



TUGAS AKHIR - KM184801

**PERENCANAAN LINTASAN KAPAL UNTUK
PENGHINDARAN HALANGAN DINAMIS MENGGUNAKAN
METODE DUBINS**

**RIA ASTUTIK
0611164000040**

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

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



TUGAS AKHIR - SM184801

**PERENCANAAN LINTASAN KAPAL UNTUK
PENGHINDARAN HALANGAN DINAMIS
MENGUNAKAN METODE DUBINS**

RIA ASTUTIK
NRP 06111640000040

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

DEPARTEMEN MATEMATIKA
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



FINAL PROJECT - SM184801

***PLANNING OF SHIP TRAJECTORY FOR
AVOIDANCE MOVING OBSTACLE USING
DUBINS PATH***

RIA ASTUTIK
NRP 06111640000040

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

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

LEMBAR PENGESAHAN
PERENCANAAN LINTASAN KAPAL UNTUK
PENGHINDARAN HALANGAN DINAMIS
MENGGUNAKAN METODE DUBINS

PLANNING OF SHIP TRAJECTORY FOR
AVOIDANCE MOVING OBSTACLE USING
DUBINS PATH

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 :
RIA ASTUTIK
NRP. 0611164000040

Menyetujui,
Dosen Pembimbing I,


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

Mengetahui,

Kepala Departemen Matematika
FSAD ITS


Subchan, Ph.D
NIP. 19710513 199702 1 001

Surabaya, Agustus 2020

PERENCANAAN LINTASAN KAPAL UNTUK PENGHINDARAN HALANGAN DINAMIS MENGGUNAKAN METODE DUBINS

Nama Mahasiswa : RIA ASTUTIK
NRP : 0611164000040
Jurusan : Matematika FSAD-ITS
Pembimbing : Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si

Abstrak

Jenis kapal perang Corvet Kelas SIGMA merupakan kapal yang memiliki kegunaan untuk patroli, penyelamatan, dan pertahanan laut. Maka dari itu kapal membutuhkan sistem panduan agar dapat bergerak sesuai keinginan. Permasalahan yang paling umum dalam sistem panduan adalah menemukan jalur dari posisi awal sampai ke posisi tujuan dengan menghindari tabrakan atau halangan. Halangan yang terdapat di perairan terdapat halangan statis dan dinamis. Halangan yang digunakan pada tugas akhir ini yaitu halangan dinamis. Pada permasalahan ini, jalur kapal yang paling dibutuhkan adalah jalur optimal dan aman serta waktu yang singkat untuk menempuhnya. Model matematika gerak kapal yang digunakan yaitu gabungan model dinamika Davidson-Schiff dan model kinematika kapal. Sistem panduan direpresentasikan dengan lintasan Dubins. Karena metode Dubins adalah salah satu metode dalam perencanaan lintasan yang digunakan untuk menemukan jalur terpendek dengan membangkitkan kelengkungan garis dengan interpolasi kekontinuannya. Selanjutnya arah datang halangan dinamis akan diberikan dalam beberapa sudut. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa metode Dubins dapat diterapkan dengan baik untuk menghindari halangan dinamis. Dan di simulasi arah datang halangan ditentukan dalam 6 sudut tertentu yang

mewakili di semua kuadran. Lintasan yang diperoleh bisa searah arah jarum jam dan berlawanan arah jarum jam, yang mana penentuannya tergantung dari sudut datangnya halangan dinamis.

Kata Kunci: Kapal Perang Corvet Kelas SIGMA, Metode Dubins, Halangan Dinamis, Sistem Panduan

PLANNING OF SHIP TRAJECTORY FOR AVOIDANCE MOVING OBSTACLE USING DUBINS PATH

Name : RIA ASTUTIK
NRP : 06111640000040
Department : Mathematics FSAD-ITS
Supervisor : Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si

Abstract

Type of SIGMA Class Corvet Warship is a ship that has uses for patrol, rescue and marine defense. Therefore the ship needs a guidance system so that it can move as desired. The most common problem in the guidance system is finding a path from the initial position to the destination position by avoiding collisions or obstacles. Obstacles in the waters there are static and dynamic obstacles. The obstacles used in this thesis are dynamic or moving obstacles. In this problem, the most needed shipping lane is the optimal and safe lane and a short time to travel. The guidance system is represented by the Dubins trajectory. Because the Dubins method is one of the methods in path planning that is used to find the shortest path by generating line curvature with interpolation of its continuity. Furthermore dynamic obstacles will be given in several angles. The simulation results show that the Dubins method can be applied well to avoid dynamic obstacles. And in the simulation the direction comes the obstacles are determined in 6 specific angles which are represented in all quadrants. The path obtained can be clockwise and counter-clockwise, and its determination depends on the angle of the dynamic obstacle.

Keywords: *SIGMA Class Corvet Warship, Dubins Method, Dynamic Obstacles, Guidance System*

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb.

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul

”PERENCANAAN LINTASAN KAPAL UNTUK PENGHINDARAN HALANGAN DINAMIS DENGAN METODE DUBINS”

sebagai salah satu syarat kelulusan Program Sarjana Jurusan Matematika FSAD Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan kepada:

1. Bapak Subchan, Ph.D selaku Kepala Departemen Matematika ITS yang telah memberikan dukungan dan motivasi selama perkuliahan hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Ibu Dr. Tahiyatul Asfihani, S.Si, M.Si selaku dosen pembimbing atas segala bimbingan dan motivasinya kepada penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik.
3. Bapak dan Ibu dosen penguji atas semua saran dan masukan yang telah diberikan.

4. Ibu Dr. Dwi Ratna Sulistyaningrum, S.Si, M.T selaku Sekdep Bidang Akademik S1 Departemen Matematika FSAD ITS dan koordinator Tugas Akhir.
5. Bapak Drs. Nurul Hidayat, M.Kom selaku dosen wali yang telah memberikan arahan akademik selama penulis menempuh pendidikan di Departemen Matematika FSAD ITS.
6. Bapak dan Ibu dosen serta para staf Departemen Matematika ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.
7. Keluarga tercinta yang selalu mendoakan saya dan keluarga Lemniscate yang selalu memberikan semangat dan dukungan agar bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu-persatu. Terimakasih telah mendoakan dan mendukung penulis sampai dengan selesainya program ini.

Penulis juga menyadari bahwa dalam Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan Tugas Akhir ini. Akhir kata, penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat membawa manfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, Juni 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i	
LEMBAR PENGESAHAN	v	
ABSTRAK	vii	
ABSTRACT	ix	
KATA PENGANTAR	xi	
DAFTAR ISI	xiii	
DAFTAR GAMBAR	xvii	
DAFTAR TABEL	xxi	
DAFTAR SIMBOL	xxiii	
BAB I	PENDAHULUAN	1
1.1	Latar Belakang	1
1.2	Rumusan Masalah	4
1.3	Batasan Masalah	4
1.4	Tujuan	5
1.5	Manfaat	5
1.6	Sistematika Penulisan	5
BAB II	TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1	Penelitian Terdahulu	7
2.2	Kapal Perang Corvet Kelas SIGMA.....	10
2.3	Lintasan Dubins	12
2.3.1	Lintasan RSR	15
2.3.2	Lintasan LSL	17
2.3.3	Lintasan RSL.....	18
2.3.4	Lintasan LSR.....	19

2.4	Nilai Jarak Aman (<i>Threshold Value</i>)	21
2.5	Model Dinamika Davidson-Schiff.	22
2.6	Model Kinematika Kapal.	31
2.7	Estimasi Halangan Bergerak.	32
BAB III	METODE PENELITIAN.	35
3.1	Studi Literatur.	35
3.2	Penentuan Model Matematika Gerak Kapal.	35
3.3	Perencanaan Lintasan Kapal dan Halangan.	35
3.4	Simulasi Lintasan dengan Matlab.	36
3.5	Analisis Hasil dan Pembahasan.	36
3.6	Penarikan kesimpulan dan Saran.	36
3.7	Penyusunan Laporan Hasil Penelitian.	36
BAB IV	ANALISIS DAN PEMBAHASAN.	39
4.1	Pembentukan Model Matematika Gerak Kapal.	39
4.1.1	Model Matematika Dinamika Kapal 2 DOF.	40
4.1.2	Model Matematika Kinematika Kapal.	46
4.2	Perencanaan Lintasan Kapal dan Halangan	47
4.2.1	Lintasan Dubins tanpa Halangan.	48
4.2.2	Lintasan Dubins dengan Halangan Dinamis.	49
4.2.2.1	Pendekatan Halangan dari Sudut Tertentu.	50
4.2.2.2	Algoritma lintasan Dubins dengan halangan	53

4.2.2.3	Perhitungan Titik-Titik di Sekitar Halangan.....	56
4.2.2.4	Penentuan Nilai <i>Threshold Value</i>	59
4.3	Simulasi Penerapan Metode Dubins Halangan Dinamis.....	61
4.3.1	Simulasi Pertama.....	63
4.3.2	Simulasi Kedua.....	68
4.3.3	Simulasi Ketiga.....	73
4.3.4	Simulasi Keempat.....	77
4.3.5	Simulasi Kelima.....	83
4.3.6	Simulasi Keenam.....	87
BAB V	PENUTUP	
5.1	Kesimpulan	95
5.2	Saran	96
DAFTAR PUSTAKA		97
BIODATA		101

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Lintasan Dubins tipe CLC dan CCC.....	11
Gambar 2.2	Lintasan Dubins dengan garis singgung luar	11
Gambar 2.3	Lintasan Dubins dengan garis singgung dalam.....	12
Gambar 2.4	<i>Turning Circle</i>	20
Gambar 2.5	Sistem Koordinat Kapal dan Bumi.....	21
Gambar 3.1	Diagram Alur Penelitian.....	33
Gambar 3.2	Diagram Alur Perencanaan Lintasan Dubins halangan bergerak.....	34
Gambar 4.2	Empat jenis lintasan Dubins tanpa halangan	59
Gambar 4.3	Pendekatan Halangan Sudut 0^0	50
Gambar 4.4	Pendekatan Halangan Sudut 60^0	51
Gambar 4.5	Pendekatan Halangan Sudut 120^0	51
Gambar 4.6	Pendekatan Halangan Sudut 180^0	52
Gambar 4.7	Pendekatan Halangan Sudut 240^0	52
Gambar 4.8	Pendekatan Halangan Sudut 300^0	53
Gambar 4.9	Lintasan Dubins Satu Halangan.....	57
Gambar 4.10	Hasil <i>Turning Circle</i>	61
Gambar 4.11	Lintasan RSR Tanpa Halangan.....	64
Gambar 4.12	Perbesaran Lintasan RSR pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan)	64
Gambar 4.13	Grafik Jarak Antara Kapal Dengan Halangan ($d_o(t)$) Dan Jarak Aman (<i>Threshold Value</i>).....	65

Gambar 4.14	Gambar lintasan total RSR penghindaran halangan dari sudut 180^0	66
Gambar 4.15	Simulasi lintasan Dubins dengan halangan dinamis dengan arah pendekatan 180^0 pada lintasan RSR.....	67
Gambar 4.16	Lintasan LSL Tanpa Halangan.....	69
Gambar 4.17	Perbesaran Lintasan LSL pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan)	69
Gambar 4.18	Grafik Jarak Antara Kapal Dengan Halangan ($d_o(t)$) Dan Jarak Aman (<i>Threshold Value</i>).....	70
Gambar 4.19	Gambar lintasan total LSL penghindaran halangan dari sudut 0^0	71
Gambar 4.20	Simulasi lintasan Dubins dengan halangan dinamis dengan arah pendekatan 0^0 pada lintasan LSL.....	72
Gambar 4.21	Lintasan RSR Tanpa Halangan.....	74
Gambar 4.22	Perbesaran Lintasan RSR pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan).....	74
Gambar 4.23	Grafik Jarak Antara Kapal Dengan Halangan ($d_o(t)$) Dan Jarak Aman (<i>Threshold Value</i>).....	75
Gambar 4.24	Gambar lintasan total RSR penghindaran halangan dari sudut 60^0	76
Gambar 4.25	Simulasi lintasan Dubins dengan halangan dinamis dengan arah pendekatan 60^0 pada lintasan RSR.....	77
Gambar 4.26	Lintasan RSL Tanpa Halangan.....	78
Gambar 4.27	Perbesaran Lintasan RSL pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan).....	79

Gambar 4.28	Grafik Jarak Antara Kapal Dengan Halangan ($d_o(t)$) Dan Jarak Aman (<i>Threshold Value</i>).....	80
Gambar 4.29	Gambar lintasan total RSL penghindaran halangan dari sudut 120^0	81
Gambar 4.30	Simulasi lintasan Dubins dengan halangan dinamis dengan arah pendekatan 120^0 pada lintasan RSL.....	82
Gambar 4.31	Lintasan LSR Tanpa Halangan.....	84
Gambar 4.32	Perbesaran Lintasan LSR pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan).....	84
Gambar 4.33	Grafik Jarak Antara Kapal Dengan Halangan ($d_o(t)$) Dan Jarak Aman (<i>Threshold Value</i>).....	85
Gambar 4.34	Gambar lintasan total LSR penghindaran halangan dari sudut 240^0	86
Gambar 4.35	Simulasi lintasan Dubins dengan halangan dinamis dengan arah pendekatan 240^0 pada lintasan LSR.....	87
Gambar 4.36	Lintasan LSL Tanpa Halangan.....	88
Gambar 4.37	Perbesaran Lintasan LSL pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan).....	89
Gambar 4.38	Grafik Jarak Antara Kapal Dengan Halangan ($d_o(t)$) Dan Jarak Aman (<i>Threshold Value</i>).....	90
Gambar 4.39	Gambar lintasan total LSL penghindaran halangan dari sudut 300^0	91
Gambar 4.40	Simulasi lintasan Dubins dengan halangan dinamis dengan arah pendekatan 300^0 pada lintasan RSR.....	92

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Notasi pada Dinamika Kapal.....	22
Tabel 2.2	Variabel normalisasi Sistem Prime I.....	28
Tabel 4.1	Data parameter KRI Corvet Kelas Sigma...	40
Tabel 4.2	Nilai Koefisien Hidrodinamika Kapal Corvet Kelas Sigma.....	43
Tabel 4.3	Tabel Posisi Awal Dan Akhir Kapal.....	62

Daftar Simbol

ψ	Sudut yaw
δ_R	Sudut rudder
x	Variabel keadaan
r	Kecepatan sudut yaw
I_z	Momen inersia pada sumbu Z
C_B	Koefisien blok
x_g	x coordinate of CG
A_δ	Luas rudder
m	Massa kapal
u_0	Kecepatan jelajah kapal
ρ	Massa jenis air laut
L	Panjang kapal
T	Kedalaman atau tinggi kapal
B	Lebar kapal
$Y_{\dot{v}}$	Turunan gaya hidrodinamika sway terhadap \dot{v}
$Y_{\dot{r}}$	Turunan gaya hidrodinamika sway terhadap \dot{r}
$N_{\dot{r}}$	Turunan momen yaw terhadap \dot{r}
Y_v	Turunan gaya arah sway terhadap v
Y_r	Turunan gaya arah yaw terhadap r
N_v	Turunan momen sway terhadap v
$N_{\dot{v}}$	Turunan momen sway terhadap \dot{v}
N_r	Turunan momen yaw terhadap r
Y_δ	Turunan gaya sway terhadap sudut rudder
N_δ	Turunan momen sway terhadap sudut rudder

BAB I

PENDAHULUAN

Pada bab ini dibahas latar belakang yang mendasari penulisan Tugas Akhir. Kemudian didalamnya juga mencakup permasalahan pada topik Tugas Akhir. Kemudian dirumuskan menjadi permasalahan yang diberikan batasan-batasan untuk membatasi pembahasan pada Tugas Akhir ini.

1.1 Latar Belakang Masalah

Kendaraan kapal merupakan teknologi transportasi yang telah mengalami perkembangan cukup pesat dalam beberapa waktu terakhir yang disertai dengan peningkatan jumlah penempunannya di bidang industri, militer, maupun pertahanan di wilayah laut. Sebagai negara yang sebagian besar wilayahnya berupa perairan yaitu duapertiga dari total seluruh luas wilayahnya, maka dengan kondisi ini pengembangan transportasi di perairan sangat diperlukan untuk Indonesia [2]. Salah satu jenis kendaraan kapal yaitu kapal perang yang mempunyai fungsi untuk menjaga wilayah geografis negara maritim karena memiliki banyak manfaat seperti patroli perairan teritorial, pengumpulan data oseanografi, dan lain-lain [1]. Dengan adanya transportasi kapal perang yang canggih diharapkan dapat menguatkan sistem pertahanan laut.

Sebuah kapal yang berlayar pastinya telah memiliki tujuan pelayaran. Pada dasarnya, posisi awal dan posisi tujuan pelayaran telah ditetapkan sebelumnya dengan perencanaan lintasan sebaik mungkin ketika kapal akan berlayar dan direpresentasikan oleh suatu bentuk *trajectory*[3]. Akan tetapi, terkadang lintasan pelayaran yang diperoleh tidak selalu ter-

hindar dari halangan. Terdapat banyak halangan yang dijumpai saat kapal berlayar baik halangan statis ataupun halangan dinamis serta harus bisa menghindarinya agar tidak terjadi tabrakan. Halangan statis merupakan halangan yang diam seperti pulau-pulau kecil maupun besar, atau kapal yang sedang berhenti, dsb, sedangkan halangan dinamis adalah halangan yang bergerak seperti kapal-kapal lain yang juga sedang berlayar. Cara penghindaran oleh halangan statis berbeda dengan halangan dinamis. Jika halangan statis letak posisinya sudah diketahui oleh kapal, sedangkan halangan dinamis sedikit lebih rumit karena harus lebih adaptif menyesuaikan halangan yang datang. Oleh sebab itu diperlukan suatu perencanaan lintasan (*path planning*) untuk kapal sehingga dapat menghindari tabrakan baik dengan halangan statis maupun dinamis agar mencapai posisi tujuan dengan *realtime*.

Dalam penentuan lintasan, diperlukan sistem navigasi yang biasanya dibantu oleh *Global Positioning System* (GPS) dimana dapat memberikan informasi letak di permukaan bumi dengan bantuan penyelarasan sinyal satelit. Sistem ini memiliki tujuan untuk menemukan lintasan dari posisi awal ke posisi akhir kapal [4]. Setelah proses navigasi selesai, sistem selanjutnya adalah sistem panduan perencanaan lintasan. Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk melakukan perencanaan lintasan diantaranya *Automatic Dependent Surveillance Broadcast* (ADS-B) [5], *Novel DVS Guidance* [6], *Dynamical Sliding Mode* [7], *Dubins Path*, dan lain sebagainya. Salah satu diantaranya terdapat satu metode yang memiliki cukup banyak keunggulan diantara metode lainnya yaitu metode lintasan Dubins. Metode lintasan Dubins adalah lintasan dengan titik terpendek yang memenuhi batas kelengkungan

maksimum antara dua titik dengan orientasi pada sebuah bidang [8]. Lintasan Dubins dibentuk oleh busur lingkaran dan garis lurus yang menyinggung kedua lingkaran. Terdapat lintasan garis dan busur lingkaran. Garis adalah jarak terpendek antara dua titik dan busur lingkaran adalah belokan kelengkungan konstan yang paling pendek [9]. Lintasan Dubins memiliki beberapa keunggulan, yaitu dapat digunakan untuk sudut di semua kuadran baik pada titik awal atau akhir, mengoptimalkan waktu karena dapat membangkitkan kelengkungan lintasan. Selain itu, lintasan Dubins tidak membutuhkan banyak waktu dalam perencanaannya sehingga dapat lebih optimal dan efisien, juga membutuhkan sedikit waktu untuk mencapai target [10].

Terdapat beberapa penelitian sebelumnya yang menyangkut tentang perencanaan lintasan haluan kapal diantaranya yaitu, Perencanaan Lintasan Menggunakan Dubins Geometry pada Pesawat Udara NIR Awak (PUNA) oleh Kumala tahun 2010, pada penelitian ini dibahas algoritma model lintasan optimal PUNA menggunakan metode geometri Dubins tanpa adanya halangan [11]. Penelitian selanjutnya yaitu Perencanaan Lintasan Dubins-Geometri pada Kapal Tanpa Awak untuk Menghindari Halangan Statis oleh Nur Muallifah, Iis Herisman dan Subchan pada tahun 2013 [12]. Lalu terdapat penelitian dengan judul *Moving Obstacle Avoidance for Unmanned Aerial Vehicles* (2013) oleh Yucong Lin tentang investigasi halangan bergerak untuk pesawat tanpa awak [13]. Penelitian selanjutnya oleh Iratdya Winggari pada tahun 2018 dengan judul kendali sudut haluan kapal pada pelacakan lintasan dubins dengan halangan statis menggunakan MPC. Disini halangan yang dipakai yaitu halangan statis seperti pulau kecil[14]. Dan

penelitian terakhir berjudul kendali haluan kapal untuk pelacakan lintasan Dubins dengan halangan dinamis menggunakan MPC oleh Dian Kusuma tahun 2019. Pada penelitian tersebut menggunakan satu halangan dinamis, datang dari 4 arah, serta kecepatan kapal dan halangan bernilai konstan [15].

Berdasarkan penjelasan diatas, pada tugas akhir ini, penulis mengusulkan penelitian tentang perencanaan lintasan kapal untuk menghindari halangan dinamis yang datang dengan sudut tertentu dengan metode Dubins.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan di atas, rumusan masalah untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana lintasan kapal yang diperoleh dari penerapan metode Dubins dalam menghindari halangan dinamis?
2. Bagaimana mengimplementasikan dan mensimulasikan lintasan Dubins pada kapal dengan halangan dinamis?

1.3 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang digunakan penulis dalam Tugas Akhir ini sebagai berikut:

1. Kapal yang digunakan pada simulasi adalah kapal perang Corvet kelas SIGMA.
2. Menggunakan satu halangan bergerak.
3. Halangan datang dari sudut tertentu.
4. Gangguan alam diabaikan karena diasumsikan bernilai kecil.
5. Pendekatan model dinamik kapal menggunakan model Davidson Schiff.

6. Kapal diasumsikan bergerak dengan kecepatan *surge* konstan.
7. Kapal diasumsikan mengetahui trayektori dari halangan yang bergerak.
8. Halangan bergerak lurus dengan kecepatan berubah beraturan.

1.4 Tujuan

Berdasarkan rumusan dan batasan masalah yang telah dijelaskan, tujuan yang ingin dicapai dalam perencanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan lintasan kapal sehingga dapat menghindari halangan dinamis dengan sudut tertentu menggunakan metode Dubins.
2. Mengetahui hasil implementasi dan simulasi dari perencanaan lintasan optimal kapal dengan metode Dubins.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari Tugas Akhir adalah sebagai berikut:

1. Sistem dalam perangkat lunak yang menghasilkan perencanaan lintasan dapat digunakan untuk keamanan pelayaran dalam menghindari tabrakan.
2. Dapat membantu pihak-pihak terkait terutama pengambilan keputusan untuk menangani berbagai masalah dalam pelayaran.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan disusun dalam lima bab, yaitu:

1. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang gambaran umum dari penulisan yang meliputi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika penulisan.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas landasan teori yang mendasari penulisan Tugas Akhir. Didalamnya mencakup penelitian terdahulu, kapal corvet kelas SIGMA, lintasan Dubins, model matematika dinamika kapal, model matematika kinematika kapal, nilai threshold value.

3. BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan langkah-langkah yang digunakan dalam penyelesaian masalah pada Tugas Akhir. Disamping itu, dijelaskan pula prosedur dan proses pelaksanaan tiap-tiap langkah yang dilakukan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.

4. BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dijelaskan secara detail mengenai pembentukan model dinamika kapal, model kinematika kapal, model gabungan gerak kapal dalam bentuk eror, linierisasi model kapal, serta pelacakan lintasan dubins halangan dinamis.

5. BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan akhir yang diperoleh dari analisis dan pembahasan pada bab sebelumnya serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini diuraikan mengenai hasil dari penelitian - penelitian sebelumnya yang terkait dengan permasalahan Tugas Akhir ini. Selain itu juga diuraikan dasar teori yang menunjang dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam penulisan Tugas Akhir ini penulis meninjau dari beberapa penelitian-penelitian sebelumnya yang sesuai dengan topik dan permasalahan yang diambil.

Salah satu penelitian yang digunakan yaitu tugas akhir yang ditulis oleh Norma Kumala Dewi tahun 2010 berjudul Perencanaan Lintasan Menggunakan Dubins Geometry pada Pesawat Udara NIR Awak (PUNA). Dalam penelitian ini dibahas algoritma model lintasan optimal pada PUNA tanpa halangan dan implementasinya dalam sistem perangkat lunak Matlab 7.6 dengan menggunakan metode geometri Dubins (*Dubins Geometry*). Kemudian hasil simulasinya yaitu Perencanaan lintasan dengan metode ini dapat dinamis untuk semua sudut di semua kuadran baik di titik awal maupun di titik akhir dan Lintasan Dubins lebih optimal terhadap waktu dan karena dapat menggeneralisasi kelengkungan lintasan. Namun perencanaan lintasan menggunakan metode Dubins Geometry disini masih memiliki kekurangan yaitu, Walaupun Lintasan tidak *feasible* tetapi memiliki panjang lintasan terpendek maka akan tetap terplot sehingga PUNA dimungkinkan tidak dapat mengikuti lintasan tersebut[11].

Selain itu, pada penelitian "Perencanaan Lintasan Dubins-

Geometri pada Kapal Tanpa Awak untuk Menghindari Halangan Statis” ditulis oleh Nur Mualifah, Iis Herisman dan Subchan pada tahun 2013. Penelitian ini menerapkan salah satu jenis metode Dubins yaitu Dubins-Geometri untuk merancang lintasan pelayaran kapal tanpa awak dengan halangan statis. Hasil simulasi yang dilakukan menunjukkan beberapa jenis lintasan Dubins yang berhasil menghindari halangan statis. Kemudian diperoleh kesimpulan bahwa lintasan Dubins Geometri adalah lintasan yang dinamis untuk semua kuadran yang memberikan kemudahan dalam perencanaan, tidak membutuhkan banyak waktu sehingga lebih efisien dan optimal [12].

Penelitian lain berjudul ”*Vehicle Collision Avoidance System*” oleh Eivind Hope Sorbo pada tahun 2013. Penelitian ini mensimulasikan 4 kasus kendaraan simulator dalam menghindari tabrakan menggunakan kendali *Null-Space-Based* (NSB) dan metode Dubins dengan kendali *line-of-sight* (LOS). Kasus 1 mensimulasikan menghindari tabrakan dengan beberapa halangan statis, kasus 2 menggunakan halangan dinamis dengan pendekatan halangan dari arah samping kiri dan kanan, kasus 3 menggunakan halangan dinamis dengan pendekatan halangan dari depan, dan kasus 4 menggunakan halangan dinamis dengan pendekatan halangan dari belakang. Hasil dari penelitian ini menyatakan bahwa kendali dengan kedua metode mampu menghindari halangan baik statis maupun dinamis dalam mencapai target pada setiap kasus [8].

Selain itu terdapat penelitian ”*Moving Obstacle Avoidance for Unmanned Aerial Vehicles (UAV)*” oleh Yucong Lin pada tahun 2013. Penelitian ini membahas perencanaan lintasan pesawat tanpa awak dengan halangan bergerak menggunakan lintasan Dubins. Dalam menghindari halangan dilakukan pen-

dekatan dua tahap. Tahap pertama yaitu *global path planner* (tanpa memperhitungkan ketinggian) dan tahap yang kedua yaitu *local potential field planner* (dengan ketinggian). Pada tahap *global path planner* menggunakan metode Dubins untuk perencanaan lintasannya dan kalman filter untuk mengestimasi halangan bergerak. Dengan menggabungkan 2 tahap, dihasilkan lintasan Dubins saat menghindari halangan dan menghasilkan pula lintasan semula untuk kembali ke rute asli. Dua kurva digabungkan, membentuk jalur penghindaran total dan bertujuan mencapai panjang dan kehalusan jalur yang optimal. Penghindaran dalam dua mode penerbangan UAV diuji: penerbangan ketinggian konstan dan pendakian. Di setiap mode, UAV perlu menghindari pesawat yang sama ketika mendekati pesawat udara di arah yang berbeda dan menghindari pesawat yang berbeda saat mendekat dari arah yang sama. Pengujian penghindaran halangan bergerak menggunakan 12 arah sudut yang berbeda[13].

Kemudian terdapat tugas akhir dengan judul Kendali Sudut Haluan Kapal untuk Pelacakan Lintasan Dubins dengan Halangan Statis Menggunakan Metode *Model Predictive Control* oleh Iratdya Winggari tahun 2018. Pada penelitian ini membahas tentang kendali sudut haluan pada kapal. Terkadang saat kapal melakukan manuver dijumpai satu atau lebih halangan sehingga diperlukan suatu cara untuk menghindari halangan. Perencanaan lintasan disini untuk menghindari halangan statis menggunakan lintasan Dubins. Kemudian terdapat sistem kendali yang dikerjakan menggunakan *model predictive control* (MPC). Untuk model yang digunakan pada penelitian ini adalah gabungan dari model dinamik dan kinematik kapal. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah kendali meng-

gunakan MPC dapat diterapkan dengan baik pada kendali sudut haluan kapal untuk pelacakan lintasan Dubins.

Dan yang terakhir terdapat thesis dengan judul Kendali Haluan Kapal untuk Pelacakan Lintasan Dubins dengan Halangan Dinamis menggunakan *Model Predictive Control* (MPC) yang ditulis oleh Dian Kusuma Rahma Putri Kusuma pada tahun 2019. Pada penelitian ini dibahas mengenai penerapan MPC pada pelacakan lintasan Dubins untuk menghindari halangan dinamis. Pembahasan diawali dengan perancangan lintasan Dubins untuk menghindari halangan dari beberapa pendekatan yaitu pendekatan dari depan, samping kanan kiri, dan belakang. Selanjutnya dilakukan proses pembentukan model matematika gerak kapal dalam bentuk eror antara sudut haluan kapal dengan referensinya. Model yang diperoleh berbentuk nonlinear sehingga dilakukan linearisasi menggunakan Jacobian dan menganalisis sifat keterkendalian serta keteramatan sistem. Setelah itu dilakukan diskritisasi menggunakan metode matriks eksponensial sebab penerapan MPC menggunakan model diskrit.

2.2 Kapal Perang Korvet (Corvette) kelas SIGMA

Kapal Korvet atau Corvette adalah salah satu jenis kapal perang yang bertugas melakukan patroli lepas pantai atau pesisir, dan memiliki kemampuan melakukan pertempuran jarak dekat. Ukurannya lebih kecil daripada Kapal Fregat namun lebih besar dari pada Kapal Patroli. Kapal Korvet ini mampu melakukan operasi sergap dan serbu secara mandiri serta dapat bermanuver lincah di antara pulau-pulau dan perairan dangkal untuk melakukan pengejaran dan penyergapan terhadap kapal-kapal para penyusup. Bobot kapal sangat bervariasi

asi, yaitu antara 500 – 2500 ton. Dengan panjang sekitar 50 – 120 meter dari haluan hingga buritan. Kapal Korvet diawaki oleh 40–80 personil. Persenjataan yang melengkapi Kapal Korvet pada umumnya adalah persenjataan dari ukuran medium dan senjata berkaliber sedang maupun kecil. Walaupun kecil, Kapal Korvet tetap dilengkapi dengan helipad untuk sebuah helikopter[1].

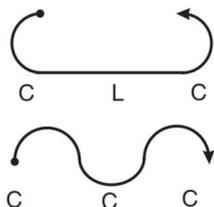
Kapal perang korvet mempunyai 25 jenis, salah satunya yaitu Kelas SIGMA (*Ship Integrated Geometrical Modularity Approach*). Korvet kelas SIGMA adalah kapal patroli dengan kemampuan untuk mengarungi samudera. Sistem propulsi (penggerak) canggih dan kemampuan berlayarnya yang baik menjadikan korvet kelas SIGMA cocok untuk dioperasikan di perairan Indonesia. Korvet kelas SIGMA dapat digunakan untuk misi patroli di Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE), misi anti kapal selam (ASW) dan untuk misi SAR (*search-and-rescue*). SIGMA dirancang untuk menerima sistem modul di berbagai area, hal ini menyebabkan kapal ini mempunyai keluwesan yang tinggi dalam pengaturannya dengan biaya yang rendah. Korvet jenis ini dilengkapi dengan perlengkapan komunikasi dan pertempuran yang lengkap di dalam ruang yang luas untuk menampung akomodasi 80 orang, sebuah dek helikopter dan propulsi diesel propeler ganda [1].



Gambar 2.1: Model Desain KRI Kelas SIGMA

2.3 Lintasan Dubins

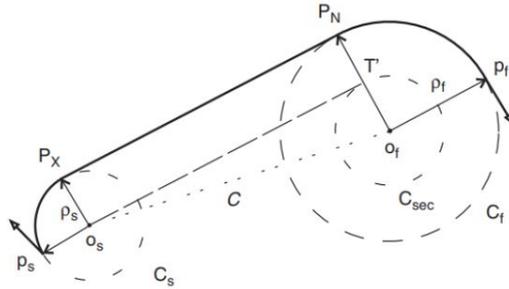
Lintasan terpendek yang menghubungkan dua titik disebut Lintasan Dubins. Pembuktian secara matematis telah dilakukan oleh Lester Eli Dubins pada tahun 1957. Definisi sederhana dari Lintasan Dubins yaitu lintasan sesingkat mungkin yang memenuhi batas kelengkungan maksimum antara dua titik dengan orientasi tertentu pada sebuah bidang baik berbentuk CLC atau CCC atau bagian dari keduanya dengan C merepresentasikan busur lingkaran dan L merepresentasikan garis lurus yang menyinggung C. Lintasan CLC terbentuk dengan menghubungkan dua busur lingkaran dan garis singgung diantara keduanya, sedangkan lintasan CCC terbentuk dengan tiga buah busur lingkaran yang menyinggung satu sama lain secara berurutan seperti pada Gambar 2.1.[4]



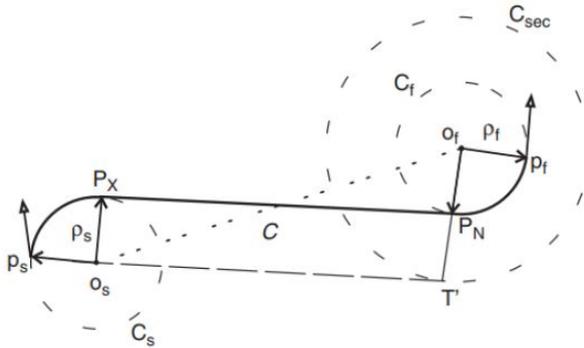
Gambar 2.2: Lintasan Dubins tipe CLC dan CCC

Lintasan Dubins diilustrasikan pada Gambar 2.3 dengan garis hitam menyatakan lintasan, P_s menyatakan posisi awal dan P_f menyatakan posisi akhir. Pada Gambar 2.3 dapat dilihat bahwa arah garis dari P_x ke P_n sama dengan garis singgung dari dua lingkaran pada titik P_x dan P_n . P_x merupakan titik akhir dari busur lingkaran pertama dan P_n merupakan titik awal dari

busur lingkaran kedua.



Gambar 2.3: Lintasan Dubins dengan garis singgung luar



Gambar 2.4: Lintasan Dubins dengan garis singgung dalam

Kemungkinan lintasan geometri Dubins yang terbentuk ada empat macam lintasan yaitu *Right-Straight-Right* (RSR), *Left-Straight-Left* (LSL), *Right-Straight-Left* (RSL) dan *Left-Straight-Right* (LSR). Lintasan RSR dan LSL menggunakan lintasan Dubins garis singgung luar. Sementara lintasan RSL

dan LSR menggunakan lintasan Dubins garis singgung dalam. Perancangan lintasan Dubins membutuhkan parameter input berikut ini [4]:

1. Posisi awal $P_s(x_s; y_s; \psi_s)$.
2. Posisi akhir $P_f(x_f; y_f; \psi_f)$.
3. Jari-jari kelengkungan awal ρ_s
4. Jari-jari kelengkungan akhir ρ_f

Adapun proses menghitung lintasan Dubins sebagai berikut [3]:

1. Menentukan parameter input posisi awal dan akhir kapal
2. Menentukan koordinat titik pusat lingkaran awal $O_s(x_{cs}, y_{cs})$ dan lingkaran akhir $O_f(x_{cf}, y_{cf})$ menggunakan

$$\begin{aligned}(x_{cs}, y_{cs}) &= (x_s - \rho_s \cos(\psi_s \pm \frac{\pi}{2}), y_s - \rho_s \sin(\psi_s \pm \frac{\pi}{2})) \\ (x_{cf}, y_{cf}) &= (x_f - \rho_f \cos(\psi_f \pm \frac{\pi}{2}), y_f - \rho_f \sin(\psi_f \pm \frac{\pi}{2}))\end{aligned}$$

3. Garis c yang menghubungkan antara titik pusat O_s dan O_f disebut garis pusat. Panjang garis pusat diperoleh dari

$$|c| = \sqrt{(x_{cs} - x_{cf})^2 + (y_{cs} - y_{cf})^2}$$

4. Menentukan posisi koordinat tangent entry $P_N(x_{P_N}, y_{P_N})$ dan tangent exit $P_X(x_{P_X}, y_{P_X})$.) Tangent entry adalah titik dari akhir lintasan garis dan awal dari busur lingkaran kedua yang akan dibentuk, sedangkan tangent exit adalah titik keluar dari lintasan busur lingkaran dan awal dari lintasan garis. Sebelum menentukan kooordinat tersebut perlu dilakukan perhitungan sudut entry θ_{en} dan sudut exit θ_{ex} .

5. Berdasarkan nilai-nilai parameter yang diperoleh di atas, panjang lintasan Dubins dapat dihitung sebagai:

$$L_{Dubins} = L_{arc,start} + L_{garissingung} + L_{arc,finish}$$

$$L_{Dubins} = f(\rho_s, \rho_f)$$

Proses perhitungan panjang masing-masing lintasan Dubins diberikan sebagai berikut:

2.3.1 Lintasan RSR (*Right-Straight-Right*)

Lintasan RSR adalah lintasan yang terbentuk sebagai akibat dari kapal berbelok ke kanan (searah jarum jam) membentuk busur lingkaran pertama kemudian bergerak membentuk garis lurus dan berbelok ke kanan kembali membentuk busur lingkaran kedua. Adapun proses perhitungan panjang lintasan RSR sebagai berikut:

1. Menentukan posisi awal P_s dan posisi akhir P_f pada koordinat kartesius (x, y) , sudut hadap kapal ψ dan jari-jari minimum kelengkungan lingkaran ρ yang akan dibentuk:

$$P_s = [x_s, y_s, \psi_s, \rho_s]$$

$$P_f = [x_f, y_f, \psi_f, \rho_f]$$

2. Menentukan titik pusat busur lingkaran yang dibentuk dengan batas jari-jari minimum dengan arah belok kapal ke kanan pada busur lingkaran awal x_{cs}, y_{cs} dan busur lingkaran akhir x_{cf}, y_{cf} menggunakan rumus berikut:

$$(x_{cs}, y_{cs}) = (x_s - \rho_s \cos(\psi_s + \frac{\pi}{2}), y_s - \rho_s \sin(\psi_s + \frac{\pi}{2}))$$

$$(x_{cf}, y_{cf}) = (x_f - \rho_f \cos(\psi_f + \frac{\pi}{2}), y_f - \rho_f \sin(\psi_f + \frac{\pi}{2}))$$

3. Menghitung jarak pusat lingkaran dengan geometri euclidean berikut :

$$|c| = \sqrt{(x_{cs} - x_{cf})^2 + (y_{cs} - y_{cf})^2}$$

4. Menganalisis eksistensi lintasan Dubins yang berbentuk RSR dengan syarat batas berikut :

$$|\rho_s - c| < \rho_f \text{ dan } |\rho_f - c| < \rho_s$$

Jika syarat terpenuhi maka lintasan yang terbentuk tidak feasible sedangkan jika syarat tidak terpenuhi maka lintasan yang terbentuk feasible.

5. Menentukan sudut kemiringan garis yang dibentuk dari pusat lingkaran awal ke pusat lingkaran akhir yang selanjutnya disebut dengan γ dengan rumus sebagai berikut:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{y_{cf} - y_{cs}}{x_{cf} - x_{cs}}\right)$$

Kemudian menentukan sudut yang dibentuk oleh garis c dan selisih jari-jari kedua lingkaran sebagai berikut:

$$\theta_e = \arctan\left(\frac{|\rho_f - \rho_s|}{\sqrt{c^2 - (|\rho_f - \rho_s|)^2}}\right)$$

6. Menentukan titik akhir dari busur lingkaran awal sebelum membentuk garis yang disebut tangen exit (P_X) dan titik akhir dari lintasan garis sebelum membentuk lintasan busur lingkaran akhir disebut tangen entry (P_N). Sebelum menentukan kedua titik tersebut harus ditentukan terlebih dulu sudut entry (θ_{en}) dan sudut exit (θ_{ex}) dari sudut hadap kapal ketika melalui kedua titik tersebut. Perhitungan kedua sudut tersebut diberikan sebagai berikut:

$$\theta_{en} = \theta_e + \frac{\pi}{2} + \gamma \text{ dan } \theta_{ex} = \theta_e + \frac{\pi}{2} + \gamma$$

Sehingga perhitungan koordinat P_X dan P_N sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
P_X &= (x_{cs} + \rho_s \cos(\theta_{ex}), y_{cs} + \rho_s \sin(\theta_{ex})) \\
P_N &= (x_{cf} + \rho_f \cos(\theta_{en}), y_{cf} + \rho_f \sin(\theta_{en}))
\end{aligned}$$

7. Panjang lintasan garis atau jarak antara titik tangen entry dan tangen exit dihitung menggunakan rumus euclidean geometri berikut :

$$|P_X P_N| = \sqrt{(x_{P_X} - x_{P_N})^2 - (y_{P_X} - y_{P_N})^2}$$

8. Selanjutnya panjang busur lingkaran awal dan akhir dihitung menggunakan rumus berikut:

$$Panjangbusur = kelilinglingkaran \times \frac{sudut}{360}$$

Untuk panjang busur lingkaran awal dihitung menggunakan rumus berikut:

$$L_{arc,start} = \pi \times \rho_s \times \frac{(\psi_s + 90^0) - \theta_{ex}}{180^0}$$

Untuk panjang busur lingkaran akhir dihitung menggunakan rumus berikut:

$$L_{arc,finish} = \pi \times \rho_f \times \frac{(\psi_f + 90^0) - \theta_{en}}{180^0}$$

9. Panjang lintasan total dirumuskan sebagai berikut:

$$L_{Dubins} = L_{arc,start} + L_{garissinggung} + L_{arc,finish}$$

2.3.2 Lintasan LSL (*Left-Straight-Left*)

Lintasan LSL adalah lintasan yang terbentuk sebagai akibat dari kapal berbelok ke kiri (berlawanan arah jarum jam) membentuk busur lingkaran pertama kemudian bergerak membentuk garis lurus dan berbelok ke kiri kembali membentuk busur lingkaran kedua. Adapun proses perhitungan panjang lintasan LSL hampir sama dengan perhitungan panjang lintasan RSR namun terdapat perbedaan dalam perhitungan pusat masing-masing busur lingkaran yang dibentuk dan perhitungan sudut tangen entry dan sudut tangen exit. Adapun perhitungan pusat busur lingkaran sebagai berikut:

$$\begin{aligned}(x_{cs}, y_{cs}) &= (x_s - \rho_s \cos(\psi_s - \frac{\pi}{2}), y_s - \rho_s \sin(\psi_s - \frac{\pi}{2})) \\(x_{cf}, y_{cf}) &= (x_f - \rho_f \cos(\psi_f - \frac{\pi}{2}), y_f - \rho_f \sin(\psi_f - \frac{\pi}{2}))\end{aligned}$$

dan perhitungan sudut tangen entry dan sudut tangen exit sebagai berikut:

$$\theta_{en} = \gamma + \theta_e - \frac{\pi}{2} \text{ dan } \theta_{ex} = \gamma + \theta_e - \frac{\pi}{2}$$

Perhitungan yang lain sama dengan perhitungan lintasan RSR.

2.3.3 Lintasan RSL (*Right-Straight-Left*)

Lintasan RSL adalah lintasan yang terbentuk sebagai akibat dari kapal berbelok ke kanan (searah jarum jam) saat membentuk busur lingkaran pertama kemudian bergerak membentuk garis lurus dan berbelok ke kiri saat membentuk busur lingkaran kedua. Adapun proses perhitungan panjang lintasan RSL sebagai berikut:

1. Menentukan pusat busur lingkaran yang terbentuk dengan

menggunakan batas jari-jari minimum dengan kapal berbelok ke arah kanan saat membentuk busur lingkaran pertama dan berbelok ke arah kiri saat membentuk busur lingkaran kedua dengan rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned}(x_{cs}, y_{cs}) &= (x_s - \rho_s \cos(\psi_s + \frac{\pi}{2}), y_s - \rho_s \sin(\psi_s + \frac{\pi}{2})) \\ (x_{cf}, y_{cf}) &= (x_f - \rho_f \cos(\psi_f - \frac{\pi}{2}), y_f - \rho_f \sin(\psi_f - \frac{\pi}{2}))\end{aligned}$$

2. Menganalisis eksistensi lintasan Dubins yang berbentuk RSL dengan syarat sebagai berikut:

$$|\rho_s + \rho_f| > c$$

Jika syarat tersebut terpenuhi maka lintasan yang terbentuk tidak feasible sedangkan jika syarat tidak terpenuhi maka lintasan feasible. Jari-jari kedua busur lingkaran dipastikan tidak beririsan dengan adanya syarat tersebut.

3. Menentukan sudut yang dibentuk oleh garis c dan selisih jari-jari lingkaran sebagai berikut:

$$\theta_e = \arctan\left(\frac{\sqrt{c^2 - (|\rho_f + \rho_s|)^2}}{|\rho_f + \rho_s|}\right)$$

4. Menentukan sudut tangen entry dan sudut tangen exit sebagai berikut:

$$\theta_{en} = \theta_e + \pi + \gamma \text{ dan } \theta_{ex} = \theta_e + \gamma$$

Untuk perhitungan yang lain sama dengan perhitungan lintasan RSR.

2.3.4 Lintasan LSR(*Left-Straight-Right*)

Lintasan LSR adalah lintasan yang terbentuk sebagai akibat dari kapal berbelok ke kiri (berlawanan arah jarum jam) saat membentuk busur lingkaran pertama kemudian bergerak membentuk garis lurus dan berbelok ke kanan saat membentuk busur lingkaran kedua. Adapun proses perhitungan panjang lintasan LSR sebagai berikut:

1. Menentukan pusat busur lingkaran yang terbentuk dengan menggunakan batas jari-jari minimum dengan kapal berbelok ke arah kiri (berlawanan arah jarum jam) saat membentuk busur lingkaran pertama dan berbelok ke arah kanan saat membentuk busur lingkaran kedua dengan rumus sebagai berikut:

$$(x_{cs}, y_{cs}) = (x_s - \rho_s \cos(\psi_s - \frac{\pi}{2}), y_s - \rho_s \sin(\psi_s - \frac{\pi}{2}))$$

$$(x_{cf}, y_{cf}) = (x_f - \rho_f \cos(\psi_f + \frac{\pi}{2}), y_f - \rho_f \sin(\psi_f + \frac{\pi}{2}))$$

2. Menganalisis eksistensi lintasan Dubins yang berbentuk LSR dengan syarat sebagai berikut:

$$|\rho_s + \rho_f| > c$$

Jika syarat tersebut terpenuhi maka lintasan yang terbentuk tidak feasible sedangkan jika syarat tidak terpenuhi maka lintasan feasible. Jari-jari kedua busur lingkaran dipastikan tidak beririsan dengan adanya syarat tersebut.

