



TESIS - MN235401

**PENGEMBANGAN SIMULASI PENGHINDARAN DINI
TABRAKAN KAPAL DENGAN METODE *FUZZY
INFERENCE* BERBASIS *COLLISION RISK INDEX***

**FERNANDA WAHYU PRATAMA
6018221001**

**Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Yuda Apri Hermawan, S.T., M.T
Dr.-Ing. Ir. Setyo Nugroho**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
2024**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

FERNANDA WAHYU PRATAMA

NRP. 6018221001

dengan Judul Tesis

**Pengembangan Simulasi Penghindaran Dini Tabrakan Kapal dengan
Metode *Fuzzy Inference* Berbasis *Collision Risk Index***

Tanggal Ujian: 22 Juli 2024

Periode Wisuda: September 2024

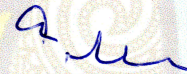
Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. Dr. Eng. Yuda Apri Hermawan, S.T., M.T
NIP. 198920201 1 007



2. Dr-Ing. Ir. Setyo Nugroho
NIP. 19651020199601 1 001

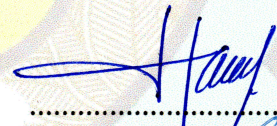


Penguji:

1. Ir. Triwilaswandio Wuruk Pribadi, M.Sc., Ph.D.
NIP. 19610914198701 1 001



2. Prof. Ir. R. Sjarief Widjadja, Ph.D.
NIP. 19630720198803 1 002



3. Dr. Eng. Septia Hardy Sujiatanti, S.T., M.T.
NIP. 19840921201212 2 002



Kepala Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan



Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., P.hD.

NIP: 19640210198903 1 001

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan karunianya tesis ini dapat diselesaikan. Pada kesempatan ini Penulis ingin menghaturkan rasa terima kasih kepada pihak- pihak yang telah berjasa dalam penyelesaian tesis ini, yaitu:

1. Orang tua dan seluruh keluarga penulis yang telah memberikan dukungan terus-menerus baik moril maupun materiil;
2. Dr. Eng. Yuda Apri Hermawan, S.T., M.T dan Dr-Ing. Ir. Setyo Nugroho selaku Dosen Pembimbing atas kesempatan yang diberikan serta bimbingan dan motivasi tiada henti yang diberikan selama pengerjaan dan penyusunan Thesis ini;
3. Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Perkapalan beserta seluruh dosen dan tenaga kependidikan yang telah membantu kelancaran perkuliahan Penulis;
4. Mas Fajar, Mbak Dinda, dan Dani sebagai sesama bimbingan;
5. Teman-teman angkatan program magister teknik perkapalan;
6. Dan semua pihak yang telah membantu penyelesaian tesis ini yang tidak dapat Penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan dan penyusunan Thesis ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Akhir kata semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, 5 Agustus 2024

Fernanda Wahyu Pratama

**PENGEMBANGAN SIMULASI PENGHINDARAN DINI TABRAKAN
KAPAL DENGAN METODE *FUZZY INFERENCE* BERBASIS
COLLISION RISK INDEX**

Mahasiswa Nama : Fernanda Wahyu Pratama
Mahasiswa ID : 6018221001
Pembimbing : Dr. Eng. Yuda Apri Hermawan, S.T., M.T
Dr-Ing. Ir. Setyo Nugroho

ABSTRAK

Tabrakan kapal dapat terjadi karena perilaku pengoperasian yang berbahaya (*human errors*). Saat kapal berpapasan dengan kapal lain, nakhoda akan melihat kondisi sekitar kapal dengan radar, *Automatic Identification System* (AIS), atau juga dengan mata nakhoda sendiri untuk mendapatkan informasi posisi dan informasi perjalanan kapal lainnya. Dengan mengandalkan peralatan navigasi ataupun pengalaman dari nakhoda, terdapat beberapa kekurangan yang perlu diperhatikan. Oleh karena itu, simulasi penghindaran dini tabrakan kapal sangat diperlukan, untuk menggambarkan perilaku kapal sesuai dengan perintah nakhoda berdasarkan hasil nilai *collision risk* (CR). Tesis ini berfokus pada simulasi penghindaran tabrakan kapal untuk meningkatkan *safety awarness* awak kru kapal dalam kondisi perairan terbatas (*restricted waterway*) seperti cannal, jalur masuk pelabuhan, dll. Simulasi dikembangkan dengan menggabungkan evaluasi risiko tabrakan berbasis metode numerik, menggunakan parameter seperti *Distance of Closest Point of Approach* (DCPA), *Time to Closest Point of Approach* (TCPA), dan domain kapal untuk memberikan penilaian yang lebih akurat dan efektif dalam menghindari tabrakan. Dalam simulasi ini, kapal dipertimbangkan mempertahankan kecepatannya karena masih dalam zona aman dalam melakukan penghindaran tabrakan. Penelitian ini mengembangkan model algoritma evaluasi risiko tabrakan kapal berbasis *fuzzy inference* yang menggabungkan indeks risiko tabrakan, *warning risk by ship domains*, dan *closest the point of approach* dengan prediksi gerakan kapal berbasis model matematika manuver kapal. Data radar dan

Automatic Identification System (AIS) kapal digunakan untuk memprediksi perubahan posisi kapal, yang kemudian diproses melalui model matematika untuk menghasilkan penilaian risiko tabrakan. Tiga variasi bentuk domain digunakan dalam penelitian ini. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kapal dapat menghindari tabrakan dengan baik, dengan domain elips dan telur memberikan penilaian CR yang lebih baik dibandingkan domain lingkaran yang kurang variatif dalam ukuran.

