



TUGAS AKHIR - TE 141599

PERANCANGAN *LINEAR QUADRATIC TRACKING* UNTUK KENDALI HALUAN KAPAL

Rewinda
NRP 07111645000064

Dosen Pembimbing
Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.
Nurlita Gamayanti, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

DESIGN LINEAR QUADRATIC TRACKING FOR SHIP HEADING

Rewinda
NRP 0711164500064

Advisor
Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.
Nurlita Gamayanti, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**PERANCANGAN *LINEAR QUADRATIC TRACKING* UNTUK KENDALI HALUAN KAPAL**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 5 Juli 2018



Rewinda
NRP 07111645000064

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

**PERANCANGAN *LINEAR QUADRATIC TRACKING*
UNTUK KENDALI HALUAN KAPAL**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Departemen Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

N.enyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Ir. Rusdhianto Effendi A.K., MT.
NIP : 195704241985021001


Nurlita Gamayanti, ST., MT.
NIP : 197812012002122002



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

PERANCANGAN *LINEAR QUADRATIC TRACKING* UNTUK KENDALI HALUAN KAPAL

Nama : Rewinda
Pembimbing : 1. Ir. Rusdhianto Effendi A.K., MT.
2. Nurlita Gamayanti, ST., MT.

ABSTRAK

Kapal adalah kendaraan pengangkut penumpang atau barang yang beroperasi di perairan. Pengendalian kapal yang baik dan mempunyai sinyal *output* mendekati sinyal *input* sangat diperlukan dalam pelaksanaannya. Besarnya kecepatan gerakan memutar kesamping pada kapal dapat menyebabkan mabuk laut dan kerusakan pada kargo. Kesetabilan kapal agar menuju titik referensi yang diberikan adalah hal yang sangat penting untuk dimiliki kapal. Dalam hal ini titik-titik referensi merupakan *waypoint* yang direncanakan. Pada tugas akhir ini persamaan *autopilot* kapal diselesaikan dengan PID konvensional yaitu untuk mengendalikan posisi *yaw* agar hasil desain memiliki respon tertentu, dimana kecepatan kapal terhadap sumbu x adalah konstan dan untuk memilih *input plant* dengan indeks performansi yang minimum pada tugas akhir ini digunakan metode *Optimal Tracking* yaitu *Linear Quadratic Tracking* (LQT). Sebagai Model kapal yang digunakan berjenis *underactuated*, yaitu kapal yang memiliki variabel kontrol lebih banyak dari pada jumlah variabel yang dikendalikan *actuator*.

Hasil pengujian kontroler menunjukkan bahwa hasil desain sistem dapat mengatur sudut *yaw* kapal sesuai dengan titik-titik *waypoint* yang diberikan. Nilai RMSE pada lintasan 1 sebesar 0.0164, lintasan 2 sebesar 0.3387, dan lintasan 3 sebesar 0.5566.

Kata Kunci : *Autopilot*, PID, *Optimal Tracking*, LQT, Kapal *Underactuated*.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DESIGN LINEAR QUADRATIC TRACKING FOR SHIP HEADING

Name : Rewinda
Advisor : 1. Ir. Rusdhianto Effendi A.K., MT.
2. Nurlita Gamayanti, ST., MT.

ABSTRACT

Ship is a passenger carrier or goods which operating in waters Good ship control and having an output signal close to the input signal is indispensable in its implementation. The magnitude of the later twisting motion on the vessel can cause seasickness and damage to cargo. Stability of the ship to get to the reference point provided is very important for the ship. In this case the reference points are the planned waypoints. In this final project the ship autopilot equation is solved by conventional PID that is to control the yaw position so that the design result has a certain response, where the velocity of the vessel to the x axis is constant and to select the input of plant u with the minimum performance index in this final project is used Optimal Tracking namely Linear Quadratic Tracking (LQT). As a ship model used underactuated type, namely the ship has more control variables than the number of variables that are controlled actuator.

The result of the controller test shows that the system design result can adjust the ship's yaw angle according to the given waypoint points. RMSE value on track 1 is 0.0164, path 2 is 0.3387, and path 3 is 0.5566.

Keywords : *Autopilot, PID, Optimal Tracking, LQT, Under Actuated Ship.*

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam semoga selalu dilimpahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan umat muslim yang senantiasa meneladani beliau.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Strata-1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan judul:

PERANCANGAN *LINEAR QUADRATIC TRACKING* UNTUK KENDALI HALUAN KAPAL

Dalam Tugas Akhir ini dirancang kendali kapal autopilot dengan pendekatan PID dan untuk *tracking* optimal pada kapal menggunakan metode LQT.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu dan Bapak penulis yang memberikan berbagai bentuk doa serta dukungan tulus tiada henti, Bapak Ir. Rusdhianto Effendi A.K., MT dan Ibu Nurlita Gamayanti ST., MT atas segala bimbingan ilmu, moral, dan spiritual dari awal hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini. Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari dan memohon maaf atas segala kekurangan pada Tugas Akhir ini. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dalam pengembangan keilmuan di kemudian hari.

Surabaya, 5 Juli 2018

Rewinda

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR ISI

	HALAMAN
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
HALAMAN PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	1
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi Penelitian	2
1.6 Sistematika Laporan.....	3
1.7 Relevansi.....	4
BAB 2 TEORI PENUNJANG	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Prinsip Sistem Kontrol Kapal [9]	5
2.2.1 Definisi <i>Guidance, Navigation</i> dan <i>Control</i> [9]	6
2.3 Dinamika Kapal [4].....	6
2.3.1 Kinematika [4].....	8
2.3.2 Pemodelan Kapal <i>Underactuated</i> [1]	9
2.4 <i>Linear Quadratic Tracking</i> (LQT).....	10
2.5 Kontroler PID (<i>Proporsional Integral Differensial</i>) [5].....	12
2.6 Sistem Kontrol Cascade [10].....	13
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM KONTROL	15
3.1 Diagram Blok Sistem Kontrol Kapal	15
3.2 Model Matematika Kapal <i>Underactuated</i>	16
3.2.1 Perancangan Simulasi Kapal.....	17

3.2.2 Perancangan Simulasi Kinematika Kapal.....	18
3.3 Perancangan Simulasi <i>Autopilot</i> Kapal <i>Underactuated</i>	19
3.4 Permodelan Sistem.....	21
3.5 Perancangan kontroler LQT Pengendalian Sudut <i>Yaw</i>	22
3.6 Perancangan <i>Guidance</i>	23
3.7 Perancangan Trayektori.....	27
BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISA	31
4.1 Hasil Simulasi Kapal <i>Underactuated Plant</i>	31
4.2 Hasil Simulasi Autopilot dan Permodelan Kapal <i>Underactuated</i>	33
4.3 Hasil Simulasi <i>Guidance System</i>	36
4.4 Hasil Simulasi <i>Linear Quadratic Tracking</i>	37
4.5 Hasil <i>Error</i> Sudut <i>Heading</i> dan Simulasi Respon Posisi Sumbu X dan Posisi Sumbu Y	41
BAB 5 PENUTUP	45
DAFTAR PUSTAKA	47
LAMPIRAN A	49
A.1. Parameter Kapal <i>Underactuated</i>	49
A.2. Program <i>Tracking</i> LQT	49
A.3. <i>Path Planning</i>	49
A.3. Program <i>Trajectory Generator</i> Lintasan 1	50
A.4. Program <i>Trajectory Generator</i> Lintasan 2	50
A.5. Program <i>Trajectory Generator</i> Lintasan 3	51
A.6. Simulink Keseluruhan	52
BIOGRAFI PENULIS	53

DAFTAR GAMBAR

HALAMAN

Gambar 2.1	<i>Guidance, Navigation dan Control</i> [9]	5
Gambar 2.2	Variabel Gerak pada Kapal [9]	7
Gambar 2.3	Diagram Blok <i>Optimal Tracking System</i> [7].....	11
Gambar 2.4	Diagram Blok Kontroler PID.....	13
Gambar 2.5	Diagram Blok Sistem Kontrol Proses <i>Cascade</i>	13
Gambar 3.1	Diagram Blok Sistem Kotrol Kapal.....	15
Gambar 3.2	Struktur <i>Simulink</i> Kecepatan Terhadap Sumbu x , Kecepatan Terhadap Sumbu y , Kecepatan Sudut <i>Yaw</i> , dan Sudut <i>Yaw</i>	17
Gambar 3.3	Perancangan Simulasi Kapal <i>Open Loop</i>	17
Gambar 3.4	Struktur <i>Simulink</i> Sub Sistem Kinematika Kapal	18
Gambar 3.5	Struktur <i>Simulink</i> Kinematika Kapal.....	18
Gambar 3.6	Diagram Blok Perancangan Kontroler PID <i>Cascade</i> Untuk <i>Autopilot</i> Kapal.	19
Gambar 3.7	Sudut <i>Yaw Open Loop</i>	20
Gambar 3.8	Grafik Kecepatan Sudut <i>Open Loop</i>	20
Gambar 3.9	Perancangan Simulasi <i>Autopilot</i> Kapal.....	20
Gambar 3.10	Respons Sudut <i>Yaw</i> Setelah Diberikan Kontroler PID ..	21
Gambar 3.11	Response Sudut <i>Yaw</i> Kapal dengan Pendekatan Orde 2.22	22
Gambar 3.12	Diagram Blok Kontroler LQT	22
Gambar 3.13	Perancangan <i>Guidance</i>	24
Gambar 3.14	Pengujian <i>Guidance</i>	24
Gambar 3.15	Grafik Respon Sumbu X dan Sumbu Y Hasil Pengujian <i>Guidance</i> Lintasan 1	25
Gambar 3.16	Grafik Respon Sumbu X dan Sumbu Y Hasil Pengujian <i>Guidance</i> Lintasan 2	26
Gambar 3.17	Grafik Respon Sumbu X dan Sumbu Y Hasil Pengujian <i>Guidance</i> Lintasan 3	27
Gambar 3.18	Hasil Plot Rencana <i>Waypoint</i> Lintasan 1	28
Gambar 3.19	Hasil Plot Rencana <i>Waypoint</i> Lintasan 2.....	29
Gambar 3.20	Hasil Plot Rencana <i>Waypoint</i> Lintasan 3.....	30
Gambar 4.1	Respon <i>Open Loop</i> Kecepatan Translasi U dengan Gangguan Diabaikan.....	32

Gambar 4.2	Respon Loop Terbuka Kecepatan Translasi V Dengan Gangguan.....	32
Gambar 4.3	Respon <i>Open Loop</i> Kecepatan Sudut Tanpa Gangguan. ...	33
Gambar 4.4	Respon <i>Open Loop</i> Sudut <i>Yaw</i> Gangguan Diabaikan.....	33
Gambar 4.5	Respon Loop Tertutup Sudut <i>Yaw</i> dengan Gangguan Diabaikan.....	34
Gambar 4.6	Grafik Heading Kapal dengan Kontroler PID <i>Cascade</i>	35
Gambar 4.7	Respon Sudut <i>Yaw</i> dan Respon Pendekatan Sudut <i>Yaw</i> Orde Satu.....	35
Gambar 4.8	Referensi Sudut <i>Yaw</i> Lintasan 1.....	36
Gambar 4.9	Referensi Sudut <i>Yaw</i> Lintasan 2.....	36
Gambar 4.10	Referensi Sudut <i>Yaw</i> Lintasan 3.....	37
Gambar 4.11	Pengujian Hasil Model <i>Tracking</i>	38
Gambar 4.12	Respon <i>Tracking</i> Sudut <i>Yaw</i> dengan Kontroler LQT Lintasan 1.....	38
Gambar 4.13	Kecepatan Kapal Sumbu Terhadap Sumbu X Lintasan 1.....	39
Gambar 4.14	Respon <i>Tracking</i> Sudut <i>Yaw</i> dengan Kontroler LQT Lintasan 2.....	39
Gambar 4.15	Kecepatan Kapal Sumbu Terhadap Sumbu X Lintasan 2.....	40
Gambar 4.16	Respon <i>Tracking</i> Sudut <i>Yaw</i> dengan Kontroler LQT Lintasan 3.....	40
Gambar 4.17	Kecepatan Kapal Sumbu Terhadap Sumbu X Lintasan 3.....	41
Gambar 4.18	Plot Posisi X dan Posisi Y Lintasan 1.....	42
Gambar 4.19	Grafik <i>Error Heading</i> .Lintasan 1.....	42
Gambar 4.20	Plot Posisi X dan Posisi Y Lintasan 2.....	43
Gambar 4.21	Grafik <i>Error Heading</i> .Lintasan 2.....	43
Gambar 4.22	Plot Posisi X dan Posisi Y Lintasan 3.....	44
Gambar 4.23	Grafik <i>Error Heading</i> .Lintasan 3.....	44

DAFTAR TABEL

	HALAMAN
Tabel 2.1 Notasi untuk Kapal [4]	7
Tabel 3.1 Parameter Kapal <i>Underactuated</i>	16
Tabel 3.2 Pengujian <i>Guidance</i> Rencana <i>Waypoint</i> untuk Lintasan 1	25
Tabel 3.3 Pengujian <i>Guidance</i> Rencana <i>Waypoint</i> untuk Lintasan 2	26
Tabel 3.4 Rencana <i>Waypoint</i> untuk Pengujian <i>Guidance</i> Lintasan 3	26
Tabel 3.5 Rencana <i>Waypoint</i> Lintasan 1	28
Tabel 3.6 Rencana <i>Waypoint</i> Lintasan 2	29
Tabel 3.7 Rencana <i>Waypoint</i> Lintasan 3	29

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal adalah kendaraan pengangkut penumpang atau barang yang beroperasi di perairan. Ditinjau dari ukurannya ada bermacam-macam istilah yang diberikan pada kapal. Istilah yang sering digunakan adalah *vessel* yaitu kendaraan dengan struktur berongga yang dibuat untuk mengapung di air yang bertujuan untuk transportasi dan navigasi. Semua jenis kapal atau perahu yang beroperasi di sungai, laut atau samudra, besar atau kecil, menggunakan layar atau tidak itu semua disebut dengan *vessel*. Ada dua jenis *vessel* yang dibagi menjadi beberapa tipe yang berbeda yaitu *Ship* dan *Boat*. *Ship* adalah kapal besar yang dirancang untuk mengarungi perairan terbuka atau samudra. Biasanya kapal yang berjenis ini memiliki berat lebih dari 500 ton. *Boat* merupakan kapal yang ukurannya lebih kecil dari pada *ship*. *Boat* tidak dirancang untuk melintasi samudra, tetapi *boat* dirancang untuk menyusuri jalur-jalur air yang ada di darat seperti sungai, danau, dan lain-lain.