3. Menentukan sudut yang dibentuk oleh garis c dan selisih jari-jari lingkaran sebagai berikut:

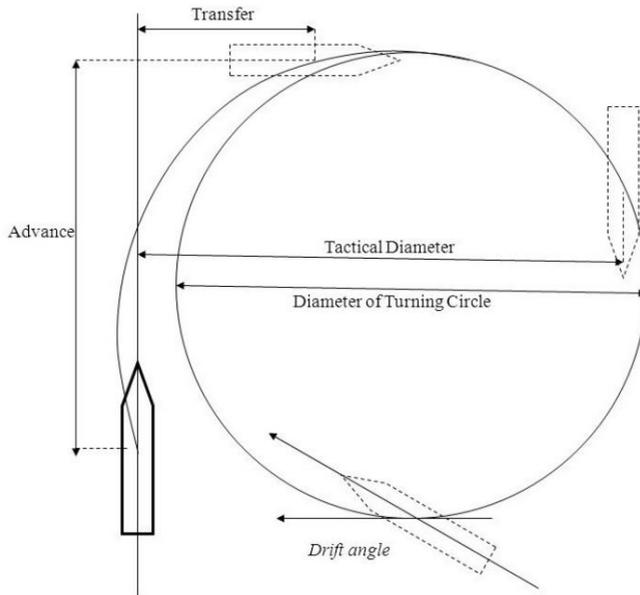
$$\theta_e = \arctan\left(\frac{\sqrt{c^2 - (|\rho_f + \rho_s|)^2}}{|\rho_f + \rho_s|}\right)$$

4. Menentukan sudut tangen entry dan sudut tangen exit sebagai berikut:

$$\theta_{en} = \gamma - \theta_e + \pi \text{ dan } \theta_{ex} = \gamma - \theta_e$$

Untuk perhitungan yang lain sama dengan perhitungan lintasan RSR.

2.4 Nilai Jarak Aman (*Threshold Value*)



Gambar 2.5: *Turning Circle*

Kapal dalam menghindari halangan dinamis harus menentukan batas aman. *Threshold value* merupakan nilai jarak aman di sekitar halangan dinamis. Nilai *Threshold value* diperoleh dari hasil *turning test* pada kapal. *Turning test* adalah

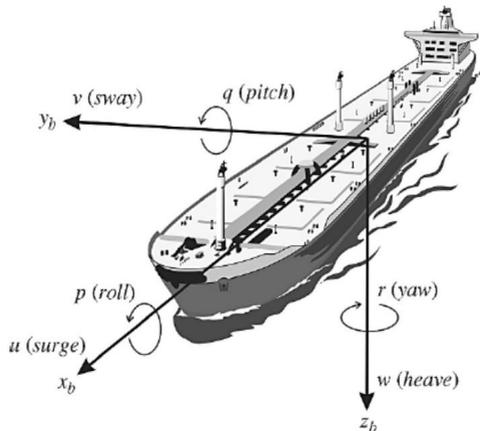
salah satu uji yang harus dipenuhi oleh kapal dalam menentukan kelayakan manuvernya selama berlayar [20]. Tes ini merupakan gerak manuver melingkar dengan memutar kapal pada kecepatan maksimum dengan sudut kemudi maksimum [8]. *Turning circle test*, dimulai dari gerak lurus kapal dengan kecepatan konstan sesuai kecepatan dinas, rudder dihidupkan dengan kecepatan maksimum ke sudut δ (sudut kemudi maksimum) dan tetap pada sudut tersebut, sampai kapal telah melakukan *turning cycle* paling kurang 540° . Percobaan dilakukan untuk bagian port side dan starboard. Informasi penting yang diperoleh dari manuver tersebut umumnya direkam dengan menggunakan GPS [20]. Hasil tes tersebut digunakan untuk menghitung ukuran standar kemampuan manuver seperti *tactical diameter*, *advance* dan *transfer* [16] seperti pada Gambar 2.5.

Advance adalah jarak yang dilalui oleh kapal dari posisi saat kapal mulai berbelok menuju posisi saat kapal mencapai sudut haluan 90° untuk pertama kali. *Transfer* adalah jarak sementara yang ditempuh sebuah kapal melakukan perubahan arah 90° . *Tactical diameter* adalah jarak dari jalur awal ke sumbu x pada kapal ketika kapal telah berbelok 180° . Sedangkan *drift angle* adalah sudut antara haluan kapal dan arah gerakan. Pada penelitian ini *threshold value* diasumsikan sama dengan nilai *advance* sehingga kapal masih memenuhi kriteria untuk melakukan manuver dan tidak menabrak halangan [15].

2.5 Model Matematika Dinamika Kapal 2 Derajat Kebebasan Davidson-Schiff

Pada model dinamika kapal dirumuskan sebagai suatu *rigid*

body dengan enam derajat kebebasan. Kapal mempunyai tiga sumbu utama diantaranya yaitu sumbu longitudinal (membujur atau sumbu X), sumbu lateral (menyamping atau sumbu Y), dan sumbu vertikal (normal atau sumbu Z). Pada dasarnya gerak dinamika kapal dibagi dalam enam derajat kebebasan, yaitu: *surge*, *sway*, *yaw*, *heave*, *roll*, dan *pitch*. Secara umum gerakan yang dialami sebuah kapal ketika melaju di lautan ada dua macam, yaitu gerakan translasi dan rotasi. Gerakan translasi terdiri dari *surge* (maju/mundur), *sway* (kanan/kiri), *heave* (atas/bawah). Gerak rotasi kapal dibagi menjadi tiga, yaitu *roll* (gerakan memutar menyamping), *pitch* (gerakan memutar ke depan), *yaw* (gerakan menggeng). Derajat kebebasan ini juga biasanya disebut sebagai komponen gerak dari kapal dengan enam komponen gerak dapat dilihat pada tabel 2.1 dan gambar 2.3 dibawah ini[3].



Gambar 2.6: Sistem koordinat kapal dan bumi

Dan notasi-notasi yang digunakan pada kapal diberikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1: Notasi pada dinamika kapal

DOF	Gerakan	Gaya dan momen	Kecepatan linear dan angular	Posisi dan Sudut Euler
1	Gerak arah-x(surge)	X	u	x
2	Gerak arah-y sway)	Y	v	y
3	Gerak arah-z(heave)	Z	w	z
4	Rotasi arah-x(roll)	K	p	Φ
5	Rotasi arah-y(pitch)	M	q	Θ
6	Rotasi arah-z(yaw)	N	r	ψ

Dasar dari gerak dinamika yaitu memperhatikan gaya-gaya yang ada dan dapat dijelaskan dengan analisa khususnya hukum gerak Newton 2 yang bisa dituliskan

$$m\dot{v}_c = f_c$$

dimana massa m , percepatan \dot{v}_c , dan gaya f_c . Jika tidak ada gaya yang beraksi ($f_c = 0$) maka kapal berpindah dengan kecepatan konstan ($v_c = constant$) atau ($\dot{v}_c = 0$).

Selain itu pada gerak kapal terdapat gaya yang bergerak secara rotasi atau bisa disebut dengan Momen gaya atau Torsi. Secara matematis momen gaya dapat ditulis

$$\tau = rF = I\alpha = mr^2\alpha$$

dimana panjang lengan r , gaya F , Inersia I , percepatan sudut α .

Ketika kapal berada di air yang tenang dalam keadaan diam, maka kapal bekerja gaya sesuai hukum archimedes (gaya

tekan keatas yang dialami sama proporsinya dengan berat volume air yang dipindahkan oleh massanya). Saat dipindahkan dari posisi keseimbangannya oleh gaya eksternal ke arah bawah dengan waktu yang singkat, momen bidang potongan akan mengubah gaya tekan keatas sebagai akibat adanya perubahan berat, hal ini mengakibatkan timbulnya percepatan vertikal. Reaksi inersia yang berlawanan arah dengan percepatan [6].

Persamaan dinamik kapal dengan enam derajat kebebasan (DOF) diberikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\
 m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= Y \\
 m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= Z \\
 I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= K \\
 I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= M \\
 I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= N
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Tiga persamaan pertama merepresentasikan gerak translasi dan tiga yang lain merepresentasikan gerakan rotasi.

Persamaan kecepatan dan sistem kemudi kapal yang diamati akan sesuai berdasarkan beberapa asumsi, yaitu:

1. Distribusi massa homogen dan bidang xz simetris ($I_{xy} = I_{yz} = 0$).
2. Koordinat pusat diletakan di tengah kapal ($y_G = 0$).
3. Gerakan *heave*, *roll* dan *pitch* tidak diperhitungkan ($w = p = q = \dot{w} = \dot{p} = \dot{q} = 0$) Berdasarkan asumsi tersebut persamaan (2.1) menjadi:

$$\begin{aligned}
 surge : m(\dot{u} - vr - x_G r^2) &= X \\
 sway : m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) &= Y
 \end{aligned}$$

$$yaw : I_z \dot{r} + m x_G (\dot{v} + ur) = N \quad (2.2)$$

4. Kecepatan *sway* v , kecepatan *yaw* r dan sudut *rudder* δ diasumsikan kecil.

Hal itu mengimplikasikan bahwa gerak *surge* dapat dipisahkan dari gerak *sway* dan *yaw* dengan asumsi kecepatan u_0 adalah konstan untuk gaya dorong yang juga konstan. Dengan cara yang sama, diasumsikan pada *sway* dan *yaw* $v_0 = r_0 = 0$. Oleh sebab itu,

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \Delta u; v = \Delta v; r = \Delta r \\ X &= X_0 + \Delta X; Y = \Delta Y; N = \Delta N \end{aligned}$$

dimana $\Delta u, \Delta v, \Delta r$ adalah gangguan kecil dari nilai u_0, v_0 dan r_0 dan $\Delta X, \Delta Y, \Delta N$ adalah gangguan kecil dari nilai nominal X_0, Y_0 dan N_0 , sehingga persamaan (2.2) dapat ditulis :

$$\begin{aligned} m \Delta \dot{u} &= X_0 + \Delta X \\ m(\Delta \dot{v} + u_0 \Delta r + x_G \Delta \dot{r}) &= \Delta Y \\ I_z \Delta \dot{r} + m x_G (\Delta \dot{v} + u_0 \Delta r) &= \Delta N \quad (2.3) \end{aligned}$$

dengan catatan dimana persamaan sistem kemudi kapal telah terpisah dari persamaan kecepatan, dengan menggunakan persamaan (2.2) persamaan (2.3) menjadi:

$$\begin{aligned} m \dot{u} &= X \quad (\text{Sistem kecepatan}) \\ m(\dot{v} + u_0 r + x_G \dot{r}) &= Y \quad (\text{Sistem kemudi}) \\ I_z \dot{r} + m x_G (\dot{v} + u_0 r) &= N \quad (\text{Sistem kemudi}) \quad (2.4) \end{aligned}$$

Persamaan kendali pada gerak kapal biasanya memuat variabel keadaan v, r, ψ dan kontrol masukan δ . Berdasarkan persamaan (2.4) persamaan kendali dinamika kapal dapat dituliskan :

$$\begin{aligned} m(\dot{v} + u_0 r + x_G \dot{r}) &= Y \\ I_z \dot{r} + m x_G (\dot{v} + u_0 r) &= N \end{aligned}$$

Teori linier Davidson dan Schiff (1946) menjelaskan bahwa gaya dan momen hidrodinamika dapat dimodelkan sebagai:

$$\begin{aligned} Y &= Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_{\delta} \delta_R \\ N &= N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_v v + N_r r + N_{\delta} \delta_R \end{aligned}$$

dimana $Y_{\dot{v}}$ adalah turunan gaya arah sway terhadap \dot{v} , $Y_{\dot{r}}$ adalah turunan gaya sway terhadap \dot{r} , $N_{\dot{r}}$ adalah turunan momen yaw terhadap \dot{r} , Y_v adalah turunan gaya arah sway terhadap v , Y_r adalah turunan gaya arah yaw terhadap r , N_v adalah turunan momen sway terhadap v , $N_{\dot{v}}$ adalah turunan momen sway terhadap \dot{v} , N_r adalah turunan momen yaw terhadap r , Y_{δ} dan N_{δ} adalah turunan gaya dan momen sway terhadap sudut rudder[8].

Sehingga dengan pendekatan Davidson dan Schiff, bentuk umum persamaan model dinamik kapal dengan 2 derajat kebebasan sebagai berikut:

$$M \dot{v} + N(u_0)v = b \delta_R \quad (2.5)$$

Dimana $\dot{v} = [v, r]^T$ adalah vektor keadaan, δ_R adalah sudut *rudder* dan:

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & m x_g - Y_{\dot{r}} \\ m x_g - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \\ N(u_0) &= \begin{bmatrix} -Y_v & m u_0 - Y_r \\ -N_v & m x_g u_0 - N_r \end{bmatrix} \\ b &= \begin{bmatrix} Y_{\delta} \\ N_{\delta} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

dengan matriks M tersusun oleh total massa dari rigidbody dan massa tambahan. Matriks N_{u_0} adalah penjumlahan gaya redaman linier D dan gaya sentripetal Coriolis C_{u_0} (dengan syarat penambahan mu_0 dan mx_gu_0)

$$N_{u_0} = C_{u_0} + D$$

dan juga dipilih matrik inersia $M \neq M^T$. Model ruang keadaan yang bersesuaian didapatkan dengan memilih $x = [v, r]^T$ sebagai vektor keadaan dan $u = \delta_R$ Sehingga

$$\dot{x} = A_x + b_1 u$$

dengan

$$A = -M^{-1}N = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \quad b_1 = M^{-1}b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

Koefisien didefinisikan sebagai berikut:

$$a_{11} = \frac{(I_z - N_r)Y_v - (mx_g - Y_{\dot{r}})N_v}{\det(M)}$$

$$a_{12} = \frac{(I_z - N_r)(Y_v - mu_0) - (mx_g - Y_{\dot{r}})(N_r - mx_gu_0)}{\det(M)}$$

$$a_{21} = \frac{(m - Y_v)N_v - (mx_g - Y_v)N_v}{\det(M)}$$

$$a_{22} = \frac{(m - Y_v)(N_r - mx_gu_0) - (mx_g - N_v)(Y_r - mu_0)}{\det(M)}$$

dan

$$b_1 = \frac{(I_z - N_r)Y_{\delta} - (mx_g - Y_{\dot{r}})N_{\delta}}{\det(M)}$$

$$b_2 = \frac{(m - Y_v)N_{\delta} - (mx_g - N_{\dot{v}})Y_{\delta}}{\det(M)}$$

dengan $\det(M)$ adalah determinan dari matriks inersia

Kemudian masuk ke proses normalisasi. Koefisien hidro-dinamika merupakan suatu bentuk non dimensional yang diturunkan dengan sistem prime I. Untuk memperoleh besaran gaya dikalikan dengan $\frac{1}{2}\rho U^2 L^2$ momen dikalikan dengan $\frac{1}{2}\rho U^2 L^3$, besaran massa dikalikan dengan $\frac{1}{2}\rho L^3$, besaran momen inersia dikalikan dengan $\frac{1}{2}\rho L^5$. Dimana ρ = massa jenis air laut ($1024kg/m^3$), L = panjang kapal, U = kecepatan servis kapal, B = lebar kapal, T = kedalaman/ tinggi kapal, C_B = koefisien blok (dari buku Fossen). Variabel normalisasi Sistem Prime I diberikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2: Variabel normalisasi Sistem Prime I

Unit	Sistem Prime I
<i>Length</i>	L
<i>Mass</i>	$1/2\rho L^3$
<i>Inertia moment</i>	$1/2\rho L^5$
<i>Time</i>	L/U
<i>Reference area</i>	L^2
<i>Position</i>	L
<i>Angle</i>	I
<i>Linear velocity</i>	U
<i>Angular velocity</i>	U/L
<i>Linear acceleration</i>	U^2/L
<i>Angular acceleration</i>	U^2/L^2
<i>Force</i>	$1/2\rho U^2 L^2$
<i>Moment</i>	$1/2\rho U^2 L^3$

Sehingga persamaan model dinamika davidson schiff menjadi:

$$M' \dot{v} + N'(u_0)v = b' \delta'_R \quad (2.5)$$

dengan $v' = [v', r']^T$ dan penerapan transformasi yang diperoleh dengan menggunakan Sistem Prime I, maka diperoleh variabel non dimensional sebagai berikut: [3]

$$\begin{aligned} v &= Uv', & r &= \frac{U}{L}r', & \delta &= \delta'_R \\ x_G &= x'_G L, & m &= m' \frac{\rho}{2} L^3, & I_z &= I'_z \frac{\rho}{2} \end{aligned}$$

dengan

$$\begin{aligned} M' &= \begin{bmatrix} m' - Y'_v & m'x'_G - Y'_r \\ m'x'_G - N'_v & I'_z - N'_r \end{bmatrix} \\ N'(u_0) &= \begin{bmatrix} -Y'_v & m'u_0 - Y'_r \\ -N'_v & m'x'_G u_0 - N'_r \end{bmatrix} \\ b' &= \begin{bmatrix} Y'_\delta \\ N'_\delta \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Nilai non dimensional dinyatakan dengan tanda ($'$). Bentuk normalisasi yang digunakan untuk persamaan gerak kemudi kapal adalah Sistem Prime I dari SNAME tahun 1950.

Berikut dibawah ini persamaan turunan koefisien hidrodinamika kapal ditemukan oleh Clarke pada tahun 1928. Persamaan berikut adalah suatu rumusan empiris dari beberapa persamaan turunan koefisien hidrodinamika kapal oleh Wang dkk pada tahun 2007 [14]:

1. $\frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0,16 \frac{C_B B}{T} - 5,1(B/L)^2$
2. $\frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = 0,6(B/L) - 0,0033(B/L)^2$
3. $\frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} = 1,1(B/L) - 0,041(B/L)$

$$4. \frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} = 0,5 + 0,017 \frac{C_{BB}}{T} - 0,33(B/L)$$

$$5. \frac{-Y'_v}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0,4 \frac{C_{BB}}{T}$$

$$6. \frac{-Y'_r}{\pi(T/L)^2} = -0,5 + 2,2(B/L) - 0,08(B/L)$$

$$7. \frac{-N'_v}{\pi(T/L)^2} = 0,5 + 2,4(T/L)$$

$$8. \frac{-N'_r}{\pi(T/L)^2} = 0,25 + 0,039(B/L) - 0,56(B/L)$$

Sedangkan untuk gaya terhadap *rudder* dan turunan dari momen terhadap *rudder* adalah :

$$Y'_\delta = \rho \frac{\pi}{4} \frac{A_\delta}{LT}$$

$$N'_\delta = -\frac{1}{2} Y'_\delta$$

Y'_v , Y'_r , N'_v , N'_r , Y'_v , Y'_r , N'_v , N'_r merupakan koefisien dinamik dari model matematika kapal 2 derajat kebebasan Davidson-Schiff. Dimana kedelapan koefisien tersebut turunan gaya arah sway dan turunan momen yaw yang nantinya akan digunakan dalam proses perhitungan model dinamika kapal pada tugas akhir ini.

2.6 Model Kinematika Kapal

Model kinematika merepresentasikan gerak benda tanpa memperhitungkan penyebab terjadinya gerak benda tersebut. Sehingga yang menjadi pokok pembahasan di kinematika yaitu seperti posisi kecepatan, dan percepatan. Model kinematika gerak kapal terdiri dari dua yaitu kinematika translasi dan rotasi. Kinematik translasi pada model kapal dengan 2 derajat

kebebasan yaitu pergerakan kapal sepanjang sumbu-x (*surge*) dan sumbu-y (*sway*). Persamaan kinematika translasi diperoleh dengan merotasi kecepatan *surge* (u_0) dan kecepatan *sway* (v) berikut[15]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

sehingga persamaan kinematik translasi diperoleh:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0\cos\psi - v\sin\psi \\ u_0\sin\psi + v\cos\psi \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Selanjutnya, kinematika rotasi yang digunakan yaitu kecepatan *yaw* (r) sehingga diperoleh:

$$\dot{\psi} = r \quad (2.17)$$

Penggabungan persamaan kinematika translasi dan kinematika rotasi akan disajikan pada bab 4.

2.6 Estimasi Posisi Halangan Bergerak

Untuk mendeteksi tabrakan dari halangan dengan kapal, diperlukan estimasi posisi dan kecepatan hambatan pada setiap saat. Berikut persamaan estimasi yang digunakan [13]:

$$\begin{aligned} x_0(t) &= x_0 + (v(t) \pm \frac{1}{2} \times a \times t^2)\cos(\theta_0) \\ y_0(t) &= y_0 + (v(t) \pm \frac{1}{2} \times a \times t^2)\sin(\theta_0) \\ \theta_0(t) &= \theta_0 \end{aligned}$$

dimana

$v(t)$: kecepatan halangan pada waktu t

(x_0, y_0) : posisi awal halangan

a : percepatan atau perlambatan halangan

θ_0 : sudut hadap datangnya halangan

$(x_0(t), y_0(t))$: posisi halangan hasil prediksi pada waktu t

BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan bagaimana langkah-langkah dalam penyelesaian tugas akhir, berikut tahapan yang digunakan:

3.1 Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan studi literatur tentang metode Dubins dalam menghindari halangan dinamis dan model dinamika dan kinematika kapal, baik melalui buku-buku, jurnal, laporan tugas akhir/thesis terdahulu ataupun artikel dari internet yang dapat menunjang penelitian.

3.2 Pembentukan Model Matematika Gerak Kapal

Pada tahap ini, dilakukan pembentukan model matematika gerak kapal dengan menggunakan model dinamika kapal 2 derajat kebebasan Davidson Schiff (*sway* dan *yaw*) dan model kinematika kapal. Dengan Kapal yang digunakan adalah kapal Corvet kelas SIGMA. Model gerak kapal yang telah diperoleh akan digunakan untuk menentukan radius putar kapal yang berfungsi pada penentuan *thresholdvalue* di proses *turning circle*.

3.3 Perencanaan Lintasan Kapal dan Halangan

Pada tahap ini, lintasan ditentukan menggunakan metode Dubins. Lintasan Dubins yang digunakan adalah lintasan dengan tipe CLC. Perencanaan lintasan berawal dari lintasan Dubins kapal tanpa halangan. Selanjutnya halangan bergerak yang datang akan memotong lintasan Dubins kapal pada bagian lintasan yang lurus. Jika jarak kapal dengan halangan lebih kecil dari nilai batas aman maka didapatkan titik

tabrakan. Sehingga pada saat itu dilakukan perencanaan ulang lintasan kapal untuk menghindari halangan dinamis dengan aman. Pendekatan halangan yang berbeda akan menghasilkan perilaku kapal yang berbeda untuk menghindarinya. Karenanya akan dilakukan pendekatan dengan beberapa sudut tertentu untuk menghindari halangan. Perencanaan lintasan terdapat di gambar 3.2

3.4 Simulasi Lintasan dengan MATLAB

Pada tahap ini, model perencanaan lintasan yang telah dirancang dan analisa model gerak kapal yang telah didapat selanjutnya akan diimplementasikan pada perangkat lunak MATLAB dengan desain perhitungan model yang nantinya memudahkan kapal untuk mengatur lintasannya. Sehingga dapat diketahui bentuk lintasan yang mungkin akan dilalui oleh kapal dengan halangan bergerak. Pada simulasi yang akan dilakukan nantinya arah datang halangan menggunakan 6 sudut tertentu.

