untuk gerak kapal perang saat penembakan misil
2. Menganalisis hasil simulasi penerapan *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC) untuk gerak kapal perang saat penembakan misil

#### **1.5 Manfaat**

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah

1. Memberikan metode alternatif pada kendali gerak kapal dalam misi penembakan misil.
2. Memberikan kontribusi dalam pengembangan penelitian kendali gerak kapal dalam misi penembakan misil

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini, dipaparkan literatur-literatur terkait permasalahan Tugas Akhir ini. Diantaranya adalah penelitian terdahulu, model matematika kapal 3 derajat kebebasan, aturan *Augmented Proportional Navigation* (APN), *Model Predictive Control* (MPC), dan *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC).

#### **2.1 Penelitian Terdahulu**

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik yang diambil. Penelitian-penelitian tersebut diantaranya adalah penelitian oleh Dian K, dkk mengenai kendali arah gerak kapal untuk pelacakan lintasan dan penghindaran tabrakan menggunakan MPC. Pelacakan lintasan dilakukan menggunakan metode dubins. Penelitian ini menggunakan 2 derajat kebebasan dari kapal yaitu *surge* dan *yaw*. Hasil penelitian ini adalah MPC dapat mengendalikan arah gerak kapal dengan baik [3].

Subchan, dkk mengenai kontrol pada kapal saat penembakan misil dengan mempertimbangkan dua derajat kebebasan yaitu *sway* dan *yaw*. Variabel kendali yang digunakan adalah sudut *rudder*. Model yang digunakan pada penelitian ini adalah model Davidson and Schiff model. Hasil dari penelitian ini adalah metode DC-MPC dapat mengatasi gangguan bahkan pada gangguan yang bernilai sangat kecil. Pada simulasinya DC-MPC dapat segera mengendalikan arah gerak kapal kepada sudut reference yang diinginkan pada detik ke- 10 dan mengembalikan sudut hadap ke  $0^\circ$  setelah detik ke-25[4].

Kemudian, terdapat penelitian oleh Heri Purnawan mengenai pengendalian gserak kapal perang saat melakukan

penembakan misil menggunakan metode DC-MPC. Meskipun begitu, penelitian ini juga mencantumkan simulasi dengan metode MPC. Tujuannya adalah untuk membandingkan hasil dari masing-masing metode. Pada penelitian ini, model matematika yang digunakan adalah model matematika 3 derajat kebebasan yang mana adalah *sway*, *yaw*, dan *roll*. Variabel kendali yang digunakan berupa sudut *rudder* kapal. Model matematika yang digunakan dikutip dari penelitian yang dilakukan Yoon dkk. Hasil dari penelitian ini adalah penggunaan metode DC-MPC memberikan hasil lebih *robust* dalam mengatasi gangguan yang dihasilkan dari penembakan misil dibandingkan dengan metode MPC [5].

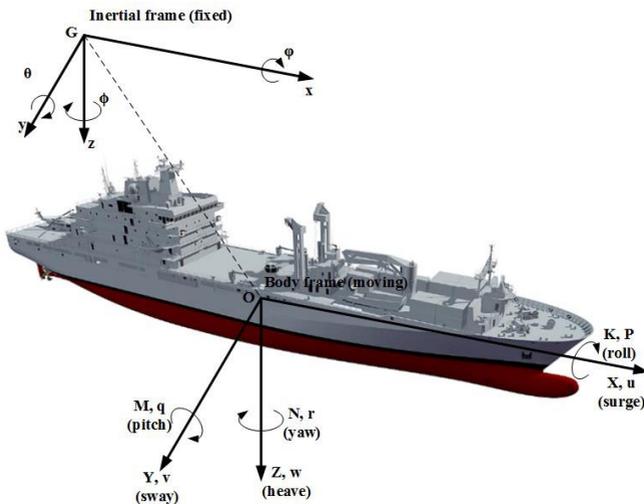
Selanjutnya, penelitian dengan menerapkan *Nonlinear MPC* diantaranya adalah penelitian oleh Mohamed A, dkk. Penelitian ini bertujuan untuk melacak lintasan dan penghindaran tabrakan. Model yang digunakan dalam penelitian ini adalah model 2 derajat kebebasan yaitu *surge* dan *yaw*. Pada penelitian ini digunakan *Nonlinear Disturbance Observer (NDO)* untuk mengestimasi gangguan eksternal pada kapal. Hasil dari penelitian ini adalah NMPC dapat melacak lintasan baik lintasan lurus maupun berbentuk kurva saat sedang memenuhi fungsi kendala kendali dan menghindarkan tabrakan baik dengan objek statis maupun dinamis [7].

Masih berkaitan dengan penerapan NMPC, terdapat penelitian yang dilakukan oleh Anindya Dwi Risdhayanti dalam penelitiannya tentang desain dan simulasi gerak kendali kedalaman pada kapal selam MARES AUV dengan menggunakan *Nonlinear Model Predictive Control (NMPC)*. Tujuan dari penelitian ini adalah mengendalikan *error* kedalaman pada kapal selam MARES AUV hingga mencapai nilai 0 saat bermanuver dalam lautan. Hasil dari penelitian ini adalah NMPC

dapat menggiring *error* kedalaman menuju 0 pada detik ke-1200 [8].

## 2.2 Model Matematika Kapal 3 Derajat Kebebasan

Pada dasarnya, saat bermanuver kapal memiliki enam derajat kebebasan (DOF). Enam derajat kebebasan tersebut diilustrasikan pada gambar berikut :



Gambar 2.1 Earth fixed dan Body Fixed kapal 6 DOF

Berdasarkan Gambar 2.1, terdapat tiga sumbu utama pada kapal yaitu sumbu x (dari buritan ke depan), sumbu y (dari bagian kiri ke kanan), dan sumbu z (dari atas ke bawah). Pada tiap sumbu terdapat gerak rotasi dan translasi. Pada sumbu x terdapat *surge* sebagai gerak translasi (maju/mundur) dan *roll* sebagai gerak rotasi (berputar), selanjutnya sumbu y terdapat *sway* sebagai gerak translasi (geser kanan/kiri) dan *pitch* sebagai gerak rotasi

(menukik), sedangkan pada sumbu x terdapat *heave* sebagai gerak translasi (gerak keatas/kebawah) dan *yaw* sebagai gerak rotasi (menggeleng). Enam arah gerak kapal dapat dilihat pada gambar berikut :

Tabel 2.1 Notasi untuk kendaraan laut [10]

| Gerak Translasi | Gaya       | Kecepatan linear  | Posisi   |
|-----------------|------------|-------------------|----------|
| arah-x (surge)  | $X$        | $u$               | $x$      |
| arah-y (sway)   | $Y$        | $v$               | $y$      |
| arah-z (heave)  | $Z$        | $w$               | $z$      |
| Gerak Rotasi    | Momen Gaya | Kecepatan angular | Sudut    |
| arah-x (roll)   | $K$        | $p$               | $\phi$   |
| arah-y (pitch)  | $M$        | $q$               | $\theta$ |
| arah-z (yaw)    | $N$        | $r$               | $\psi$   |

Posisi kapal ditempatkan pada titik gaya apung dan titik gaya berat di titik koordinat *center of gravity*  $r_g = [x_g \ y_g \ z_g]^T$  dan berdasarkan Tabel 2.1 didefinisikan hal-hal berikut :

$$\text{Gaya} = [X, Y, Z]^T$$

$$\text{Momen Gaya} = [K, M, N]^T$$

$$\text{Kecepatan linear } V = [u, v, w]^T$$

Untuk mendapatkan model matematika gerak translasi kapal digunakan persamaan gerak dengan merujuk pada Hukum Newton II untuk benda pejal dengan 6 derajat kebebasan berikut

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

Dengan,

$$a_g = \frac{\delta V}{\delta t} + \omega \times V + \frac{\delta \omega}{\delta t} \times r_g + \omega \times \omega \times r_g \quad (2.2)$$

Didapat

$$\sum F = m \left( \frac{\delta V}{\delta t} + \omega \times v + \frac{\delta \omega}{\delta t} \times r_g + \omega \times \omega \times r_g \right) \quad (2.3)$$

Dari persamaan diatas disubstitusikan kecepatan linear  $V$ , posisi  $r_g$ , dan matriks  $\omega$  yang ditulis sebagai berikut :

$$\omega = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Sehingga didapatkan model matematika gerak translasi kapal yaitu sebagai berikut

$$\begin{aligned} X & m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] = \\ Y & m[\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})] = \\ Z & m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})] = \end{aligned} \quad (2.5)$$

Selanjutnya untuk mendapatkan model matematika gerak rotasi kapal digunakan persamaan gerak euler benda pejal dengan 6 derajat kebebasan di titik  $r_g = [x_g \ y_g \ z_g]^T$  sebagai berikut :

$$\sum M_B = H_g + m \times r_g \times \left( \frac{\delta V}{\delta t} + \omega \times V \right) \quad (2.6)$$

Dengan  $H_g$  adalah laju perubahan momentum sudut terhadap titik beratnya

$$H_g = [I] \frac{\delta \omega}{\delta t} + \omega \times [I] \omega \quad (2.7)$$

Dengan  $I$  merupakan matriks inersia diagonal sebagai berikut

$$[I] = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Sehingga didapatkan, model matematika gerak rotasi kapal sebagai berikut

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

Pada penelitian ini digunakan model matematika 3 derajat kebebasan yang mana berasal dari model matematika kapal 4 dof. Model 4 dof ini berasal dari model kapal 6 dof dengan mengabaikan gerak translasi *heave* dan gerak rotasi *pitch*. Dengan mengasumsikan bahwa tak ada gaya dan momen gaya pada *heave* dan *pitch*, secara langsung mengakibatkan kecepatan *heave*  $w$  dan

kecepatan angular *pitch*  $r$  bernilai sama dengan 0. Dan dengan mengasumsikan bahwa koordinat  $y_g = 0$  didapat :

$$\begin{aligned}
 m\dot{u} - m(vr + x_G r^2 - z_G pr) &= X \\
 m\dot{v} + mur - mz_G \dot{p} + mx_G \dot{r} &= Y \\
 -mz_G ur - mz_G \dot{v} + I_x \dot{p} &= K \\
 mx_G ur + mx_G \dot{v} - I_z \dot{r} &= N
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Mode *surge* dapat dipisahkan dari mode *sway*, *roll*, dan *yaw* dengan asumsi kecepatan  $u$  bernilai konstan ( $u \approx U$ ). Selanjutnya, akan dipaparkan model matematika *nonlinear* kapal dengan mempertimbangkan 3 DOF yaitu *sway*, *roll*, dan *yaw*. Model tersebut dipaparkan sebagai berikut [11] :

$$\begin{aligned}
 (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - (mz_G + Y_{\dot{p}})\dot{p} + (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} &= -mUr + Y_{hyd} + Y_{eks} \\
 -(mz_G + K_{\dot{v}})\dot{v} - (I_x - K_{\dot{p}})\dot{p} &= -mz_G Ur + K_{hyd} + K_{eks} \\
 (mx_G + N_{\dot{v}})\dot{v} - (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} &= -mx_G Ur + N_{hyd} + N_{eks}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Dengan,

- $m$  : massa kapal
- $I_x$  : momen inersia x
- $I_y$  : momen inersia y
- $Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{p}}, Y_{\dot{r}}$  : koefisien massa tambahan pada gaya
- $K_{\dot{v}}, K_{\dot{p}}, N_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}$  : koefisien massa tambahan pada momen gaya
- $v, p, r$  : variabel gerak, berturut-turut adalah *sway*, *roll*, dan *yaw*

$X_{eks}$ ,  $Y_{eks}$ ,  $K_{eks}$ , dan  $N_{eks}$  sebagai gaya dan momen eksternal berupa gaya *rudder*, *propeller*, dan *bow thrusters*. Gaya dan momen gaya eksternal yang dipertimbangkan hanya gaya *rudder*. Sedangkan,  $Y_{hyd}$ ,  $K_{hyd}$ , dan  $N_{hyd}$  merupakan gaya dan

momen *sway*, *roll*, dan *yaw* dari komponen hidrodinamika.  $Y_{hyd}$ ,  $K_{hyd}$ , dan  $N_{hyd}$  diberikan sebagai berikut [12] :

$$X = X_{\dot{u}}\dot{u} + Y_{vr}vr + Y_{|u|u}|u|u$$

$$Y = Y_{\dot{v}}\dot{v} + K_{\dot{p}}\dot{p} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{|u|v}|u|v + Y_{ur}ur + Y_{|v|v}|v|v + Y_{|r|r}|r|r + Y_{r|v|r}|r|v| + Y_{\phi|uv}|\phi|uv| + Y_{\phi|ur}|\phi|ur| + Y_{\phi uu}\phi u^2 \quad (2.12)$$

$$K = K_{\dot{v}}\dot{v} + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{|u|v}|u|v + K_{ur}ur + K_{|v|v}|v|v + K_{|r|r}|r|r| + K_{r|v|r}|r|v| + K_{\phi|uv}|\phi|uv| + K_{\phi|ur}|\phi|ur| + K_{\phi uu}\phi u^2 + K_{|u|p}|u|p + K_{p|p|p}|p|p| + K_p p + K_{\phi\phi\phi}\phi^3 - \rho g \nabla GZ(\phi)$$

$$N = N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{|u|v}|u|v + N_{|u|r}|u|r + N_{r|r}|r|r| + N_{r|v|r}|r|v| + N_{\phi|uv}|\phi|uv| + N_{\phi|ur}|\phi|ur| + N_p p + N_{p|p|p}|p|p| + N_{|u|p}|u|p + N_{\phi|ur}|\phi|ur|$$

Selanjutnya, dipaparkan model kinematika kapal yang digunakan untuk menghitung sudut hadap kapal  $\psi$  pada persamaan berikut [13] :

$$\dot{\phi} = p \quad (2.13)$$

$$\dot{\psi} = r \cos \phi \quad (2.14)$$

Dengan,

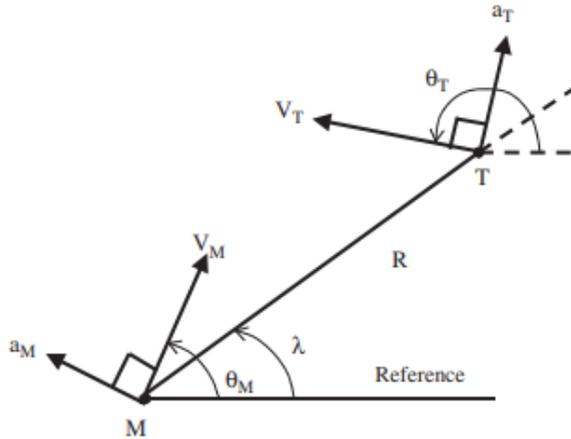
$\phi$  : sudut *roll* kapal

$\psi$  : sudut *yaw* kapal

### 2.3 Kendali *Augmented Proportional Navigation* (APN) untuk gerak kapal

Penembakan misil memerlukan jarak yang optimal antara misil dan target agar misil dapat mengenai target dengan tepat.