Besarnya gerakan memutar kesamping pada kapal dapat menyebabkan mabuk laut dan kerusakan pada kargo. Kesetabilan kapal agar menuju titik referensi yang diberikan adalah hal yang sangat penting untuk di dimiliki kapal. Dalam hal ini titik-titik referensi merupakan *waypoint* yang direncanakan. Pada tugas akhir ini persamaan autopilot kapal diselesaikan dengan PID konvensional yaitu untuk mengendalikan posisi *yaw* agar hasil desain memiliki respon tertentu, dimana kecepatan kapal terhadap sumbu x adalah konstan dan untuk memilih *input plant* dengan indeks performansi yang minimum pada tugas akhir ini digunakan metode *Optimal Tracking* yaitu *Linear Quadratic Tracking* (LQT). Sebagai Model kapal yang digunakan berjenis *underactuated*, yaitu kapal yang memiliki variabel kontrol lebih banyak dari pada jumlah variabel yang dikendalikan *actuator*. *Actuator* adalah suatu peralatan mekanis yang dapat menggerakkan atau mengendalikan suatu mekanisme dari sistem.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah bagaimana mengatur sudut *yaw* (gerakan berbelok) pada kapal, sehingga kapal dapat lebih optimal dalam melacak jalur referensinya ketika

bermanuver di laut dengan menggunakan sistem kendali *Tracking Optimal* yaitu *Linear Quadratic Tracking* (LQT).

1.3 Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Kapal yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah kapal *underactuated* bertipe monohul.
2. Menggunakan model matematika kapal *underactuated* dengan pergerakan 3 derajat kebebasan. Dimana dalam hal ini kecepatan *surge* di asumsikan konstan.
3. Desain kontroler untuk *autopilot* kapal menggunakan PID konvensional dan menggunakan LQT (*Linear Quadratic Tracking*) untuk mengontrol sudut *yaw* yaitu gerakan rotasi pada sumbu vertical kapal.
4. Kendali sistem gerak kapal yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengaturan sudut *heading* (*Yaw*) kapal.
5. Kapal diasumsikan hanya dapat berjalan ke depan.

1.4 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem kendali *Tracking Optimal* pada *heading* kapal. Manfaat dari tugas akhir ini adalah mahasiswa mendapatkan pengetahuan mengenai penerapan sistem kendali *Tracking Optimal* khususnya pada kapal.

1.5 Metodologi Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu akan dijelaskan sebagai berikut.

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data mengenai kapal dan pengkajian mengenai model matematika kapal. Pencarian informasi mengenai metode *Optimal Tracking* yang akan diterapkan untuk mengontrol kapal. Data dan informasi yang dikumpulkan dari beberapa sumber ilmiah seperti buku, jurnal ilmiah yang telah diterbitkan dan hasil penelitian.

2. Pemodelan Sistem

Pada tahap ini pemodelan fisis analisis kinematika dan dinamika sistem kapal *underactuated* dan parameternya didapat dari jurnal ilmiah. Variabel yang didapatkan dari jurnal ilmiah

adalah pergerakan *sway* (kanan atau kiri), dan *yaw* (gerakan memutar kesamping) dengan *surge* (maju atau mundur) konstan.

3. Desain Kontroler

Model matematik kapal permukaan *underactuated* telah diperoleh, maka akan dilakukan perancangan sistem kendali *Tracking Optimal* dengan metode LQT (*Linear Quadratic Tracking*) untuk mengoptimisasi gerak *tracking* pada *heading* kapal.

4. Pengujian dan Analisa

Pada tahap ini dilakukan pengujian sistem. Sistem yang diuji adalah sistem *open loop* dan sistem yang telah menggunakan sistem kendali *Tracking Optimal*. Pengujian sistem pada tahap ini dilakukan dengan cara mensimulasikan sistem. Pada tahap ini juga dilakukan pengamatan pada *error orientasi* (ψ^*e).

5. Penyusunan Buku Tugas Akhir

Pada tahap ini akan dilakukan penyusunan laporan terkait hasil proses Tugas Akhir yang telah dilakukan. Penyusunan buku tugas akhir dilakukan sebagai bentuk laporan tertulis dari proses dan hasil kerja terkait topik yang diusulkan.

1.6 Sistematika Laporan

Pembahasan Tugas Akhir ini akan dibagi menjadi lima Bab dengan sistematika sebagai berikut:

BAB 1 Pendahuluan

Bab ini meliputi latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, metodologi penelitian, sistematika laporan, dan relevansi.

BAB 2 Teori Dasar

Bab ini menjelaskan tentang tinjauan pustaka, model matematika kapal *underactuated*, konsep dari metode Optimal kontrol *tracking* LQT (*Linier Quadratic Tracking*), spesifikasi respon *Transient*, dan kontroler PID.

BAB 3 Perancangan Sistem

Bab ini membahas desain simulasi dan perancangan algoritma kontrol untuk *tracking optimal* pada *heading* kapal berdasarkan teori dasar yang ada pada Bab 2.

- BAB 4 Pengujian dan Analisa
Bab ini membahas hasil simulasi dari kontroler yang telah dibuat serta dilakukan analisa hasil penelitian.
- BAB 5 Penutup
Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan diharapkan Tugas Akhir ini dapat menjadi referensi perencanaan desain optimal kontrol untuk mengendalikan *heading* kapal dan dapat menjadi rujukan untuk akademika dalam hal sistem kendali kapal permukaan *underactuated*.

BAB 2 TEORI PENUNJANG

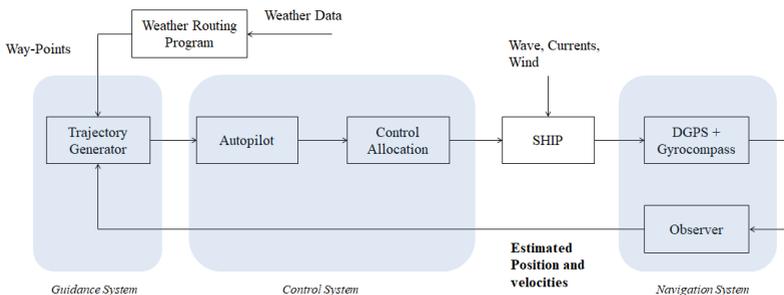
Pada Bab ini akan membahas mengenai teori dasar yang akan menunjang dalam penelitian yang akan dilakukan. Teori dasar yang akan di bahas pada bab ini adalah model matematika kapal *underactuated*, Spesifikasi kondisi *Transient* dan Kendali PID dan metode LQT (*Linear Quadratic Tracking*).

2.1 Tinjauan Pustaka

Pada kontrol kapal banyak sekali permasalahan kontrol yang harus diselesaikan. *Trajectory tracking* merupakan permasalahan kontrol yang menjadi perhatian untuk diselesaikan. Pada penelitian ini [1] *Trajectory Tracking* adalah permasalahan kontrol dimana kendaraan dibutuhkan untuk melacak jalur referensi dengan parameter waktu. Oleh karena itu *trajectory tracking* sangat bergantung pada model referensi. Terdapat beberapa metode untuk meyelesaikan permasalahan kontrol seperti ini.

Penelitian yang membahas mengenai permasalahan *tracking* kontrol adalah seperti pada [2] menggunakan PID Adaptif diterapkan pada sistem autopilot kapal untuk mengendalikan gerak *yaw* atau kendali haluan kapal. Kemudian pada penelitian selanjutnya [3] menggunakan metode LQG (*Linear Quadratic Gaussian*) yang diterapkan dalam sistem kendali kapal dalam bentuk ruang keadaan (*state-space*).

2.2 Prinsip Sistem Kontrol Kapal [9]



Gambar 2.1 Guidance, Navigation dan Control [9]

Pada dasarnya system kontrol kapal secara umum terdiri dari tiga blok bagian utama yaitu adalah *Guidance, Navigation, dan Control (GNC) System*. Sistem ini berinteraksi dengan satu sama lain melalui data dan sinyal transmisi seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 2.1**. Bentuk yang paling dasar dari sistem GNC adalah model referensi (*guidance system*), *sensor system (navigation system)*, dan *feedback control system*.

2.2.1 Definisi *Guidance, Navigation dan Control* [9]

Secara umum bentuk paling maju dari system kapal adalah sistem GNC, dimana sistem ini terdiri dari 3 blok pengaturan dasar sebagai berikut :

Guidance adalah aksi dari sistem yang secara terus menerus menghitung referensi (yang diinginkan) posisi, kecepatan, percepatan dan sudut dari kapal untuk digunakan sebagai referensi *input control system*. Biasanya data disediakan oleh operator manusia atau dari system navigasi. Komponen dasar dari *guidance system* adalah sensor gerak, data eksternal seperti data cuaca (kecepatan dan arah angin, data gelombang, kecepatan dan arah arus, dll) dan komputer. Dibanyak kasus, pada teknik optimasi yang maju *guidance* digunakan untuk menghitung *optimal trajectory* atau *path*.

Navigation adalah ilmu yang mengarahkan kapal ke posisi, arah dan jarak yang ditempuh. Pada beberapa kasus kecepatan dan percepatan umumnya sudah di tentukan. Sistem navigasi biasanya dilakukan dengan menggunakan *satellite navigation system* yang dikombinasikan dengan sensor gerak seperti *accelerometer* dan *gyroscope*. Sistem navigasi yang diaplikasikan pada kapal yang paling canggih adalah *Inertial Navigation System (INS)*.

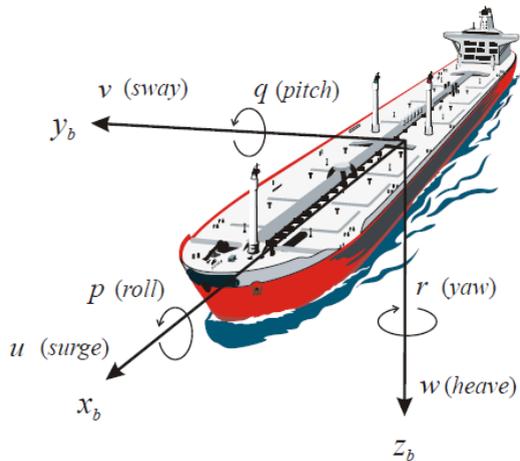
Control adalah aksi penentuan kontrol gaya dan momen yang dibutuhkan dan dihasilkan oleh kapal untuk memenuhi *objective control*. Kontrol obyektif yang diinginkan biasanya berhubungan dengan *guidance system*. Contoh dari kontrol obyektif adalah meminimumkan energi, *set point regulation, trajectory tracking, path following, maneuvering*, dll).

2.3 Dinamika Kapal [4]

Model matematika kapal didapatkan dari struktur mekanik, prinsip statis dan dinamik. Pada prinsip statis berdasarkan pada titik *equilibrium body* kapal pada saat kapal beristirahat atau tidak bergerak dengan

kecepatan konstan. Pada pengaruh dinamik berkaitan dengan *body* kapal yang memiliki gerakan yang dipercepat akibat dari adanya gangguan atau gaya.

Untuk kapal laut dengan 6 derajat kebebasan, 6 kordinat diperlukan untuk menentukan posisi dan orientasi kapal. Pada kordinat pertama yaitu (x, y, z) dan turunan pertamanya berdasarkan posisi dan gerak translasi sepanjang sumbu x -, y - dan z -, sedangkan tiga kordinat terakhir yaitu (ϕ, θ, ψ) dan turunan pertama mendeskripsikan gerak orientasi dan rotasi.



Gambar 2.2 Variabel Gerak pada Kapal [9]

Tabel 2.1 Notasi untuk Kapal [4]

Derajat Kebebasan		Gaya Dan Moment	Kecepatan <i>Linear</i> Dan <i>Angular</i>	Posisi Dan Sudut Euler
1	<i>Surge</i>	X	u	x
2	<i>Sway</i>	Y	v	y
3	<i>Heave</i>	Z	w	z
4	<i>Roll</i>	K	p	ϕ
5	<i>Pitch</i>	M	q	θ
6	<i>Yaw</i>	N	r	ψ

Tabel 2.1 merupakan notasi yang digunakan pada kapal laut, 6 komponen gerak yang didefinisikan sebagai *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Untuk menentukan persamaan gerak, mempertimbangkan dua *frame* referensi yaitu pada saat *inersia* atau *fixed* pada *frame* bumi dimana O_E, X_E, Y_E, Z_E yang diambil untuk disesuaikan dengan kordinat kapal pada *fixed frame* pada kondisi awal dan *body* kapal pada *fixed frame* yaitu O_B, X_B, Y_B, Z_B untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **Gambar 2.2**. Karena gerak bumi hampir tidak mempengaruhi kapal laut berbeda dengan kendaraan udara, oleh karena itu sumbu bumi pada *fixed frame* O_E, X_E, Y_E, Z_E dapat di anggap sebagai *inersia*. Berdasarkan gagasan itu secara umum gerak kapal laut dapat dideskripsikan dengan vektor berikut :

$$\begin{aligned}
 \eta &= [\eta_1 \eta_2]^T & \eta_1 &= [xyz]^T & \eta_2 &= [\phi \theta \psi]^T \\
 v &= [v_1 v_2]^T & v_1 &= [uvw]^T & v_2 &= [pqr]^T \\
 \tau &= [\tau_1 \tau_2]^T & \tau_1 &= [XYZ]^T & \tau_2 &= [KMN]^T
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Dimana η merepresentasikan vektor posisi dan orientasi dengan kordinat pada sumbu *Fixed frame* bumi, v merepresentasikan vektor kecepatan linier dan angular dengan kordinat pada *fixed frame* badan kapal dan τ mempresentasikan gaya dan *moment* yang bekerja pada kapal berdasarkan *fixed frame* badan kapal.