3.5 Analisis Hasil dan Pembahasan

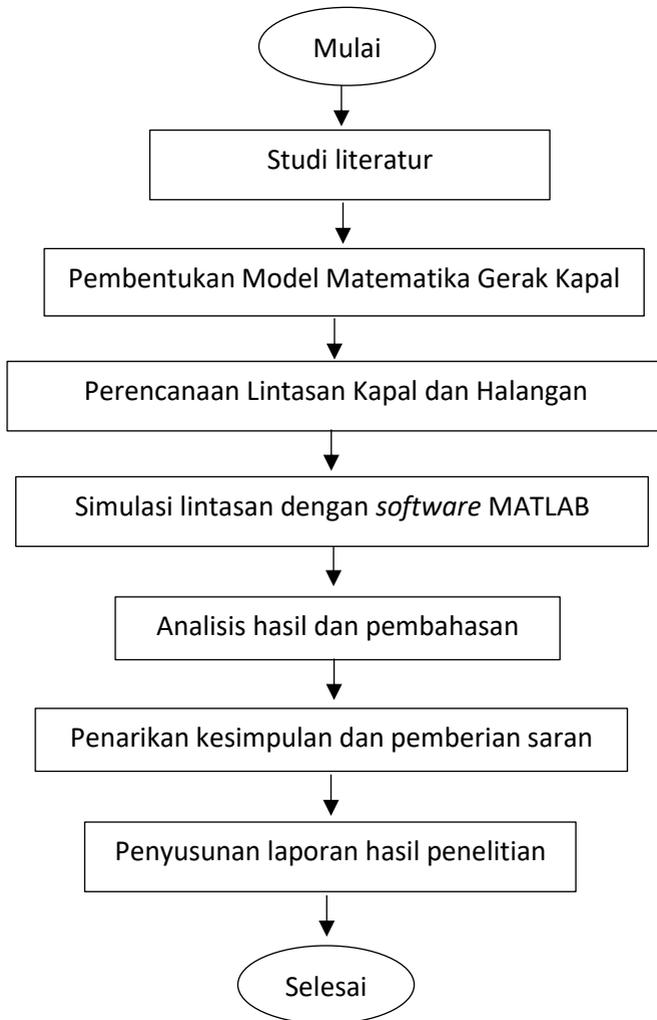
Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap hasil simulasi yang diberikan pada tahap sebelumnya.

3.6 Penarikan Kesimpulan Saran

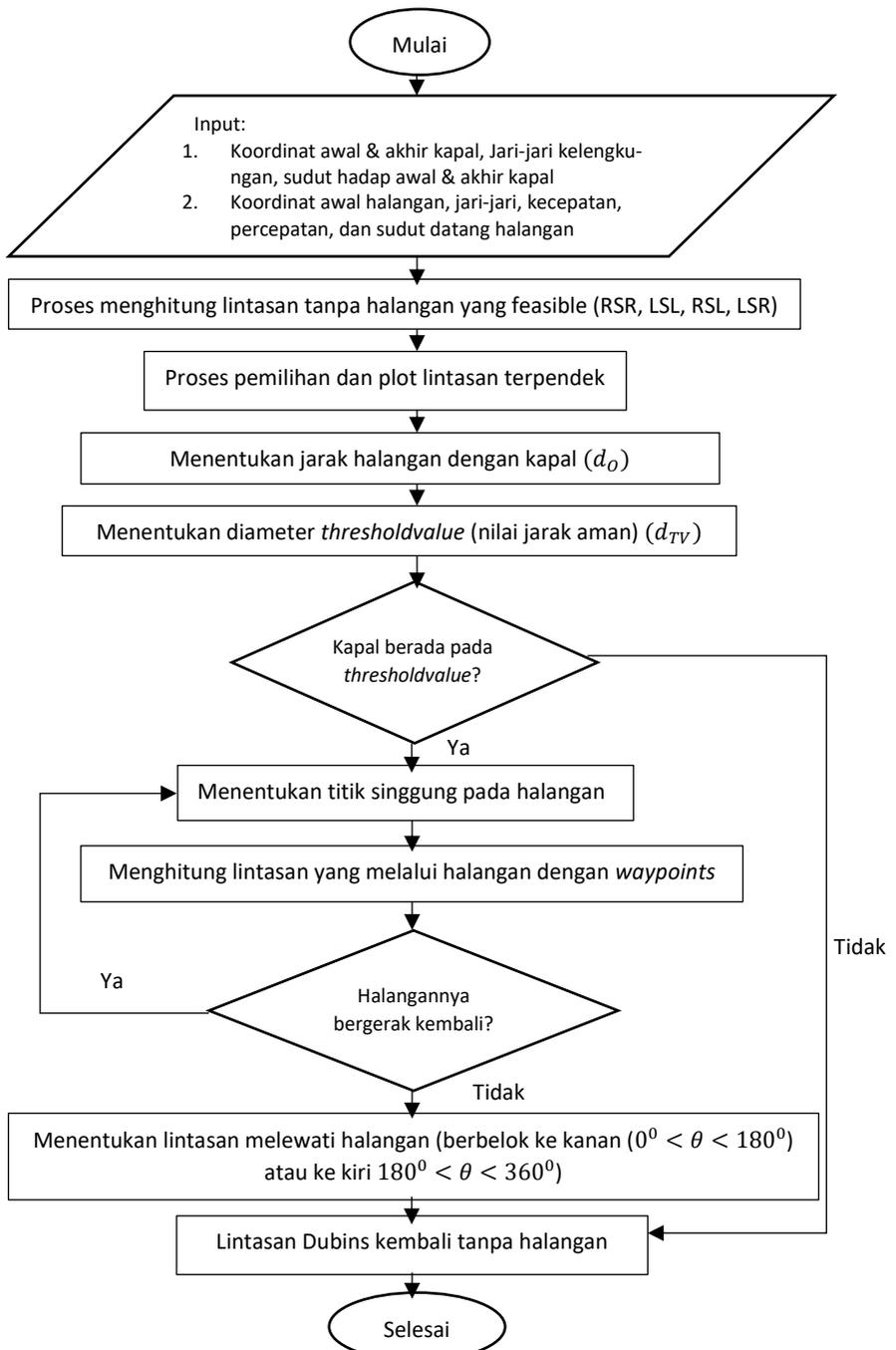
Pada tahap ini dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan hasil simulasi dan pembahasan pada tahap sebelumnya. Selanjutnya dari hasil beberapa kesimpulan tersebut diberikan saran untuk penelitian selanjutnya.

3.7 Penyusunan Laporan Hasil Penelitian

Pada tahap ini dilakukan penyusunan laporan berdasarkan hasil analisis dan penelitian.



Gambar 3.1: Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2: Diagram Alir Lintasan Dubins Halangan Dinamis

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dibahas mengenai penerapan metode Dubins pada perencanaan lintasan kapal untuk menghindari halangan dinamis. Pembahasan diawali pembentukan model matematika gerak kapal yang terdiri dari model dinamika dan model kinematika kapal, penggabungan kedua model tersebut dalam bentuk eror antara sudut haluan kapal dengan referensinya digunakan untuk menentukan radius putar kapal. Langkah selanjutnya yaitu menentukan lintasan kapal dengan perancangan lintasan Dubins untuk menghindari halangan dinamis dengan sudut tertentu. Kemudian langkah terakhir yaitu simulasi yang dilakukan menggunakan *software* MATLAB. Setelah itu dilakukan analisis dari hasil simulasi.

4.1 Pembentukan Model Matematika Gerak Kapal

Dalam Tugas Akhir ini, model matematika yang digunakan yaitu hasil dari penggabungan model dinamika dan kinematika kapal 2 derajat kebebasan Davidson - Schiff. Parameter - parameter yang digunakan untuk model adalah spesifikasi KRI Corvet Kelas SIGMA (*Ship Integrated Geometrical Modularity Approach*), yang merupakan kapal patroli dengan kemampuan untuk mengarungi samudera digunakan untuk misi patroli di Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE), misi anti kapal selam (ASW) dan untuk misi SAR (*search-and-rescue*). Tabel 4.1 berikut ini menunjukkan 10 data parameternya yang digunakan untuk proses pemodelan dalam tugas akhir ini [15].

Tabel 4.1: Data Parameter KRI Corvet Kelas SIGMA[15]

Nama	Simbol	Ukuran
Panjang Kapal	L	101,07 m
Lebar Kapal	B	14 m
Kedalaman Kapal	T	3,7 m
Massa Kapal	m	$2423 \times 10^3 kg$
Kecepatan Kapal	U	15,4 m/s
Koefisien Blok	C_B	0,65
Massa Jenis Air Laut	ρ	$1024 kg/m^3$
Pusat massa sumbu x	x_G	5,5 m
Luas Rudder	A_δ	$5,5 m^2$
Kisaran jari-jari	r	$0,156 \times L$

4.1.1 Model Dinamika Kapal 2 Derajat Kebebasan

Model dinamika merupakan model untuk merepresentasikan gerak kapal dengan memperhitungkan penyebab terjadinya gaya yang ada. Berdasarkan dari bab 2 telah diperoleh bentuk umum dari persamaan model dinamika kapal dengan 2 derajat kebebasan dengan pendekatan Davidson dan Schiff, sebagai berikut persamaannya

$$M' \dot{v} + N'(u'_0)v = b' \delta'_R \quad (4.1)$$

dengan

$$M' = \begin{bmatrix} m' - Y'_{\dot{v}} & m'x'_G - Y'_{\dot{r}} \\ m'x'_{G'} - N'_{\dot{v}} & I'_z - N'_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$N'(u'_0) = \begin{bmatrix} -Y'_v & m' - Y'_r \\ -N'_v & m'x'_{G'} - N'_r \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$b' = \begin{bmatrix} Y'_\delta \\ N'_\delta \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Dari parameter-parameter KRI Corvet Kelas SIGMA yang terdapat pada Tabel 4.1 akan didapatkan nilai koefisien hidrodinamika kapal yang diperoleh dari persamaan 2.6-2.13 pada bab 2. Nilai koefisien hidrodinamika kapal diperlukan untuk mendapatkan model dinamika kapal. Hasil dari koefisien hidrodinamika kapal sudah dalam bentuk non-dimensional.

a. Mendapatkan nilai koefisien $Y'_{\dot{v}}$ sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 -\frac{Y'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} &= 1 + 0,16\frac{C_B B}{T} - 5,1\left(\frac{B}{L}\right)^2 \\
 -\frac{Y'_{\dot{v}}}{3,14(3,7/101,07)^2} &= 1 + 0,16\frac{0,65(14)}{3,7} - 5,1\left(\frac{14}{101,07}\right)^2 \\
 -Y'_{\dot{v}} &= 0,0054522934 \\
 Y'_{\dot{v}} &= -0,00545 = -5,45 \times 10^{-3}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

b. Mendapatkan nilai koefisien $Y'_{\dot{r}}$ sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 -\frac{Y'_{\dot{r}}}{\pi(T/L)^2} &= 0,67(B/L) - 0,0033(B/L)^2 \\
 -\frac{Y'_{\dot{r}}}{3,14(3,7/101,07)^2} &= 0,67(14/101,07) - 0,0033(14/3,7)^2 \\
 -Y'_{\dot{r}} &= 0,00019182275950 \\
 Y'_{\dot{r}} &= -1,9182 \times 10^{-4}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

c. Mendapatkan nilai koefisien $N'_{\dot{v}}$ sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 -\frac{N'_{\dot{v}}}{\pi(T/L)^2} &= 1,1(B/L) - 0,041(B/T) \\
 -\frac{N'_{\dot{v}}}{3,14(3,7/101,07)^2} &= 1,1(14/101,07) - 0,041(14/3,7) \\
 -N'_{\dot{v}} &= -1,164342994111 \times 10^{-5} \\
 N'_{\dot{v}} &= 1,1643 \times 10^{-5}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

d. Mendapatkan nilai koefisien N'_r sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 -\frac{N'_r}{\pi(T/L)^2} &= \frac{1}{12} + 0,017 \frac{C_{BB}}{T} - 0,33 \left(\frac{B}{L}\right) \\
 -\frac{N'_r}{3,14(3,7/101,07)^2} &= \frac{1}{12} + 0,017 \frac{0,65(14)}{3,7} - 0,33 \left(\frac{14}{101,07}\right) \\
 -N'_r &= 3,344265 \times 10^{-4} \\
 N'_r &= -3,3443 \times 10^{-4}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

e. Mendapatkan nilai koefisien Y'_v sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 -\frac{Y'_v}{\pi(T/L)^2} &= 1 + 0,4 \frac{C_{BB}}{T} \\
 -\frac{Y'_v}{3,14(3,7/101,07)^2} &= 1 + 0,4 \frac{0,65(14)}{3,7} \\
 -Y'_v &= 0,0083522430 \\
 Y'_v &= -8,352 \times 10^{-3}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

f. Mendapatkan nilai koefisien Y'_r sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 -\frac{Y'_r}{\pi(T/L)^2} &= -1/2 + 2,2 \frac{B}{L} - 0,008(B/T) \\
 -\frac{Y'_r}{3,14(3,7/101,07)^2} &= -1/2 + 2,2 \frac{14}{101,07} - 0,08(14/3,7) \\
 -Y'_r &= -0,00211 \\
 Y'_r &= 2,11 \times 10^{-3}
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

g. Mendapatkan nilai koefisien N'_v sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 -\frac{N'_v}{\pi(T/L)^2} &= 1/2 + 2,4(T/L) \\
 -\frac{N'_v}{3,14(3,7/101,07)^2} &= 1/2 + 2,4(3,7/101,07) \\
 -N'_v &= 0,00247378500 \\
 N'_v &= -2,474 \times 10^{-3}
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

h. Mendapatkan nilai koefisien N'_r sebagai berikut

$$\begin{aligned}
-\frac{N'_r}{\pi(T/L)^2} &= 1/4 + 0,039(B/T) - 0,56(B/L) \\
-\frac{N'_r}{3,14(3,7/101,07)^2} &= 1/4 + 0,039(14/3,7) - 0,56(14/101,07) \\
-N'_r &= 0,0013464926 \\
N'_r &= -1,346 \times 10^{-3}
\end{aligned}
\tag{4.12}$$

i. Mendapatkan nilai koefisien Y'_δ sebagai berikut

$$\begin{aligned}
Y'_\delta &= \frac{1}{4} \rho \pi \left(\frac{A_\delta}{LT} \right) \\
Y'_\delta &= \frac{1}{4} (1024) \pi \left(\frac{5,7224}{(101,07)(3,7)} \right) \\
Y'_\delta &= 12,3067
\end{aligned}
\tag{4.13}$$

j. Mendapatkan nilai koefisien N'_δ sebagai berikut

$$\begin{aligned}
N'_\delta &= -0,5Y'_\delta \\
N'_\delta &= -0,5(12,3067) \\
N'_\delta &= -6,1534
\end{aligned}
\tag{4.14}$$

Hasil dari perhitungan koefisien hidrodinamika kapal diatas pada persamaan 4.5 sampai 4.14 ditunjukkan pada Tabel 4.2 berikut:

Tabel 4.2: Nilai Koefisien Hidrodinamika Kapal Corvet Kelas SIGMA

Koefisien-Y	Koefisien-N
$Y'_v = -5,45 \times 10^{-3}$	$N'_v = 1,16 \times 10^{-5}$
$Y'_r = -1,92 \times 10^{-4}$	$N'_r = -3,34 \times 10^{-4}$
$Y'_v = -8,35 \times 10^{-3}$	$N'_v = -2,47 \times 10^{-3}$
$Y'_r = 2,11 \times 10^{-3}$	$N'_r = -1,35 \times 10^{-3}$
$Y'_\delta = 12,3067$	$N'_\delta = -6,1534$

Kemudian dihitung besarnya nilai variabel non dimensional untuk massa dan pusat gravitasi.

Nilai m' diperoleh sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 m' &= \frac{2m}{\rho L^3} \\
 &= \frac{2(2,423 \times 10^6)}{(1024)(101,07)^3} \\
 &= 0,004586 \approx 4,6 \times 10^{-3}
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Nilai x'_G diperoleh sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 x'_G &= \frac{x_G}{L} \\
 &= \frac{5,25}{101,07} \\
 &= 0,0519 \approx 5,19 \times 10^{-2}
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Nilai I'_r diperoleh sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 I'_r &= \frac{mr^2}{0,5\rho L^5} \\
 &= \frac{m(0,156L)^2}{0,5\rho L^5} \\
 &= \frac{(2,423 \times 10^6)(0,156(101,07))^2}{0,5(1024)(101,07)^5} \\
 &= 0,000111549 \approx 1,1155 \times 10^{-4}
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

Nilai I'_z diperoleh sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 I'_z &= \frac{m(x_G)^2}{0,5\rho L^5} + I'_r \\
 &= \frac{(2,423 \times 10^6)(5,25)^2}{0,5(1024)(101,07)^5} + 1,1155 \times 10^{-4}
 \end{aligned}$$

$$= 0,00012392 \approx 1,2392 \times 10^{-4} \quad (4.18)$$

Berdasarkan pada hasil perhitungan koefisien hidrodinamika kapal yang disajikan pada Tabel 4.2, persamaan (4.15)-(4.18), dan nilai $u'_0 = 1$ digunakan untuk mencari koefisien matriks M', N', b' dinamika kapal, sebagai berikut,

$$M' = \begin{bmatrix} m' - Y'_v & m'x'_G - Y'_r \\ m'x'_G - N'_v & I'_z - N'_r \end{bmatrix}$$

dengan mensubstitusikan nilai $m' = 0,0046$, $x'_G = 0,0519$, dan $I'_z = 1,2392 \times 10^{-4}$ sehingga diperoleh nilai matrik M'

$$M' = \begin{bmatrix} 0,01000 & 0,00044 \\ 0,00023 & 0,00050 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya untuk mencari koefisien matriks N' dinamika kapal sebagai berikut,

$$N'(u'_0) = \begin{bmatrix} -Y'_v & m' - Y'_r \\ -N'_v & m'x'_G - N'_r \end{bmatrix}$$

dengan mensubstitusikan nilai $m', x'_G, Y'_v, Y'_r, N'_v$ dan N'_r diperoleh nilai matriks N'

$$N'(u'_0) = \begin{bmatrix} -0,0084 & 0,0025 \\ -0,0025 & 0,0016 \end{bmatrix}$$

Kemudian untuk menghitung koefisien matriks b' dinamika kapal, sebagai berikut,

$$b' = \begin{bmatrix} Y'_\delta \\ N'_\delta \end{bmatrix}$$

$$b' = \begin{bmatrix} 12,3068 \\ -6,1534 \end{bmatrix}$$

Sehingga model dinamika kapal Davidson Schiff yang sudah diubah kedalam bentuk nondimensional dapat ditulis sebagai berikut,

$$\begin{aligned} \dot{v} &= A_1 v + B_1 u \\ \dot{v} &= M'^{-1}(N'(u_0))v + M'^{-1}b'\delta'_R \end{aligned} \quad (4.19)$$

Dimana $A_1 = M'^{-1}(N'(u_0))$, dan $B_1 = M'^{-1}b'$. Namun B_1 diasumsikan bernilai $\begin{bmatrix} 0,1 \\ 1 \end{bmatrix}$ karena nilai Y'_δ dan N'_δ pada matriks b' terlalu besar dan tidak sesuai dengan spesifikasi kapal yang digunakan, $v = [v \ r]^T$, dan $u = \delta'_R$. Sehingga persamaan (4.19) menjadi berikut ini

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0,01000 & 0,00044 \\ 0,00023 & 0,00050 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -0,0084 & 0,0025 \\ -0,0025 & 0,0016 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0,1 \\ 1 \end{bmatrix} \delta'_R \end{aligned}$$

atau

$$\dot{v} = \begin{bmatrix} -0,61371 & -0,10180 \\ -5,09673 & -3,40862 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0,1 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (4.20)$$

4.1.2 Model Kinematika Kapal

Model kinematika merupakan model untuk merepresentasikan gerak benda tanpa memperhitungkan penyebab terjadinya gerak benda tersebut. Sehingga yang menjadi pokok pembahasan di kinematika yaitu seperti posisi kecepatan, dan percepatan.

Pada tugas akhir ini persamaan kinematika yang digunakan adalah persamaan kinematika untuk 2 derajat kebebasan yang terdiri dari kinematika translasi dan

kinematika rotasi. Gerak kinematika merupakan gerak kapal dengan menyesuaikan koordinat posisi.

Berdasarkan pada bab 2 telah didapatkan model kinematik translasi pada persamaan (2.16) sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 \cos \psi - v \sin \psi \\ u_0 \sin \psi + v \cos \psi \end{bmatrix}$$

Dan pada bab 2 juga telah didapatkan model kinematik rotasi pada persamaan (2.17) sebagai berikut:

$$\dot{\psi} = r$$

Dengan menggabungkan kinematika translasi (2.16) dan rotasi (2.17), maka diperoleh model persamaan kinematik kapal sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 \cos \psi - v \sin \psi \\ u_0 \sin \psi + v \cos \psi \\ r \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

dengan x adalah posisi kapal pada sumbu- x , y adalah posisi kapal sumbu- y , ψ adalah sudut haluan kapal, u_0 adalah kecepatan *surge*, v adalah kecepatan *sway*, dan r adalah kecepatan *yaw*. Tujuan dari pelacakan trayektori ini adalah sudut hadap kapal (ψ) bergerak menuju sudut hadap kapal yang diinginkan (ψ_d) yang diperoleh dari lintasan Dubins yang sudah ditentukan.

4.2 Perencanaan Lintasan Kapal dan Halangan

Pada Tugas Akhir ini perencanaan lintasan kapal menggunakan metode Dubins. *Path planning* adalah perencanaan lintasan yang akan dilalui oleh kapal dari posisi awal menuju target untuk mendapatkan lintasan yang optimal.

Lintasan optimal merupakan lintasan terpendek dan merupakan lintasan yang terbebas dari halangan. *Path planning* secara umum dapat ditulis sebagai berikut:

$$P_s(x_s, y_s, \psi_s) \rightarrow P_f(x_f, y_f, \psi_f)$$

Keterangan:

P_s : Posisi awal kapal

P_f : Posisi akhir akhir

x_s, x_f : Posisi awal dan akhir koordinat pada sumbu absis

y_s, y_f : Posisi awal dan akhir koordinat pada sumbu ordinat

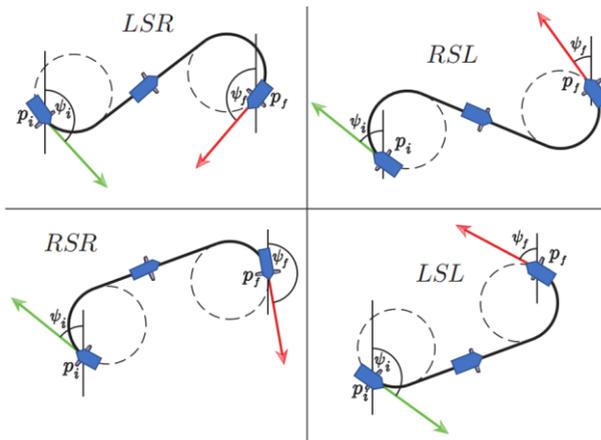
ψ_s, ψ_f : Sudut hadap awal dan akhir kapal

Perencanaan lintasan Dubins dibentuk dengan rangkaian dua busur lingkaran dengan garis singgung atau dengan tiga garis tangensial busur lingkaran. Dalam membangun model lintasan Dubins ada dua pendekatan yaitu dengan geometri analitik dan differential geometri. Pada pendekatan geometri analitik lebih di fokuskan untuk bentuk lintasan CLC, sedangkan differensial geometri menggunakan CCC. Namun yang akan digunakan pada tugas akhir ini hanya bentuk lintasan CLC, dengan C adalah lingkaran dan L adalah segmen garis. Berdasarkan arah putarnya, Dubins geometri memiliki empat bentuk lintasan yaitu RSR, LSL, RSL, dengan LSR. Dengan R adalah *right* yang artinya kapal berbelok ke arah kanan dan L adalah *left* yang artinya kapal berbelok ke arah kiri dan S adalah segmen garis lurus.