Untuk itu, diperlukan kendali optimal misal kendali APN untuk mengoptimalkan (meminimumkan) jarak antara misil dan target [14]. Berikut gambar ilustrasi 2D pada skenario misil-target :



Gambar 2.2 Ilustrasi 2D misil-target [15]

LOS atau *Line Of Sight* berdasarkan gambar tersebut adalah garis yang menandai bahwa sebuah target dapat terlihat oleh misil tanpa ada penghalang apapun. Model gerak misil akan dipaparkan sebagai berikut [14]:

$$\dot{\lambda} = \frac{V_T \sin(\theta_T - \lambda) - V_M \sin(\theta_M - \lambda)}{R} \quad (2.15)$$

$$\dot{R} = V_T \cos(\theta_T - \lambda) - V_M \cos(\theta_M - \lambda) \quad (2.16)$$

$$\dot{\theta}_T = \frac{a_T}{V_T} \quad (2.17)$$

$$\dot{\theta}_M = \frac{a_M}{V_M} \quad (2.18)$$

Dengan,

$\lambda(t)$  : sudut LOS pada saat t

- $R(t)$  : jarak LOS pada saat  $t$   
 $\theta_T(t)$  : sudut terbang target pada waktu  $t$   
 $\theta_M(t)$  : sudut terbang misil pada waktu  $t$   
 $a_M(t)$  : percepatan normal misil pada waktu  $t$   
 $a_T(t)$  : percepatan normal misil pada waktu  $t$   
 $V_T$  : kecepatan tangensial target pada waktu  $t$   
 $V_M$  : kecepatan misil pada waktu  $t$

Jika target dalam kondisi bergerak maka  $a_T$  merupakan variabel yang nilainya tidak diketahui yang mana membutuhkan estimasi nilai terlebih dahulu [16]. Pada penelitian ini,  $a_T$  bernilai nol karena target dianggap dalam posisi tidak bergerak atau diam. Sedangkan Kendali APN untuk menghitung percepatan misil diberikan sebagai berikut [17] :

$$a_M = N'V_c\dot{\lambda} + N'\frac{a_T}{2} \quad (2.19)$$

Dengan,

$$N' = \text{konstanta bernilai } 3 - 5$$

$$V_c = -\dot{R}$$

## 2.4 Metode Runge-Kutta Orde 4

Metode Runge-Kutta orde 4 sering digunakan dalam penyelesaian suatu persamaan differensial atau sistem persamaan differensial secara numeric dengan diberikan syarat awal. Metode ini memberikan ketelitian lebih tinggi dibandingkan dengan Metode Runge-Kutta yang memiliki orde dibawahnya[18]. Bentuk umum pendiskritan persamaan differensial  $\frac{dy}{dx} = f(x, y)$  diberikan sebagai berikut :

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.20)$$

Dengan,

$$k_1 = hf(x_n, y_n)$$

$$k_2 = hf\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right)$$

$$k_3 = hf\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right)$$

$$k_4 = hf(x_n + h, y_n + k_3)$$

Dengan  $y_n$  merupakan nilai variabel  $y$  pada waktu  $n$ ,  $h$  merupakan waktu sampling pendiskritan.

## 2.5 Model Predictive Control (MPC)

*Model Predictive Control* (MPC) merupakan strategi kendali yang sering digunakan untuk mengatasi masalah kendali dalam berbagai bidang seperti bidang industri, keuangan, kesehatan, dan sebagainya. Sistem yang digunakan untuk strategi kendali MPC adalah sistem linear diskrit. Bentuk umum dari sistem linear diskrit adalah sebagai berikut :

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (2.20)$$

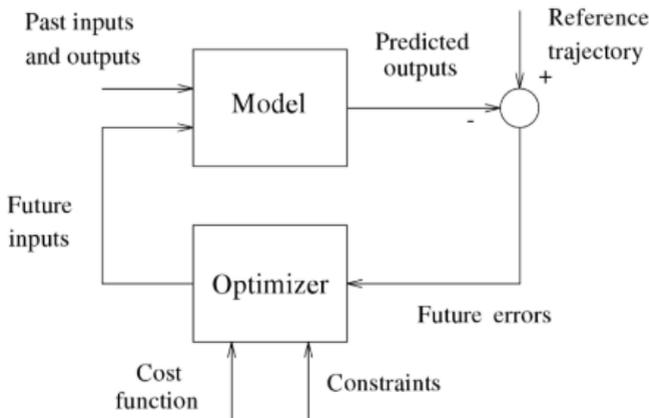
$$y(k) = Cx(k) \quad (2.21)$$

Dengan,

$x(k)$  : variabel *state* pada waktu  $k$   
 $A$  : Matriks Keadaan  
 $B$  : Matriks input

$u(k)$  : input kendali pada waktu  $k$   
 $y(k)$  : matriks pengukuran atau output  
 $C$  : matriks *observer*

Berikut adalah struktur dasar MPC :



Gambar 2.3 Struktur dasar MPC

Berdasarkan Gambar 2.3, *Model Predictive Control* menggunakan model untuk memprediksi *output*  $y$  berdasarkan nilai *input*  $u$  dan *output*  $y$  sebelumnya. Nilai dari *output*  $y$  yang telah diprediksi akan dicari selisihnya dengan referensi yang diinginkan mendapatkan *future error*. Selanjutnya, *future error* memasuki blok *optimizer*. Dalam *optimizer*, dilakukan perhitungan *input* baru atau yang disebut *future input* dengan meminimalkan *cost function* dengan *constraints* yang telah ditentukan. Pada tahap ini, *future inputs* yang dihasilkan yaitu  $[u_0^*, u_1^*, \dots, u_{n_p-1}^*]$ . Dengan menggunakan prinsip *receding horizon*, kendali optimal yang diberikan pada sistem adalah

vektor awal yaitu  $u_0^*$ . Selanjutnya, *future input*  $u_0^*$  diinputkan ke model dengan *output*  $y$  yang sebelumnya diprediksi *untuk mendapatkan output*  $y$  yang baru. langkah ini terus berulang *future control* dapat membawa prediksi *output* yang sesuai dengan referensi yang diinginkan [19].

Berikut ini adalah fungsi objektif MPC dalam menyelesaikan masalah optimasi  $P(x(k), u^*)$

$$\min_{u(\cdot|k)} \sum_{j=1}^{N_p} \|\hat{r}(k+j|k) - \hat{y}(k+j|k)\|_Q^2 + \sum_{j=0}^{N_c-1} \|\hat{u}(k+j|k)\|_R^2 \quad (2.22)$$

Dengan kendala sebagai berikut

$$x(k+1|k) = f(x(k), u(k), k) \quad (2.23)$$

Untuk  $j = 0, 1, 2, \dots, N_p - 1$ ,

$$x^{min} \leq x(k+j|k) \leq x^{max} \quad (2.24)$$

$$u^{min} \leq u(k+j) \leq u^{max} \quad (2.25)$$

Dengan

- $N_p$  : prediksi horizon
- $N_c$  : kendali horizon
- $\hat{r}(k+j|k)$  : referensi trayektori
- $\hat{y}(k+j|k)$  : prediksi output
- $\Delta\hat{u}(k+j|k)$  : selisih nilai variabel input antara waktu  $k+j$  dengan  $k$  atau *increment input*
- $Q$  dan  $R$  : matriks bobot definit positif yang mempengaruhi respon pada sistem kendali

Pada fungsi objektif digunakan norm untuk penyelesaiannya. Dengan penjabaran sebagai berikut [5]

$$\|\hat{r}(k+j|k) - \hat{y}(k+j|k)\|_Q^2 = (\hat{r}(k+j|k) - \hat{y}(k+j|k))^T Q (\hat{r}(k+j|k) - \hat{y}(k+j|k))$$

$$\|\hat{u}(k+j|k)\|_R^2 = (\hat{u}(k+j|k))^T R (\hat{u}(k+j|k))$$

Setelah menyelesaikan fungsi objektif diatas diperoleh solusi dari  $P(x(k), u^*)$  adalah barisan input kendali sebagai berikut

$$\{u^*(k|k), u^*(k+1|k), \dots, u^*(k+N_c-1)\}$$

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, bahwa dengan prinsip receding horizon nilai kendali yang digunakan adalah vektor pertama dari vector kendali yang diperoleh dari proses optimasi.

$$u_k = u^*(k|k) + \Delta u(k) \quad (2.27)$$

## 2.6 Nonlinear Model Predictive Control (NMPC)

*Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC) merupakan salah satu pengembangan dari metode *Model Predictive Control* yang dikhususkan untuk model *nonlinear* baik *constant reference* maupun *time varying reference* [9].

Berikut adalah langkah-langkah dalam NMPC [20,21]

1. Diberikan model *nonlinear* diskrit

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) \quad (2.28)$$

$$y_k = C(x_k, u_{k-1}) \quad (2.29)$$

Dengan,

$x_k$  : vektor *state*

$u_k$  : input kendali vektor

$y_k$ : vektor pengukuran atau output

$k$  merepresentasikan index sampling waktu

2. Selanjutnya, penyelesaian masalah kendali dengan NMPC diberikan sebagai berikut :

$$\min_{u(\cdot|k)} \sum_{j=1}^{N_p} \|\hat{r}(k+j|k) - \hat{y}(k+j|k)\|_{Q(j)}^2 + \sum_{j=0}^{N_c-1} \|\hat{u}(k+j|k)\|_{R(j)}^2 \quad (2.30)$$

dengan kendala,

$$C_1 x(k+j+1|k) \leq D_1 \quad (2.31)$$

$$Su(k+j|k) \leq T \quad (2.32)$$

$$S\Delta u(k+j|k) \leq V \quad (2.34)$$

Masalah kendali ini diselesaikan pada tiap sampel untuk mendapatkan kendali paling optimal  $[u_0^*, u_1^*, \dots, u_{n_p-1}^*]$ . Dengan menggunakan prinsip *receding horizon* pada MPC, kendali optimal yang diberikan pada sistem adalah vector awal dari penyelesaian optimalnya. Maka nilai kendali yang diberikan adalah  $u_0^*$

3.  $u_0^*$  yang didapatkan pada langkah sebelumnya digunakan untuk optimasi pada waktu berikutnya

## 2.7 Mean Absolute Error (MAE)

MAE adalah formula untuk menghitung rata-rata error atau selisih yang terjadi pada dua data yang banyaknya sama. Berikut adalah formulanya

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |a - b| \quad (2.35)$$

Dengan,

a : data pertama

b : data kedua

n : banyaknya data pertama dan kedua

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

Dalam rangka menyelesaikan permasalahan, dibutuhkan metode penelitian yang sesuai dan runtut. Pada bab ini, akan dipaparkan metode penelitian untuk menyelesaikan permasalahan yang diangkat. Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan berikut

#### 3.1 Studi Literatur

Pada tahap ini, dilakukan studi literatur mengenai model matematika kapal 3 DOF, gaya dan momen gaya yang timbul pada kapal akibat melakukan penembakan misil, dan metode MPC dan NMPC.

#### 3.2 Pengkajian Gaya dan Momen Gaya Impact Misil

Pada tahap ini dilakukan pengkajian gaya dan momen gaya yang terjadi akibat penembakan misil pada kapal perang berdasarkan Hukum Newton II dan III.

##### 3.2.1 Gaya Impact Misil

Perilaku kapal yang terjadi saat melakukan penembakan misil adalah bergerak berlawanan arah tembakan misil. Hal ini merupakan gaya reaksi yang timbul. Untuk mengukur besarnya gaya yang timbul, maka digunakan Hukum Newton III.