2.3.1 Kinematika [4]

Turunan pertama dari vektor posisi η_1 terkait dengan dengan vektor kecepatan linier v_1 berdasarkan transformasi berikut:

$$\dot{\eta} = J_1(\eta_2)v_1 \tag{2.2}$$

Dimana $J_1(\eta_2)$ adalah matrik transformasi, dimana persamaan 2.2 tersebut terkait dengan fungsi sudut *euler* : *roll* (ϕ), *pitch* (θ), dan

yaw (ψ). Persamaan dalam bentuk matrik diberikan sebagai berikut :

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) \cos(\theta) - \sin(\psi) \cos(\phi) + \sin(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) \\ \sin(\psi) \cos(\theta) \quad \cos(\psi) \cos(\phi) + \sin(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) \quad \dots \\ -\sin(\theta) \quad \sin(\phi) \cos(\theta) \\ \sin(\psi) \sin(\phi) + \sin(\theta) \cos(\psi) \cos(\phi) \\ -\cos(\psi) \sin(\phi) + \sin(\theta) \sin(\psi) \cos(\phi) \\ \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.3.2 Pemodelan Kapal *Underactuated*[1]

Pada persamaan berikut kapal *underactuated* dianggap mempunyai dinamika yang sederhana yang berarti semua diagonalnya linier dan memiliki matrik redaman linier dan non linier. Demikian juga gangguan lingkungan yang mempengaruhi kapal seperti gelombang laut, angin dan arus laut pada persamaan ini diabaikan. Persamaan 2.4 berikut ini adalah model matematika kapal *underactuated* yang bergerak pada arah *surge*, *sway* dan *yaw* :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{u} &= -\frac{m_{22}vr}{m_{11}} - \frac{d_{11}}{m_{11}}u + \frac{trhust}{m_{11}} + \left(\frac{F_{arusair}}{m_{11}} + \frac{F_{gelombang}}{m_{11}} + \frac{F_{angin}}{m_{11}} \right) \\ \dot{y} &= u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{v} &= -\frac{m_{11}ur}{m_{22}} - \frac{d_{22}}{m_{22}}v + \left(\frac{F_{arusair}}{m_{22}} + \frac{F_{gelombang}}{m_{22}} + \frac{F_{angin}}{m_{22}} \right) \\ \dot{\psi} &= r \\ \dot{r} &= \frac{(m_{11} - m_{22})uv}{m_{33}} - \frac{d_{33}}{m_{33}}r + \frac{1}{m_{33}}\tau_r \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dimana :

- x : Perpindahan *surge* searah *frame* tetap bumi
- y : Perpindahan *sway* searah *frame* tetap bumi
- ψ : Sudut *yaw* searah *frame* tetap bumi

- \dot{u} : Kecepatan *surge*
- \dot{v} : Kecepatan *sway*
- \dot{r} : Kecepatan *yaw*
- $m_{ii}(i=1,2,3)$: Inersia kapal termasuk penambahan massa pada pergerakan *surge*, *sway*, dan *yaw*
- $d_{ii}(i=2,3)$: Peredam getaran hidrodinamik pada pergerakan *sway* dan *yaw*
- τ_r : Momen *yaw*

2.4 Linear Quadratic Tracking (LQT)

Pada [7] *Linear Quadratic Tracking* (LQT) sistem digunakan untuk menjaga agar *output* sistem sedekat mungkin dengan *output* yang diinginkan dengan meminimumkan energi yang dikontrol. Dibawah ini adalah persamaan linier, sistem *observable* :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) &= C(t)x(t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dimana, $x(t)$ merupakan vektor *state order* ke n , $u(t)$ adalah vektor kontrol orde ke r , dan $y(t)$ adalah vektor *output* order ke m . Selanjutnya $z(t)$ sebagai orde ke m *output* yang diinginkan dan berbagai matrik $A(t)$, $B(t)$ dan $C(t)$ menjadi dimensi yang sesuai. Hal yang utama pada persamaan ini adalah bagaimana caranya agar *output* $y(t)$ dapat mengikuti *output* yang diinginkan $z(t)$ sedekat mungkin dengan interval waktu $[t_0, t_f]$ dengan meminimumkan upaya pengontrolan. Dari keterkaitan tersebut, dapat ditentukan vektor *error* sebagai berikut :

$$e(t) = z(t) - y(t) \quad (2.6)$$

Dan *Performance Index* yang dipilih adalah,

$$J = \frac{1}{2} e'(t_f)F(t_f)e(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [e'(t)Q(t)e(t) + u'(t)R(t)u(t)]dt \quad (2.7)$$

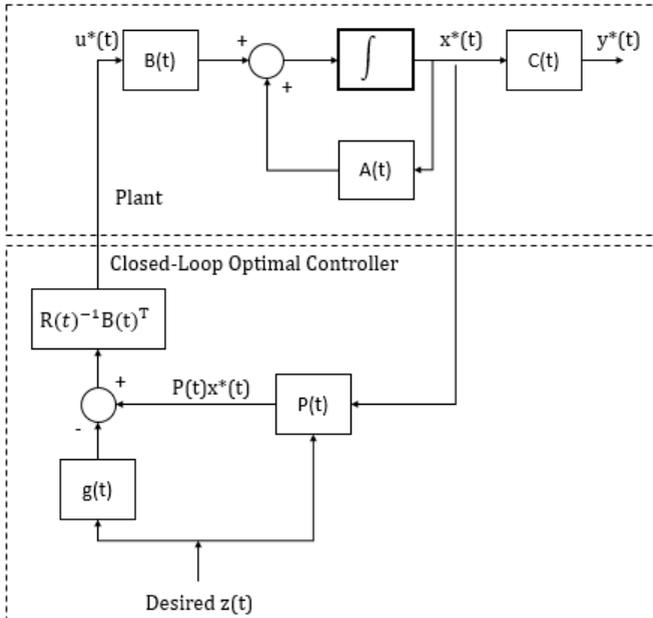
Diasumsikan $F(t_f)$ dan $Q(t)$ adalah matrik simetris positif semidefinit dengan dimensi $(m \times m)$, dan $R(t)$ adalah matrik simetris definit positif. $R(t)$ dan $Q(t)$ merupakan matrik pembobot yang berfungsi sebagai penentu kinerja dari suatu sistem. Semakin besar $Q(t)$

semakin memperkecil sinyal kesalahan $e(t)$. Sedangkan $R(t)$ berfungsi untuk mengatur seberapa besar daya, energi dan lain-lain yang dikeluarkan untuk mengatur sistem yang dikontrol.

Setelah didapatkan matrik *state* $A(t)$ dan $B(t)$ selanjutnya adalah menyelesaikan matrik persamaan *Differential Ricatti* dengan Persamaan 2.8 untuk sistem dengan *finite time case* dan Persamaan 2.9 untuk sistem dengan *infinite time case*. Diagram blok sistem dengan kontroler LQT data dapat dilihat pada **Gambar 2.3**.

$$\dot{P}(t) = -P(t)A(t) - A'(t)P(t) + P(t)E(t)P(t) - V(t) \quad (2.8)$$

$$0 = -P(t)A(t) - A'(t)P(t) + P(t)B(t)R(t)^{-1}B'(t)'P(t) - C(t)'Q(t)C(t) \quad (2.9)$$



Gambar 2.3 Diagram Blok *Optimal Tracking System* [7]

Untuk matrik Q dan R diasumsikan sesuai dengan kriteria sistem yang diinginkan. Setelah didapatkan persamaan *differential ricatti* selanjutnya adalah mencari persamaan matriks *differential non homogen* sebagai berikut :

$$\dot{g}(t) = [P(t)E(t) - A'(t)]g(t) - W(t)z(t) \quad (2.10)$$

Setelah didapatkan matrik P(t) dan matrik g(t) langkah selanjutnya adalah mencari matrik K(t). Matrik K(t) didapatkan dari berikut ini :

$$K(t) = R^{-1}(t)B'(t)P(t) \quad (2.11)$$

Setelah parameter yang dibutuhkan untuk metode LQT didapatkan selanjutnya dapat dicari nilai kontrol optimal $u^*(t)$ dengan menggunakan sebagai berikut :

$$u^*(t) = -K(t)x^*(t) + R^{-1}(t)B'(t)g(t) \quad (2.12)$$

2.5 Kontroler PID (*Proporsional Integral Differensial*) [5]

Pada kontroler proporsional ditambah integral ditambah differensial, terdiri dari dua sinyal utama yaitu yang pertama sinyal kesalahan $e(t)$ adalah masukan kontroler sedangkan keluaran dari kontroler merupakan sinyal kontrol yaitu $u(t)$. Terdapat relasi antara masukan kontroler $e(t)$ dan keluaran kontroler $u(t)$, hubungan ini akan dijelaskan pada persamaan sebagai berikut :

$$u(t) = Kp \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t)dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.13)$$

Dalam besaran transformasi *Laplace* yaitu sebagai berikut :

$$U(s) = Kp \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) E(s) \quad (2.14)$$

Dari persamaan diatas Kp merupakan penguatan proporsional, τ_i adalah waktu integral dan τ_d adalah waktu *differensial*. Dalam kasus ini parameter Kp , τ_i dan τ_d dapat ditentukan, sehingga fungsi alih kontroler PID dapat dilihat pada Persamaan 2.15.

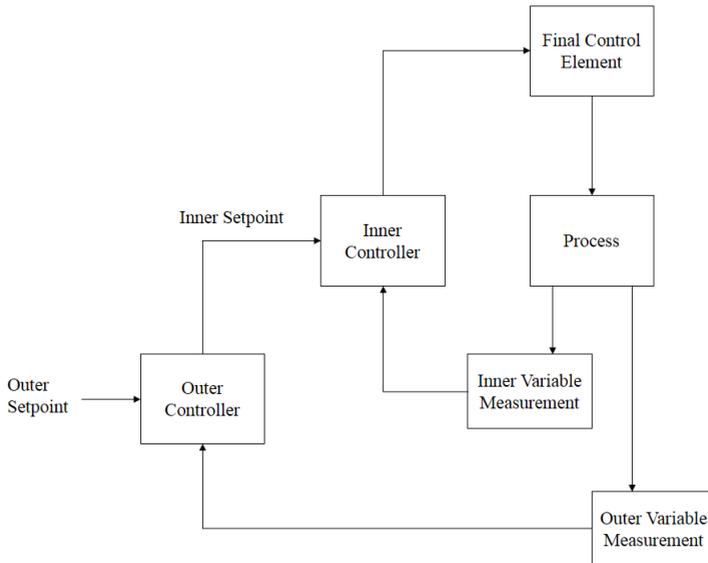
$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (2.15)$$

Dari Persamaan diatas terdapat hubungan *input* dan *output* yang direpresentasikan dalam bentuk diagram blok. Diagram blok kontroler PID adalah sebagai berikut :

$$E(s) \longrightarrow \boxed{\frac{U(s)}{E(s)} = Kp \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right)} \longrightarrow U(s) \quad (2.16)$$

Gambar 2.4 Diagram Blok Kontroler PID

2.6 Sistem Kontrol Cascade [10]



Gambar 2.5 Diagram Blok Sistem Kontrol Proses *Cascade*.

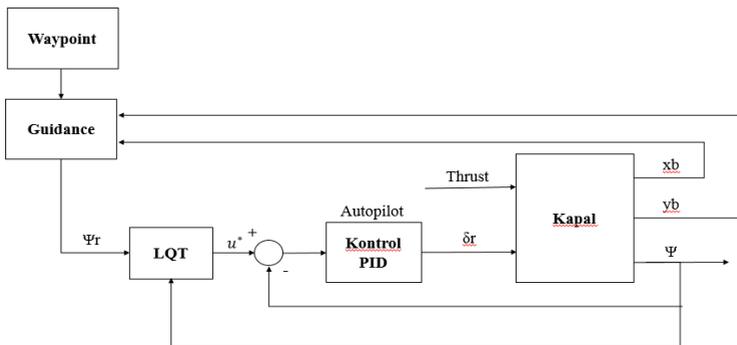
Interaksi antara 2 sistem kontrol pada banyak aplikasi terkadang digunakan untuk memberikan kontrol keseluruhan yang baik. Salah satu metode untuk mencapai hal ini adalah kontrol cascade. Yaitu sebuah sistem kontrol yang *set point* dalam satu *loop* kontrol ditentukan oleh pengukuran dari variable yang berbeda untuk setiap interaksi yang ada. Diagram blok sistem kontrol ini diberikan pada **Gambar 2.5**. Dua pengukuran diambil dari sistem dan menggunakan *loop* masing-masing. Pada *loop* luar, *output* kontroler adalah *setpoint* dari *loop* dalam. Oleh karena itu, apabila variabel kontrol *loop* luar berubah, maka sinyal kesalahan yang dimasukkan ke kontroler menyebabkan perubahan

setpoint di *loop* dalam. Meskipun demikian, nilai yang terukur dari *loop* dalam tidak berubah, *loop* dalam menghasilkan sinyal kesalahan dan dengan demikian *output* baru berdasarkan perubahan *setpoint*. Kontrol *casacade* umumnya memberikan kontrol yang lebih baik dari pada sistem kontrol dengan variable tunggal.

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM KONTROL

Pada bab ini akan membahas mengenai perancangan sistem kontrol yang dibagi menjadi tiga hal. Pertama akan membahas mengenai perancangan simulasi model matematika kapal *underactuated*. Yang kedua adalah perancangan kontroler PI dan PI yang digunakan pada sistem *autopilot* pada kapal. Kontroler ini digunakan untuk mengendalikan posisi *yaw* agar hasil desain memiliki respon tertentu dan untuk memilih *input plant* u dengan indeks performansi yang minimum pada tugas akhir ini digunakan metode *Optimal Tracking* yaitu *Linear Quadratic Tracking* (LQT). Dan yang terakhir adalah penyusunan simulasi sistem *Tracking* kapal yang akan dikontrol dengan menggunakan metode LQT.

3.1 Diagram Blok Sistem Kontrol Kapal



Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem Kontrol Kapal.

Pada diagram blok **Gambar 3.1** menunjukkan perancangan sistem kapal yang digunakan pada tugas akhir ini. Pada diagram blok tersebut dapat kita lihat referensi sudut *yaw* didapatkan dari *guidance system* berdasarkan titik-titik *waypoint* yang diinginkan. Kemudian masuk ke *autopilot system*, dimana metode yang dipakai sebagai pengontrolan sudut *heading* adalah metode LQT dan PID konvensional. Sistem *autopilot* kapal dalam hal ini menggunakan tipe *cascade* yaitu kontroler PD untuk mengatur sudut *yaw* pada kapal. Dan kontroler PI digunakan untuk mengatur *yaw rate* pada kapal. Sistem *optimal tracking* metode

LQT digunakan untuk mengatasi permasalahan *tracking* sistem linier yang memenuhi fungsi kuadrat *error minimum*.