4.2.1 Lintasan Dubins Tanpa Halangan

Lintasan Dubins tanpa halangan adalah lintasan terpendek yang menghubungkan dua titik dan telah dijelaskan pada bab 2. Lintasan ini memiliki empat jenis lintasan (*feasible*) yaitu, lintasan RSR (*Right-Straight-Right*), lintasan RSL (*Right-Straight-Left*), lintasan LSR (*Left-Straight-Right*), dan lintasan LSL (*Left-Straight-Left*). Dari keempat lintasan

tersebut dihitung dan dipilih lintasan yang terpendek untuk diplot di kurva. Penandaan gerakan awal dan akhir dapat ditentukan dengan menggambarkan masing-masing putaran ke arah kanan atau kiri. Dengan memperhatikan masing-masing posisi, perputaran positif atau negatif akan didefinisikan dengan garis lengkung masing-masing gerakan. Langkah-langkah pengerjaannya dari keempat lintasan telah dijelaskan pada bab 2.



Gambar 4.2:Empat Jenis Lintasan Dubins Tanpa Halangan

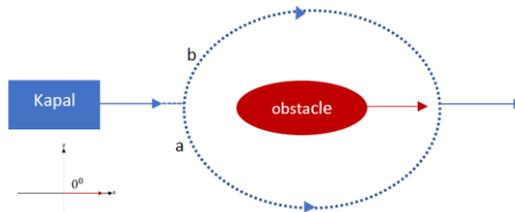
4.2.2 Lintasan Dubins dengan Halangan Dinamis

Kapal yang sedang berlayar selain dihadapkan dengan halangan statis, permasalahan lain yaitu saat menghindari halangan dinamis. Proses penghindaran halangan dinamis sedikit lebih kompleks dibandingkan halangan statis. Karena pendekatan halangan dinamis dari arah sudut yang berbeda menyebabkan perilaku kapal yang berbeda pula untuk menghindari halangan tersebut. Oleh karenanya dibutuhkan keputusan terbaik untuk melalui lintasan yang paling aman untuk sampai ke titik target.

4.2.2.1 Pendekatan Halangan dari Sudut Tertentu

Pendekatan halangan dinamis berbeda dengan halangan statis. Jika kapal menghindari halangan statis kapal bebas mengambil arah sesuai searah ataupun berlawanan jarum jam. Namun jika menghindari halangan dinamis kapal harus bisa menentukan arah yang tepat dan aman. Oleh karenanya akan dibuat beberapa pendekatan dari sudut tertentu. Sudut datang halangan diukur atau didasarkan pada sumbu- x bumi. Dan pada semua pendekatan tersebut arah kapal diasumsikan tetap menghadap ke arah sumbu- x positif.

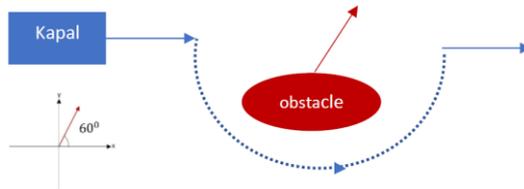
1. Pendekatan dari sudut 0^0



Gambar 4.3: Pendekatan Halangan Dari Sudut 0^0

Pada keadaan seperti diatas, halangan berada di depan kapal dan memiliki arah yang sama. Kapal dan halangan sama-sama bergerak dari sudut 0^0 terhadap sumbu x bumi. Jika kecepatan kapal lebih besar dari halangan maka kapal harus mendahuluinya agar tidak terjadi tabrakan. Arah lintasan kapal yang dipilih bisa searah arah jarum jam (lintasan b) atau juga bisa berlawanan arah jarum jam (lintasan a) karena sama-sama aman. Setelah bisa melewati halangan maka kapal kembali pada lintasan yang seharusnya.

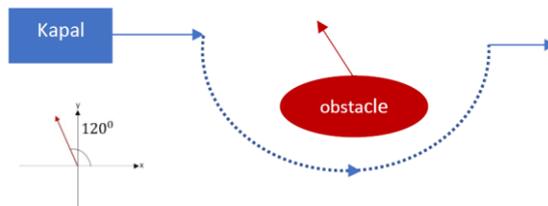
2. Pendekatan dari sudut 60°



Gambar 4.4: Pendekatan Halangan Dari Sudut 60°

Pada keadaan seperti diatas, kapal bergerak dengan sudut 0° terhadap sumbu- x bumi dan halangan datang dari sudut 60° terhadap sumbu- x bumi, maka kapal harus berbelok ke kanan (berlawanan arah jarum jam). Karena jika tetap berjalan lurus atau berbelok ke kiri maka akan terjadi tabrakan. Setelah bisa melewati halangan maka kapal kembali pada lintasan yang seharusnya.

3. Pendekatan dari sudut 120°

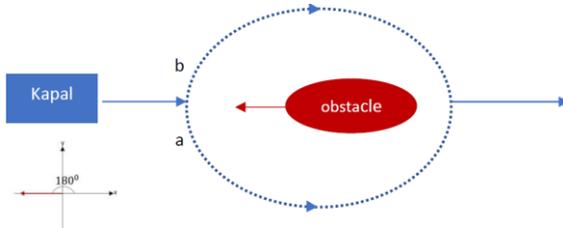


Gambar 4.5: Pendekatan Halangan Dari Sudut 120°

Pada keadaan seperti diatas, kapal bergerak dengan sudut 0° terhadap sumbu- x bumi dan halangan bergerak dari sudut 120° terhadap sumbu x bumi maka kapal harus berbelok ke kanan (berlawanan arah jarum jam). Karena jika tetap berjalan lurus atau berbelok ke kiri maka akan

terjadi tabrakan. Setelah bisa melewati halangan maka kapal kembali pada lintasan yang seharusnya.

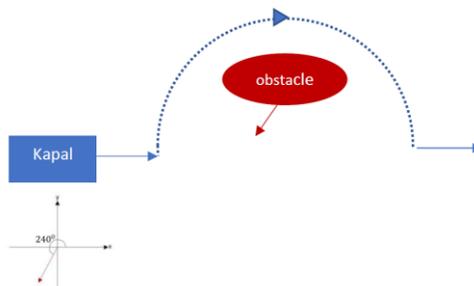
4. Pendekatan dari sudut 180°



Gambar 4.6: Pendekatan Halangan Dari Sudut 180°

Halangan bergerak di depan kapal dan memiliki arah yang berlawanan atau saling berhadapan. Kapal bergerak dengan sudut 0° dan halangan bergerak dari sudut 180° terhadap sumbu x bumi. Pada kondisi seperti resiko tabrakan akan lebih besar daripada dari sudut yang lain. Arah yang dipilih bisa searah arah jarum jam (lintasan b) atau juga bisa berlawanan arah jarum jam (lintasan a) karena sama-sama aman. Setelah bisa melewati halangan maka kapal kembali pada lintasan yang seharusnya.

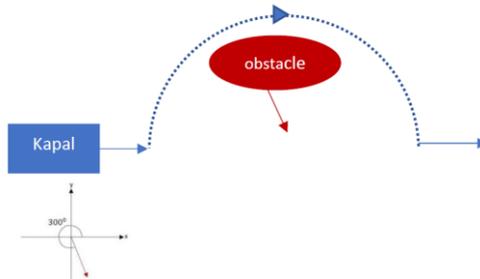
5. Pendekatan dari sudut 240°



Gambar 4.7: Pendekatan halangan dari sudut 240°

Pada keadaan seperti diatas, kapal bergerak dengan sudut 0^0 terhadap sumbu- x bumi dan kapal mendeteksi datangnya halangan bergerak dari sudut 120^0 terhadap sumbu x bumi, maka kapal harus berbelok ke kiri (searah arah jarum jam). Karena jika tetap berjalan lurus atau berbelok ke kanan maka akan terjadi tabrakan. Setelah bisa melewati halangan maka kapal kembali pada lintasan yang seharusnya.

6. Pendekatan dari sudut 300^0



Gambar 4.8: Pendekatan Halangan Dari Sudut 300^0

Pada keadaan seperti diatas, kapal bergerak dengan sudut 0^0 terhadap sumbu- x bumi dan kapal mendeteksi datangnya halangan bergerak dari sudut 300^0 terhadap sumbu x bumi maka kapal harus berbelok ke kiri (searah arah jarum jam). Karena jika tetap berjalan lurus atau berbelok ke kanan maka akan terjadi tabrakan. Setelah bisa melewati halangan maka kapal kembali pada lintasan yang seharusnya.

4.2.2.2 Algoritma Lintasan Dubins Dengan Halangan Dinamis

a) Inisialisasi input posisi kapal

Posisi kapal diperoleh dari lintasan Dubins tanpa halangan.

Data input yang digunakan adalah koordinat posisi awal (x_s, y_s) dan koordinat posisi akhir kapal (x_f, y_f) , jari-jari lingkaran/ kelengkungan awal (ρ_s) dan akhir (ρ_f) , sudut hadap kapal awal (ψ_s) dan akhir (ψ_f) .

- b) Kapal bergerak dengan kecepatan *surge* konstan
 $(u_o = \text{constan})$
- c) Proses perhitungan dan pemilihan lintasan optimal/ terpendek tanpa halangan diantara lintasan RSR, RSL,LSR, dan LSL. Dan lintasan diplot ke kurva.
- d) Menentukan posisi halangan. Halangan diasumsikan gerak lurus berubah beraturan sehingga mempunyai percepatan atau perlambatan. Yang pertama menentukan nilai jarak antara kapal dengan halangan (d_o) . (d_o) didapat dari

$$d_o(t) = ||R(t) - O(t)||_2 \quad (4.22)$$

Dan $R(t)$ didapat dari lintasan Dubins kapal, serta $O(t)$ didapat dari

$$O(t) = \begin{bmatrix} x_0(t) \\ y_0(t) \\ \theta_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + (v_0(t) \pm \frac{1}{2} \times a \times t^2) \cos(\theta_0) \\ y_0 + (v_0(t) \pm \frac{1}{2} \times a \times t^2) \sin(\theta_0) \\ \theta_0 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

dimana:

$O(t)$: vektor posisi halangan pada waktu ke t

$x_0(t)$: posisi halangan pada sumbu- x pada waktu t

$y_0(t)$: posisi halangan pada sumbu- y pada waktu t

$v_0(t)$: kecepatan halangan pada waktu t

a : percepatan atau perlambatan halangan

v_0 : kecepatan awal halangan

θ_0 : sudut antara hadap halangan dengan sumbu x

x_0 : posisi awal halangan pada sumbu- x

y_0 : posisi awal halangan pada sumbu- y

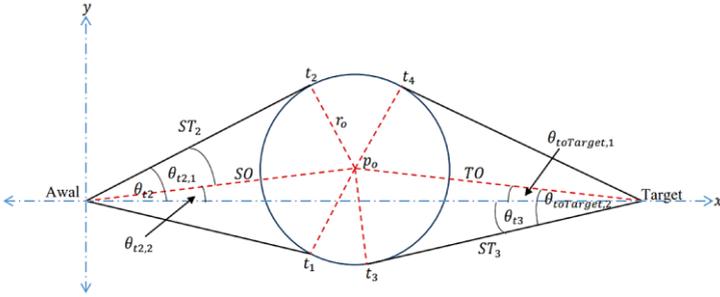
- $R(t)$: vektor posisi kapal pada waktu t
- e) Menentukan nilai *threshold value* (d_{TV}). Nilai *threshold value* didapatkan dari proses *turningcircle* atau radius putar kapal. Untuk menentukan radius putar kapal menggunakan model gabungan dinamika dan kinematika kapal yang telah diperoleh.
- f) Dilakukan pengecekan apakah terjadi tabrakan atau tidak dengan pertidaksamaan $d_O(t) \leq d_{TV}$.
 d_O : jarak antara halangan dengan kapal
 d_{TV} : nilai jarak aman yang telah didapat.
 halangan dinamis diasumsikan sebagai halangan statis saat jarak antara halangan dengan kapal lebih kecil dari jarak aman (*threshold value*). Dengan keadaan seperti itu dapat dihitung waypointnya (titik-titik singgung pada halangan).
- g) Jika pertidaksamaan pada langkah (f) terpenuhi, maka posisi pertama ketika pertidaksamaan tersebut diperoleh akan dianggap sebagai posisi tabrakan pertama ($t_{tabrakan\ pertama}$).
- h) Perhitungan waypoints (titik-titik singgung pada halangan) sama seperti dengan melewati halangan statis. Pada halangan dinamis, perhitungannya diulangi karena *waypoints* baru dibuat kembali ketika halangannya bergerak. Terdapat tiga ketentuan untuk kapal dalam pemilihan jalur *waypoint* agar dapat menghindari kapal dengan aman diantaranya yaitu:
1. Saat halangan datang dari sudut antara 0^0 sampai 180^0 terhadap sumbu bumi maka kapal berbelok ke kanan (berlawanan arah jarum jam).
 2. Saat halangan datang dari sudut antara 180^0 sampai 360^0 terhadap sumbu bumi maka kapal berbelok ke kiri (searah arah jarum jam).

3. Saat halangan datang dari sudut 0^0 terhadap sumbu bumi (posisi kapal berada di belakang halangan yang akan mendahuluinya) dan dari sudut 180^0 terhadap sumbu bumi (posisi kapal dan halangan saling mendekati dan berhadapan) maka kapal bisa berbelok ke kiri (searah arah jarum jam) atau bisa ke kanan (berlawanan arah jarum jam).
- i) Setelah berhasil melewati halangan, kapal kembali ke lintasan Dubins tanpa halangan hingga sampai titik target.

4.2.2.3 Perhitungan Titik-Titik di Sekitar Halangan

Dalam algoritma, halangan dinamis diasumsikan sebagai halangan statis saat jarak antara halangan dengan kapal lebih kecil dari jarak aman (*threshold value*) agar bisa dihitung waypointnya (titik-titik singgung pada halangan). Oleh karena itu perlu dilakukan perhitungan waypoint.

Lintasan Dubins dari posisi awal (p_{start}) di sekitar satu halangan statis dengan pusat (p_0) dan jari-jari (r_0) menuju posisi target (p_{target}) diberikan pada Gambar 4.11. Lintasan searah jarum jam didefinisikan sebagai lintasan dari (p_{start}) $\rightarrow t_2 \rightarrow t_4 \rightarrow p_{target}$. Dan lintasan berlawanan arah jarum jam didefinisikan sebagai lintasan (p_{start}) $\rightarrow t_1 \rightarrow t_3 \rightarrow p_{target}$. Titik t_1, t_2, t_3, t_4 dan segmen busur lingkaran pada halangan dari t_1 ke t_3 dan t_2 ke t_4 perlu dicari agar kapal bisa melewati halangan [14].



Gambar 4.9: Lintasan Dubins Satu Halangan

Langkah-langkah untuk mendapatkan titik-titik t_1, t_2, t_3, t_4 diberikan sebagai berikut:

1. Mendapatkan titik t_2

Vektor dari p_{start} ke p_0 didefinisikan dengan vektor SO dan dari p_0 ke t_2 didefinisikan dengan vektor ST_2 dengan Panjang masing-masing adalah d_{SO} dan d_{ST_2} .

$$SO := p_0 - p_{start}$$

Panjang d_{SO} dihitung menggunakan norm euclidean antara p_0 dan p_{start} , setelah diperoleh d_{SO} dan d_{ST_2} dapat dihitung menggunakan rumus pythagoras.

$$d_{SO} = \|p_0 - p_{start}\|_2$$

$$d_{ST_2} = \sqrt{d_{SO}^2 - r_0^2}$$

Sudut antara SO dan ST_2 dinyatakan dengan $\theta_{t2,1}$ dan sudut antara SO dan bidang xy dinyatakan dengan $\theta_{t2,2}$.

Panjang r_0 dan d_{SO} digunakan untuk mendapatkan $\theta_{t2,1}$ sehingga diperoleh :

$$\theta_{t2,1} = \text{asin} \left(\frac{r_0}{d_{SO}} \right)$$

$$\theta_{t2,2} = \text{atan2} (SO_y, SO_x)$$

Kemudian sudut antara bidang-xy dan vektor ST_2 dinyatakan sebagai θ_{t2} dan diperoleh dari

$$\theta_{t2} = \theta_{t2,1} + \theta_{t2,2}$$

Diberikan matriks rotasi dua dimensi berikut:

$$R(\theta) := \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Kemudian titik t_2 diperoleh menggunakan rumus berikut:

$$t_2 = R(\theta_{t_2}) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} d_{SO} + p_{start}$$

2. Mendapatkan titik t_1

Titik t_1 diperoleh menggunakan cara yang sama dengan t_2 . Perbedaannya mengubah arah rotasi berikut:

$$\theta_{t_1} = \theta_{t_2,2} + \theta_{t_2,1}$$

Kemudian titik t_1 diperoleh menggunakan rumus berikut:

$$t_1 = R(\theta_{t_1}) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} d_{SO} + p_{start}$$

3. Mendapatkan titik t_3

Vektor dari posisi target ke posisi halangan dinyatakan dengan TO dan diperoleh menggunakan rumus berikut

$$TO := p_0 - p_{target}$$

Selanjutnya dihitung panjang vektor TO menggunakan rumus:

$$d_{TO} = \|p_0 - p_{target}\|$$

Kemudian dihitung Panjang dari vektor ST_3 yang merupakan vektor dari target ke titik t_3 menggunakan rumus pythagoras

$$d_{ST_3} = \sqrt{d_{TO}^2 - r_0^2}$$

Sudut antara vektor TO dan ST_3 dinyatakan dengan $\theta_{t_0Target,2}$ dan diperoleh dengan cara berikut

$$\theta_{t_0Target,2} = \arcsin\left(\frac{r_0}{d_{TO}}\right)$$

Sudut antara vektor TO dengan bidang-xy dinyatakan dengan $\theta_{t_0Target,1}$ dan diperoleh dengan cara berikut

$$\theta_{t_0Target,1} = \text{atan2}(TO_y, TO_x)$$

Kemudian sudut antara bidang-xy dan vektor ST_3 dinyatakan sebagai θ_{t_3} dan diperoleh dari

$$\theta_{t_3} = \theta_{t_0Target,1} + \theta_{t_0Trget,2}$$

Dan titik t_3 diperoleh menggunakan rumus berikut:

$$t_3 = R(\theta_{t_3}) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} d_{TO} + p_{target}$$

4. Mendapatkan titik t_4

Sudut antara bidang-xy dengan vektor ST_4 dinyatakan sebagai berikut:

$$\theta_{t_4} = \theta_{t_0Target,1} + \theta_{t_0Target,2}$$

Kemudian titik t_4 diperoleh menggunakan rumus berikut:

$$t_4 = R(\theta_{t_4}) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} d_{TO} + p_{target}$$

4.2.2.4 Penentuan Nilai *Threshold Value* (Jarak Aman)

Nilai *threshold value* didapatkan dari proses *turning test*. Gerak *turning circle* telah diatur oleh IMO (*International Maritime Organization*). Mekanisme gerak *turning circle* pada kapal dimulai dengan memberi masukan besarnya sudut *turning circle*, memberi masukan kendali rudder sebesar N derajat, kemudian heading kapal berubah sampai membentuk lintasan melingkar dengan sudut rudder konstan [21].

Agar kapal bergerak dengan arah yang sesuai berdasarkan perintah yang diinginkan maka dibutuhkan rudder. Salah satu rudder yang digunakan pada kapal perang kelas SIGMA adalah rudder dengan jenis Van Amorengen, yaitu sudut rudder konstan pada kapal sebesar $|\delta_R| \leq 35 \text{ deg}$, serta perubahan sudut rudder sebesar $|\Delta\delta_R| \leq 5 \text{ deg/s}$, yang artinya jika kapal berbelok maksimal 35^0 maka kecepatannya maksimal 5 deg/s . Kemudian kecepatan sudut yaw pada kapal yaitu $|r| \leq 0,0932 \text{ rad/s}$. Sehingga matriks kendala yang digunakan didefinisikan sebagai berikut:

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0,0932 \text{ rad/s} \\ 0,0932 \text{ rad/s} \end{bmatrix}$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} 35 \text{ rad} \\ 35 \text{ rad} \end{bmatrix}$$

$$V_1 = \begin{bmatrix} 5 \text{ deg/s} \\ 5 \text{ deg/s} \end{bmatrix}$$

Proses *turningcircle* atau radius putar kapal menggunakan hasil dari model matematika dinamika dan kinematika kapal yang telah diperoleh.

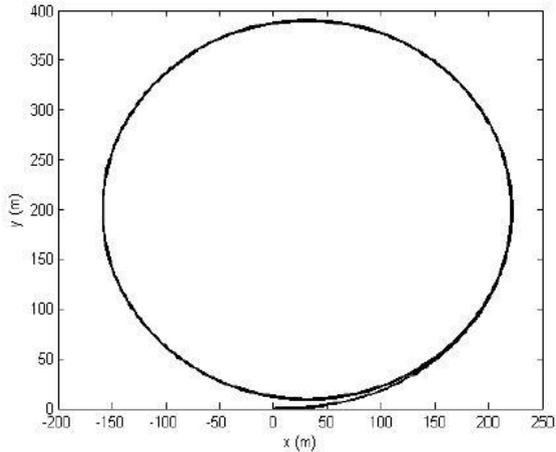
Model dinamika kapal 2 derajat kebebasan:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,01000 & 0,00044 \\ 0,00023 & 0,00050 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -0,0084 & 0,0025 \\ -0,0025 & 0,0016 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,1 \\ 1 \end{bmatrix} \delta_R$$

Model kinematika kapal 2 derajat kebebasan:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 \cos \psi - v \sin \psi \\ u_0 \sin \psi + v \cos \psi \\ r \end{bmatrix}$$

Hasil *turning test* kapal ditunjukkan pada Gambar 4.10. Berdasarkan Gambar 4.10, diperoleh nilai *transfer* adalah 172 meter dan nilai *advance* adalah 200 meter. Karena pada bab 2 telah diasumsikan bahwa nilai *threshold value* sama dengan nilai *advance* [15]. Dimana *advance* merupakan jarak yang dilalui oleh kapal dari posisi saat kapal mulai berbelok menuju posisi saat kapal mencapai sudut haluan 90^0 terhadap sumbu x positif untuk pertama kali sehingga kapal masih memenuhi kriteria untuk melakukan manuver dan tidak menabrak tabrakan. Dengan begitu kapal mempunyai radius putar minimal 200 m dan diperoleh nilai *threshold value* sebesar 200 meter.



Gambar 4.10: Hasil *Turning Circle*

4.3. Simulasi Penerapan Metode Dubins pada kapal dengan Halangan Dinamis

Pada sub bab ini diberikan beberapa simulasi kasus dari perencanaan lintasan kapal untuk menghindari halangan dinamis menggunakan Dubins. Pendekatan yang digunakan yaitu arah datangnya halangan dinamis dalam beberapa sudut tertentu yaitu sudut 0° , 60° , 120° , 180° , 240° , dan 300° .