##### 3.2.2 Momen Gaya Impact Misil

Terdapat momen gaya yang terjadi akibat penembakan misil. Momen gaya terjadi akibat arah penembakan misil yang tidak searah dengan surge kapal yaitu membentuk sudut  $30^\circ$  dari *surge*. Hal ini mengakibatkan adanya gerak rotasi yang terjadi sehingga muncul Momen Gaya atau torsi. Momen Gaya dapat diperoleh dengan merujuk pada Hukum Newton II.

### 3.3 Pengkajian Model *Nonlinear* Kapal 3 derajat kebebasan beserta gangguannya

Pada tahap ini dilakukan pendefinisian model sistem gerak kapal dengan 3 derajat kebebasan. Model yang digunakan adalah model dari penelitian [5]

#### 3.3.1 Perhitungan Gangguan

Pada tahap ini dilakukan perhitungan gangguan. Gangguan dihitung berdasarkan parameter misil yang digunakan seperti massa, percepatan dan juga sudut hadap misil yang diperoleh dari penelitian Blanke[21]. Dengan menggunakan hukum kendali APN maka didapatkan percepatan misil yang nantinya akan disubstitusikan pada Gaya dan Momen Gaya Impact yang telah dikaji.

#### 3.3.2 Pendefinisian model kapal dengan gangguan

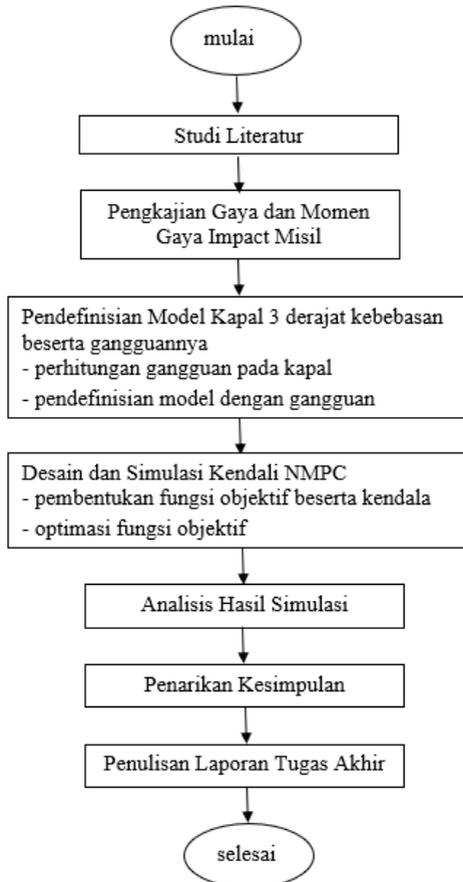
Pada tahap ini dilakukan penambahan gangguan pada model *nonlinear* yang telah dikaji. Gangguan diperoleh pada tahap 3.1. Selanjutnya, model yang diperoleh digunakan untuk melakukan simulasi pada tahap selanjutnya

### 3.4 Desain dan Simulasi kendali NMPC

Pada tahap ini dilakukan desain kendali NMPC. Desain kendali yang dimaksud adalah penentuan fungsi objektif beserta kendalanya. Fungsi objektif dan kendala berguna untuk menentukan *future input* pada proses optimasi. Setelah mendapatkan desain kendali yang sesuai, dilanjutkan dengan simulasi kendali. Simulai kendali dilakukan dengan *software* Matlab.

### 3.5 Analisis dan Penarikan kesimpulan hasil simulasi

Setelah mendapatkan hasil simulasi, maka dilakukan analisis terhadap hasil simulasi. Kemudian, dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang telah didapatkan.



Bagan 3.1. Bagan Alir Penelitian



## BAB IV

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, dilakukan perumusan model matematika *nonlinear* kapal yang digunakan. lalu dilakukan pengkajian gaya dan momen gaya akibat penembakan misil. Gaya dan momen gaya yang diperoleh ditambahkan pada model sebagai gangguan sehingga diperoleh model matematika kapal dengan gangguan. Dari model yang diperoleh dilakukan desain kendali NMPC yang berisi fungsi objektif dan kendala. Selanjutnya dilakukan simulasi untuk mendapatkan hasil kendali.

#### 4. 1 Model Nonlinear Gerak Kapal

Model matematika yang digunakan dalam penelitian ini adalah model matematika *nonlinear* kapal dengan mempertimbangkan 3 DOF yaitu *sway*, *roll*, dan *yaw* berdasarkan pada Persamaan (2.11). Model tersebut dipaparkan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - (mz_G + Y_{\dot{p}})\dot{p} + (mx_G + Y_{\dot{r}})\dot{r} &= -mUr + Y_{hyd} + Y_{eks} \\ -(mz_G + K_{\dot{v}})\dot{v} - (I_x - K_{\dot{p}})\dot{p} &= -mz_GUr + K_{hyd} + K_{eks} \\ (mx_G + N_{\dot{v}})\dot{v} - (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} &= -mx_GUr + N_{hyd} + N_{eks}\end{aligned}$$

Sedangkan untuk model kinematika kapal digunakan Persamaan (2.13) dan (2.14)

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

$Y_{eks}, K_{eks}, N_{eks}$  merupakan gaya eksternal berupa gaya rudder. Karena pada penelitian ini terdapat gangguan berupa gaya dan momen gaya impact maka  $Y_{eks}, K_{eks}, N_{eks}$  tidak hanya memperhitungkan gaya *rudder* namun ditambahkan gaya dan

momen gaya impact. Gaya *rudder* dirumuskan sebagai berikut (Blanke) :

$$Y_{\delta_r} = \frac{1}{4\delta_{stall}} \pi C_L A_R U^2 \quad (4.1)$$

$$K_{\delta_r} = -l_{\delta_z} Y_{\delta_r} \quad (4.2)$$

$$N_{\delta_r} = -l_{\delta_x} Y_{\delta_r} \quad (4.3)$$

Berdasarkan model matematika diatas, variabel *state* yang digunakan adalah  $v, p, r, \phi, \psi$  yang mana jika dibentuk suatu matriks ditulis sebagai berikut

$$x = \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix}$$

Dengan,

$v$  : kecepatan linear sway

$p$  : kecepatan angular roll

$r$  : kecepatan angular yaw

$\phi$  : sudut roll

$\psi$  : sudut yaw

Model matematika dapat ditulis dalam bentuk matriks berikut

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

$$= \begin{bmatrix} -mUr + Y_{hyd} \\ -mz_G Ur + K_{hyd} \\ -mx_G Ur + N_{hyd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{eks} \\ K_{eks} \\ N_{eks} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

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

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -mUr + Y_{hyd} \\ -mz_G Ur + K_{hyd} \\ -mx_G Ur + N_{hyd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{eks} \\ K_{eks} \\ N_{eks} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Gaya eksternal yang terjadi pada kapal tanpa gangguan dapat ditulis sebagai berikut

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

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -mUr + Y_{hyd} \\ -mz_G Ur + K_{hyd} \\ -mx_G Ur + N_{hyd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{\delta_r} \delta_r \\ K_{\delta_r} \delta_r \\ N_{\delta_r} \delta_r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Dengan  $\delta_r$  merupakan input kendali yang nantinya digunakan pada proses simulasi. Persamaan diatas dapat ditulis dalam bentuk persamaan sebagai berikut

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & I_{2 \times 2} \end{bmatrix}^{-1} (f_a + f_{eks}) \quad (4.7)$$

Dengan,

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

$$f_a = \begin{bmatrix} -mUr + Y_{hyd} \\ -mz_GUr + K_{hyd} \\ -mx_GUr + N_{hyd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$f_{eks} = \begin{bmatrix} Y_{\delta_r} \\ K_{\delta_r} \\ N_{\delta_r} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r$$

Pada penelitian ini, ditambahkan gangguan  $w$  berupa gaya impact penembakan misil. Gaya *impact* penembakan misil ditulis sebagai gaya eksternal yang diterima kapal selain gaya *rudder*. Sehingga, model *nonlinear* kapal dengan gangguan dapat dituliskan sebagai berikut

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & I_{2 \times 2} \end{bmatrix} (f_a + f_{eks}) \quad (4.8)$$

Dengan,

$$f_{eks} = \begin{bmatrix} Y_{\delta_r} \\ K_{\delta_r} \\ N_{\delta_r} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r + \begin{bmatrix} Y_{imp} \\ K_{imp} \\ N_{imp} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Untuk keterangan  $Y_{imp}$ ,  $K_{imp}$ , dan  $N_{imp}$  pada persamaan gangguan  $w$  diatas diuraikan pada subbab 4.3

#### 4.2 Pendiskritan Model

Model yang digunakan pada kendali NMPC haruslah dalam bentuk diskrit. Pendiskritan model dilakukan dengan Runge Kutta orde 4. Berdasarkan Persamaan (2.18), diberikan langkah-langkah pendiskritan sebagai berikut

1. menentukan waktu *sampling*  $h$ , inialisasi awal variabel *state*  $x$ , dan sistem persamaan differensial yang digunakan.

Pendiskritan dilakukan pada variabel *state* yang berisi kecepatan linear sway  $v$ , kecepatan angular roll  $p$ , kecepatan angular yaw  $r$ , sudut roll  $\phi$ , dan sudut yaw  $\psi$ . Diambil nilai waktu *sampling*  $h$ , inialisasi nilai awal variabel  $v(t_n) = v_n$ ,  $p(t_n) = p_n$ ,  $r(t_n) = r_n$ ,  $\phi(t_n) = \phi_n$ , dan  $\psi(t_n) = \psi_n$ , dan sistem persamaan differensial berikut

$$\frac{dv}{dt} = \dot{v} = f(t, v, p, r)$$

$$\frac{dp}{dt} = \dot{p} = f(t, v, p, r)$$

$$\frac{dr}{dt} = \dot{r} = f(t, v, p, r)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \dot{\phi} = f(t, \phi, p)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \dot{\psi} = f(t, \psi, r, \phi)$$

2. Mensubstitusikan waktu *sampling*  $h$ , inialisasi awal variabel *state*  $x$ , dan persamaan differensial yang digunakan pada persamaan (2.18). diperoleh

$$v(t_n + h) = v_{n+1} = v_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

Dengan,

$$k_1 = hf(v_n, t_n)$$

$$k_2 = hf\left(v_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{h}{2}\right)$$

$$k_3 = hf\left(v_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{h}{2}\right)$$

$$k_4 = hf(v_n + k_1, t_n + h)$$

Begitu juga dengan PD selanjutnya.

3. Memperbarui nilai  $t_n = t_n + h$  untuk digunakan untuk perhitungan variabel *state* waktu *sampling* selanjutnya.

Lalu mengulangi langkah 1 dan 2 hingga mencapai waktu pendiskritan  $t_n$  yang dibutuhkan.

#### 4.3 Pengkajian Gaya dan Momen Gaya Impact Penembakan Misil [5]

Saat melakukan penembakan misil, terdapat gaya tambahan yang bekerja pada kapal berupa gaya aksi reaksi. Pada subbab ini dibahas mengenai gaya reaksi yang diterima kapal akibat melakukan aksi penembakan misil. Gaya aksi-reaksi diatur dalam Hukum Newton III.

*“Besarnya gaya reaksi yang diperoleh suatu benda bernilai sama dengan aksi yang dilakukan benda tersebut namun arah gaya diantara keduanya berlawanan”.*

Sehingga formula untuk Gaya Aksi Reaksi dapat dituliskan sebagai berikut :

$$F_{aksi} = -F_{reaksi} \quad (4.9)$$

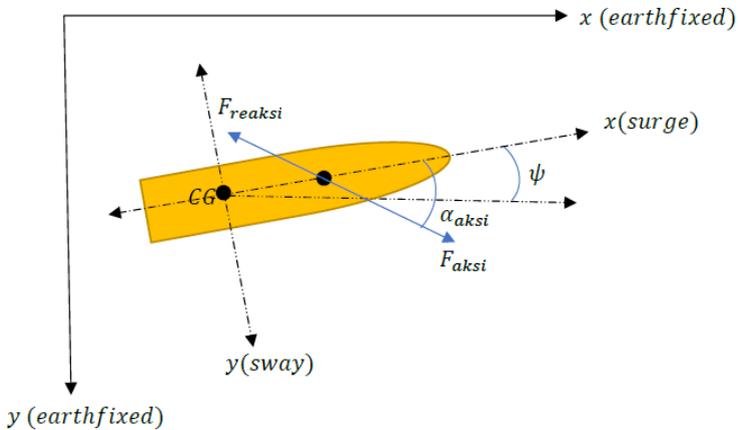
Selanjutnya, Sebagaimana formula perhitungan Gaya pada umumnya, besar nilai  $F_{aksi}$  saat penembakan misil dapat dituliskan sebagai berikut :

$$F_A = m_M \cdot a_M \quad (4.10)$$

Dengan,

$F_A$  :  $F_{aksi}$  / Besarnya Gaya (N)  
 $m_M$  : massa misil (kg)  
 $a_M$  : percepatan misil ( $m/s^2$ )

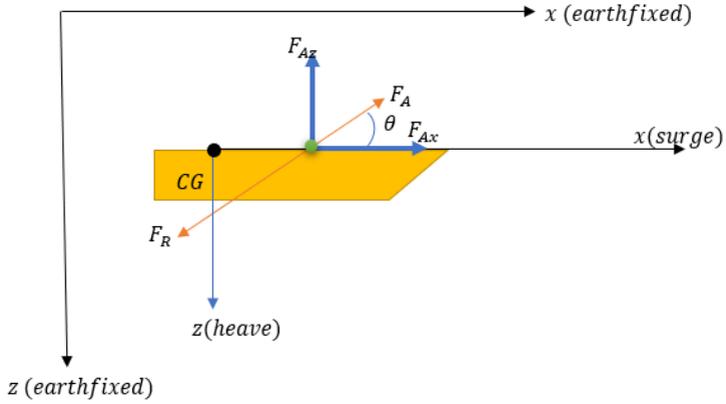
Gaya terjadi pada gerak translasi kapal yaitu *surge*(X), *sway*(Y), dan *heave*(Z). Berikut adalah ilustrasi kapal tampak atas saat melakukan penembakan misil.