3.2 Model Matematika Kapal *Underactuated*

Model matematika kapal *underactuated* di adopsi dari [1]. Dalam pelaksanaannya model matematika kapal dibagi menjadi 2 aspek yaitu yang pertama memperhatikan aspek gerak geometris kapal dan kinematika dimana pada kinematika ini dilakukan analisa yang menghasilkan gerak. Berikut merupakan model matematika kapal yang digunakan pada tugas akhir ini :

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\
 \dot{u} &= -\frac{m_{22}vr}{m_{11}} - \frac{d_{11}}{m_{11}}u + \frac{thrust}{m_{11}} + \left(\frac{F_{arusair}}{m_{11}} + \frac{F_{gelombang}}{m_{11}} + \frac{F_{angin}}{m_{11}} \right) \\
 \dot{y} &= u \sin \psi + v \cos \psi \\
 \dot{v} &= -\frac{m_{11}ur}{m_{22}} - \frac{d_{22}}{m_{22}}v + \left(\frac{F_{arusair}}{m_{22}} + \frac{F_{gelombang}}{m_{22}} + \frac{F_{angin}}{m_{22}} \right) \\
 \dot{\psi} &= r \\
 \dot{r} &= \frac{(m_{11} - m_{22})uv}{m_{33}} - \frac{d_{33}}{m_{33}}r + \frac{1}{m_{33}}\tau_r
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Berdasarkan persamaan 3.1 di atas didapatkan *input* sesungguhnya kapal adalah *thrust* dan τ_r . Dimana *thrust* merupakan gaya dorong kapal dan τ_r merupakan momen *yaw*. Dimana pada *thrust* itu sendiri berasal dari persamaan 3.2 dan momen *yaw* berasal dari persamaan 3.3. F merupakan gaya *propulsion* (gaya yang ditimbulkan oleh mesin), l merupakan jarak propeller terhadap titik berat kapal dan δr merupakan sudut kemudi. Oleh karena itu, input sesungguhnya dari kapal adalah F dan δr . Parameter kapal *underactuated* yang digunakan pada penelitian ini diambil dari [1] yang diberikan pada **Tabel 3.1**.

$$Thrust = F \cos \delta r \tag{3.2}$$

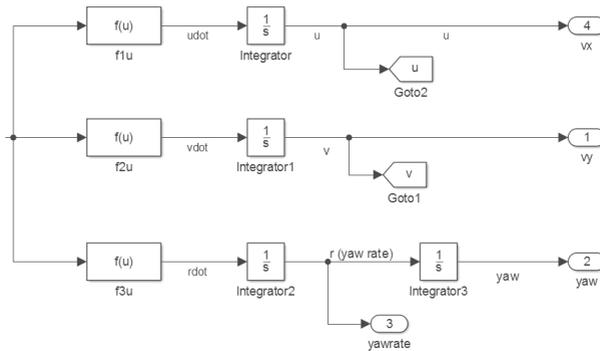
$$\tau_r = l.F.\sin \delta r \tag{3.3}$$

Tabel 3.1 Parameter Kapal *Underactuated*

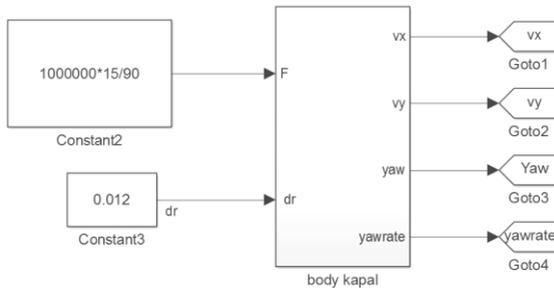
No	Parameter	Simbol	Nilai
1	Kecepatan <i>Surge</i>	u	10m/s
2	Konstanta	k	0.02
3		c	0,0125 s

No	Parameter	Simbol	Nilai
4	Momen Inersia pada pergerakan <i>surge</i>	$m11$	120.000 kg
5	Momen Inersia pada pergerakan <i>sway</i>	$m22$	217.900 kg
6	Momen Inersia pada pergerakan <i>yaw</i>	$m33$	63.600.000 kg.m ²
7	<i>Damper</i> pada gerak <i>surge</i>	$d11$	21.500
8	<i>Damper</i> pada gerak <i>sway</i>	$d22$	117.000 kg/s
9	<i>Damper</i> pada gerak <i>yaw</i>	$d33$	8.020.000 kg m ² /s

3.2.1 Perancangan Simulasi Kapal.



Gambar 3.2 Struktur *Simulink* Kecepatan Terhadap Sumbu x , Kecepatan Terhadap Sumbu y, Kecepatan Sudut Yaw, dan Sudut Yaw.

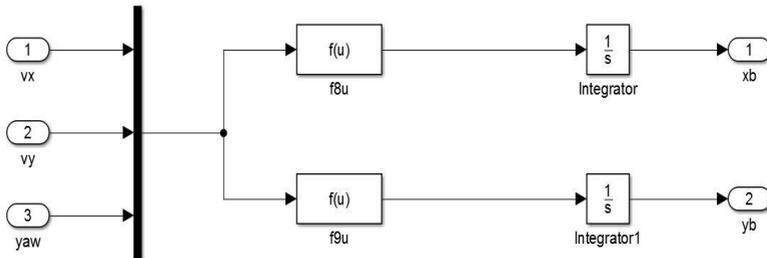


Gambar 3.3 Perancangan Simulasi Kapal *Open Loop*

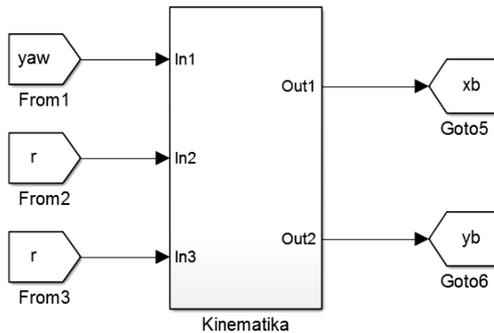
Dari persamaan 3.1 selanjutnya pada subab ini akan disajikan dalam bentuk struktur *simulink*. Pada persamaan kapal *underactuated* tersebut terdapat dua *input* yaitu gaya dorong (*thrust*) dan momen *yaw* dan 3 *output* yaitu kecepatan pada sumbu x, kecepatan pada sumbu y

dan sudut *yaw*. Dimana *thrust* diasumsikan sebesar 160.000. Dan sebelum dilakukan pengendalian sudut *yaw* untuk melihat respon kapal digunakan referensi sudut *yaw* sebesar 0.012 rad. 0.012 rad merupakan sudut maksimal yang dapat dilakukan kapal. **Gambar 3.2** berikut merupakan struktur *simulink output* dari persamaan kapal *underactuated*. Struktur keseluruhan perancangan Simulink *body* kapal *Underactuated* dapat dilihat pada **Gambar 3.3**.

3.2.2 Perancangan Simulasi Kinematika Kapal



Gambar 3.4 Struktur *Simulink* Sub Sistem Kinematika Kapal



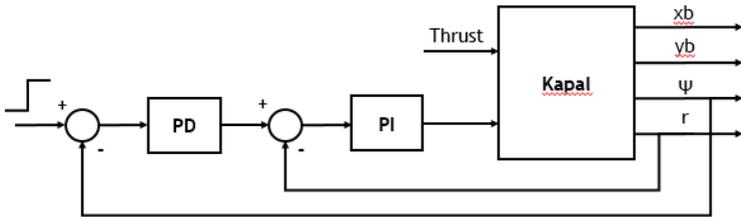
Gambar 3.5 Struktur Simulink Kinematika Kapal.

Selanjutnya adalah kinematika kapal digunakan untuk merepresentasikan model matematika kapal dalam kordinat *fixed* sumbu x dan sumbu y bumi. Persamaan 3.1 merupakan kinematika kapal yang dipakai pada tugas akhir ini. $J(\eta)$ merupakan matrik transformasi yang merepresentasikan vektor posisi dan orientasi dengan kordinat pada

sumbu *Fixed frame* bumi. Struktur *Simulink* kinematika kapal pada sistem ini dapat dilihat pada **Gambar 3.4** dan **Gambar 3.5**.

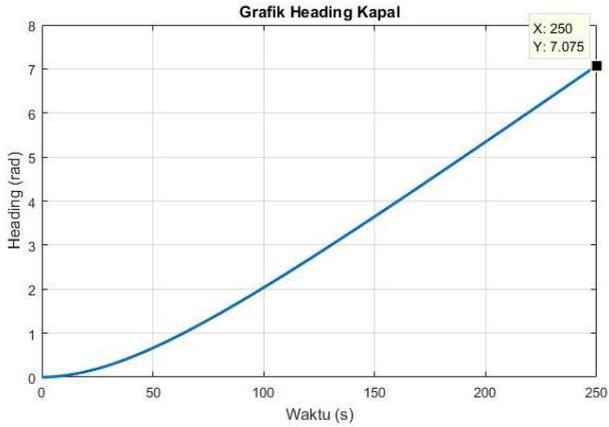
$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

3.3 Perancangan Simulasi *Autopilot* Kapal *Underactuated*

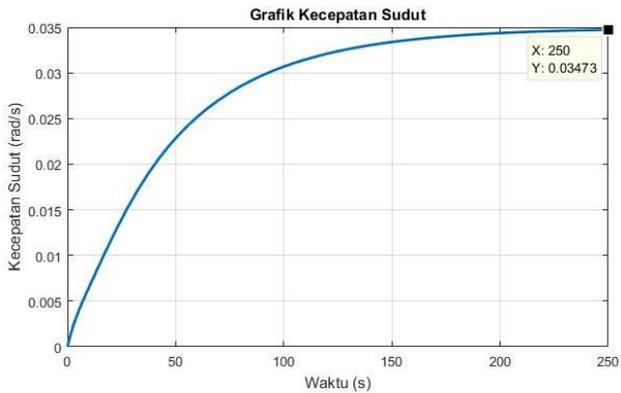


Gambar 3.6 Diagram Blok Perancangan Kontroler PID *Cascade* Untuk *Autopilot* Kapal.

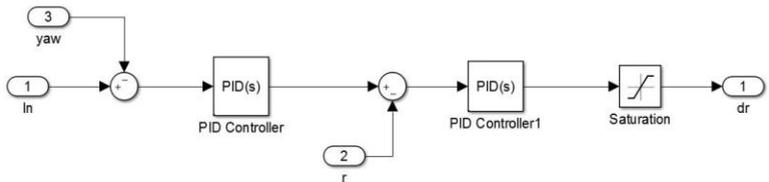
Pada tahap ini dilakukan perancangan *autopilot* kapal. *Plant* kapal yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *plant non linear* oleh karena itu sebelum dilakukan pengaturan *tracking* pada sudut *yaw* yang harus dilakukan adalah melinierkan *plant* kapal. Hal ini dilakukan untuk mengendalikan sudut belok kapal atau sudut *yaw* dan kecepatan sudut *yaw* yang nantinya akan menjadi *input* sudut referensi pada *plant*. Metode yang digunakan untuk melinierkan sudut *yaw* adalah dengan pendekatan model linier dengan kontroler PID. Model *close loop* dengan kontroler PID dianggap sebagai suatu sistem linier orde 2. Model linier dari kapal yang sudah didapatkan tadi selanjutnya digunakan untuk pengaturan *tracking* kapal. Sebelum diberikan kontroler (*open loop*) grafik sudut *yaw* dan kecepatan sudut dapat dilihat pada **Gambar 3.7** dan **Gambar 3.8**. Pada perancangan kontroler ini menggunakan kontroler PID *cascade* dengan kontroler PI untuk mengendalikan kecepatan sudut dan kontroler PD untuk mengendalikan sudut *yaw*. **Gambar 3.6** berikut merupakan diagram blok dari perancangan *autopilot* pada kapal.



Gambar 3.7 Sudut Yaw *Open Loop*



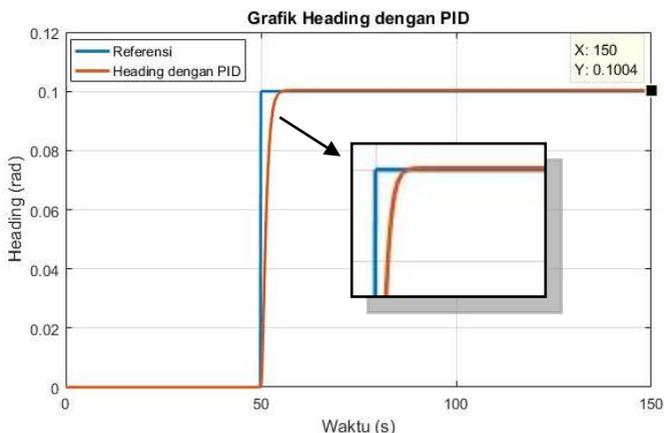
Gambar 3.8 Grafik Kecepatan Sudut *Open Loop*



Gambar 3.9 Perancangan Simulasi *Autopilot* Kapal

Dapat kita lihat sistem *open loop* kapal respon sudut *yaw* menuju ke tak hingga. Struktur simulik untuk *autopilot* kapal *underactuated* ini dapat dilihat pada **Gambar 3.9**. Parameter kontroler PD dan PI yang digunakan dalam pengaturan sinyal *autopilot* ditentukan dengan menggunakan metode *trial and error* dimana kontroler PI pada kasus ini berfungsi untuk mengurangi *overshoot* pada sudut *yaw* dengan memberikan *kp* lebih besar dari pada *ki* pada *loop* dalam. Selanjutnya adalah untuk *loop* luar menggunakan kontroler PD dimana kontroler PD ini berfungsi untuk mempercepat *settling time* dan *rise time* respon. Simulasi dilakukan dengan memberikan sinyal referensi *input* sinyal *step* sebesar 0.1. Setelah diberikan PID respon sistem dapat dilihat pada **Gambar 3.10**. Parameter PID yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Kontroler PD P = 90
P = 2 I = 1
I = 0 D = 0 (3.2)
D = 1
- Kontroler PI



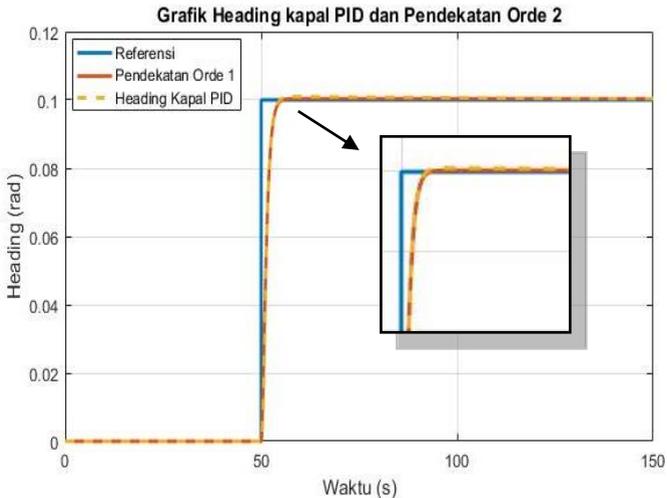
Gambar 3.10 Respons Sudut *Yaw* Setelah Diberikan Kontroler PID

3.4 Permodelan Sistem

Setelah sudut *yaw* dan kecepatan sudut diberikan kontroler PID didapatkan grafik sudut *yaw* yang dapat dilihat pada **Gambar 3.10**. Pada grafik tersebut dapat kita lihat respon sudut *yaw* mendekati sinyal referensi.