Pada simulasi ini, akan dicari terlebih dahulu lintasan awal kapal tanpa halangan untuk menentukan posisi awal dan akhir kapal. Posisi awal dan akhir kapal diberikan pada Tabel 4.3. Dari posisi awal ke posisi akhir dihitung 4 lintasan feasible (RSR, RSL, LSR, LSL). Setelah didapatkan nilai Panjang dari keempat lintasan tersebut kemudian dipilih lintasan terpendek diantara 4 lintasan tersebut. Lalu kapal bergerak sesuai dengan parameter input dan jenis lintasan yang terpilih (terpendek). Diberikan suatu kondisi yaitu terdapat halangan dinamis dari

sudut tertentu. Halangan diasumsikan memiliki percepatan atau perlambatan dalam gerakannya sehingga memiliki gerak lurus berubah beraturan. Dan jari-jari halangan didefinisikan sebesar 100 meter karena rata-rata kapal perang corvet memiliki panjang antara 75meter-113meter. Sedangkan kapal bergerak dengan kecepatan *surge* konstan 15,4 m/s. Setelah itu kapal mengestimasi kapan terjadi tabrakan untuk menentukan arah belokan dalam menghindari halangan.

Tabel 4.3: Tabel Posisi Awal dan Akhir Kapal

Simulasi	Posisi Awal (P_s) (x_s, y_s, ψ_s, ρ_s)	Posisi Akhir (P_f) (x_f, y_f, ψ_f, ρ_f)
1.	(100,500, 180 ⁰ ,200)	(20000,500, 180 ⁰ ,200)
2.	(100,100, 240 ⁰ ,200)	(13500,100, 150 ⁰ ,200)
3.	(100,70, 180 ⁰ ,200)	(10500,100,180 ⁰ ,200)
4.	(150,-4000, 150 ⁰ ,200)	(8000,3000, 120 ⁰ ,200)
5.	(100,2500, 270 ⁰ ,200)	(8000,-3000, 280 ⁰ ,200)
6.	(100,100, 270 ⁰ ,200)	(10500,100, 90 ⁰ ,200)

Dalam metode Dubins, total lintasan kapal dari titik awal hingga mencapai titik akhir terdapat beberapa kriteria gerak kapal, diantaranya:

- a. Lintasan terpendek yang digunakan pada metode Dubins merupakan lintasan yang dihitung untuk menghubungkan dua titik dari posisi awal sampai posisi akhir kapal.
- b. Lintasan awal dari pergerakan kapal dari posisi awal mengikuti pada sudut hadap awal kapal (ψ_s). Ketika kapal telah sampai pada titik tangent exit, kapal melanjutkan lintasannya dengan garis lurus. Dan saat sampai pada titik

tangent entry, kapal bergerak mengikuti sudut hadap akhir (ψ_f) hingga pada posisi akhir.

- c. Pada proses *turning circle* menjelaskan bahwa kapal mempunyai radius putar minimal 200 m sehingga untuk parameter input kapal nilai jari-jari kelengkungan awal ρ_s dan jari-jari kelengkungan akhir ρ_f bernilai 200 meter.

4.3.1 Simulasi Pertama

Pada percobaan pertama menginputkan parameter sebagai berikut:

Rute lintasan kapal dalam bidang kartesius:

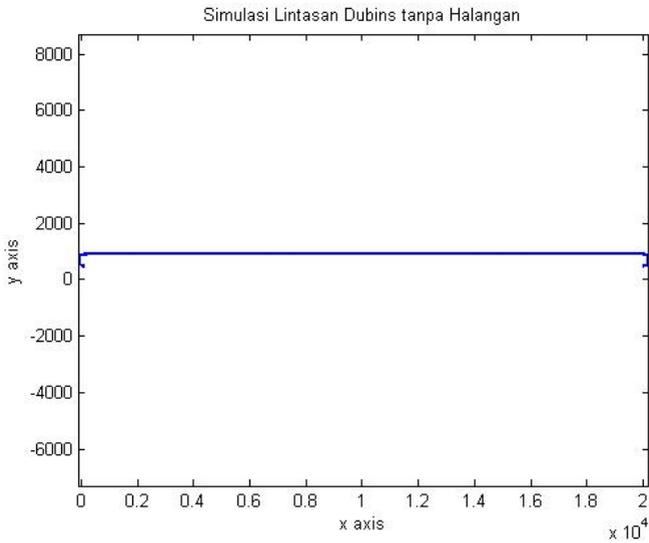
$$P = [x \quad y \quad \psi \quad \rho]$$

$$P_{start} = [100 \quad 500 \quad 180^0 \quad 200]$$

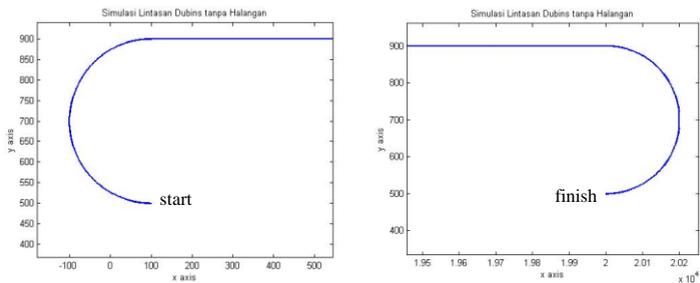
$$P_{finish} = [20000 \quad 500 \quad 180^0 \quad 200]$$

Dengan parameter input posisi awal dan akhir kapal seperti diatas akan dihitung panjang lintasan RSR, RSL, LSR, dan LSL. Selanjutnya dipilih lintasan yang optimal atau lintasan terpendek diantara keempat lintasan tersebut untuk diplot ke kurva lintasan Dubins tanpa halangan.

Setelah dilakukan perhitungan didapatkan panjang lintasan seperti berikut: Panjang lintasan RSR sepanjang 21157 meter, Panjang lintasan RSL sepanjang 21173 meter, Panjang lintasan LSR sepanjang 22413 meter, Panjang lintasan LSL sepanjang 21167 meter. Karena Panjang lintasan terpendek adalah lintasan RSR maka lintasan yang akan ditempuh adalah lintasan RSR dengan hasil plot kurva sebagai berikut:



Gambar 4.11: Lintasan RSR Tanpa Halangan



Gambar 4.12: Perbesaran Lintasan RSR pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan)

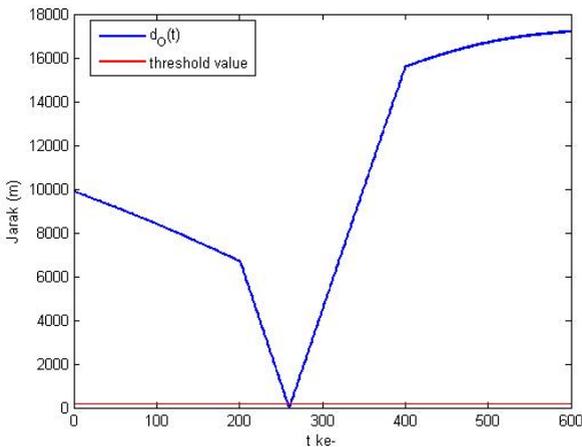
Kemudian diberikan input parameter untuk halangan dinamis sebagai berikut:

Posisi awal halangan dinamis pada bidang kartesius:

$$P_O = [x_0 \quad y_0]$$

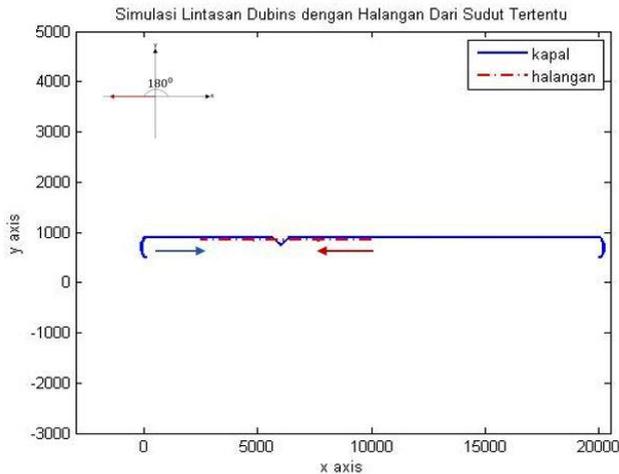
$$P_O = [10000 \quad 850]$$

Dengan kecepatan awal sebesar ($v_0 = 18 \text{ m/s}$) mengalami perlambatan sebesar ($a = -0,02 \text{ m/s}^2$) dan sudut hadap halangan sebesar ($\theta_0 = 180^0$) terhadap sumbu- x positif. Dan dengan jari-jari halangan sebesar 100 meter. Setelah itu dilakukan pengecekan apakah terjadi tabrakan atau tidak dengan menghitung jarak antara kapal dengan halangan, dan diperoleh hasil pada Gambar 4.13.



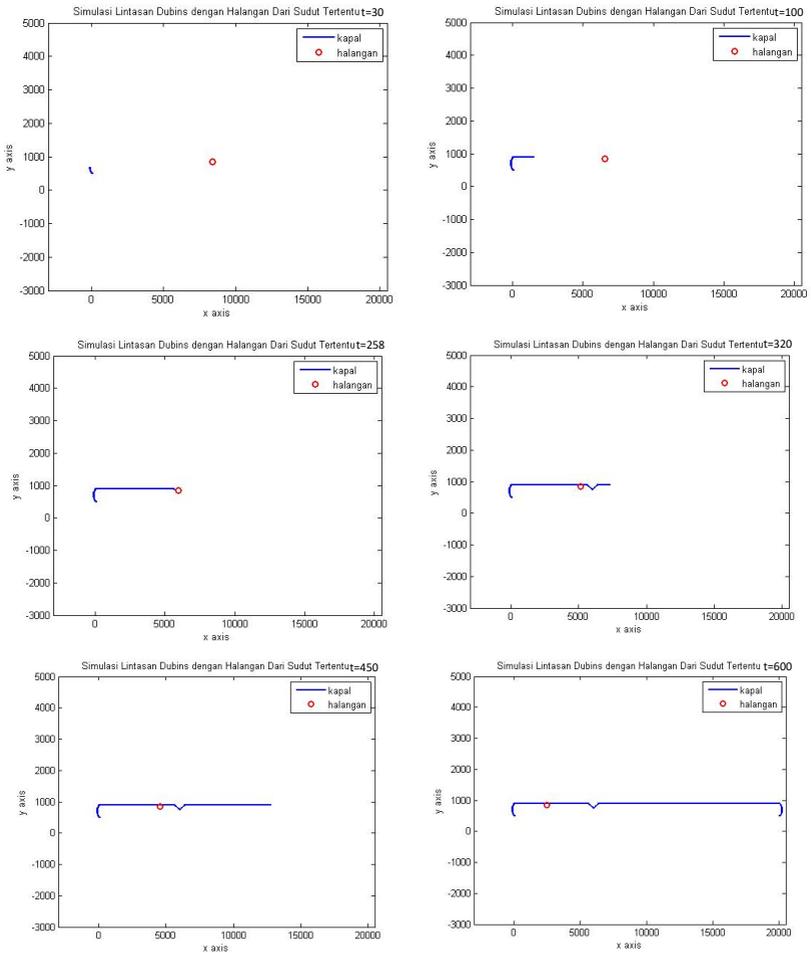
Gambar 4.13: Grafik Jarak Antara Kapal Dengan Halangan ($d_o(t)$) Dan Jarak Aman (*Threshold Value*)

Berdasarkan Gambar 4.14 diperoleh bahwa jarak antara kapal dengan halangan kurang dari *threshold value* sehingga didapatkan posisi tabrakan pertama yang terjadi pada posisi titik ke $t=258,3$. Karena terjadi tabrakan maka dilakukan perencanaan lintasan ulang untuk menghindari halangan tersebut. Hasil lintasan total diberikan pada Gambar 4.14. dan penjabaran lintasan berdasarkan titik posisi dan waktu diberikan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.14: Gambar lintasan total RSR penghindaran halangan dari sudut 180^0

Pada Gambar 4.14 terlihat bahwa halangan bergerak dari depan kapal dan memiliki arah yang berlawanan serta saling berhadapan dengan kapal. Sehingga kapal dan halangan bergerak saling mendekati satu sama lain. Kapal awalnya berbelok ke arah kanan karena menyesuaikan sudut hadap awal kapal (ψ_s) dan jari-jari kelengkungan awal (ρ_s) hingga pada titik tangent exit kemudian lintasannya lurus. Kemudian berbelok ke kanan atau berlawanan arah jarum jam (sesuai dengan algoritma) untuk menghindari halangan, kemudian kembali ke posisi lintasan yang lurus hingga pada titik tangent entry dan akhirnya kapal berbelok ke kanan kembali dengan menyesuaikan sudut hadap akhir (ψ_f) dan jari-jari kelengkungan akhir (ρ_f) hingga pada posisi akhir. Berikut ini gambar lintasan yang lebih detail.



Gambar 4.15: Simulasi lintasan Dubins dengan halangan dinamis dengan arah pendekatan 180^0 pada lintasan RSR

4.3.2 Simulasi Kedua

Pada percobaan pertama menginputkan parameter sebagai berikut:

Rute lintasan kapal dalam bidang kartesius:

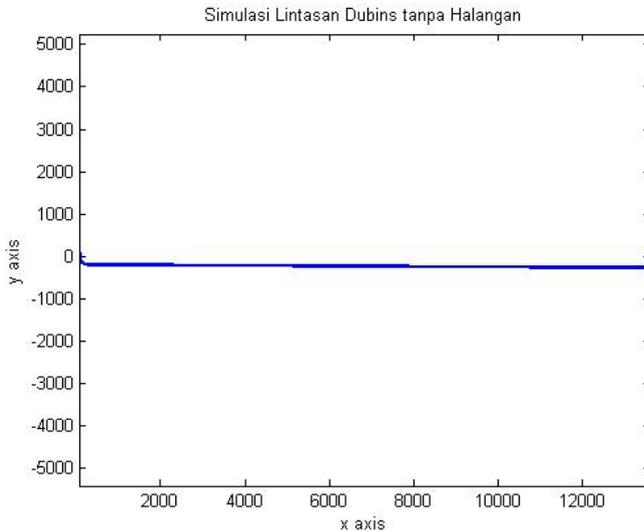
$$P = [x \quad y \quad \psi \quad \rho]$$

$$P_{start} = [100 \quad 100 \quad 240^0 \quad 200]$$

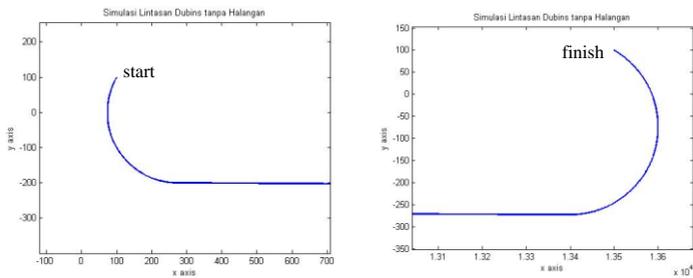
$$P_{finish} = [13500 \quad 100 \quad 150^0 \quad 200]$$

Dengan parameter input posisi awal dan akhir kapal seperti diatas akan dihitung panjang lintasan RSR, RSL, LSR, dan LSL. Selanjutnya dipilih lintasan yang optimal atau lintasan terpendek diantara keempat lintasan tersebut untuk diplot ke kurva lintasan Dubins tanpa halangan.

Setelah dilakukan perhitungan didapatkan panjang lintasan seperti berikut: Panjang lintasan RSR sepanjang 15244 meter, Panjang lintasan RSL sepanjang 14851 meter, Panjang lintasan LSR sepanjang 15523 meter, Panjang lintasan LSL sepanjang 14069 meter. Karena Panjang lintasan terpendek adalah lintasan LSL maka lintasan yang akan ditempuh adalah lintasan LSL dengan hasil plot kurva sebagai berikut:



Gambar 4.16: Lintasan LSL tanpa halangan



Gambar 4.17: Perbesaran Lintasan LSL pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan)

Kemudian diberikan input parameter untuk halangan dinamis sebagai berikut:

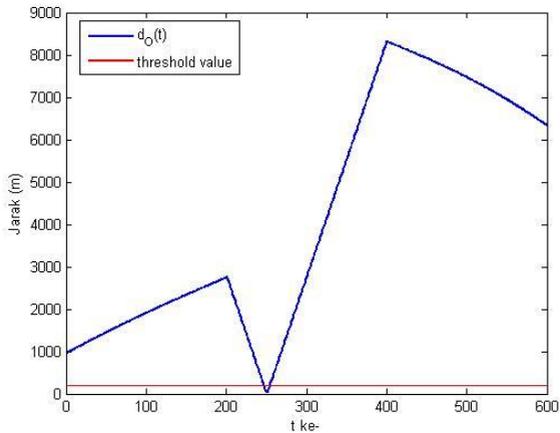
Posisi awal halangan dinamis pada bidang kartesius:

$$P_0 = [\ x_0 \quad y_0]$$

$$P_0 = [1000 \quad -250]$$

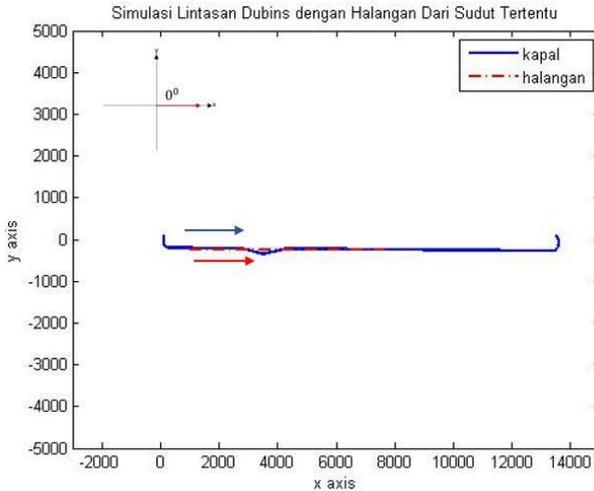
Dengan kecepatan awal sebesar ($v_0 = 10 \text{ m/s}$) mengalami percepatan sebesar ($a = 0,001 \text{ m/s}^2$) dan sudut hadap

halangan sebesar ($\theta_0 = 0^0$) terhadap sumbu- x positif. Dan dengan jari-jari halangan sebesar 100 meter. Setelah itu dilakukan pengecekan apakah terjadi tabrakan atau tidak dengan menghitung jarak antara kapal dengan halangan, dan diperoleh hasil pada Gambar 4.18.



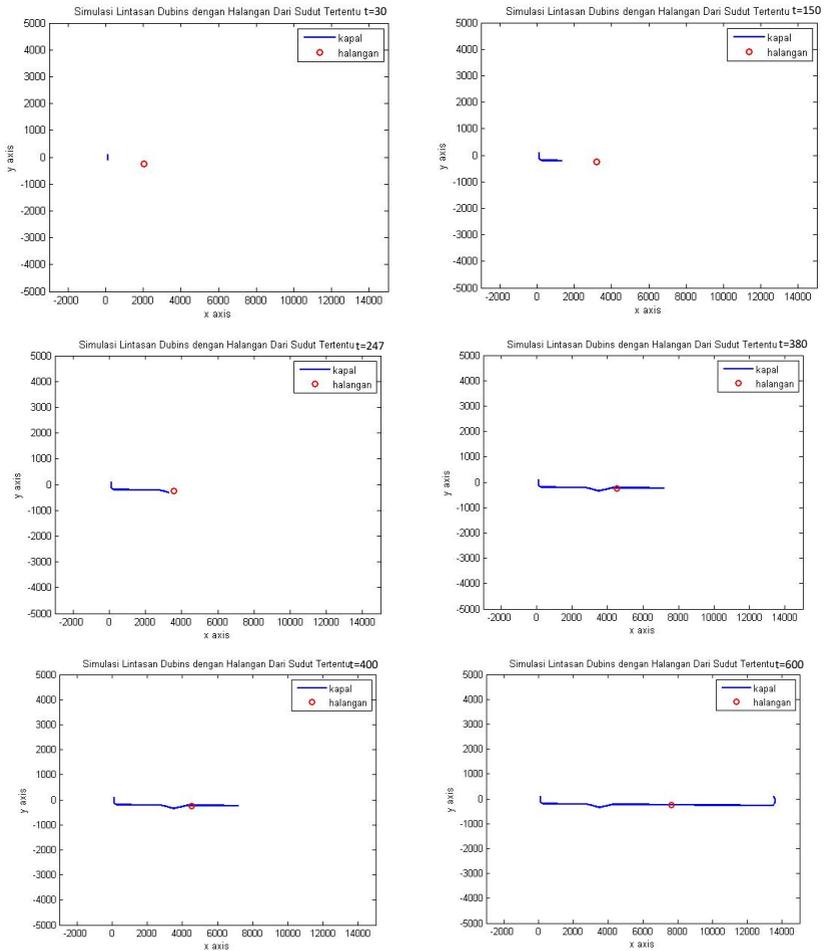
Gambar 4.18: Grafik jarak antara kapal dengan halangan ($d_o(t)$) dan jarak aman (*threshold value*)

Berdasarkan Gambar 4.18 diperoleh bahwa jarak antara kapal dengan halangan kurang dari *threshold value* sehingga didapatkan posisi tabrakan pertama yang terjadi pada posisi titik ke $t=247$. Karena terjadi tabrakan maka dilakukan perencanaan lintasan ulang untuk menghindari halangan tersebut. Hasil lintasan total diberikan pada Gambar 4.19. dan penjabaran lintasan berdasarkan titik posisi dan waktu diberikan pada Gambar 4.20.



Gambar 4.19: Gambar lintasan total LSL penghindaran halangan dari sudut 0^0

Pada Gambar 4.19 terlihat bahwa halangan bergerak di depan kapal dan memiliki arah yang searah dengan kapal. Pada posisi tersebut kapal berada di belakang halangan dengan kecepatan kapal lebih besar daripada kecepatan halangan sehingga kapal harus mendahului halangan agar tidak terjadi tabrakan. Kapal awalnya berbelok ke arah kiri karena menyesuaikan sudut hadap awal kapal (ψ_s) dan jari-jari kelengkungan awal (ρ_s) hingga pada titik tangent exit kemudian lintasannya lurus. Kemudian berbelok ke kanan atau berlawanan arah jarum jam (sesuai dengan algoritma) untuk menghindari halangan, lalu kembali ke posisi lintasan yang lurus hingga pada titik tangent entry dan akhirnya kapal berbelok ke kiri kembali dengan menyesuaikan sudut hadap akhir (ψ_f) dan jari-jari kelengkungan akhir (ρ_f) hingga pada posisi akhir. Berikut ini gambar lintasan yang lebih detail.



Gambar 4.20: Simulasi lintasan Dubins dengan halangan dinamis dengan arah pendekatan 0^0 pada lintasan LSL

4.3.3 Simulasi Ketiga

Pada percobaan pertama menginputkan parameter sebagai berikut:

Rute lintasan kapal dalam bidang kartesius:

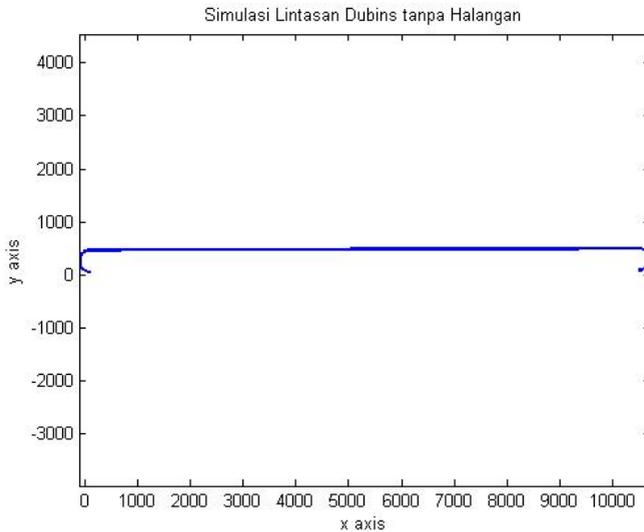
$$P = [x \quad y \quad \psi \quad \rho]$$

$$P_{start} = [100 \quad 70 \quad 180^0 \quad 200]$$

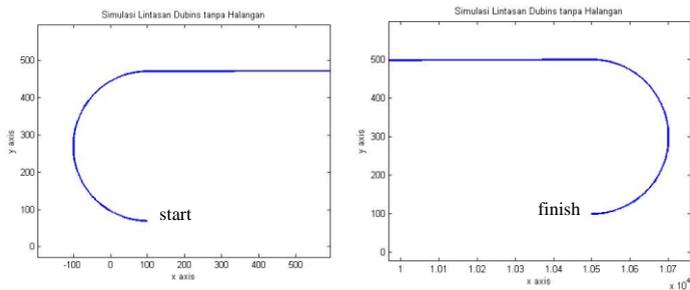
$$P_{finish} = [10500 \quad 100 \quad 180^0 \quad 200]$$

Dengan parameter input posisi awal dan akhir kapal seperti diatas akan dihitung panjang lintasan RSR, RSL, LSR, dan LSL. Selanjutnya dipilih lintasan yang optimal atau lintasan terpendek diantara keempat lintasan tersebut untuk diplot ke kurva lintasan Dubins tanpa halangan.