Gambar 4.1 Ilustrasi 2D kapal setelah penembakan misil tampak atas

Berdasarkan pada Gambar 4.1, pada saat kapal menembakkan misil dengan sudut sebesar  $\alpha_{aksi}$  terhadap *surge*, maka arah gerak kapal secara otomatis berubah atau berotasi pada sumbu-z sebesar  $\psi$  terhadap *surge*. Hal ini disebut sebagai gaya *impact* yang diterima kapal setelah melakukan penembakan. Gaya *impact* ini dapat dikategorikan sebagai gangguan. Gangguan ini ditambahkan pada model matematika kapal. Pengkajian gaya dan momen gaya dilakukan sesuai dengan gerak translasi dan rotasi kapal yang dipertimbangkan yakni gaya *impact* pada gerak *sway* ( $Y_{imp}$ ) dan momen gaya *impact* pada gerak *roll* ( $K_{imp}$ ) dan *yaw* ( $N_{imp}$ ).

Selanjutnya, dilakukan pengkajian Gaya *impact* pada gerak *sway*. Berikut adalah ilustrasi kapal tampak samping saat melakukan penembakan pada bidang-*xz* :



Gambar 4.2 Ilustrasi 2D kapal setelah penembakan misil pada bidang  $xz$

Berdasarkan Gambar 4.2, kapal menembak dengan sudut sebesar  $\theta$  terhadap arah *surge* kapal. Gaya yang searah *surge* kapal dinotasikan sebagai  $F_{Ax}$ , sedangkan yang searah *heave* kapal dinotasikan sebagai  $F_{Az}$ . Berikut adalah besar gaya  $F_{Ax}$  dan  $F_{Az}$  :

$$F_{Ax} = F_A \cos \theta \quad (4.11)$$

$$F_{Az} = F_A \sin \theta \quad (4.12)$$

Karena pada penelitian ini gerak *heave* diabaikan, maka nilai  $F_{Az} = 0 \text{ N}$ . Selanjutnya, dihitung gaya reaksi yang terjadi pada gerak *surge* dan *sway*. Berdasarkan Gambar 4.1, maka diperoleh

$$F_{Asurge} = F_{Ax} \cos \alpha_{aksi} = F_A \cos \theta \cos \alpha_{aksi} \quad (4.13)$$

$$F_{Asway} = F_{Ax} \sin \alpha_{aksi} = F_A \cos \theta \sin \alpha_{aksi} \quad (4.14)$$

Karena  $F_{aksi} = -F_{reaksi}$ , maka dapat ditulis

$$F_{Asurge} = -F_{Rsurge} \quad (4.15)$$

$$F_{Asway} = -F_{Rsurge} \quad (4.16)$$

Sehingga,

$$F_{Rsurge} = -F_A \cos \theta \cos \alpha_{aksi} = X_{imp} \quad (4.17)$$

$$F_{Rsway} = -F_A \cos \theta \sin \alpha_{aksi} = Y_{imp} \quad (4.18)$$

$X_{imp}$  dan  $Y_{imp}$  dapat diklasifikasikan sebagai gaya eksternal kapal dan ditambahkan pada model kapal sebagai gangguan.

Selanjutnya, dilakukan kajian mengenai momen gaya saat melakukan penembakan misil. Berbeda dengan gaya yang mana diakibatkan gerak translasi yang mana berupa gaya reaksi pada gerak *surge*, *sway*, dan *heave*, Momen gaya terjadi pada gerak rotasi kapal, Momen gaya dapat terjadi ketika terdapat gaya yang bekerja pada suatu lengan gaya dengan panjang tertentu dan memiliki arah tertentu namun lengan gaya tertahan oleh suatu poros yang menyebabkan gaya tersebut berputar pada porosnya. Hal ini diatur pada Hukum Newton II untuk gerak rotasi. Berikut adalah formula untuk momen gaya :

$$\tau = F \cdot d \cdot \sin \theta \quad (4.19)$$

Dengan,

$\tau$  : Momen Gaya (Nm)

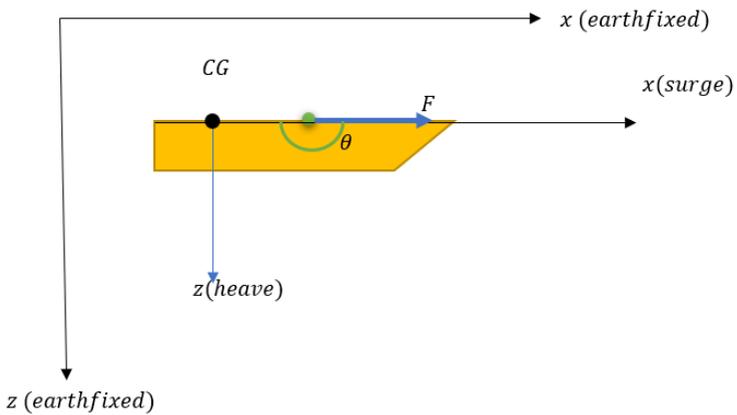
$F$  : Gaya (N)

$d$  : Lengan gaya (m)

$\theta$  : besar sudut antara  $F$  dan  $d$  ( $^\circ$ )

Pada kapal perang yang menembakkan misil, poros momen gaya terletak pada CG (*Center of Gravity*) dan lengan gaya merupakan bagian pada kapal antara peluncur misil dengan CG. Selanjutnya, dipaparkan pengkajian Momen gaya berdasarkan arah gaya yang mempengaruhinya.

1. Arah Gaya  $F$  bergerak searah bagian kapal antara peluncur misil ke CG. Hal ini berarti gerak yang terjadi adalah roll.



Gambar 4.3 Ilustrasi 2D arah penembakan misil pada bidang- $xz$  searah surge kapal

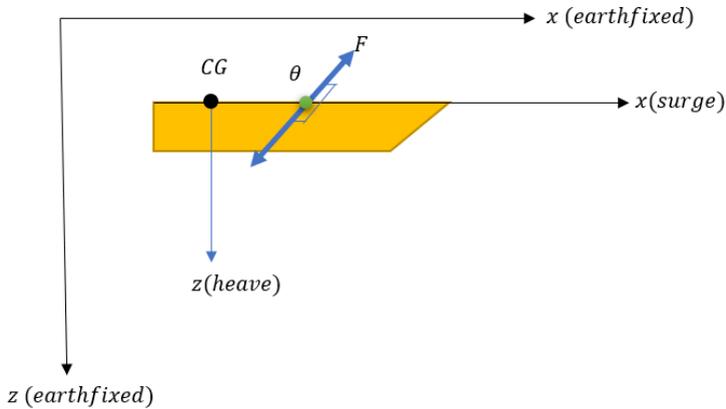
Dapat terlihat bahwa dengan posisi ini tidak dapat terjadi gerak rotasi atau jika dihitung secara matematis maka sudut  $\theta$  bernilai  $\pi$ . Sehingga dengan menggunakan formula momen gaya, dapat diketahui bahwa nilai untuk momen gaya searah dengan gerak roll adalah :

$$\tau = F \cdot d \cdot \sin \pi = 0 \text{ Nm} \quad (4.20)$$

Dengan demikian diperoleh nilai dari momen gaya searah gerak Roll kapal diperoleh

$$K_{imp} = 0 Nm \quad (4.21)$$

2. Arah Gaya  $F$  bergerak searah kesamping tegak lurus dengan bagian kapal antara peluncur misil ke CG.



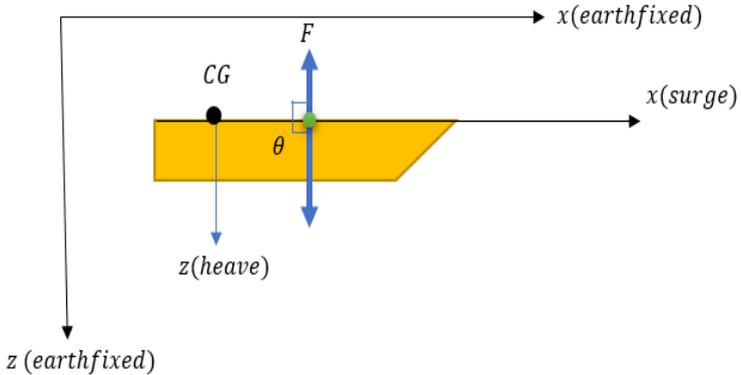
Gambar 4.4 Ilustrasi 2D arah penembakan misil pada bidang  $xz$  searah *sway* kapal

Berdasarkan Gambar 4.4 gerak rotasi dapat terjadi dengan posisi ini. Momen gaya yang terjadi adalah momen gaya searah gerak *yaw* ( $N_{imp}$ ). Gaya  $F$  yang bekerja pada posisi ini adalah gaya reaksi pada gerak *sway* ( $Y_{imp}$ ). Umumnya, apabila Gaya  $F$  mengarah ke kiri maka momen gaya bernilai negatif. Hal ini disebabkan karena arah rotasi kapal tidak searah jarum jam dan begitu juga sebaliknya.

Momen gaya yang terjadi tidak bernilai nol karena arah tembakan misil tegak lurus dengan bagian antara antara peluncur misil ke CG. Momen gaya pada gerak *yaw* dapat ditulis sebagai berikut :

$$N_{imp} = -Y_{imp} \cdot d \quad (4.22)$$

3. Arah Gaya  $F$  bergerak searah kesamping tegak lurus dengan jarak peluncur misil ke CG.



Gambar 4.5 Ilustrasi 2D arah penembakan misil pada bidang  $-xz$  searah heave kapal

Berdasarkan Gambar 4.5 Gerak rotasi dapat terjadi dengan posisi ini. momen gaya yang terjadi adalah momen gaya searah gerak Pitch ( $M_{imp}$ ). Gaya  $F$  yang bekerja pada posisi ini adalah gaya reaksi pada gerak heave ( $Z_{imp}$ ). Umumnya, apabila Gaya  $F$  mengarah keatas maka momen gaya bernilai negatif. Hal ini disebabkan karena arah rotasi kapal tidak searah jarum jam dan begitu juga sebaliknya.

Momen gaya yang terjadi tidak bernilai nol karena arah tembakan misil tegak lurus dengan bagian antara peluncur misil ke CG. Momen gaya pada gerak *heave* dapat ditulis sebagai berikut :

$$M_{imp} = Z_{imp} \cdot d \quad (4.23)$$

Berdasarkan serangkaian poin pengkajian momen gaya diatas diperoleh formula perhitungan momen gaya sebagai berikut :

$$K_{imp} = 0$$

$$M_{imp} = Z_{mp} \cdot d$$

$$N_{imp} = -Y_{imp} \cdot d$$

Sebagaimana yang telah disebutkan sebelumnya, pada penelitian ini arah gerak rotasi yang digunakan adalah roll dan yaw maka formula momen gaya  $K_{imp}$  dan  $N_{imp}$  saja yang digunakan pada perhitungan.