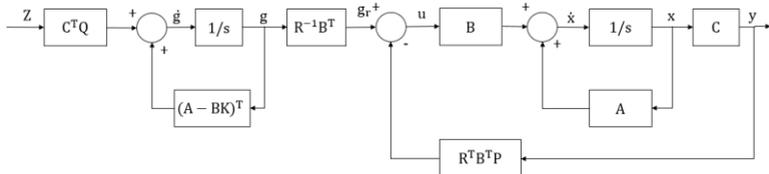
Setelah diberikan sistem *autopilot* untuk keperluan *tracking* selanjutnya adalah permodelan *output* linier *yaw* dapat dilihat pada **Gambar 3.11**. Respon sudut *yaw* menyerupai orde dua. Langkah selanjutnya adalah membuat pendekatan model respon *yaw* orde dua dengan menggunakan metode *trial and error zero pole* sehingga diperoleh pendekatan orde dua model *plant* sistem sebagai berikut :

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{2.0877}{(s + 1.6)(s + 1.3)} \quad (3.3)$$



Gambar 3.11 Response Sudut *Yaw* Kapal dengan Pendekatan Orde 2

3.5 Perancangan kontroler LQT Pengendalian Sudut *Yaw*



Gambar 3.12 Diagram Blok Kontroler LQT

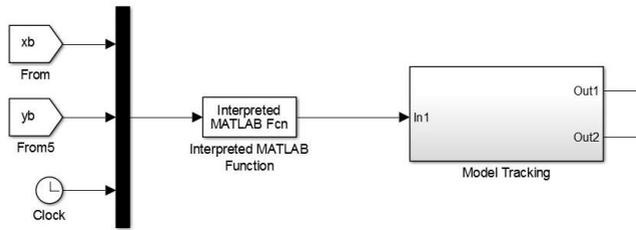
Diagram blok perancangan simulasi LQT dapat dilihat pada **Gambar 3.12**. Pada perancangan kontroler ini seperti yang sudah

dijelaskan pada bab 2 sebelumnya LQT ini berfungsi untuk menjaga *output* sistem agar berada sedekat mungkin dengan *output* yang diinginkan. Dari hasil eksperimen didapatkan matrik pembobot Q sebesar 10 dan matrik pembobot R sebesar 0.0000000001. Untuk menggunakan metode LQT diperlukan beberapa matrik penyusun yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} -2,90 & -1,442 \\ 1,442 & 0 \end{bmatrix} & R &= 0,0000000001 \\
 B &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} & K &= \begin{bmatrix} 0.0011488 \\ 0.000045984 \end{bmatrix} \\
 C &= 10,0459 \begin{bmatrix} 0 \\ 0.14475 \end{bmatrix} & & \\
 D &= [0] & & \\
 Q &= 10 & &
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

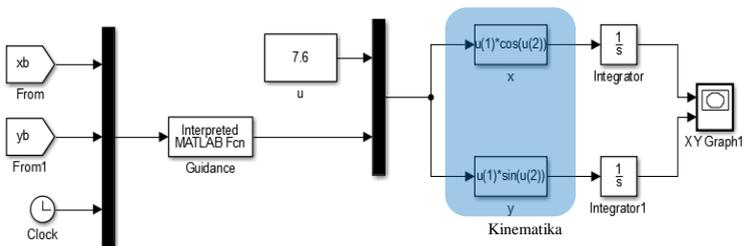
3.6 Perancangan *Guidance*

Sesuai dengan diagram blok pengaturan kapal untuk mendapatkan referensi sudut *yaw* terhadap waktu diperlukan *guidance system*. Metode *Guidance* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah metode *guidance* sederhana yang hanya ditujukan agar *plant* dapat mengikuti sinyal referensi ketika pengaturan *tracking*. Sinyal referensi merupakan referensi sudut dimana referensi sudut digunakan untuk menjadi *input* referensi pada *system autopilot*. Pada sistem *guidance* ini terdapat *trajectory generator*, dimana *trajectory generator* ini yang akan menghasilkan referensi sudut *yaw* atau referensi *heading* untuk menjadi *input* referensi sistem autopilot yaitu LQT. Program untuk *trajectory generator* dapat dilihat pada lampiran. Pada *guidance* ini digunakan jarak error 100 m yang diperoleh melalui *trial* dan *error* simulasi. Perancangan *Guidance* untuk tugas akhir ini dapat dilihat pada **Gambar 3.13**.



Gambar 3.13 Perancangan *Guidance*

Untuk membuktikan bahwa *guidance* yang dipakai pada tugas akhir ini sudah benar digunakan perancangan *guidance* tanpa menggunakan *plant* kapal. Perancangan pengujian *guidance* dapat dilihat pada **Gambar 3.14** dengan program yang diberikan pada lampiran. Pada gambar tersebut dapat kita lihat *input constant* sebesar 7.6 diperumpamakan sebagai kecepatan kapal searah dengan sumbu x atau kecepatan *surge*. Kinematika kapal menghasilkan posisi kapal dalam kordinat sumbu x bumi dan sumbu y bumi. Pada *guidance* digunakan program *waypoint* dengan *waypoint* yang direncanakan dengan jarak antar *waypoint* yaitu 300m. perancangan *waypoint* untuk pengujian *guidance* ini dapat dilihat pada **Tabel 3.2**. Hasil simulasi dari perancangan pengujian *guidance* lintasan 1 dapat dilihat pada **Gambar 3.15**. Pengujian *guidance* lintasan 2 dapat dilihat pada **Gambar 3.16** dan rencana *waypoint* lintasan 2 dapat dilihat pada **Tabel 3.3**. Tabel rencana *waypoint* dan hasil pengujian *guidance* lintasan 3 dapat dilihat pada **Tabel 3.4** dan **Gambar 3.17**.

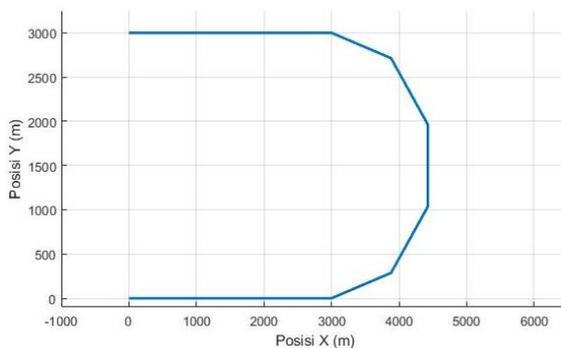


Gambar 3.14 Pengujian *Guidance*

Tabel 3.2 Pengujian *Guidance* Rencana *Waypoint* untuk Lintasan 1

Waypoint	Posisi X	Posisi Y
0	0	0
1	300	0
2	600	0
3	900	0
4	1200	0
5	1500	0
6	1800	0
7	2100	0
8	2400	0
9	2700	0
10	3000	0
11	3882	286.5
12	4427	1036
13	4427	1964

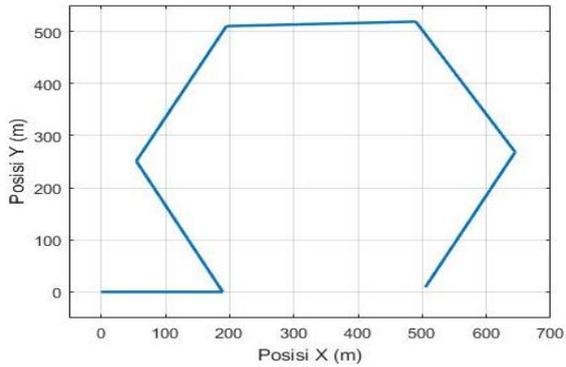
Waypoint	Posisi X	Posisi Y
14	3882	2714
15	3000	3000
16	2700	3000
17	2400	3000
16	2700	3000
17	2400	3000
18	2100	3000
19	1800	3000
20	1500	3000
21	1200	3000
22	900	3000
23	600	3000
24	300	3000
25	0	3000



Gambar 3.15 Grafik Respon Sumbu X dan Sumbu Y Hasil Pengujian *Guidance* Lintasan 1

Tabel 3.3 Pengujian *Guidance* Rencana *Waypoint* untuk Lintasan 2

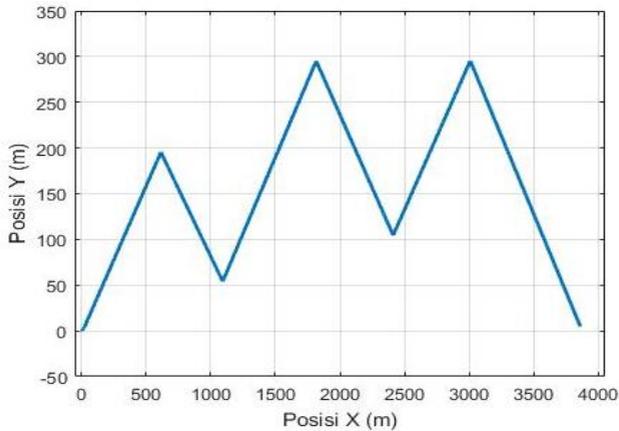
Waypoint	Posisi X	Posisi Y
0	200	0
1	50	260
2	200	519
3	500	519
4	650	260
5	500	0



Gambar 3.16 Grafik Respon Sumbu X dan Sumbu Y Hasil Pengujian *Guidance* Lintasan 2

Tabel 3.4 Rencana *Waypoint* untuk Pengujian *Guidance* Lintasan 3

Waypoint	Posisi X	Posisi Y
0	0	0
1	100	200
2	200	50
3	300	300
4	400	100
5	500	300
6	600	0



Gambar 3.17 Grafik Respon Sumbu X dan Sumbu Y Hasil Pengujian *Guidance* Lintasan 3

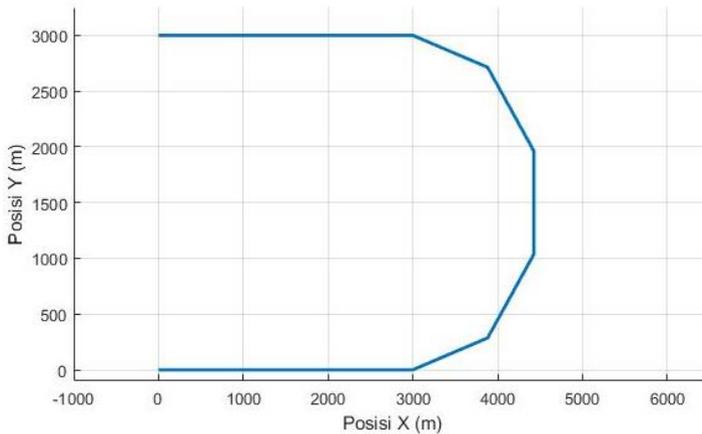
3.7 Perancangan Trayektori

Pada subbab ini dilakukan perencanaan trayektori atau lintasan yang akan dilalui oleh kapal ketika bermanuver dilaut. Perencanaan ini dilakukan agar kapal dapat berjalan pada lintasan yang sudah ditentukan dan tidak melanggar jalur pelayaran yang ada. Pada tugas akhir ini dilakukan pengujian lintasan menggunakan 3 jenis lintasan yang berbeda dengan merencanakan titik-titik *waypoint*. Yang pertama adalah merencanakan titik-titik *waypoint* dengan jarak 300 m yang membentuk huruf U yang menghadap sumbu Y yang dapat dilihat pada **Gambar 3.18**. Rencana titik-titik *waypoint* untuk lintasan 1 dapat dilihat pada **Tabel 3.5**. Untuk lintasan setengah lingkaran titik-titik diambil dari perhitungan menggunakan program yang dapat dilihat pada lampiran. Diameter yang digunakan pada lintasan setengah lingkaran tersebut adalah 150 m. Lintasan kedua adalah berbentuk segi 8 dengan diameter 300 m. Rencana titik *waypoint* diambil dari plot program yang terlampir pada lampiran. Rencana titik *waypoint* dan gambar lintasan 2 dapat dilihat pada **Tabel 3.6** dan **Gambar 3.19**. Untuk lintasan ke 3 adalah berbentuk segi 3 beraturan dengan jarak *waypoint* 100 m. Rencana lintasan ketiga dan *waypoint* dapat dilihat pada **Gambar 3.17** dan **Tabel 3.7**.