Setelah dilakukan perhitungan didapatkan panjang lintasan seperti berikut: Panjang lintasan RSR sepanjang 11657 meter, Panjang lintasan RSL sepanjang 11685 meter, Panjang lintasan LSR sepanjang 12914 meter, Panjang lintasan LSL sepanjang 11667 meter. Karena Panjang lintasan terpendek adalah lintasan RSR maka lintasan yang akan ditempuh adalah lintasan RSR dengan hasil plot kurva sebagai berikut:



Gambar 4.21: Lintasan RSR tanpa halangan



Gambar 4.22: Perbesaran Lintasan RSR pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan)

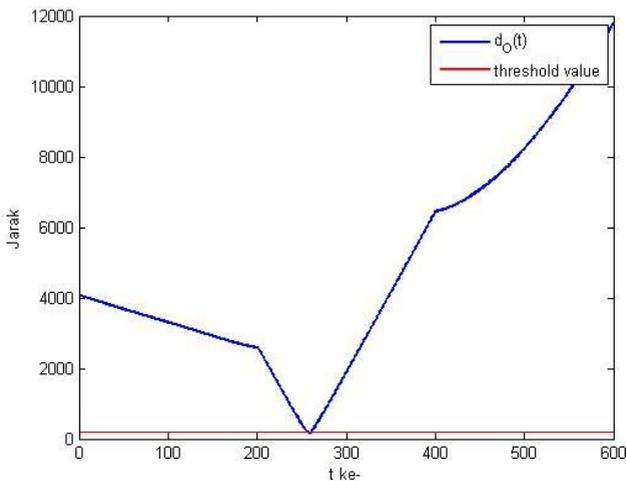
Kemudian diberikan input parameter untuk halangan dinamis sebagai berikut:

Posisi awal halangan dinamis pada bidang kartesius:

$$P_O = [x_0 \quad y_0]$$

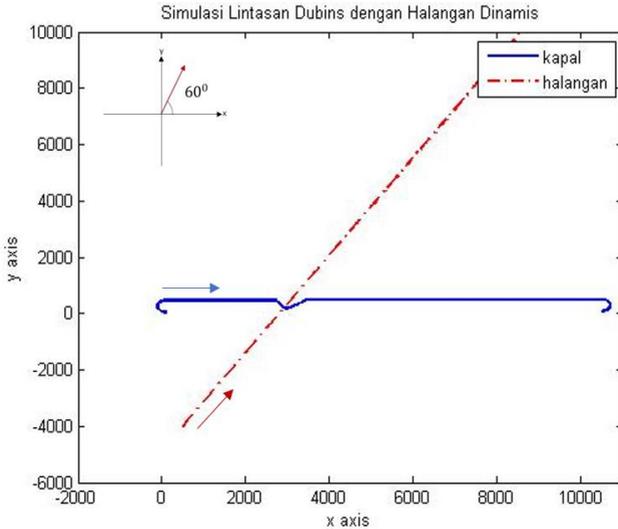
$$P_O = [500 \quad -4000]$$

Dengan kecepatan awal sebesar ($v_0 = 11 \text{ m/s}$) mengalami percepatan sebesar ($a = 0,065 \text{ m/s}^2$) dan sudut hadap halangan sebesar ($\theta_0 = 60^0$) terhadap sumbu- x positif. Dan dengan jari-jari halangan sebesar 100 meter. Setelah itu dilakukan pengecekan apakah terjadi tabrakan atau tidak dengan menghitung jarak antara kapal dengan halangan, dan diperoleh hasil pada Gambar 4.23.



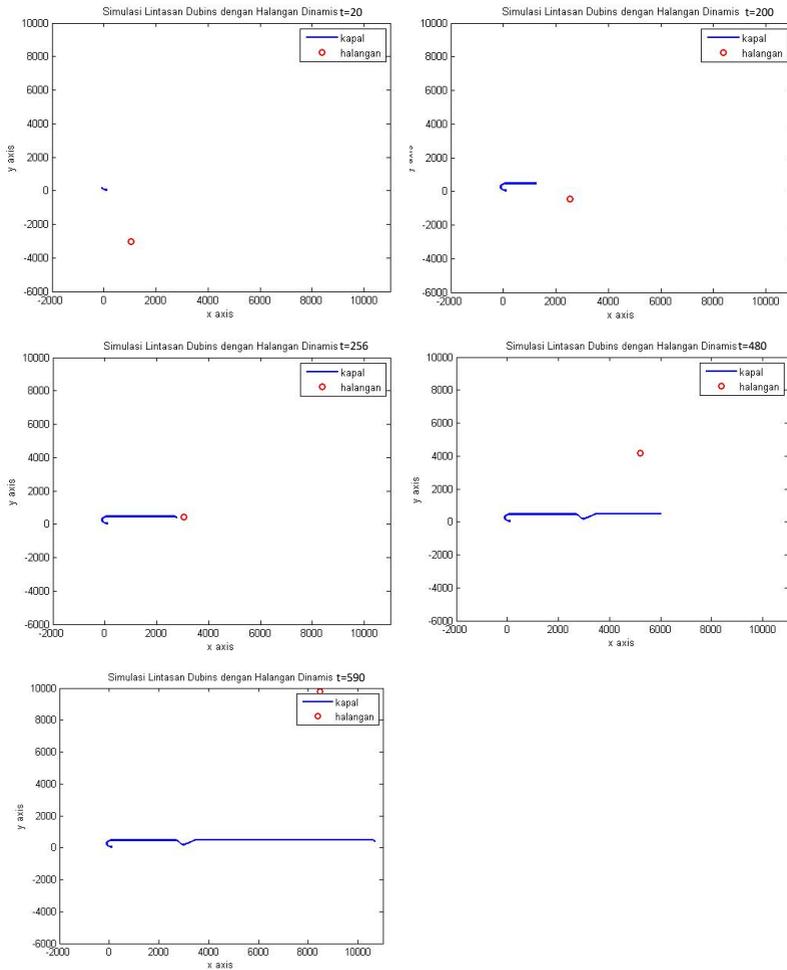
Gambar 4.23: Grafik jarak antara kapal dengan halangan ($d_o(t)$) dan jarak aman (*threshold value*)

Berdasarkan Gambar 4.23 diperoleh bahwa jarak antara kapal dengan halangan kurang dari *threshold value* sehingga didapatkan posisi tabrakan pertama yang terjadi pada posisi titik ke $t=256$. Karena terjadi tabrakan maka dilakukan perencanaan lintasan ulang untuk menghindari halangan tersebut. Hasil lintasan total diberikan pada Gambar 4.24. dan penjabaran lintasan berdasarkan titik posisi dan waktu diberikan pada Gambar 4.25.



Gambar 4.24: Gambar lintasan total RSR penghindaran halangan dari sudut 60^0

Pada Gambar 4.24 terlihat bahwa halangan datang dari samping kanan kapal dengan sudut 60^0 terhadap sumbu x positif. Kapal awalnya berbelok ke arah kanan karena menyesuaikan sudut hadap awal kapal (ψ_s) dan jari-jari kelengkungan awal (ρ_s) hingga pada titik tangent exit kemudian lintasannya lurus. Kemudian berbelok ke kanan atau berlawanan arah jarum jam (sesuai dengan algoritma) untuk menghindari halangan, lalu kembali ke posisi lintasan yang lurus hingga pada titik tangent entry dan akhirnya kapal berbelok ke kanan kembali dengan menyesuaikan sudut hadap akhir (ψ_f) dan jari-jari kelengkungan akhir (ρ_f) hingga pada posisi akhir. Berikut ini gambar lintasan yang lebih detail.



Gambar 4.25: Simulasi lintasan Dubins dengan halangan dinamis dengan arah pendekatan 60^0 pada lintasan RSR

4.3.4 Simulasi Keempat

Pada percobaan kedua menginputkan parameter sebagai berikut:

Rute lintasan kapal dalam bidang kartesius:

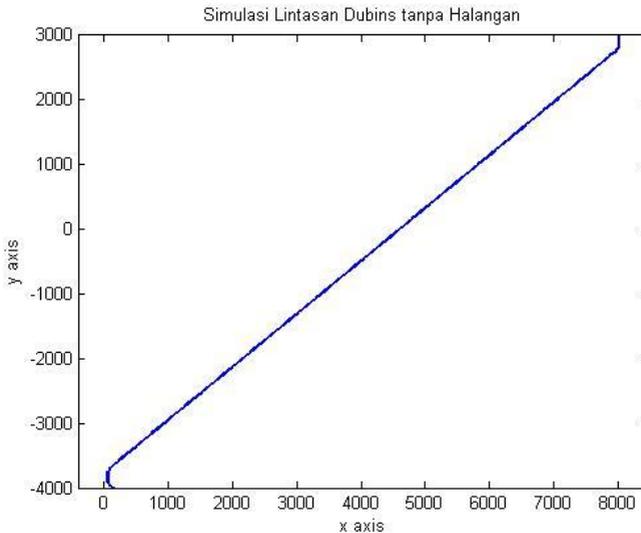
$$P = [x \quad y \quad \psi \quad \rho]$$

$$P_{start} = [150 \quad -4000 \quad 150^0 \quad 200]$$

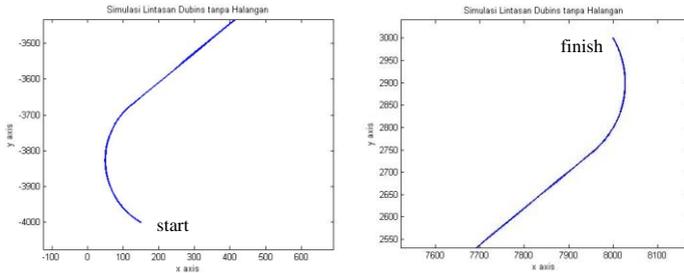
$$P_{finish} = [8000 \quad 3000 \quad 120^0 \quad 200]$$

Dengan parameter input posisi awal dan akhir kapal seperti diatas akan dihitung panjang lintasan RSR, RSL, LSR, dan LSL. Selanjutnya dipilih lintasan yang optimal atau lintasan terpendek diantara keempat lintasan tersebut untuk diplot ke kurva lintasan Dubins tanpa halangan.

Setelah dilakukan perhitungan didapatkan panjang lintasan seperti berikut: Panjang lintasan RSR sepanjang 11886 meter, Panjang lintasan RSL sepanjang 10792 meter, Panjang lintasan LSR sepanjang 13305 meter, Panjang lintasan LSL sepanjang 11664 meter. Karena Panjang lintasan terpendek adalah lintasan RSL maka lintasan yang akan ditempuh adalah lintasan RSL dengan hasil plot kurva sebagai berikut:



Gambar 4.26: Lintasan RSL Tanpa Halangan



Gambar 4.27: Perbesaran Lintasan RSL pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan)

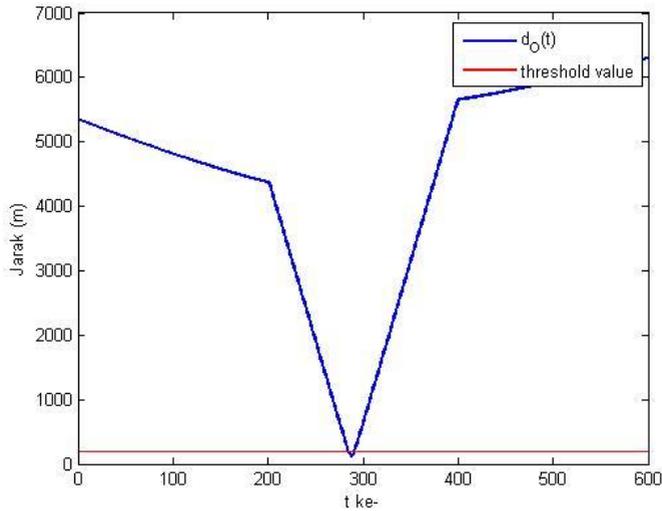
Kemudian diberikan input parameter untuk halangan dinamis sebagai berikut:

Posisi awal halangan dinamis pada bidang kartesius:

$$P_0 = [x_0 \quad y_0]$$

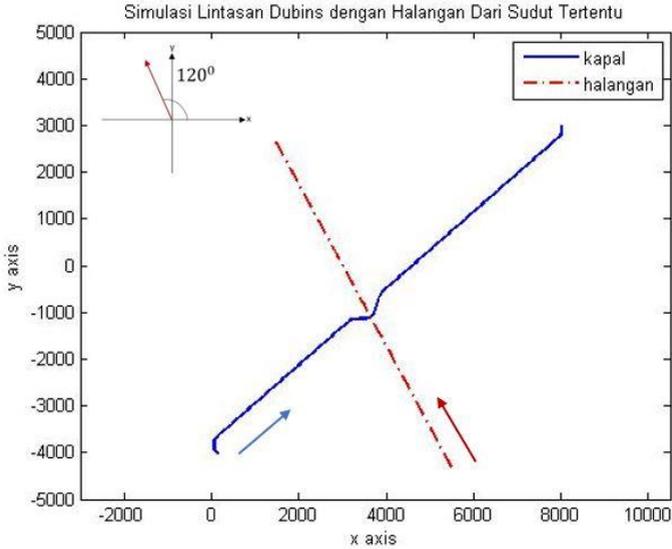
$$P_0 = [5500 \quad -4300]$$

Dengan kecepatan awal sebesar ($v_0 = 14 \text{ m/s}$) mengalami perlambatan sebesar ($a = -0,05 \text{ m/s}^2$) dan sudut hadap halangan sebesar ($\theta_0 = 120^0$) terhadap sumbu- x positif. Dan dengan jari-jari halangan sebesar 100 meter. Setelah itu dilakukan pengecekan apakah terjadi tabrakan atau tidak dengan menghitung jarak antara kapal dengan halangan, dan diperoleh hasil pada Gambar 4.28.



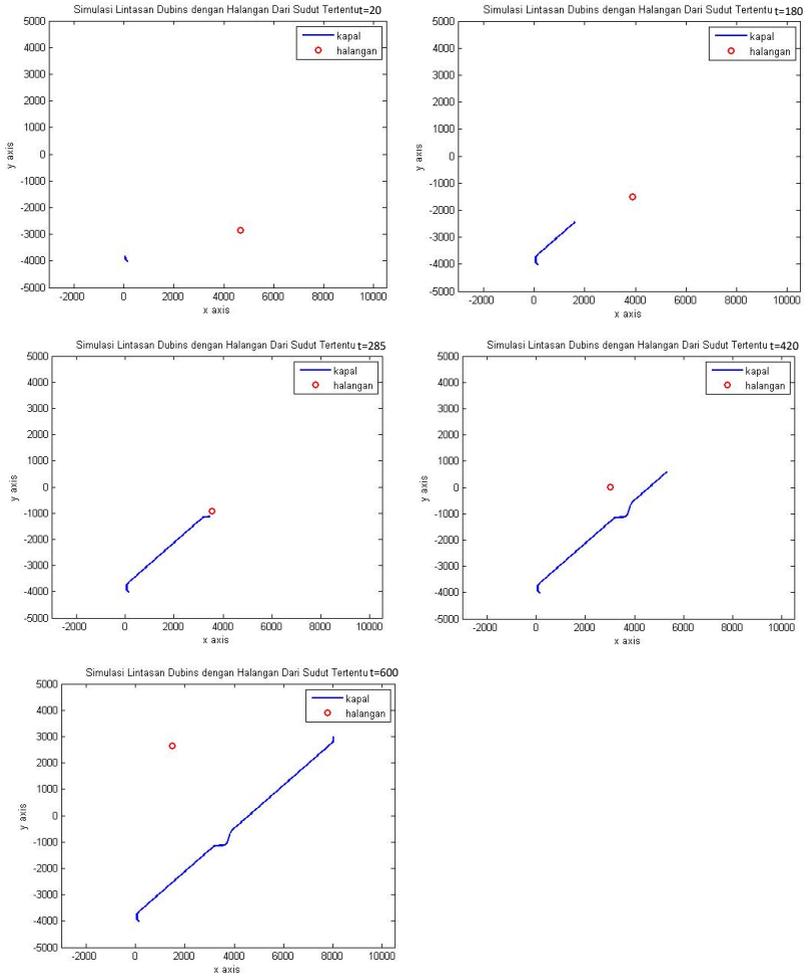
Gambar 4.28: Grafik jarak antara kapal dengan halangan ($d_o(t)$) dan jarak aman (*threshold value*)

Berdasarkan Gambar 4.28 diperoleh bahwa jarak antara kapal dengan halangan kurang dari *threshold value* sehingga didapatkan posisi tabrakan pertama yang terjadi pada posisi titik ke $t=285$. Karena terjadi tabrakan maka dilakukan perencanaan lintasan ulang untuk menghindari halangan tersebut. Hasil lintasan total diberikan pada Gambar 4.29, dan penjabaran lintasan berdasarkan titik posisi diberikan pada Gambar 4.30.



Gambar 4.29: Gambar lintasan total RSL penghindaran halangan dari sudut 120°

Pada Gambar 4.29 terlihat bahwa halangan datang dari samping kanan kapal dengan sudut datang halangan 120° terhadap sumbu x positif. Kapal awalnya berbelok ke arah kanan karena menyesuaikan sudut hadap awal kapal (ψ_s) dan jari-jari kelengkungan awal (ρ_s) hingga pada titik tangent exit kemudian lintasannya lurus. Kemudian berbelok ke kanan atau berlawanan arah jarum jam (sesuai dengan algoritma) untuk menghindari halangan, lalu kembali ke posisi lintasan yang lurus hingga pada titik tangent entry dan akhirnya kapal berbelok ke kiri dengan menyesuaikan sudut hadap akhir (ψ_f) dan jari-jari kelengkungan akhir (ρ_f) hingga pada posisi akhir. Berikut ini gambar lintasan yang lebih detail.



Gambar 4.30: Simulasi lintasan Dubins dengan halangan dinamis dengan arah pendekatan 120° pada lintasan RSL

4.3.5 Simulasi Kelima

Pada percobaan ketiga menginputkan parameter sebagai berikut:

Rute lintasan kapal dalam bidang kartesius:

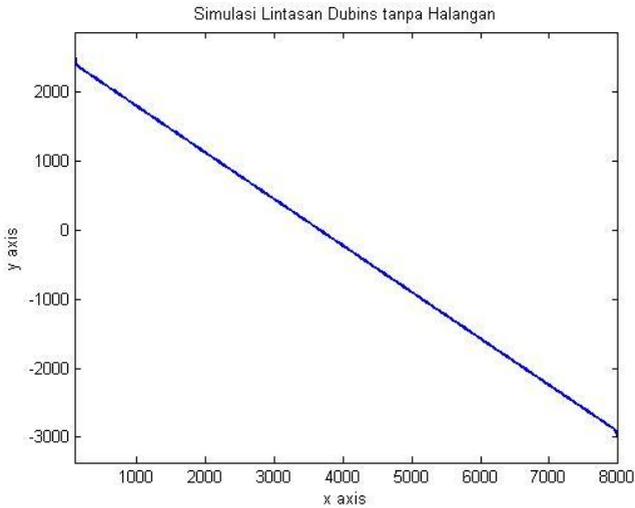
$$P = [x \quad y \quad \psi \quad \rho]$$

$$P_{start} = [100 \quad 2500 \quad 270^0 \quad 200]$$

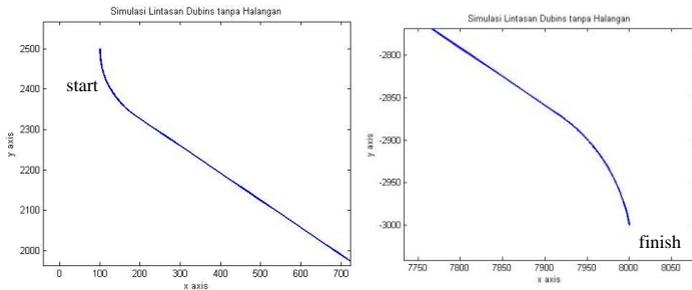
$$P_{finish} = [8000 \quad -300 \quad 280^0 \quad 200]$$

Dengan parameter input posisi awal dan akhir kapal seperti diatas akan dihitung panjang lintasan RSR, RSL, LSR, dan LSL. Selanjutnya dipilih lintasan yang optimal atau lintasan terpendek diantara keempat lintasan tersebut untuk diplot ke kurva lintasan Dubins tanpa halangan.

Setelah dilakukan perhitungan didapatkan panjang lintasan seperti berikut: Panjang lintasan RSR sepanjang 10870 meter, Panjang lintasan RSL sepanjang 12096 meter, Panjang lintasan LSR sepanjang 9671 meter, Panjang lintasan LSL sepanjang 10895 meter. Karena Panjang lintasan terpendek adalah lintasan LSR maka lintasan yang akan ditempuh adalah lintasan LSR dengan hasil plot kurva sebagai berikut:



Gambar 4.31: Lintasan LSR tanpa halangan



Gambar 4.32: Perbesaran Lintasan LSR pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan)

Kemudian diberikan input parameter untuk halangan dinamis sebagai berikut:

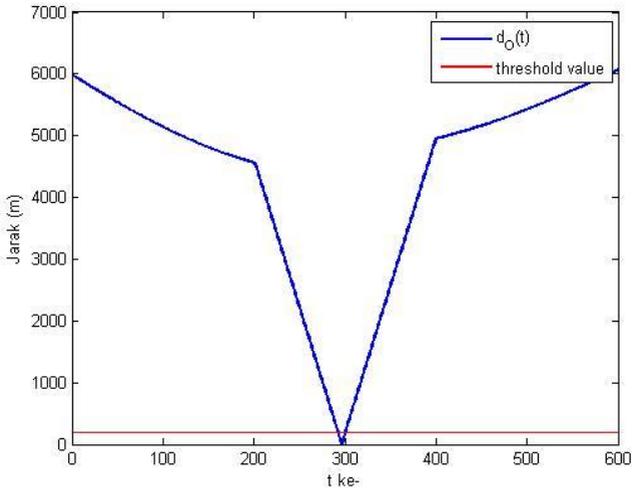
Posisi awal halangan dinamis pada bidang kartesius:

$$P_0 = [x_0 \quad y_0]$$

$$P_0 = [6000 \quad 3500]$$

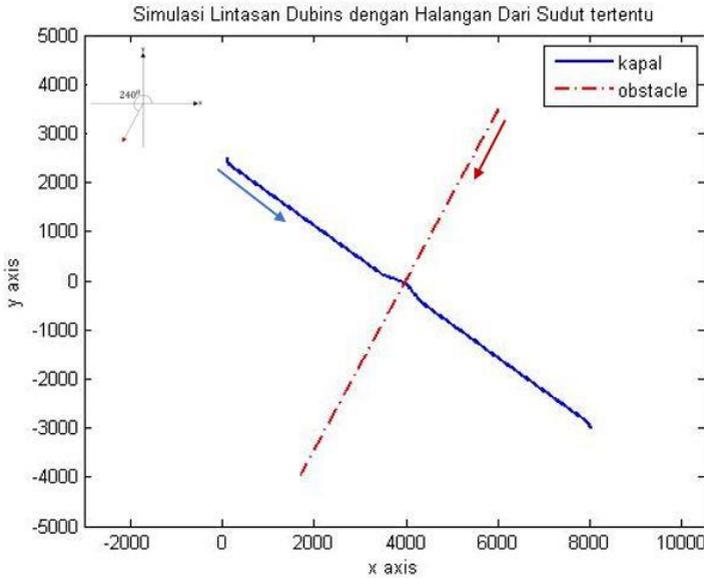
Dengan kecepatan awal sebesar ($v_0 = 15 \text{ m/s}$) mengalami perlambatan sebesar ($a = -0,005 \text{ m/s}^2$) dan sudut hadap

halangan sebesar ($\theta_0 = 240^0$) terhadap sumbu- x positif. Dan dengan jari-jari halangan sebesar 100 meter. Setelah itu dilakukan pengecekan apakah terjadi tabrakan atau tidak dengan menghitung jarak antara kapal dengan halangan, dan diperoleh hasil pada Gambar 4.33.