Sehingga formula yang digunakan pada perhitungan gaya dan momen gaya *impact* dapat ditulis sebagai berikut :

$$Y_{imp} = -m_M \cdot a_M \cos \theta \sin \alpha_{aksi} \quad (4.24)$$

$$K_{imp} = 0 \quad (4.25)$$

$$N_{imp} = m_M \cdot a_M \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha_{aksi} \cdot d \quad (4.26)$$

Dari persamaan (4.24 - 4.26) diperoleh gaya *impact* sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} Y_{imp} \\ K_{imp} \\ N_{imp} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_M \cdot a_M \cos \theta \sin \alpha_{aksi} \\ 0 \\ m_M \cdot a_M \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha_{aksi} \cdot d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

#### 4.4 Desain Kendali NMPC

Untuk mendapatkan kendali pada *rudder* kapal dengan gangguan penembakan misil, dilakukan desain kendali dengan NMPC. Fungsi objektif yang digunakan dipaparkan sebagai berikut

$$J = \sum_{j=1}^{N_p} \|\hat{r}(k+j|k) - \hat{y}(k+j|k)\|_Q^2 + \sum_{j=0}^{N_c-1} \|\hat{u}(k+j|k)\|_R^2$$

Dengan,

$\hat{r}(k)$  : referensi haluan kapal ke- $k$

$\hat{y}(k)$  : output haluan kapal ke- $k$

$\hat{u}(k)$  : kendali sudut kemudi ke- $k$

Fungsi objektif diatas meminimumkan error antara sudut haluan kapal dan sudut haluan yg diinginkan dan energi yang digunakan untuk menginputkan kendali. Selanjutnya dipilih  $N_p = N_c$  sehingga persamaan diatas menjadi

$$\begin{aligned} J &= \sum_{j=1}^{N_p} \|\hat{r}(k+j|k) - \hat{y}(k+j|k)\|_Q^2 + \|\hat{u}(k+j-1|k)\|_R^2 \\ &= \|\hat{r}(k+1|k) - \hat{y}(k+1|k)\|_Q^2 + \|\hat{r}(k+2|k) - \hat{y}(k+2|k)\|_Q^2 \\ &\quad + \dots + \|\hat{r}(k+N_p|k) - \hat{y}(k+N_p|k)\|_Q^2 + \|\hat{u}(k|k)\|_R^2 \\ &\quad + \|\hat{u}(k+1|k)\|_R^2 + \dots + \|\hat{u}(k+N_p-1|k)\|_R^2 \end{aligned}$$

Dengan,

$$\|\hat{r}(k+j|k) - \hat{y}(k+j|k)\|_{Q(j)}^2 = (\hat{r}(k+j|k) - \hat{y}(k+j|k))^T Q(\hat{r}(k+j|k) - \hat{y}(k+j|k))$$

$$\|\hat{u}(k+j|k)\|_R^2 = (\hat{u}(k+j|k))^T R(\hat{u}(k+j|k))$$

Berdasarkan formulasi diatas, diperoleh persamaan berikut

$$J = (R_s - Y)^T Q_c (R_s - Y) + U^T R_c U \quad (4.28)$$

Dengan keterangan  $R_s$  adalah nilai referensi mulai dari  $k + 1$  sampai  $k + Np$ ,  $Q_c$  dan  $R_c$  matriks bobot semidefinit positif,  $Y$  sebagai nilai output mulai dari  $k + 1$  sampai  $k + Np$ , serta  $U$  adalah input mulai dari  $k$  sampai  $k + Np - 1$ . Berikut adalah penjabarannya

$$R_s = \begin{bmatrix} \hat{r}(k + 1) \\ \hat{r}(k + 2) \\ \vdots \\ \hat{r}(k + Np) \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$Q_c = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Q_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Q_{Np} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$R_c = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R_{Np} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$$Y = \begin{bmatrix} y(k + 1) \\ y(k + 2) \\ \vdots \\ y(k + Np) \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$$U = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+N_p-1) \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

### Formulasi Kendala

Kendala batas dalam NMPC secara umum terdiri atas kendala input, kendala increment input, dan kendala variabel *state*. Berikut ini adalah pemaparan tiap-tiap kendala batas :

#### 1. Kendala Input

Kendala input diberikan untuk membatasi nilai input yang diberikan pada sistem dalam suatu range. Kendala batas diberikan sebagai berikut

$$u^{min} \leq u(k+j) \leq u^{max}$$

Dengan,

$u^{min}$  : batas minimal nilai input

$u^{max}$  : batas maksimal nilai input

Atau dapat ditulis sebagai pertidaksamaan berikut

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

Dengan  $j = 0, 1, \dots, N_p - 1$ . Pertidaksamaan diatas dapat ditulis dalam bentuk matriks menjadi

$$\begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} u(k+j) \leq \begin{bmatrix} -u^{min} \\ u^{max} \end{bmatrix}$$

$$j = 0$$

$$\begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \leq \begin{bmatrix} -u^{min} \\ u^{max} \end{bmatrix}$$

$$j = 1$$

$$\begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} u(k + 1) \leq \begin{bmatrix} -u^{min} \\ u^{max} \end{bmatrix}$$

$$j = N_p - 1$$

$$\begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} u(k + N_p - 1) \leq \begin{bmatrix} -u^{min} \\ u^{max} \end{bmatrix}$$

Diperoleh kendala input dalam bentuk matriks sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k + 1) \\ \vdots \\ u(k + N_p - 1) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} -u^{min} \\ u^{max} \\ -u^{min} \\ u^{max} \\ \vdots \\ u^{max} \end{bmatrix}$$

Sehingga diperoleh kendala kuadratik berikut ini

$$SU \leq T \tag{4.35}$$

Pada penelitian ini, sudut rudder kapal ditentukan dalam batasan berikut ini :

$$-35^\circ < \delta < 35^\circ$$

Sudut rudder merupakan input kendali yang digunakan pada penelitian ini. Sehingga, kendala batas diatas dapat ditulis dalam bentuk berikut ini :

$$-35^\circ < u < 35^\circ$$

Sehingga berdasarkan persamaan (4.35) pada subbab sebelumnya diperoleh koefisien kendala input  $S$  dan  $T$ . Dengan hanya diberikan satu jenis input, maka koefisien  $S$  adalah

$$S = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{2N_p \times 1N_p}$$

Sedangkan untuk koefisien  $T$  dapat ditulis sebagai

$$T = \begin{bmatrix} 35^\circ \\ 35^\circ \\ 35^\circ \\ 35^\circ \\ \vdots \\ 35^\circ \end{bmatrix}_{2N_p \times 1}$$

## 2. Kendala increment input

Diketahui  $\Delta u = u(k) - u(k - 1)$ . Kendala increment input umumnya diberikan sebagai berikut

$$\Delta u^{\min} \leq \Delta u(k + j) \leq \Delta u^{\max}$$

Atau dapat ditulis sebagai pertidaksamaan berikut

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

Dengan  $j = 0, 1, \dots, N_p - 1$ . Pertidaksamaan diatas dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai

$$j = 0$$

$$\begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \leq \begin{bmatrix} -\Delta u^{min} - u(k-1) \\ \Delta u^{max} + u(k-1) \end{bmatrix}$$

$$j = 1$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} u(k+1) \leq \begin{bmatrix} -\Delta u^{min} \\ \Delta u^{max} \end{bmatrix}$$

$$j = N_p - 1$$

$$\begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} u(k + N_p - 1) \leq \begin{bmatrix} -\Delta u^{min} - u(k + N_p - 2) \\ \Delta u^{max} + u(k + N_p - 2) \end{bmatrix}$$

Diperoleh kendala input keseluruhan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & -1 & \dots & 0 \\ -1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k + N_p - 1) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} -\Delta u^{min} - u(k-1) \\ \Delta u^{max} + u(k-1) \\ \vdots \\ \Delta u^{max} + u(k + N_p - 2) \end{bmatrix}$$

Sehingga diperoleh kendala kuadratik berikut ini

$$EU \leq F \quad (4.36)$$

Pada penelitian ini, diberikan kendala perubahan sudut rudder. Kendala perubahan sudut rudder merupakan kendala increment input yang diberikan, kendala batas dapat ditulis dalam bentuk berikut ini :

$$-5^\circ < \Delta\delta < 5^\circ$$

Sehingga berdasarkan persamaan (4.36) pada subbab sebelumnya diperoleh koefisien kendala increment input input  $E$  dan  $F$ .

$$E = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & -1 & \dots & 0 \\ -1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{2Np \times 1Np}$$

Sedangkan untuk koefisien T dapat ditulis sebagai

$$F = \begin{bmatrix} 5^\circ \\ 5^\circ \\ 5^\circ \\ 5^\circ \\ \vdots \\ 5^\circ \end{bmatrix}_{2Np \times 1}$$

### 3. Kendala Variabel *State*

Pada kecepatan yaw  $v$ , diberikan kendala batas dalam range nilai  $|r| \leq 0.34 \text{ radian/detik}$ . Sehingga kendala variabel *state* diberikan sebagai

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0.34 \\ 0.34 \end{bmatrix}$$

### 4.5 Perhitungan Gangguan

Pada subbab ini, dilakukan perhitungan nilai gangguan pada kapal berdasarkan pada subbab 4.2. Pada bagian ini, dibutuhkan nilai percepatan misil yang digunakan. Oleh karena

itu, digunakan persamaan (2.19) yang bertujuan untuk menentukan nilai percepatan misil. Berikut adalah nilai parameter yang digunakan dalam perhitungan percepatan misil :

$$\text{massa misil} = 600 \text{ kg}$$

$$\text{kecepatan misil} = 1150 \text{ km/jam} \text{ atau } 319,4 \text{ m/s}$$

$$\theta_M = 45^\circ, \theta_T = 180^\circ$$

$$\lambda = 15^\circ, \text{ dan } R = 10 \text{ km.}$$

Hasil yang diperoleh untuk nilai percepatan misil adalah  $-13,26 \text{ m/s}^2$ . Selanjutnya, nilai ini disubstitusikan pada persamaan (4.24-4.26) untuk mendapatkan nilai gaya dan momen gaya impact. Seperti halnya pada perhitungan percepatan misil, dalam penentuan nilai gaya dan momen gaya digunakan parameter-parameter seperti massa kapal, jarak penembak misil ke pusat gravitasi, dan lain lain. Parameter-parameter ini diperoleh dari penelitian oleh Heri P.[5] dan Blanke[21]. Hasil yang diperoleh untuk nilai gaya dan momen gaya impact disajikan sebagai berikut :

$$Y_{imp} = 0.280420341429779 \times 10^4 \text{ N}$$

$$K_{imp} = 0 \text{ Nm}$$

$$N_{imp} = -5.608406828595575 \times 10^4 \text{ Nm}$$

Selanjutnya adalah perhitungan nilai gangguan. Pada perhitungan bagian ini, terdapat beberapa koefisien hidrodinamika yang berperan. Nilai dari koefisien ini diperoleh dari penelitian oleh

Blanke[21]. Berdasarkan Persamaan (4.27) hasil dari perhitungan nilai gangguan  $w$  pada tiap variabel disajikan sebagai berikut :

$$w = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & I_{2 \times 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.280420341429779 \times 10^4 \\ 0 \\ -5.608406828595575 \times 10^4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.004358511848254 \\ -0.000355453009716 \\ -0.000776450055524 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Hasil gangguan yang diperoleh diatas adalah nilai gangguan pada variabel *state*. Pada variabel *sway*  $v$  gangguan yang diperoleh 0.0044, *roll*  $p$  sebesar  $-0.00036$ , dan *yaw*  $r$  sebesar  $-0.00078$ . Nilai gangguan ini akan dapat dilihat *impact*-nya pada arah gerak kapal pada subbab simulasi yang dipaparkan selanjutnya.

#### 4.6 Hasil Simulasi

Pada subbab ini, dipaparkan hasil simulasi NMPC dengan gangguan. Simulasi dilakukan dengan tiga skenario. Skenario pertama yaitu penembakan ketika kapal belum mencapai referensi, yang kedua ketika kapal sedang menuju referensi, dan yang terakhir ketika kapal telah mencapai referensi. Pertama akan dilakukan pemilihan koefisien bobot  $Q$  dan  $Np$  dari beberapa variasi yang akan disimulasikan pada sistem tanpa gangguan terlebih dahulu. Beberapa variasi nilai  $Q$  yang digunakan yakni 1,10 dan 100 dan variasi  $Np$  yang digunakan adalah 10, 15, dan 20. Tiap variasi nilai bobot  $Q$  dan  $Np$ , dipaparkan hasil nilai MAE (*Mean Absolut Error*) yang mana perhitungannya akan dilakukan dengan formula pada persamaan (2.35) berikut

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |\hat{r} - \hat{y}|$$

Dengan,

$\hat{r}$  : Nilai referensi yang diinginkan

$\hat{y}$  : Nilai output yang diperoleh

$n$  : banyaknya iterasi

MAE pada penelitian ini digunakan untuk menghitung rata-rata *error* yang diperoleh dari error atau selisih antara nilai referensi yang diinginkan dengan nilai output sudut hadap kapal yang didapatkan.

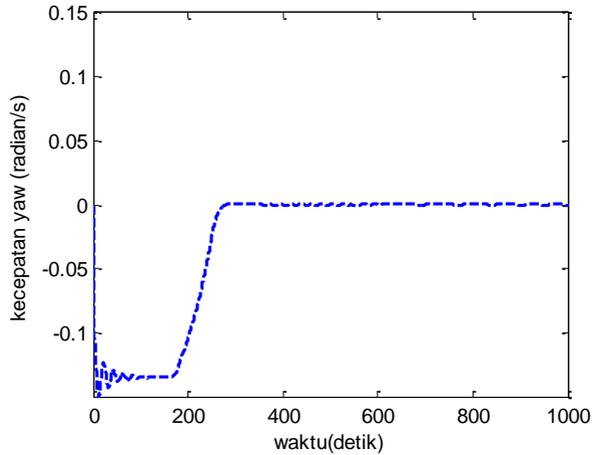
Berikut ini nilai MAE dari variasi nilai bobot  $Q$  dan  $Np$  yang disajikan pada table 4.1 berikut

Tabel 4.1 Perbandingan nilai MAE dengan variasi bobot  $Q$  dan  $Np$

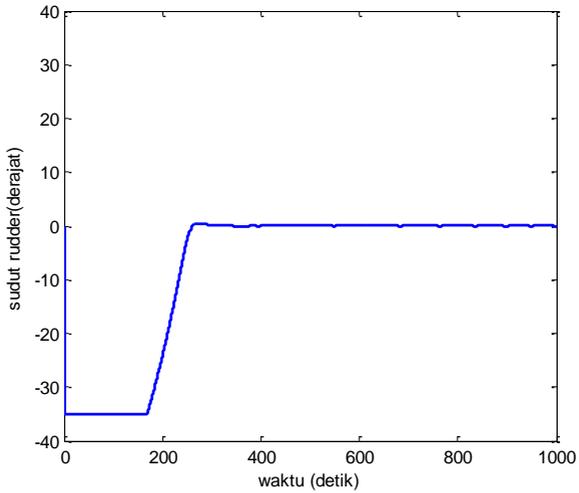
|     |     | $Np$    |         |         |
|-----|-----|---------|---------|---------|
|     |     | 10      | 15      | 20      |
| $Q$ | 1   | 23.4320 | 17.9615 | 14.1790 |
|     | 10  | 10.3908 | 6.9338  | 5.4144  |
|     | 100 | 4.1264  | 3.5255  | 3.4378  |

Berdasarkan Tabel 4.1, nilai MAE yang terkecil dari beberapa variasi  $Np$  dan  $Q$  yang diberikan adalah ketika sistem menggunakan  $Q = 100$  dan  $Np = 20$ . Sehingga untuk selanjutnya simulasi menggunakan nilai  $Np$  dan  $Q$  tersebut untuk tiga skenario yang telah dipaparkan sebelumnya. Simulasi

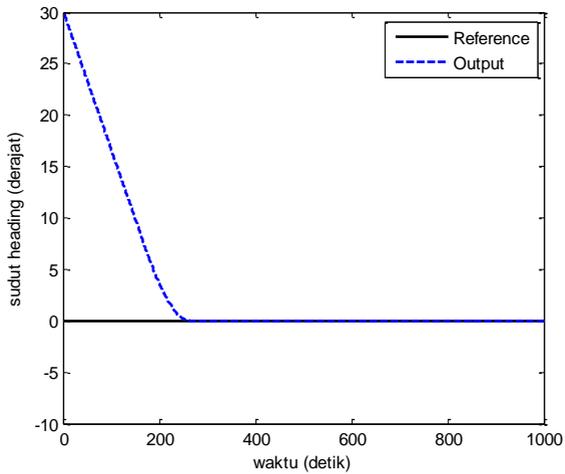
dilakukan dengan koefisien bobot  $R = 1$ , serta waktu *sampling* yang digunakan adalah 0.5 dan waktu selama 1000 detik.