Tabel 3.5 Rencana *Waypoint* Lintasan 1

Waypoint	Posisi X	Posisi Y
0	0	0
1	300	0
2	600	0
3	900	0
4	1200	0
5	1500	0
6	1800	0
7	2100	0
8	2400	0
9	2700	0
10	3000	0
11	3882	286.5
12	4427	1036

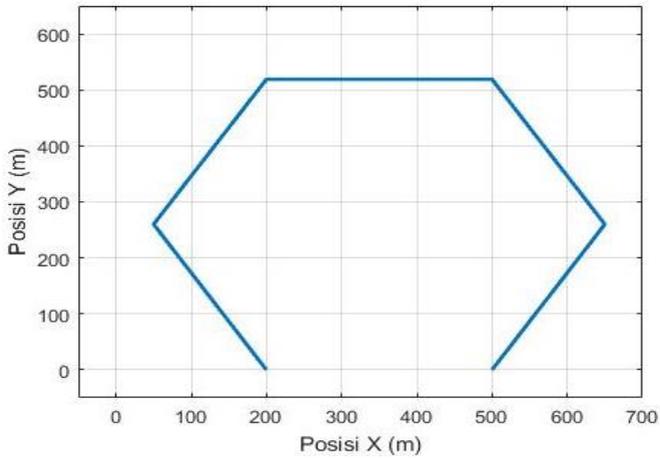
Waypoint	Posisi X	Posisi Y
13	4427	1964
14	3882	2714
15	3000	3000
16	2700	3000
17	2400	3000
18	2100	3000
19	1800	3000
20	1500	3000
21	1200	3000
22	900	3000
23	600	3000
24	300	3000
25	0	3000



Gambar 3.18 Hasil Plot Rencana *Waypoint* Lintasan 1

Tabel 3.6 Rencana *Waypoint* Lintasan 2

Waypoint	Posisi X	Posisi Y
0	200	0
1	50	260
2	200	519
3	500	519
4	650	260
5	500	0

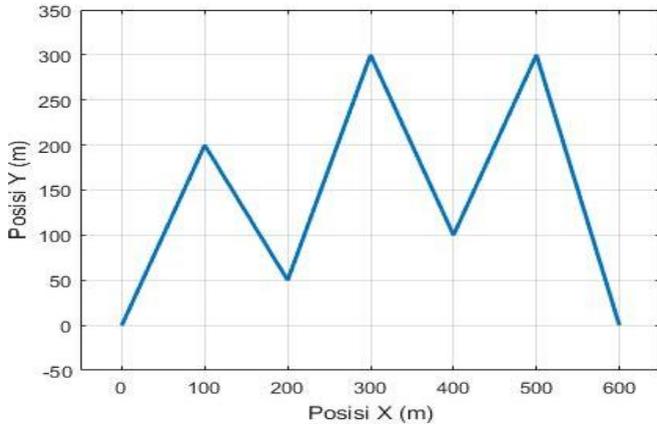


Gambar 3.19 Hasil Plot Rencana *Waypoint* Lintasan 2

Tabel 3.7 Rencana *Waypoint* Lintasan 3

Waypoint	Posisi X	Posisi Y
0	0	0
1	100	200
2	200	50
3	300	300

Waypoint	Posisi X	Posisi Y
4	400	100
5	500	300
6	600	0



Gambar 3.20 Hasil Plot Rencana *Waypoint* Lintasan 3

BAB 4

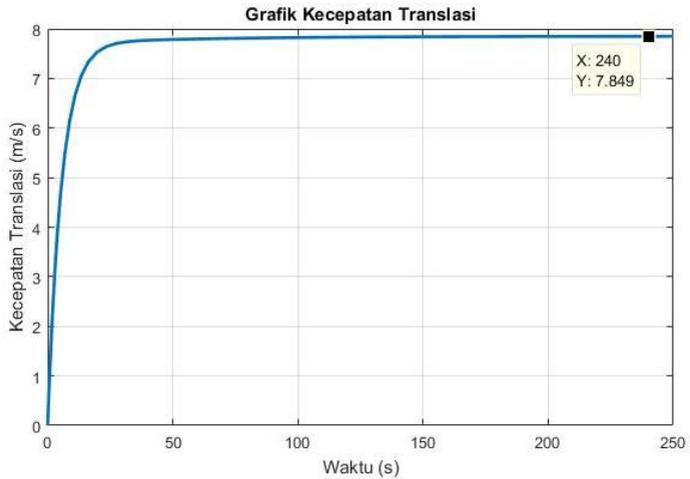
HASIL SIMULASI DAN ANALISA

Pada Bab ini dibagi menjadi dua bagian. Yang pertama adalah penjelasan mengenai *variable* dan parameter yang digunakan. Pada bagian yang kedua dijelaskan mengenai hasil percobaan simulasi perancangan *Simulink* pada sebuah *software* simulasi sesuai dengan perancangan yang sudah dijelaskan pada BAB 3.

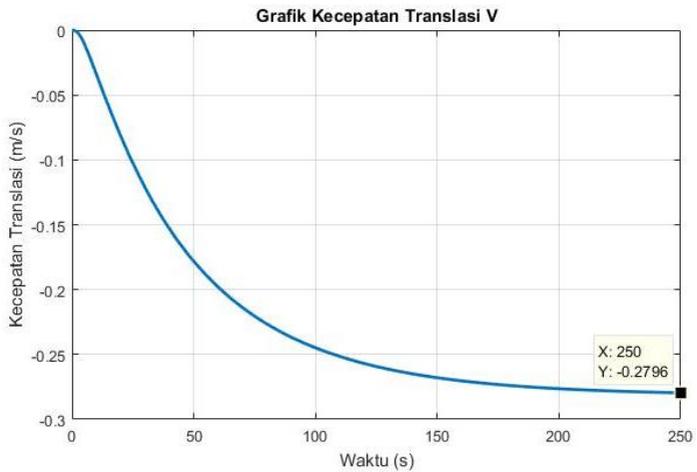
4.1 Hasil Simulasi Kapal *Underactuated Plant*

Pada subbab ini akan dijelaskan bagaimana hasil simulasi dan analisa dari perancangan sistem kapal *underactuated* yang sudah diberikan pada bab 3 sebelumnya. Hal pertama yang dibahas adalah respon *open loop* yang diberikan oleh perancangan simulasi kapal *underactuated*. Respon *open loop* dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui perbedaan respon *plant* sebelum diberikan kontroler dan setelah diberikan kontroler. Respon *open loop* yang akan dibahas adalah respon *open loop* kecepatan translasi terhadap sumbu x (*surge*), respon kecepatan translasi terhadap sumbu y (*sway*), respon *open loop heading* kapal (*yaw*), dan respon *open loop* kecepatan sudut yang diberikan oleh kapal (*yaw rate*). Perancangan simulasi dapat dilihat pada **Gambar 3.2**.

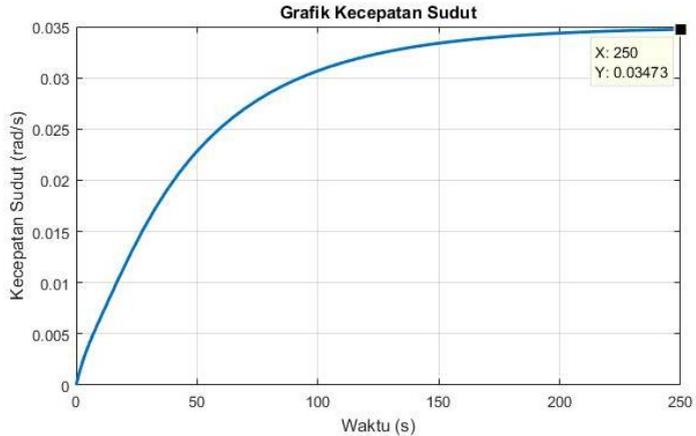
Simulasi dilakukan dengan pemberian parameter kapal yang diambil pada jurnal ilmiah [1]. Setelah nilai parameter kapal *underactuated* diberikan pada *plant* selanjutnya untuk dilakukan *trial* dan *error* sudut yang di hasilkan oleh sistem dan didapatkan nilai *input constan* sistem sebesar 0.012 rad dengan waktu simulasi yang diberikan adalah 250s. Langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi respon *open loop* dari *plant* tersebut. Pada **Gambar 4.1** dapat dilihat bahwa kecepatan mencapai kondisi transient pada detik ke 100s . Pada tugas akhir ini lebih difokuskan pada pengaturan *heading* atau sudut *yaw*. Dapat dilihat pada **Gambar 4.2** respon sudut *yaw* tidak stabil dan menuju tak hingga. Oleh karena itu diperlukan umpan balik sistem dan kontroler untuk mengatur karakteristik respon sudut *yaw* agar sesuai dengan kebutuhan. Respon *open loop* pada *plant* dapat dilihat sebagai berikut:



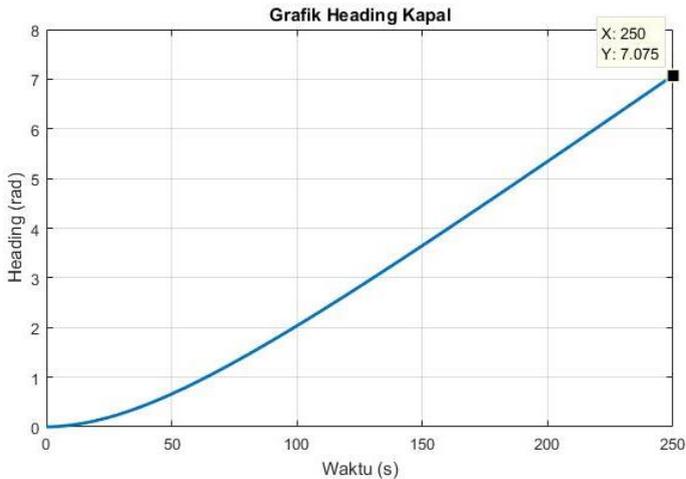
Gambar 4.1 Respon *Open Loop* Kecepatan Translasi U dengan Gangguan Diabaikan.



Gambar 4.2 Respon Loop Terbuka Kecepatan Translasi V Dengan Gangguan Diabaikan.



Gambar 4.3 Respon *Open Loop* Kecepatan Sudut Tanpa Gangguan.

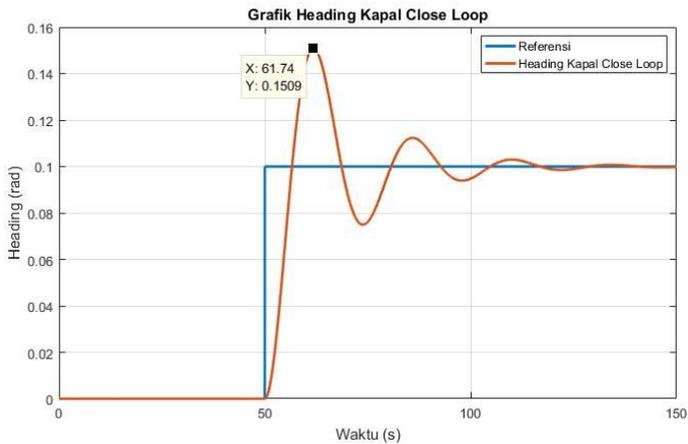


Gambar 4.4 Respon *Open Loop* Sudut *Yaw* Gangguan Diabaikan.

4.2 Hasil Simulasi Autopilot dan Permodelan Kapal *Underactuated*

Dari perancangan struktur simulasi autopilot yang sudah dijelaskan pada subbab 4.1 sebelumnya didapatkan respon sudut *heading* atau sudut *yaw open loop* yang menuju ke tak hingga. Oleh karena itu

diperlukan *feed back* pada plant untuk menjaga agar system sesuai *input* yang diberikan. Pada **Gambar 4.5** dapat dilihat meskipun *system* sudah diberikan *feedback* akan tetapi terdapat osilasi. Dalam hal ini osilasi dapat menyebabkan ketidak stabilan pada pengaturan sudut yang akan dilakukan. Oleh karena itu diperlukan kontroler untuk membuat respon menjadi sesuai dengan kriteria yaitu sistem orde 1. Perancangan PID *cascade* yang diberikan pada bab sebelumnya pada **Gambar 3.9**. Hasil simulasi struktur Simulink dari sistem *close loop* sebelum diberi kontroler PID dapat dilihat pada **Gambar 4.5**.



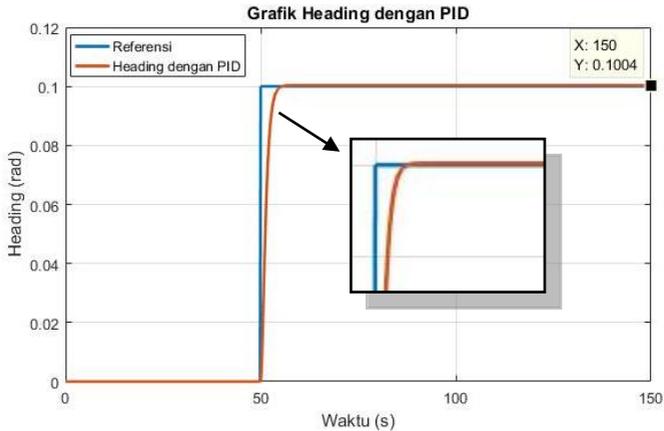
Gambar 4.5 Respon Loop Tertutup Sudut *Yaw* dengan Gangguan Diabaikan.

Dari **Gambar 4.5** dapat dilihat bahwa respon sudut *yaw* pada *plant* merupakan respon orde dua dengan pengaturan *input*:

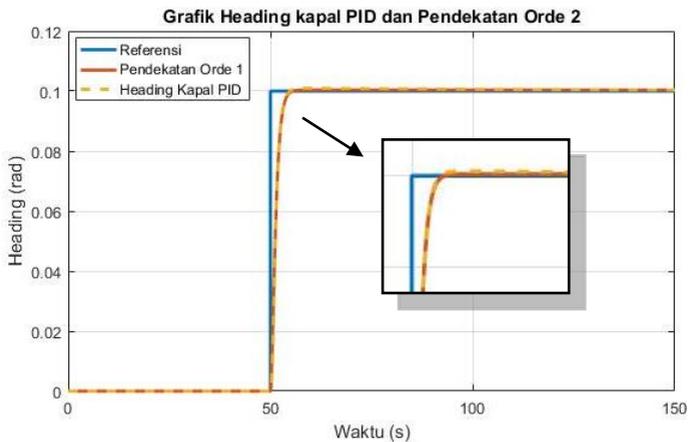
- *Input Step Time* = 50
- *Initial Value* = 0
- *Final Value* = 0.1
- *Sample Time* = 0

Untuk mendapatkan respon orde satu dengan spesifikasi yang diinginkan kecepatan sudut *yaw* (*yaw rate*) diatur dengan kontroler PI dengan nilai $P = 90$, $I = 1$, $D = 0$ dan $N = 100$. Untuk mengatur respon sudut *yaw* diberikan kontroler PD dengan nilai $P = 2$, $I = 0$, $D = 1$ dan $N = 10$. Respon sudut *yaw* dari sistem *autopilot* dengan kontroler PID *cascade* gangguan diabaikan yang dapat dilihat pada **Gambar 4.6**.

Setelah didapatkan respon *plant* orde satu selanjutnya adalah membuat pendekatan model orde satu yang sesuai dengan *plant*. Selanjutnya didapatkan pendekatan model dengan transfer fungsi yang dapat dilihat pada Persamaan 3.2 Grafik respon sudut *yaw* *plant* setelah diberi kontroler PID dan pendekatan model orde satu *plant* yang diinginkan dapat dilihat pada **Gambar 4.7**.