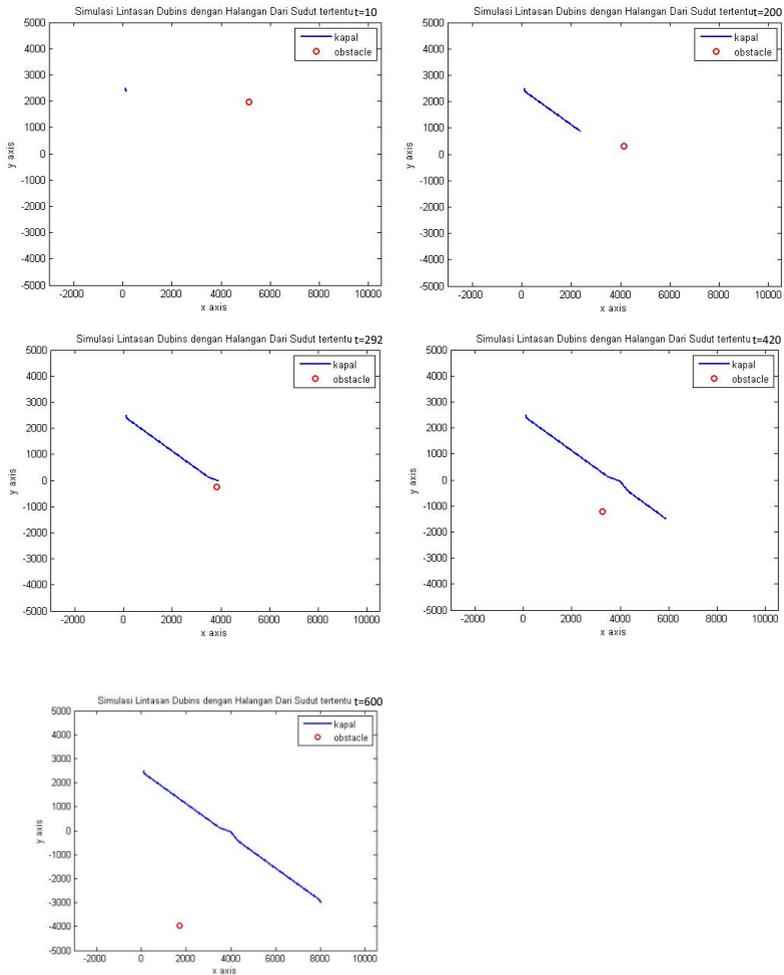
Gambar 4.33: Grafik jarak antara kapal dengan halangan ($d_o(t)$) dan jarak aman (*threshold value*)

Berdasarkan Gambar 4.33 diperoleh bahwa jarak antara kapal dengan halangan kurang dari *threshold value* sehingga didapatkan posisi tabrakan pertama yang terjadi pada posisi titik ke $t=292$. Karena terjadi tabrakan maka dilakukan perencanaan lintasan ulang untuk menghindari halangan tersebut. Hasil lintasan total diberikan pada Gambar 4.34 dan penjabaran lintasan berdasarkan titik posisi diberikan pada Gambar 4.35



Gambar 4.34: Gambar lintasan total LSR penghindaran halangan dari sudut 240^0

Pada Gambar 4.34 terlihat bahwa halangan datang dari samping kiri kapal dengan sudut datang halangan 240^0 terhadap sumbu x positif. Kapal awalnya berbelok ke arah kiri karena menyesuaikan sudut hadap awal kapal (ψ_s) dan jari-jari kelengkungan awal (ρ_s) hingga pada titik tangent exit kemudian lintasannya lurus. Kemudian berbelok ke kiri atau searah arah jarum jam (sesuai dengan algoritma) untuk menghindari halangan, lalu kembali ke posisi lintasan yang lurus hingga pada titik tangent entry dan akhirnya kapal berbelok ke kanan dengan menyesuaikan sudut hadap akhir (ψ_f) dan jari-jari kelengkungan akhir (ρ_f) hingga pada posisi akhir. Berikut ini gambar lintasan yang lebih detail.



Gambar 4.35: Simulasi lintasan Dubins dengan halangan dinamis dengan arah pendekatan 240^0 pada lintasan LSR

4.3.6 Simulasi Keenam

Pada percobaan keempat menginputkan parameter sebagai berikut:

Rute lintasan kapal dalam bidang kartesius:

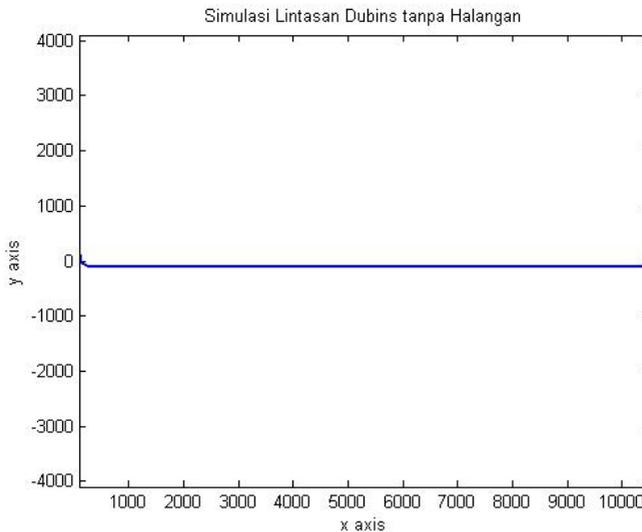
$$P = [x \quad y \quad \psi \quad \rho]$$

$$P_{start} = [100 \quad 100 \quad 270^{\circ} \quad 200]$$

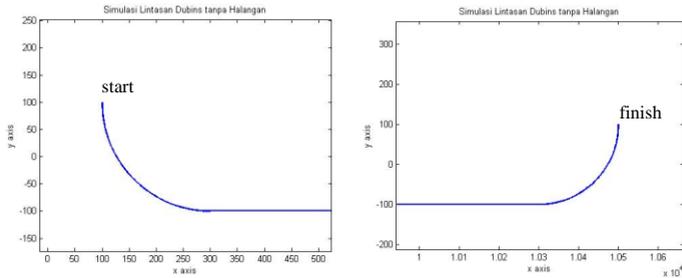
$$P_{finish} = [10500 \quad 100 \quad 90^{\circ} \quad 200]$$

Dengan parameter input posisi awal dan akhir kapal seperti diatas akan dihitung panjang lintasan RSR, RSL, LSR, dan LSL. Selanjutnya dipilih lintasan yang optimal atau lintasan terpendek diantara keempat lintasan tersebut untuk diplot ke kurva lintasan Dubins tanpa halangan.

Setelah dilakukan perhitungan didapatkan panjang lintasan seperti berikut: Panjang lintasan RSR sepanjang 12685 meter, Panjang lintasan RSL sepanjang 11664 meter, Panjang lintasan LSR sepanjang 12277 meter, Panjang lintasan LSL sepanjang 10628 meter. Karena Panjang lintasan terpendek adalah lintasan LSL maka lintasan yang akan ditempuh adalah lintasan LSL dengan hasil plot kurva sebagai berikut:



Gambar 4.36: Lintasan LSL tanpa halangan



Gambar 4.37: Perbesaran Lintasan LSL pada Posisi Awal (kiri) dan Posisi Akhir (kanan)

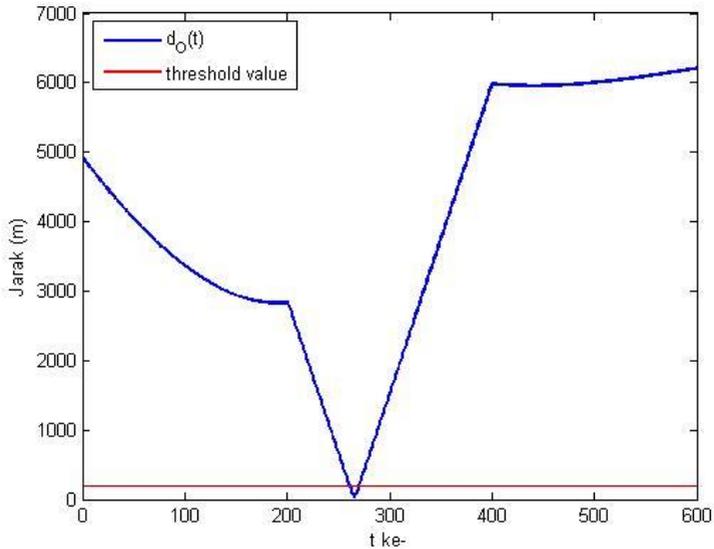
Kemudian diberikan input parameter untuk halangan dinamis sebagai berikut:

Posisi awal halangan dinamis pada bidang kartesius:

$$P_O = [x_0 \quad y_0]$$

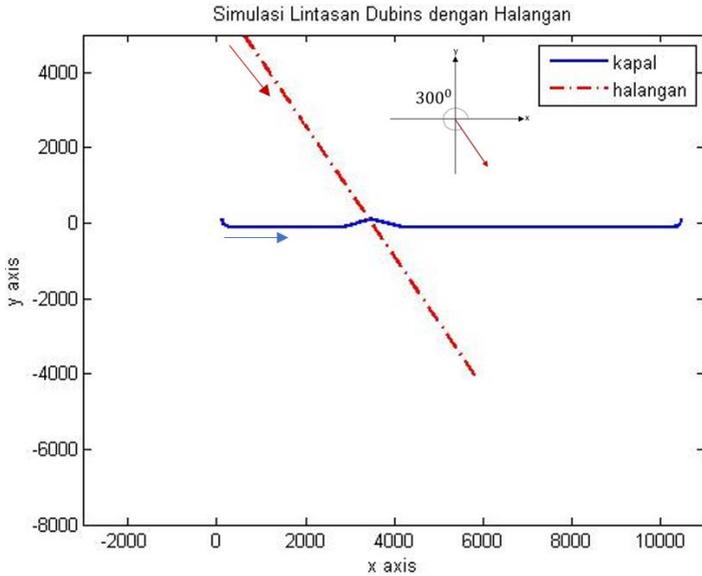
$$P_O = [600 \quad 5000]$$

Dengan kecepatan awal sebesar ($v_0 = 26 \text{ m/s}$) mengalami perlambatan sebesar ($a = -0,03 \text{ m/s}^2$) dan sudut hadap halangan sebesar ($\theta_0 = 300^\circ$) terhadap sumbu- x positif. Dan dengan jari-jari halangan sebesar 100 meter. Setelah itu dilakukan pengecekan apakah terjadi tabrakan atau tidak dengan menghitung jarak antara kapal dengan halangan, dan diperoleh hasil pada Gambar 4.38.



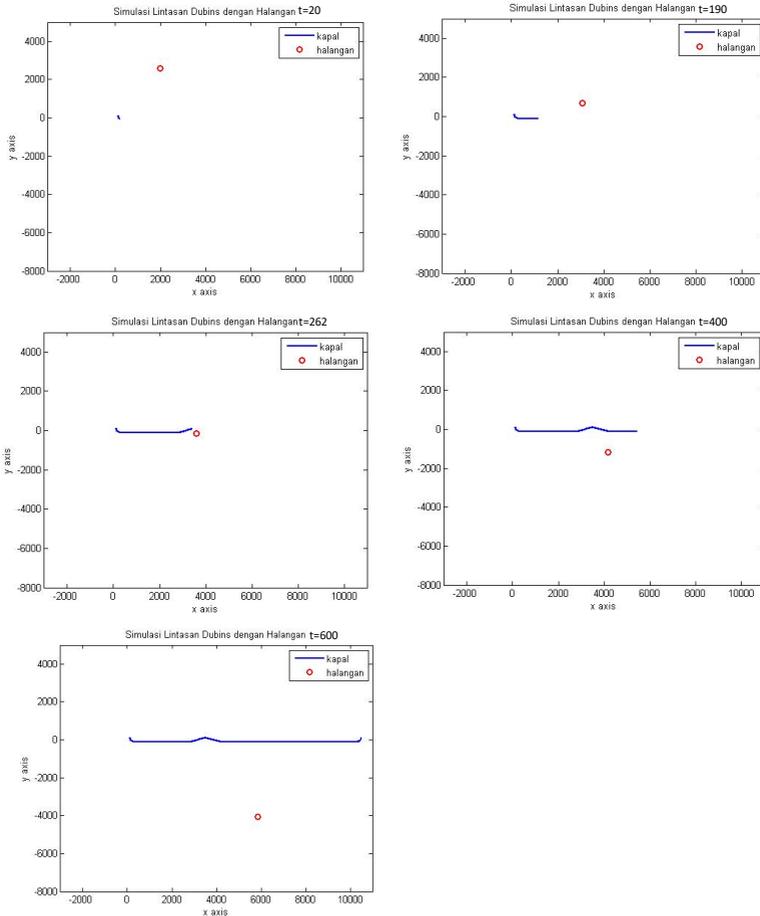
Gambar 4.38: Grafik jarak antara kapal dengan halangan ($d_o(t)$) dan jarak aman (*threshold value*)

Berdasarkan Gambar 4.38 diperoleh bahwa jarak antara kapal dengan halangan kurang dari *threshold value* sehingga didapatkan posisi tabrakan pertama yang terjadi pada posisi titik ke $t=261$. Karena terjadi tabrakan maka dilakukan perencanaan lintasan ulang untuk menghindari halangan tersebut. Hasil lintasan total diberikan pada Gambar 4.39 dan penjabaran lintasan berdasarkan titik posisi diberikan pada Gambar 4.40.



Gambar 4.39: Gambar lintasan total LSL penghindaran halangan dari sudut 300°

Pada Gambar 4.39 terlihat bahwa halangan datang dari samping kiri kapal dengan sudut datang halangan 300° terhadap sumbu x positif. Kapal awalnya berbelok ke arah kiri karena menyesuaikan sudut hadap awal kapal (ψ_s) dan jari-jari kelengkungan awal (ρ_s) hingga pada titik tangent exit kemudian lintasannya lurus. Kemudian berbelok ke kiri atau searah arah jarum jam (sesuai dengan algoritma) untuk menghindari halangan, lalu kembali ke posisi lintasan yang lurus hingga pada titik tangent entry dan akhirnya kapal berbelok ke kiri kembali dengan menyesuaikan sudut hadap akhir (ψ_f) dan jari-jari kelengkungan akhir (ρ_f) hingga pada posisi akhir. Berikut ini gambar lintasan yang lebih detail.



Gambar 4.40: Simulasi lintasan Dubins dengan halangan dinamis dengan arah pendekatan 300^0 pada lintasan LSL

Berdasarkan hasil pada simulasi yang telah diperoleh diatas, didapatkan lintasan kapal yang baik untuk menghindari halangan dinamis dengan berbagai sudut arah datangnya halangan di semua kuadran. Metode Dubins bisa diterapkan dengan optimal untuk perencanaan lintasan kapal. Untuk mendapatkan lintasan yang dapat menghindari halangan

dinamis harus didapatkan titik tabrakannya terlebih dahulu dengan menggunakan estimasi posisi halangan dan gerak kapal. Setelah itu dilakukan perencanaan ulang lintasan kapal untuk menghindari halangan dinamis dengan aman. Namun pada simulasi diatas percepatan dan perlambatan halangan bernilai kecil dikarenakan kapal bergerak dengan kecepatan *surge* konstan sedangkan halangan bergerak lurus berubah beraturan sehingga jika nilai percepatan atau perlambatan halangan terlalu besar maka tidak terjadi tabrakan dan tidak perlu melakukan penghindaran untuk gerak kapal.

BAB V

PENUTUP

Pada bab ini, diberikan kesimpulan yang diperoleh dari Tugas Akhir serta saran untuk penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dan analisis yang telah disajikan pada bab sebelumnya, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Perencanaan lintasan kapal dengan metode Dubins dalam menghindari halangan dinamis bisa dilakukan dengan baik untuk berbagai sudut arah datangnya halangan di semua kuadran.
2. Dalam implementasi perencanaan lintasan Dubins untuk menghindari halangan dinamis, bermula dengan posisi kapal diperoleh dari lintasan tanpa halangan dan didapatkan lintasan terpendek. Kemudian saat akan mendekati halangan, kapal akan mengestimasi arah beloknya. Dalam estimasi akan dicari posisi awal tabrakan terlebih dahulu. Karena saat posisi awal tabrakan ini halangan dianggap statis sehingga dapat dihitung titik-titik di sekitar halangan. Kemudian titik-titik di sekitar halangan tersebut yang membentuk lintasan lengkung dan digabungkan dengan lintasan awal. Dengan begitu diperoleh lintasan yang mampu menghindari halangan dinamis. Apabila halangan datang dari sudut antara 0^0 sampai 180^0 maka untuk menghindarinya kapal berbelok berlawanan arah jarum jam, dan jika halangan datang dari sudut antara 180^0 sampai 360^0 maka kapal berbelok searah arah jarum jam.

5.2 Saran

Perencanaan lintasan Dubins dapat dikembangkan menggunakan lebih dari satu halangan dinamis

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Andardi. (2017), Klasifikasi Kapal Perang Indonesia, Jurnal Sains Dan Seni ,bagian-1.
- [2] Kementrian Pertahanan Republik Indonesia, 2015, Buku Putih Pertahanan Indonesia, ISBN 978-979- 8878-04-6
- [3] Fossen, T.I.(1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Hoboken :Wiley.
- [4] Tsourdos, A., White, B., and Shanmugavel, M., (2010), *Cooperative Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles* (Vol. 32), John Wiley and Sons.
- [5] Fossen, Kristin.(2014). *Collision Avoidance Planning Using Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B)*, IEEE Transactions on control System Technology Journal, 1063-6536.
- [6] Guoqing, Yingjie.(2018). *Novel DVS Guidance and Path Following Control for Underactuated Ship*, Ocean Engineering Journal, 116026
- [7] Jian Xu.(2015). *Dynamical Sliding Mode Control for Trajectory Tracking of Underactuated Unmanned Underwater Vehicles*, Ocean Engineering Journal, 150001
- [8] Sorbo, E. H., (2013), *Vehicle Collision Avoidance System*, Masters thesis, Institut for teknisk kybernetikk.
- [9] Subchan, S., White, B. A., Tsourdos, A., Shanmugavel, M., and bikowski, R.,(2008), *Dubins Path Planning of Multiple UAVs for Tracking Contaminant Cloud*, IFAC Proceedings Volumes, 41(2), 5718-5723.
- [10] Putri, D. K. R., Asfihani, T. and Subchan, S. (2018), *Steering Angle Control of Car for Dubins Path-tracking Using Model Predictive Control*, dalam *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 974, IOP Publishing, 012066.
- [11] Norma, Kumala (2010). *Perencanaan Lintasan Menggunakan Dubins Geometry pada Pesawat Udara NIR*

- Awak (PUNA). Tugas Akhir Jurusan Matematika. ITS. Surabaya.
- [12] Mualifah, N., Herisman, I., dan Subchan (2013). Perencanaan Lintasan Dubins-Geometri pada Kapal Tanpa Awak untuk Menghindari Halangan Statis. *Jurnal Sains Dan Seni* Vol. 1, No. 1, halaman:1-6
- [13] Lin, Yucong. (2013). *Moving Obstacle Avoidance for Unmanned Aerial Vehicles*. Srikanth: Saripalli
- [14] Winggari, Iratdya.(2018).Kendali Sudut Haluan Kapal untuk Pelacakan Lintasan Dubins dengan Halangan Statis menggunakan *Model Predictive Control*. Tugas Akhir Departemen Matematika. ITS. Surabaya
- [15] Kusuma, Dian.(2019). Kendali Haluan Kapal untuk Pelacakan Lintasan Dubins dengan Halangan Dinamis menggunakan *Model Predictive Control*. Tesis Departemen Matematika. ITS. Surabaya
- [16] Fossen,T.I.,(2011), *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*, JohnWileyandSons.
- [17] Riyanto, B. A.,(2018). Kendali Sudut pada Gerak Kapal untuk Pelacakan Lintasan Dubins Menggunakan *Disturbance Compensating Model Predictive Control*. Tugas Akhir, Departemen Matematika. ITS. Surabaya
- [18] Arifin, Zaenal. (2015). Kendali Optimal Pada Pesawat Udara Nir Awak (PUNA) Untuk Mengikuti Lintasan Dengan Halangan. Tesis Departemen Matematika.ITS.Surabaya
- [19] Lugo, I., Flores, G., dan Salasar, S.(2015). *Dubins path generation for a fixed wing UAV*. IEEE Transactions on control System Technology Journal, 01138167
- [20] Nurhadi dan Baharudin, A. (2015). Studi Pengembangan Skeg Terkontrol Untuk Meningkatkan Kinerja *Maneuverability* Pada Kapal Cepat. *Jurnal Wave* Volume 9 Nomor 2,; Hal 71-78

[21] Akbar, Ridho. (2014). Pemodelan Kapal Perang Kelas SIGMA Extended Skala 3 Meter Berbasis Eksperimen. Tesis Departemen Teknik Fisika. ITS. Surabaya

BIODATA



Penulis bernama Ria Astutik, lahir di Sidoarjo, 29 September 1997. Jenjang Pendidikan formal yang ditempuh oleh penulis mulai dari TK RA DarunNajah (2002-2004), MI DarunNajah (2004-2010), SMP Negeri 2 Taman Sidoarjo (2010-2013), SMA Negeri 1 Taman Sidoarjo (2013-2016). Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang S1 di Departemen Matematika Fakultas Sains dan Analitika Data Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada tahun 2016-sekarang melalui jalur SNMPTN dengan NRP 0611164000040. Di Departemen Matematika ITS, penulis mengambil bidang minat Matematika Terapan yang terdiri atas Pemodelan Matematika serta Riset Operasi dan Pengolahan Data. Selama diperkuliahan penulis mengikuti kegiatan organisasi mahasiswa yaitu UKM Ukafo ITS sebagai Staff Divisi PSDM periode 2017, lalu sebagai Staff Ahli Divisi PSDM periode 2017/2018. Selain itu juga aktif di Himpunan Mahasiswa Matematika (HIMATIKA) ITS sebagai *Secretary of Applied Science Department* periode 2018/2019. Disamping itu, penulis juga aktif dalam berbagai acara kemahasiswaan yaitu seperti pelatihan LKMM Pra-TD, LKMM TD.

Informasi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini dapat ditujukan ke penulis melalui *e-mail* RiaAstutik29@gmail.com. Terima kasih dan semoga bermanfaat.