Gambar 4.6 Kecepatan *yaw* sistem tanpa gangguan dengan waktu *sampling* 0.5 dan  $t=1000$



Gambar 4.7 Sudut *rudder* sistem tanpa gangguan dengan waktu sampling 0.5 dan  $t=1000$



Gambar 4.8 Sudut hadap sistem tanpa gangguan dengan waktu sampling 0.5 dan  $t=1000$

Kondisi awal  $x(k = 0)$  untuk sistem diberikan sebagai berikut

$$x(0) = \begin{bmatrix} v(0) \\ p(0) \\ r(0) \\ \phi(0) \\ \psi(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 30^\circ \end{bmatrix}$$

Kondisi awal yang diberikan adalah sudut hadap kapal  $\psi = 30^\circ$ . Simulasi dilakukan untuk menggiring sudut hadap kapal menuju sudut *reference* yang diinginkan yaitu  $0^\circ$  dengan menggunakan tiga skenario yang telah ditentukan

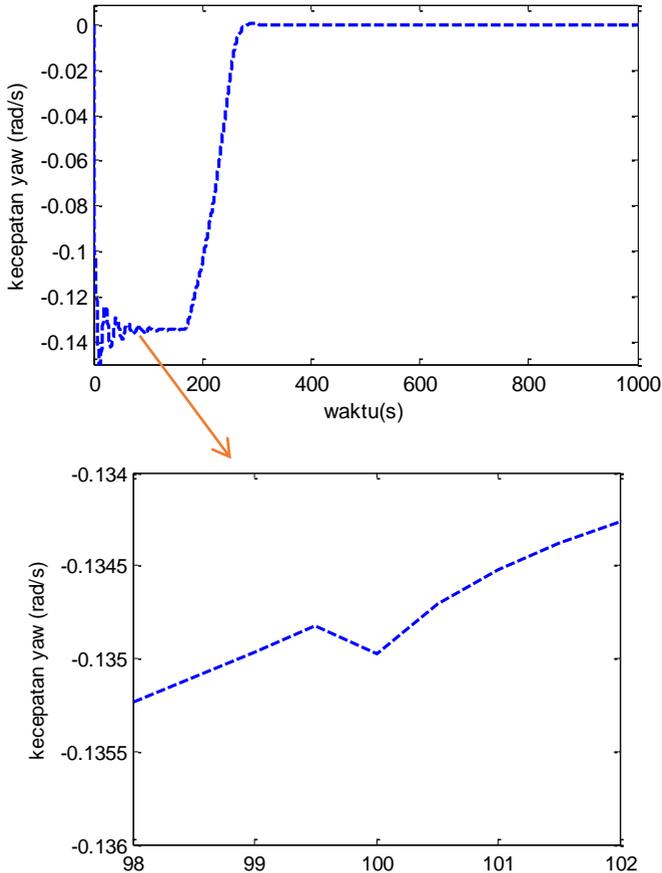
### Hasil Simulasi

Pada tahap ini, dipaparkan hasil simulasi kendali kapal dengan menggunakan NMPC disertai gangguan penembakan misil. Simulasi sistem dengan gangguan ini menggunakan skenario simulasi yang telah dijelaskan sebelumnya. Pada tiap simulasi, dilakukan perhitungan MAE (*mean absolut error*). Sudut tembak yang dilakukan adalah  $30^\circ$ . Dan juga dipilih  $N_p = N_c$ . Berikut adalah hasil simulasi yang diperoleh :

### Skenario 1

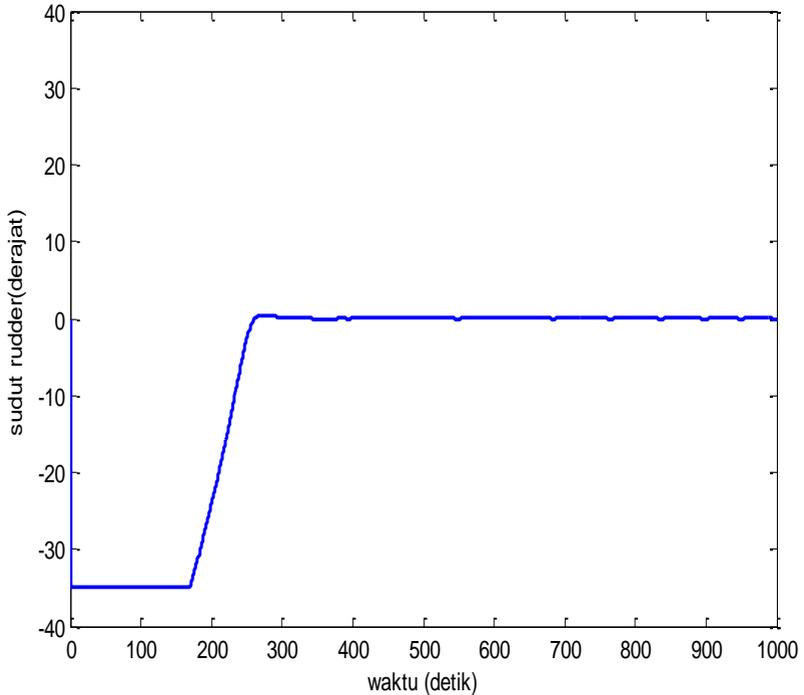
Pada simulasi ini, skenario yang dilakukan adalah kapal menembak sebelum mencapai sudut referensi dengan waktu penembakan yaitu  $t = 100$ . Selanjutnya, sudut hadap kapal digiring menuju referensi  $0^\circ$ . Hasil simulasi disajikan pada Gambar 4.9 hingga 4.11.

Berdasarkan gambar 4.9, tampak bahwa kecepatan *yaw* kapal terjadi perubahan nilai yaitu kurang dari  $0.0002 \text{ radian/detik}$  kearah negatif atau sekitar  $19.5^\circ/\text{detik}$ . Perubahan kecepatan *yaw* ke arah negatif berarti kapal bergerak ke kiri. Hal ini tentunya membantu proses pergerakan arah kapal menuju referensi sudut hadap yang diinginkan yaitu  $0^\circ$ .



Gambar 4.9 Kecepatan *yaw* skenario 1 dengan waktu sampling 0.5 dan  $t=1000$

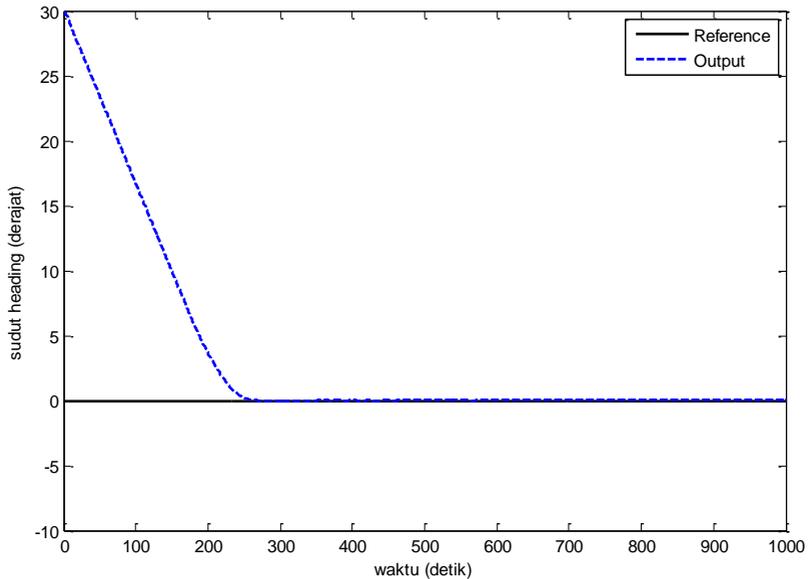
Selanjutnya, diberikan grafik perubahan sudut *rudder* untuk mengetahui perubahan pada *rudder* hadap kapal, disajikan gambar 4.10 berikut



Gambar 4.10 Sudut *rudder* skenario 1 dengan waktu sampling 0.5 dan  $t=1000$

Pada Gambar 4.10, tampak pada detik ke-100 kapal masih dalam kondisi kendali sudut *rudder* minimum hingga mendekati detik ke-200. Hal ini berarti, kapal masih berusaha untuk mengubah sudut hadapnya secara signifikan dengan tetap dalam kondisi batas yang ditentukan yakni minimum nilai kendali sebesar  $-35^\circ$ . Kendali yang mencapai batas minimum

merepresentasikan sudut hadap kapal yang masih jauh dari sudut hadap yang diinginkan sehingga kapal menggunakan kendali penuh dengan tetap memenuhi kondisi batas kendali sudut *rudder* dan juga batas perubahan kendali sudut *rudder* yang telah ditentukan pada subbab sebelumnya. Dengan kendali sudut *rudder* yang masih konstan pada titik minimum, maka sudut hadap kapal pun terpengaruh. Selanjutnya disajikan grafik sudut hadap kapal pada Gambar 4.11



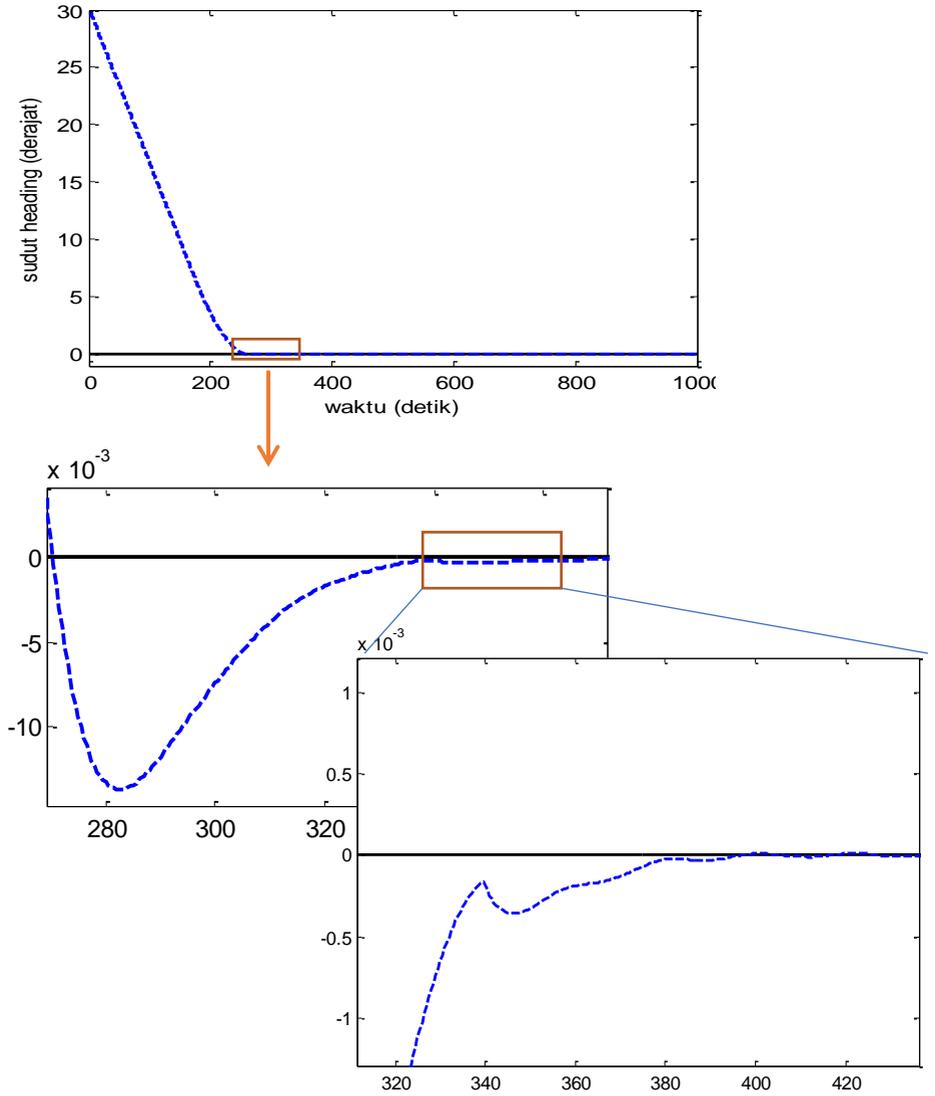
Gambar 4.11 Sudut hadap skenario 1 dengan waktu sampling 0.5 dan  $t=1000$