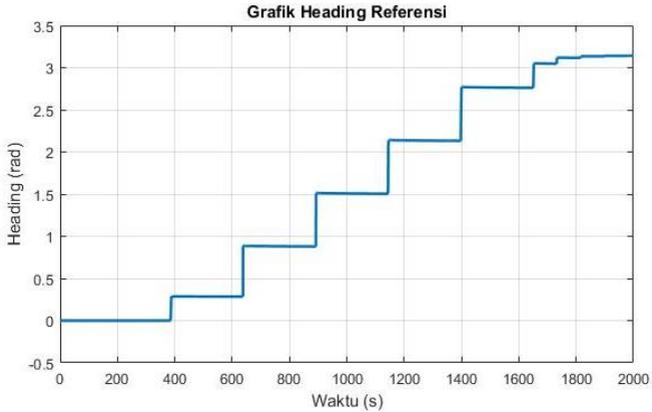
Gambar 4.6 Grafik Heading Kapal dengan Kontroler PID Cascade



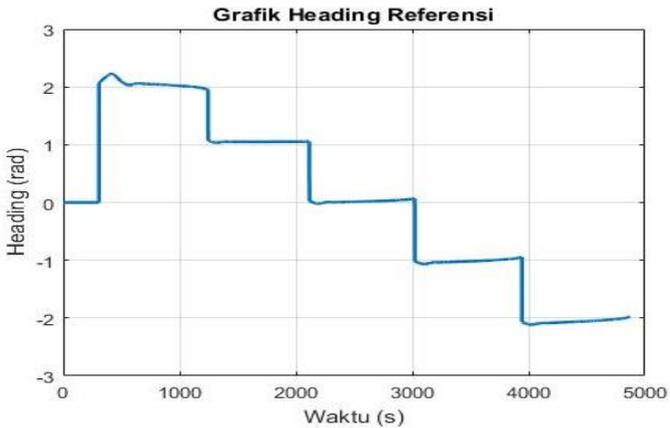
Gambar 4.7 Respon Sudut *Yaw* dan Respon Pendekatan Sudut *Yaw* Orde Satu.

4.3 Hasil Simulasi *Guidance System*

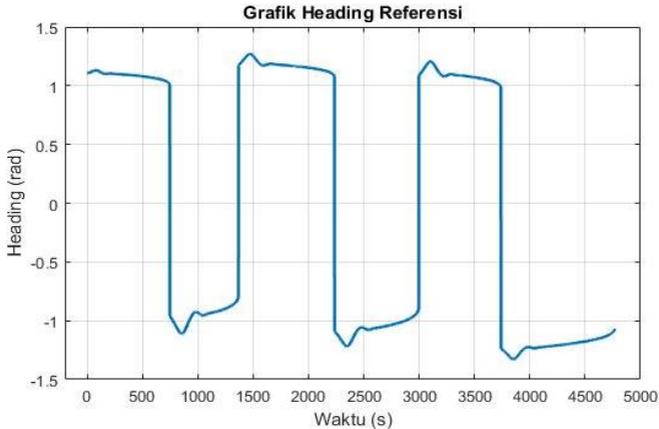
Dari perancangan *guidance* yang telah dijelaskan pada bab 3 sebelumnya ketika diaplikasikan ke lintasan 1 hasil referensi sudut *yaw* untuk menjadi referensi *yaw* dapat dilihat pada **Gambar 4.8** selanjutnya hasil simulasi sudut *yaw* lintasan 2 dan lintasan 3 dapat dilihat pada **Gambar 4.9** dan **Gambar 4.10**.



Gambar 4.8 Referensi Sudut *Yaw* Lintasan 1.



Gambar 4.9 Referensi Sudut *Yaw* Lintasan 2.

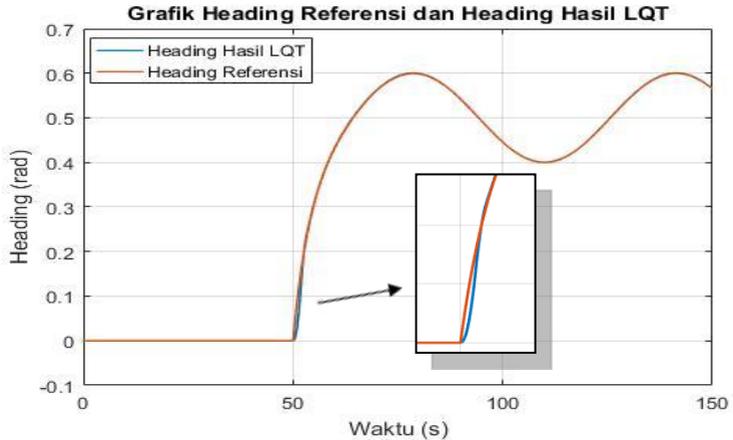


Gambar 4.10 Referensi Sudut *Yaw* Lintasan 3.

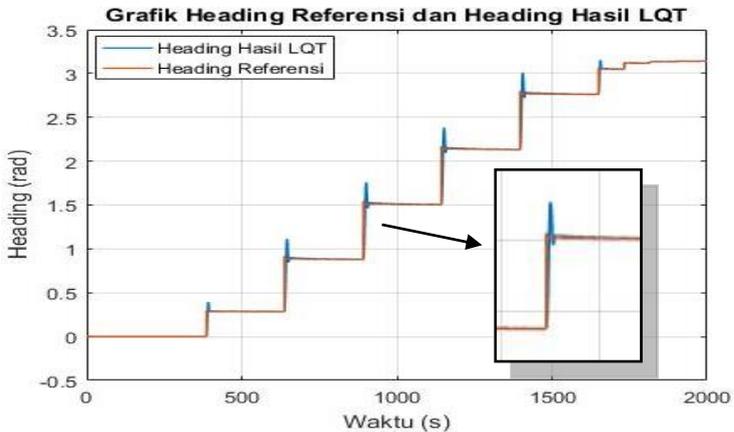
4.4 Hasil Simulasi *Linear Quadratic Tracking*

Pada *Control system* kapal untuk mengatur sudut *yaw* agar mengikuti referensi sudut yang diberikan diperlukan sebuah kontroler, yang mana pengaturan sudut *yaw* pada tugas akhir ini menggunakan metode LQT. Pertama untuk mengecek apakah metode LQT sudah dapat melakukan *tracking* dilakukan trial dengan menggunakan sinyal *input* gelombang sinus dengan kriteria amplitude= 1, bias= 5 dan frekuensi= 0.1 yang diberikan pada *plant*. Untuk menunjukkan bahwa LQT sudah sesuai dapat dilihat pada **Gambar 4.11**. Pada gambar tersebut kapal berjalan melebihi sudut referensi kapal yang diberikan akan tetapi setelah beberapa detik kemudian kapal mengikuti sudut referensi yang diberikan dengan baik. Sinyal *input* gelombang sinus ini diasumsikan sebagai referensi sudut yang dihasilkan oleh *guidance*. Hasil dari model *tracking* LQT menjadi input referensi *autopilot* kapal. Sinyal kontrol keluaran dari model *tracking* ini berupa sudut dalam satuan radian. Setelah diberikan kontroler LQT untuk *tracking* sudut *yaw* kapal maka didapatkan respon sudut *yaw* yang dapat dilihat pada **Gambar 4.12** untuk lintasan 1. **Gambar 4.14** adalah respon sudut *yaw* pada lintasan 2 dan **Gambar 4.16** merupakan respon sudut *yaw* pada lintasan 3. Dari ketiga gambar respon sudut *yaw* tersebut dapat kita lihat bahwa terdapat *error* sudut ketika kapal mengalami perubahan sudut. Akan tetapi itu hanya sesaat selanjutnya kapal dapat mengikuti sudut referensi dengan baik. Grafik respon kecepatan translasi u pada lintasan

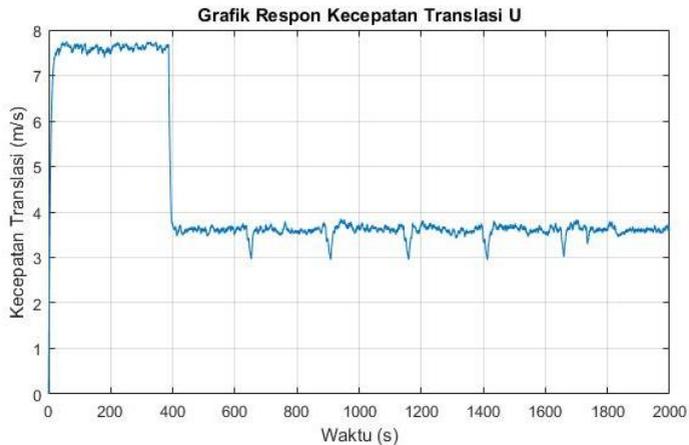
1 dapat dilihat pada **Gambar 4.13**. Grafik respon kecepatan translasi u pada lintasan 2 diberikan **Gambar 4.15**. dan yang terakhir kecepatan translasi u pada lintasan 3 dapat dilihat pada **Gambar 4.17**. Dari ketiga grafik kecepatan tersebut dapat dilihat bahwa kapal mengalami penurunan kecepatan pada saat kapal mengalami perubahan sudut atau berbelok.



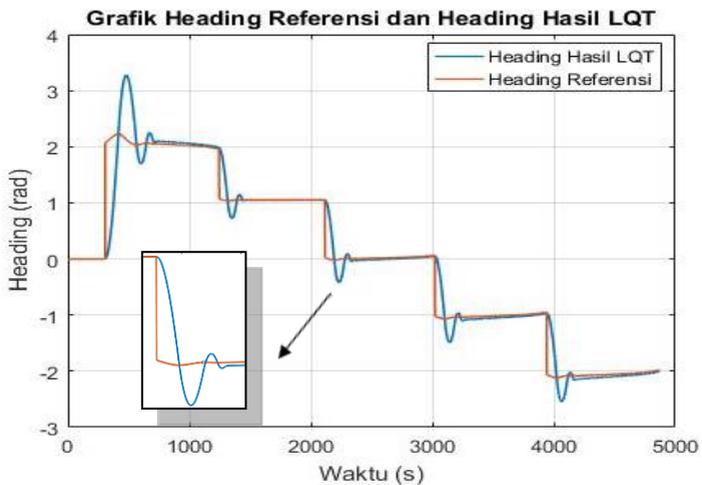
Gambar 4.11 Pengujian Hasil Model *Tracking*



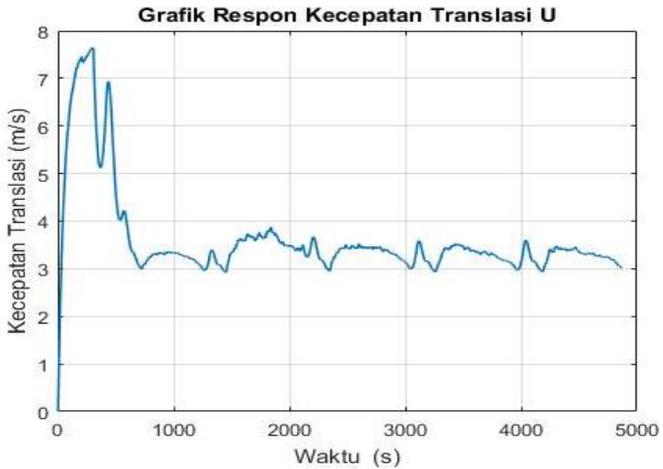
Gambar 4.12 Respon *Tracking* Sudut *Yaw* dengan Kontroler LQT Lintasan 1.



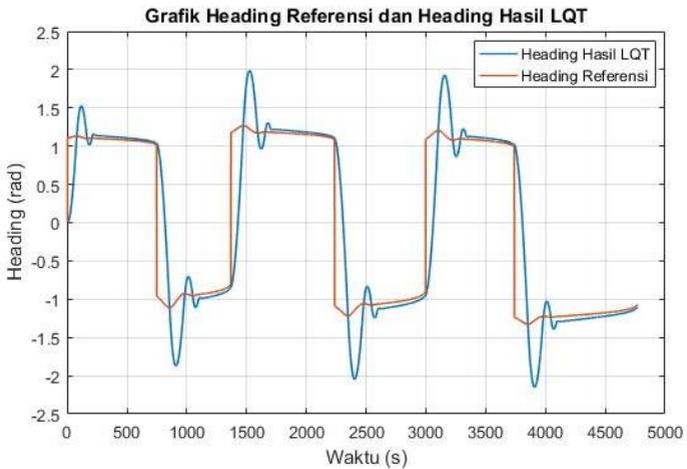
Gambar 4.13 Kecepatan Kapal Sumbu Terhadap Sumbu X Lintasan 1.



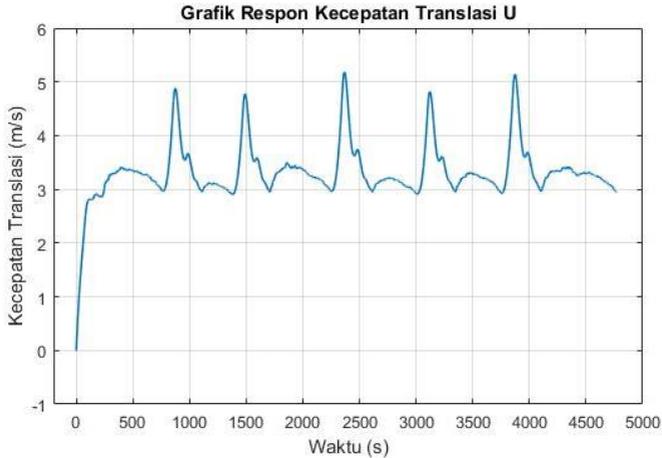
Gambar 4.14 Respon *Tracking* Sudut *Yaw* dengan Kontroler LQT Lintasan 2.



Gambar 4.15 Kecepatan Kapal Sumbu Terhadap Sumbu X Lintasan 2.



Gambar 4.16 Respon *Tracking* Sudut *Yaw* dengan Kontroler LQT Lintasan 3.



Gambar 4.17 Kecepatan Kapal Sumbu Terhadap Sumbu X Lintasan 3.

4.5 Hasil *Error Sudut Heading* dan Simulasi Respon Posisi Sumbu X dan Posisi Sumbu Y.

Dari referensi sudut yang diberikan oleh *guidance system* dan setelah diberikan kontroler *tracking* didapatkan respon posisi pada sumbu x dan posisi pada sumbu y. Hasil plot posisi pada sumbu x dan sumbu y dapat dilihat pada **Gambar 4.18** untuk lintasan 1. **Gambar 4.20** untuk lintasan 3 dan **Gambar 4.22** hasil plot posisi pada lintasan 3.

Error heading didapat dari pengurangan antara sudut *heading* referensi dan sudut *heading* hasil *tracking*. Pada **Gambar 4.19** diberikan *error* sudut lintasan 1, **Gambar 4.21** *error* sudut lintasan 2 dan **Gambar 4.23** adalah *error* sudut lintasan 3. *Error* sudut tersebut direpresentasikan dalam grafik. Pada Grafik dapat dilihat bahwa kapal mengalami *error* ketika terjadi perubahan sudut. Untuk menghitung rata-rata *error* digunakan rumus RMSE yang mana perhitungannya adalah sebagai berikut :

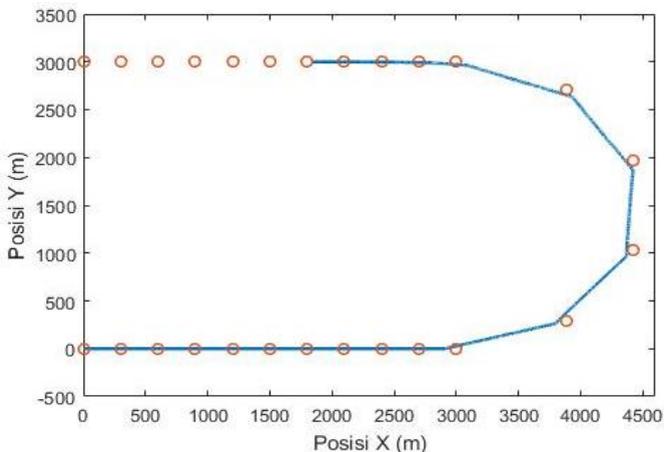
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{e_y^T \cdot e_y}{n}}$$

$$\text{RMSE (Lintasan 1)} = 0.0164$$

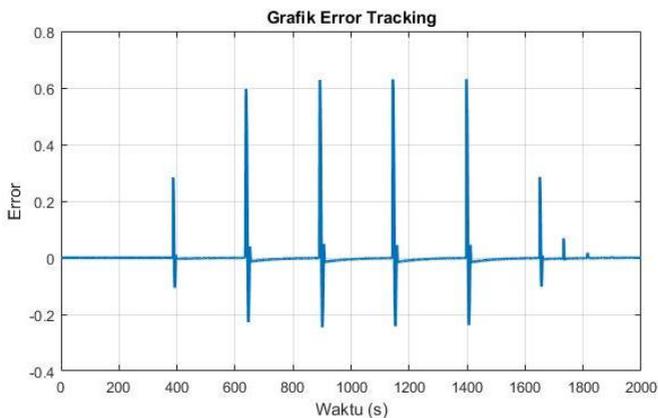
$$\text{RMSE (Lintasan 2)} = 0.3387$$

$$\text{RMSE (Lintasan 3)} = 0.5566$$

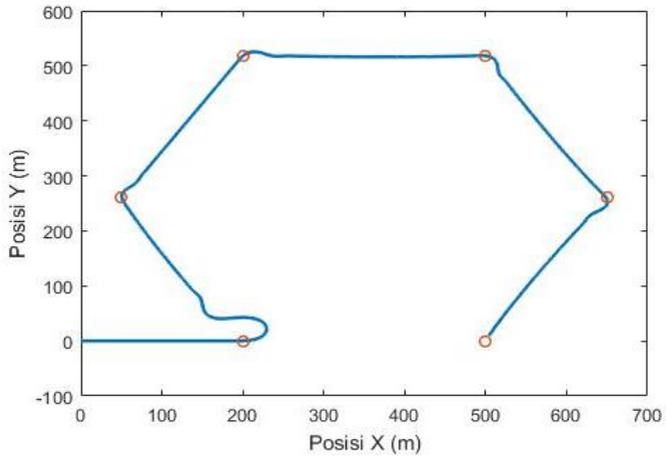
Dari *error* yang telah didapatkan tersebut, pada lintasan 1 dapat disimpulkan *error* hampir tidak berpengaruh pada perubahan sudut kapal ketika melalui lintasan 1. *Error* bertambah ketika melalui lintasan 2 dan 3. *Error* ini terjadi akibat keterbatasan kapal dalam melakukan perubahan *heading* dan juga dikarenakan faktor panjang kapal yang membuat kapal hanya dapat melakukan gerakan yang terbatas.



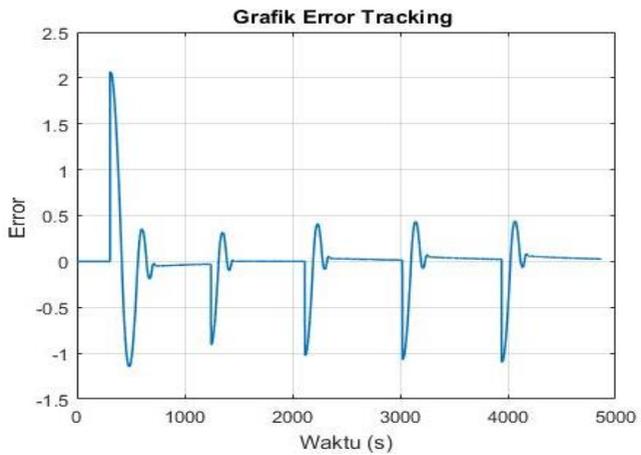
Gambar 4.18 Plot Posisi X dan Posisi Y Lintasan 1.



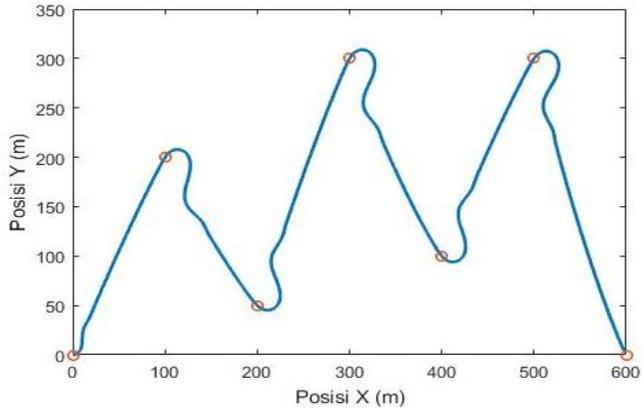
Gambar 4.19 Grafik *Error Heading*.Lintasan 1.



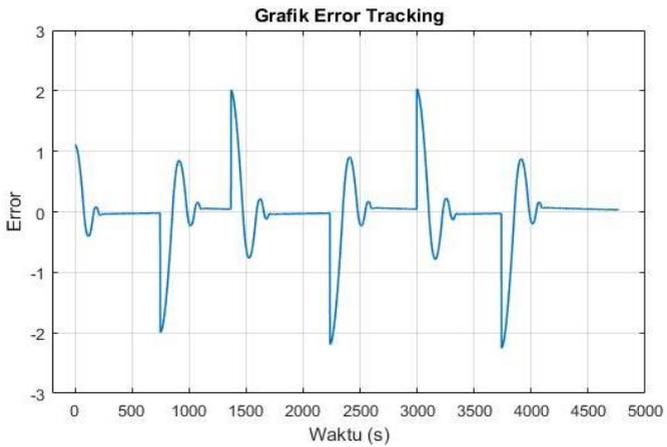
Gambar 4.20 Plot Posisi X dan Posisi Y Lintasan 2



Gambar 4.21 Grafik *Error Heading*.Lintasan 2.



Gambar 4.22 Plot Posisi X dan Posisi Y Lintasan 3.



Gambar 4.23 Grafik *Error Heading*.Lintasan 3.

BAB 5

PENUTUP

Dari hasil pengujian sistem kontrol hasil desain dengan simulasi , dapat diambil kesimpulan bahwa kontrol tracking menggunakan metode Linear Quadratic Tracking (LQT) memberikan respons posisi kapal yang mampu mengikuti sinyal referensi dengan mempertahankan posisi kapal di sekitar 0 rad. Meskipun disaat awal kapal berbelok terdapat error sebesar 0.0164 pada lintasan 1, 0.3387 pada lintasan 2 dan 0.5566 pada lintasan 3. Hal ini terjadi akibat keterbatasan kapal dalam melakukan heading dikarenakan faktor panjang kapal yang membuat kapal hanya dapat melakukan heading yang terbatas.

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah menambahkan variabel gangguan seperti gangguan angin, arus laut, dan gangguan ombak. Selain itu juga perlu ditambahkan variasi pengujian yang lebih bervariasi agar hasil pengujian bertambah *valid*.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Xiaofei,W., Baohua,Z., Deying,C., Huaming,W. , “ *Adaptive Analytic Model Predictive Controller for Path Following of Underactuated Ships* ”, Chinese Control Conference, pp. 5515-5521, Yantai, Juli, 2011.
- [2] Firmansyah, M. A. , “ Desain Kendali Haluan Kapal SSV BRP TARLAC (LD-601) menggunakan Adaptive PID Controller “, *Tugas Akhir*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [3] Ambarwati, F. , “ Perancangan Optimal Tracking Control Kapal LNG Dengan Beban Penuh Keluar dari Pelabuhan Arun ”, *Tugas Akhir*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [4] Khac Duc Do, Jie Pan. , “*Control of Ship and Underwater Vehicles*”, Springer-Verlag, London, 2009.
- [5] Effendi, R., Gamayanti, N., “ Handout Dasar Sistem Pengaturan”, Surabaya, 2010.
- [6] Ogata K. , "*Modern Control Engineering*", Minnesota: Prentice-Hall International, 3th Edition, 1997.
- [7] Naidu, D.S., “ *Optimal Control System* ”. Washington: CRC Press, New York, 2002.
- [8] L. Lewis and V. L. Syrmos., “ *Optimal Control Second Edition* ”, Toronto: A Wiley Interscience Publication, 1995.
- [9] Fossen, Thor.I. “ *Marine Control Systems : Guidance, Navigation and Control of Ship, Rig and Underwater Vehicles* ”, Marine Cybernetics, 2002.
- [10] Johnson,Curtis D. “ *Process Control Instrumentation Technology Eight Edition* ”., Pearson Education Limited, 2014.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

LAMPIRAN A

A.1. Parameter Kapal Underactuated

```
% Parameter Kapal
k=0.02;
c=0.0125;
m11=120000;
d11=21500;
m22=217900;
m33=63600000;
d22=117000;
d33=8020000;
l=32;
u=10;
```

A.2. Program Tracking LQT

```
%Tracking LQT
A=[-2.90 -1.4422 ; 1.4422 0]
B=[1 ; 0]
C=10.0459*[0 0.14475];
D=[0]
Q=10; R=0.0000000001; %0.00000000000001
W=C'*Q; %
[S,o,m,n]=care(A,B,C'*Q*C,R) %m=v(t) %S=P
K=inv(R)*B'*S %feedback Gain
ACL=(A-B*K) '
L=inv(R)*B' %model following gain
```

A.3. Path Planning

```
axis ([-1000 6500 -100 3250])
hold on
x=[0,300,600,900,1200,1500,1800,2100,2400,2700];
y=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
r=1500
th = -pi/2:pi/5:pi/2;
xunit = r * cos(th)+3000;
yunit = r * sin(th)+1500;
x1=[2700,2400,2100,1800,1500,1200,900,600,300,0];
```

```

y1=[3000,3000,3000,3000,3000,3000,3000,3000,
3000,3000];
x2=[x xunit x1]
y2=[y yunit y1]
grid on
plot(x2,y2)

```

A.3. Program Trajectory Generator Lintasan 1

```

function [yref]=guidd(xyz)
global xt yt d de p xx yy
xb=xyz(1);
yb=xyz(2);
tt=xyz(3);
if tt==0

xx=[0,300,600,900,1200,1500,1800,2100,2400,2
700,3000,3882,4427,4427,3882,3000,2700,2400,
2100,1800,1500,1200,900,600,300,0];
yy=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,286.5,1036,1964,27
14,3000,3000,3000,3000,3000,3000,3000,3000,3
000,3000,3000];
    p=1;
    de=100;
    xt=xx(p);
    yt=yy(p);
end
d=sqrt(((xt-xb)^2)+((yt-yb)^2));
if (d<de)
    p=p+1;
    xt=xx(p);
    yt=yy(p);
end
yref=atan2((yt-yb),(xt-xb));
end

```

A.4. Program Trajectory Generator Lintasan 2

```

function [yref]=guiddphi3(xyz)
global xt yt d de p xx yy
xb=xyz(1);
yb=xyz(2);

```

```

tt=xyz(3);
if tt==0
    xx=[200,50,200,500,650,500];
    yy=[0,260,519,519,260,0];
    p=1;
    de=10;
    xt=xx(p);
    yt=yy(p);
end
d=sqrt(((xt-xb)^2)+((yt-yb)^2));
if (d<de)
    p=p+1;
    xt=xx(p);
    yt=yy(p);
end
yref=atan2((yt-yb),(xt-xb));
end

```

A.5. Program *Trajectory Generator Lintasan 3*

```

function [yref]=guiddkotak(xyz)
global xt yt d de p xx yy
xb=xyz(1);
yb=xyz(2);
tt=xyz(3);
if tt==0
    xx=[0,100,200,300,400,500,600];
    yy=[0,200,50,300,100,300,0];
    p=1;
    de=5;
    xt=xx(p);
    yt=yy(p);
end
d=sqrt(((xt-xb)^2)+((yt-yb)^2));
if (d<de)
    p=p+1;
    xt=xx(p);
    yt=yy(p);
end
yref=atan2((yt-yb),(xt-xb));
end

```


BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Rewinda, penulis akrab dipanggil winda. Penulis dilahirkan di Trenggalek 15 Mei 1994. Penulis menempuh pendidikan di TK Negeri Pembina pada tahun 2000, kemudian masuk SDN 1 Sumbergedong pada tahun 2001. Pada tahun 2007 penulis melanjutkan pendidikan di SMPN 1 Trenggalek. Kemudian pada tahun 2010 penulis masuk ke SMAN 1 Trenggalek. Melanjtkan kuliah pada jenjang Diploma III di Diploma III Teknik Elektro di Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan program studi Computer Control pada tahun 2013. Setelah lulus dari jenjang Diploma III pada tahun 2016, penulis melanjutkan kuliah pada jenjang sarjana di Departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada bidang studi Teknik Sistem Pengaturan. Untuk menghubungi penulis dapat melalui email di rewinda13@mhs.ee.its.ac.id.