Pada Gambar 4.11, disajikan grafik sudut hadap kapal. Pada grafik terlihat bahwa sudut hadap kapal tidak mengalami perubahan yang signifikan. Hal ini sesuai dengan sudut *rudder* kapal yang telah dalam keadaan penggunaan kendali pada batas minimum. Sehingga meskipun terbantu dengan arah *impact*

penembakan misil yang sesuai dengan arah penggiringan sudut hadap kapal menuju referensi, sudut *rudder* kapal tidak dapat melampaui kendala batas minimum. Akibatnya, sudut hadap kapal pun mengikuti nilai sudut *ruddernya* yaitu perlahan menuju sudut referensi. Selanjutnya pada Gambar 4.10, nilai sudut *rudder* terlihat berkurang secara perlahan ketika waktu  $t$  mendekati angka 200 hingga menuju titik  $0^\circ$ . Hal tersebut sesuai dengan besar sudut hadap kapal yang terlihat telah mendekati referensi pada detik tersebut sehingga berpengaruh pada kendali sudut *rudder* yang diberikan. Semakin mendekati sudut referensi maka besar kendali sudut *rudder* pun ikut berkurang. Pada skenario ini, nilai MAE yang dihasilkan adalah 3.4378.

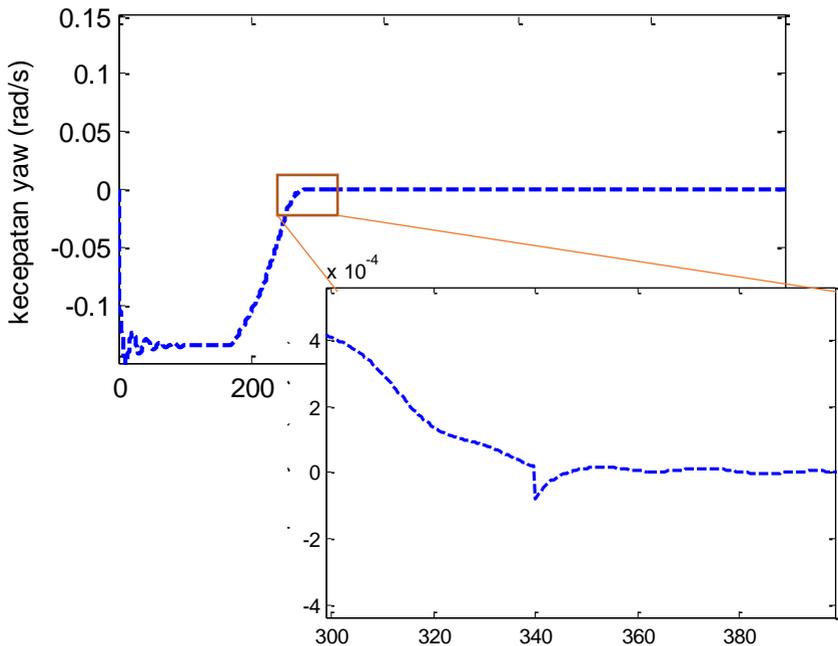
## **Skenario 2**

Pada simulasi ini, skenario yang dilakukan adalah kapal menembak saat sedang mendekati referensi sudut hadap  $0^\circ$ . Penembakan dilakukan pada detik ke 340. Selanjutnya sudut hadap kapal digiring menuju referensi  $0^\circ$ . Pada Gambar 4.12 disajikan grafik sudut hadap kapal. Terlihat bahwa perubahan yang terjadi pada saat penembakan misil mengakibatkan sudut hadap kapal yang mulanya akan mencapai referensi  $0^\circ$  kembali goyah pada detik penembakan misil.



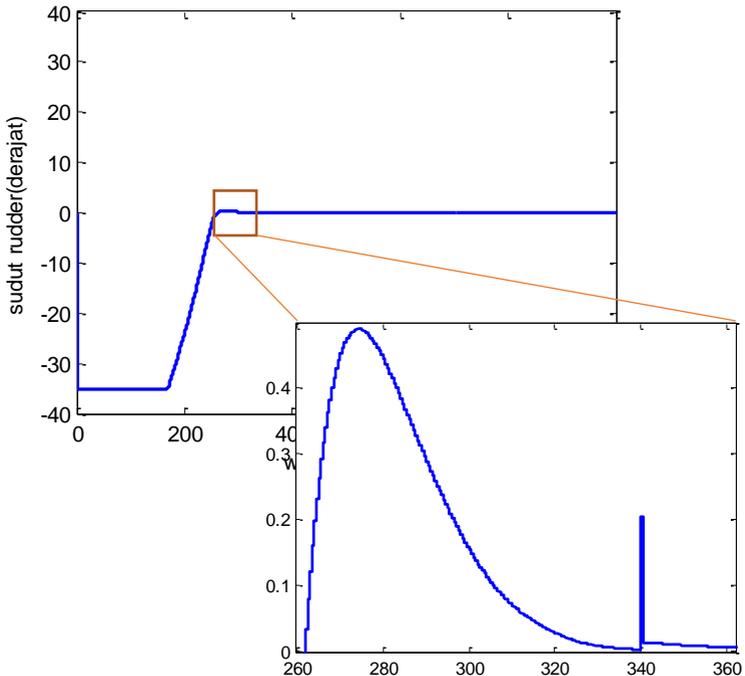
Gambar 4.12 Sudut hadap skenario 2 dengan waktu sampling 0.5 dan  $t=1000$

Selanjutnya, sudut hadap kapal perlahan mendekati sudut referensi  $0^\circ$ . Pada detik ke-270, tampak bahwa sudut *heading* mencapai  $0^\circ$ . Namun, setelahnya menuju kearah negatif sehingga terlihat tidak langsung stabil pada sudut referensi  $0^\circ$ . Selanjutnya, pada saat kapal akan mencapai referensi sudut hadap kapal  $0^\circ$ , dilakukan penembakan misil. Hal ini mempengaruhi sudut hadap kapal sehingga menjauhi sudut referensi. Berdasarkan Gambar 4.12, kapal mendekati sudut referensi kembali sekitar detik ke-440. Selanjutnya, disajikan grafik kecepatan *yaw* pada Gambar 4.13



Gambar 4.13 Kecepatan *yaw* skenario 2 dengan waktu sampling 0.5 dan  $t=1000$

Pada Gambar 4.13, disajikan grafik kecepatan *yaw*. Pada saat penembakan misil di detik ke-340, grafik kecepatan *yaw* mengalami penurunan lalu naik kembali. Hal ini disebabkan karena penembakan misil yang dilakukan saat kecepatan *yaw* seharusnya telah mendekati  $0 \text{ rad/detik}$  ditandai oleh sudut hadap kapal juga telah mendekati referensi pada Gambar 4.14.



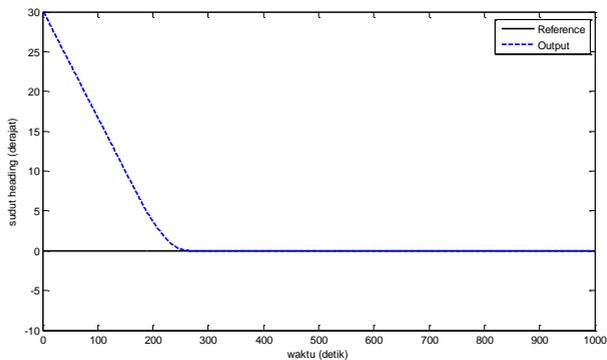
Gambar 4.14 Sudut *rudder* skenario 2 dengan waktu sampling 0.5 dan  $t=1000$

Berdasarkan Gambar 4.14, terlihat bahwa sudut *rudder* pada detik ke-340 mengalami perubahan sebesar  $0.2^\circ$  yang mana pada

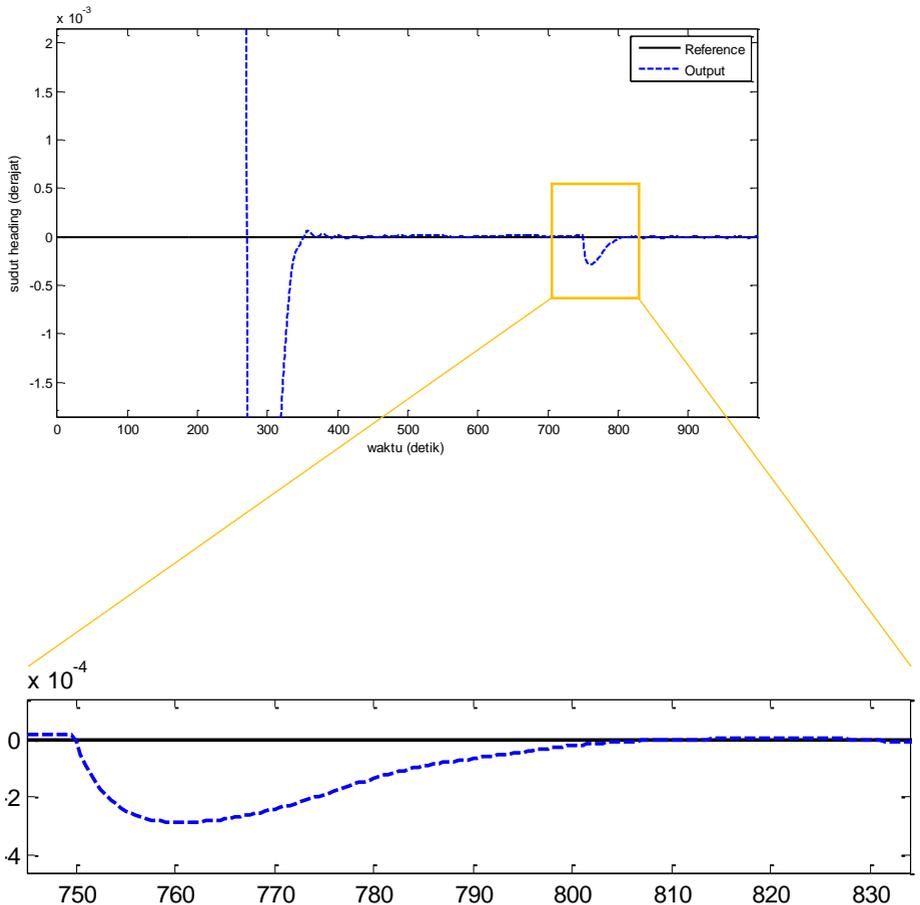
awalnya akan bertahan di titik  $0^\circ$ . Hal ini dipengaruhi oleh penembakan misil yang dilakukan sehingga kapal harus diberikan kendali sebesar nilai tersebut agar kapal segera kembali menuju referensi sudut hadap yang diinginkan.. Nilai MAE yang dihasilkan pada simulasi 2 adalah 3.4378.

### Skenario 3

Pada simulasi ini, skenario yang dilakukan adalah kapal menembak saat kapal telah melakukan *heading* dan mencapai sudut referensi yang diinginkan yaitu  $0^\circ$ . Penembakan dilakukan pada detik ke 750. Selanjutnya sudut hadap kapal kembali digiring menuju referensi  $0^\circ$  setelah penembakan misil dilakukan. Pada Gambar 4.15 disajikan grafik sudut *heading* kapal.



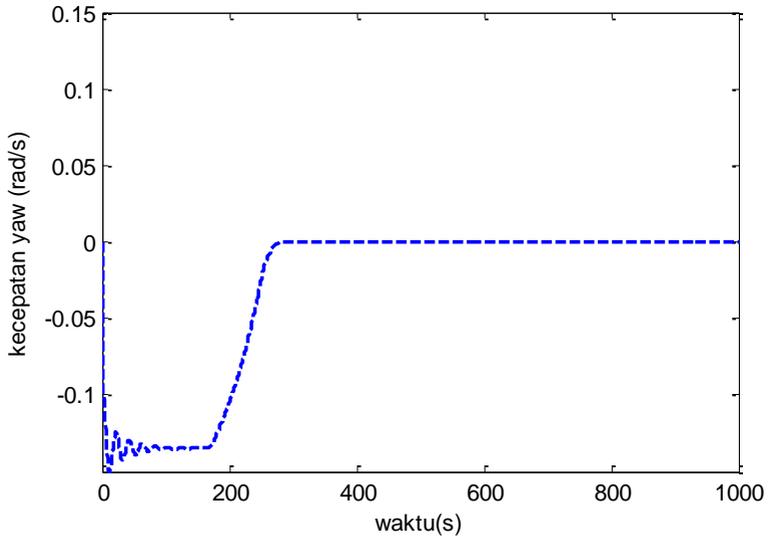
Gambar 4.15 Sudut hadap skenario 3 dengan waktu sampling 0.5 dan  $t=1000$



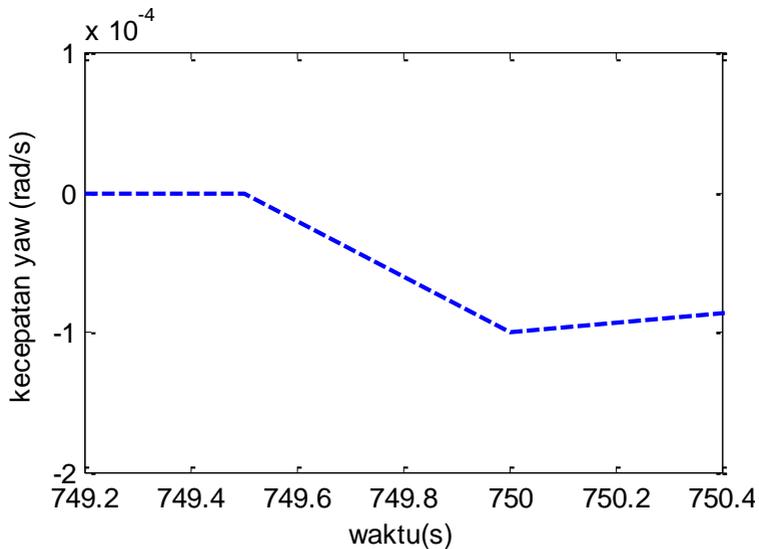
Gambar 4.15a Perbesaran gambar sudut hadap skenario 3 waktu sampling 0.5, dan  $t=1000$

Berdasarkan Gambar 4.15a terlihat penembakan misil pada detik ke 750 mempengaruhi sudut hadap kapal yang awalnya telah berada pada referensi  $0^\circ$  terlihat goyah. Sudut hadap kapal berubah sebesar  $0.0003^\circ$ . Setelahnya, kapal menuju

referensi kembali pada detik ke-832.sehingga dibutuhkan waktu sekitar 82 detik untuk kapal kembali pada referensi sudut hadap yang diinginkan yaitu  $0^\circ$ . Selanjutnya disajikan grafik kecepatan yaw pada Gambar 4.16 dab 4.16a.



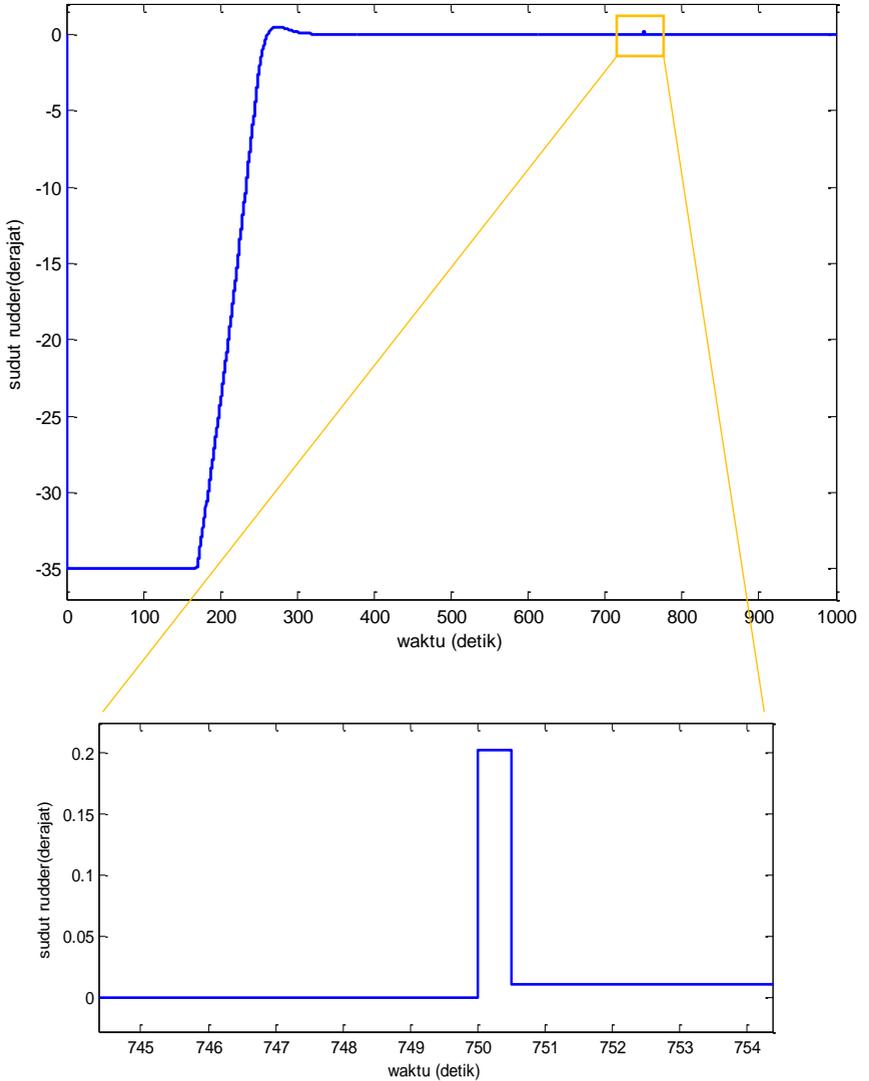
Gambar 4.16 Kecepatan yaw skenario 3 dengan waktu sampling 0.5, dan  $t=1000$



Gambar 4.16a Perbesaran gambar kecepatan *yaw* skenario 3 dengan waktu sampling 0.5, dan  $t=1000$

Pada Gambar 4.16, disajikan grafik kecepatan *yaw* secara keseluruhan waktu simulasi. Selanjutnya dilakukan perbesaran pada Gambar 4.16 yang disajikan pada Gambar 4.16a. Pada grafik terlihat kecepatan *yaw* pada detik ke 749.5 hingga detik ke 750 terjadi pembelokan kecil. Hal ini dikarenakan penembakan misil yang dilakukan pada detik-750. Perubahan kecepatan yang terjadi sebesar 0.0001 *radian/detik*. Selanjutnya kecepatan *yaw* kembali menuju 0 *radian/detik*.

Selanjutnya disajikan grafik sudut *rudder* selama proses kendali yang terdapat pada Gambar 4.17. Berdasarkan Gambar 4.17, terlihat bahwa sudut *rudder* terjadi lonjakan pada detik ke-750. Perubahan sudut *rudder* yang terjadi sekitar  $0.2^\circ$ .



Gambar 4.17 Sudut *rudder* skenario 3 waktu sampling 0.5, dan  $t=1000$

Nilai ini serupa dengan nilai perubahan sudut *rudder* pada skenario 2 dikarenakan besarnya *impact* yang diterima kapal adalah sama meskipun pada waktu penembakan yang berbeda. Nilai MAE yang dihasilkan pada skenario ini adalah 3.4378.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

Pada bab ini, diberikan kesimpulan berdasarkan analisis simulasi kendali sudut pada kapal saat melakukan penembakan misil menggunakan *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC). Selanjutnya diberikan saran untuk penelitian selanjutnya.

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan analisis dan pembahasan pada Bab IV, kesimpulan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut

1. Kendali dengan menggunakan *Nonlinear Model Predictive Control* (NMPC) dapat diterapkan pada kendali sudut kapal pada misi penembakan misil.
2. Kendali sudut hadap dilakukan dengan koefisien bobot  $R = 1, Q = 100$ , waktu *sampling* 0.5, waktu  $t=1000$ , dan  $Np = 20$ . Dapat menggiring sudut hadap kapal menuju referensi yang diinginkan. Nilai MAE yang dihasilkan sistem untuk meraih sudut referensi dengan variasi skenario penembakan misil adalah sama yaitu  $3.4378^\circ$ . Kendali *rudder* yang diberikan sistem untuk penembakan misil bernilai serupa yakni sekitar  $0.2^\circ$ , hal ini dapat dilihat pada skenario 2 dan 3.

#### **5.2 Saran**

Saran dari tugas akhir ini adalah

1. Dalam penelitian ini, penulis mengabaikan massa kapal saat penembakan dan sesudah penembakan misil. Pada penelitian selanjutnya, massa sebelum dan sesudah kapal dapat diperhitungkan.
2. Untuk penelitian selanjutnya, gangguan yang ditambahkan dapat berupa gangguan alam seperti angin dan gelombang.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 16 Tahun 2017 Tentang Kebijakan Kelautan Indonesia Pasal 1 Ayat 2.
- [2] Indonesia, K.P.R., 2015. Buku Putih Pertahanan Indonesia. *Jakarta: Kementerian Pertahanan (Kemhan) Republik Indonesia.*
- [3] Putri, D.K.R., Adzkiya, D. and Asfihani, T., 2019, July. Ship Heading Control for Dubins Path Tracking and Collision Avoidance using Model Predictive Control. In *2019 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)* (pp. 628-633). IEEE.
- [4] Purnawan, H., Asfihani, T. and Adzkiya, D., 2018, November. Disturbance compensating model predictive control for warship heading control in missile firing mission. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1108, No. 1, p. 012035). IOP Publishing.
- [5] Purnawan, H., 2018, Agustus, *Disturbance Compensating Model Predictive Control Untuk Kendali Gerak Kapal Perang Dengan Misi Penembakan Misil*, Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [6] Jalving, B., 1994. The NDRE-AUV flight control system. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 19(4), pp.497-501.
- [7] Abdelaal, M., Fränzle, M. and Hahn, A., 2018. Nonlinear Model Predictive Control for trajectory tracking and collision avoidance of underactuated vessels with disturbances. *Ocean Engineering*, 160, pp.168-180.
- [8] Risdhayanti, A.D., 2017. *Desain dan Simulasi Gerak Kontrol Kedalaman Pada MARES AUV Menggunakan*

- Nonlinear Model Predictive Control* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- [9] Magni, L., Raimondo, D.M. and Allgöwer, F., 2009. Nonlinear model predictive control. ***Lecture Notes in Control and Information Sciences***
- [10] SNAME, T., 1950. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. ***The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Technical and Research Bulletin No***, pp.1-5.
- [11] Yoon, H. K., Son, N. S. & Lee, G. J, 2007, Estimation of the Roll Hydrodynamic Moment Of A Ship by Using The System Identification Method And The Free Running Model test, **IEEE Journal of Oceanic Engineering** 32 (4), 798-806.
- [12] Perez, T., 2006. *Ship motion control: course keeping and roll stabilisation using rudder and fins*. **Springer Science & Business Media**.
- [13] Fossen, T.I., 1994. *Guidance and control of ocean vehicles*. New York: Wiley.
- [14] Pan, S., Su, H., Chu, J. & Wang, H., 2010, Applying a novel extended Kalman Filter to missile- target interception with APN guidance law : **A benchmark case study, Control Engineering Practice** 18(2), 159-167
- [15] Madyastha, V., 2005. *Adaptive estimation for control of uncertain nonlinear systems with applications to target tracking* (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology).
- [16] Subchan, S. and Asfihani, T., 2013. The missile guidance estimation using extended kalman filter-unknown input-without direct feedthrough (ekf-ui-wdf) method. ***Journal of the Indonesian Mathematical Society***, 19(1), pp.1-14.

- [17] Zarchan, P., 2012. *Tactical and strategic missile guidance*. **American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.**
- [18] Huzaimah, H., 2016. *Metode analitik dan metode runge-kutta orde 4 dalam penyelesaian persamaan getaran pegas teredam* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim)
- [19] Camacho, E.F. and Alba, C.B., 2013. *Model predictive control*. **Springer Science & Business Media**.
- [20] Grüne, L. and Pannek, J., 2017. Nonlinear model predictive control. In *Nonlinear Model Predictive Control* (pp. 45-69). **Springer, Cham**.
- [21] Marafioti, G., Olaru, S. and Hovd, M., 2009. State estimation in nonlinear model predictive control, unscented kalman filter advantages. In *Nonlinear Model Predictive Control* (pp. 305-313). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [22] Blanke, M. and Christensen, A. C., 1993. Rudder-roll damping autopilot robustness to sway-yaw-roll couplings. Aalborg Universitetscenter



## **LAMPIRAN BIODATA PENULIS**



Penulis bernama Tri Wahyu Agus Setiorini, lahir di Surabaya, 12 Agustus 1999. Penyusun merupakan anak ketiga dari pasangan Bapak Samsun dan Ibu Ponirah. Jenjang pendidikan formal yang ditempuh oleh penyusun dimulai dari SDN Ngino (2004-2010), MTsN Pare (2010-2013), SMAN 2 Pare (2013-2016).

Setelah lulus dari penyusun melanjutkan studi ke jenjang S1 di Matematika ITS pada tahun 2016 sampai sekarang melalui jalur SNMPTN dengan NRP 06111640000041. Di Jurusan Matematika ITS penulis mengambil Bidang Minat Matematika Terapan. Selain aktif kuliah, penulis juga aktif berorganisasi di Staff Dana Usaha Ibnu Muqlah (2017/2018) dan mengikuti beberapa kepanitian yang ada di dalam kampus. Adapun informasi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini dapat ditunjukkan ke penulis melalui email [triwahyuasr@gmail.com](mailto:triwahyuasr@gmail.com)