Kata kunci: Metode *fuzzy logic*, Risiko tabrakan, Domain kapal, Metode *closest point of approach*, Prediksi gerak kapal, Penghindaran tabrakan.

**DEVELOPMENT OF AN EARLY SHIP COLLISION AVOIDANCE
SIMULATION USING FUZZY INFERENCE METHOD BASED ON
COLLISION RISK INDEX**

Mahasiswa Nama : Fernanda Wahyu Pratama
Mahasiswa ID : 6018221001
Pembimbing : Dr. Eng. Yuda Apri Hermawan, S.T., M.T
Dr-Ing. Ir. Setyo Nugroho

ABSTRACT

When ships encounter each other, the captain uses radar, the Automatic Identification System (AIS), or visual observation to gather positional and navigational information of other vessels. Relying solely on navigational equipment or the captain's experience has its limitations. Therefore, early collision avoidance simulations are crucial to depict the ship's behavior according to the captain's commands based on collision risk (CR) values. This thesis focuses on collision avoidance simulations to enhance crew safety awareness in restricted waterways such as canals and port entry routes. The simulation is developed by integrating numerical method-based collision risk evaluation, using parameters like Distance of Closest Point of Approach (DCPA), Time to Closest Point of Approach (TCPA), and ship domains to provide a more accurate and effective collision avoidance assessment. In this simulation, the ship is considered to maintain its speed as it is still within the safe zone for collision avoidance. This research develops a ship collision risk evaluation algorithm based on fuzzy inference, combining collision risk indices, warning risk by ship domains, and the closest point of approach with ship movement prediction based on a mathematical maneuvering model. Radar and Automatic Identification System (AIS) data are used to predict changes in ship positions, which are then processed through the mathematical model to produce collision risk assessments. Three variations of domain shapes are used in this study. The simulation results show that ships can effectively avoid collisions, with

elliptical and egg-shaped domains providing better CR assessments compared to circular domains, which are less variable in size.

Keywords: fuzzy logic method, Collision risk, Ship domain, closest point of approach method, Ship movement prediction, Collision avoidance.

DAFTAR ISI

Lembar Pengesahan Tesis	i
Kata Pengantar	ii
Abstrak	iii
Abstract	v
Daftar Isi.....	vii
Daftar Gambar.....	x
Daftar Tabel.....	xxii
BAB 1 Pendahuluan.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Manfaat	4
BAB 2 kajian Pustaka dan Dasar Teori.....	5
2.1. Kajian Pustaka.....	5
2.1.1. Perhitungan Nilai <i>collision Risk Index</i>	5
2.1.2. Pendekatan Berbasis Aturan.....	9
2.1.3. Perkiraan Daerah Tabrakan dan Domain Kapal.....	10
2.1.4. Keterbaruan Penelitian	14
2.2. Dasar teori	14
2.2.1. Manuver Kapal.....	14
2.2.2. Persamaan Gerak Manuver Kapal.....	15
2.2.3. Model Matematika Untuk Gaya Eksternal.....	18

2.2.4. Gaya Dan Momen Hidrodinamik.....	18
2.2.5. Gaya Baling-Baling.....	19
2.2.6. Gaya kemudi	20
2.2.7. Penyelesaian Masalah Gerak Manuver Kapal.....	20
2.2.8. <i>DCPA</i> dan <i>TCPA</i>	21
2.2.9. Domain Kapal	23
2.2.10. <i>Automatic Collision Avoidance System</i>	25
2.2.11. Logika <i>Fuzzy</i>	28
2.2.12. Perilaku Kapal Menurut COLREGs.....	30
BAB 3 Metode penelitian.....	35
3.1. Bagan Alir	35
3.2. Pengumpulan Referensi Data.....	35
3.3. Prediksi Gerak Kapal	35
3.4. Perhitungan Risiko Tabrakan Kapal.....	36
3.5. Indeks Risiko Tabrakan.....	37
3.6. Penilaian Risiko Tabrakan Kapal	37
3.7. Aksi Setelah Penilaian Risiko Tabrakan.....	37
BAB 4 Perancangan algoritma dan Pengembangan Program.....	39
4.1 Tinjauan rancangan algoritma	39
4.2 Pembacaan data kapal	42
4.3 Deteksi konflik.....	45
4.3.1 Himpunan <i>fuzzy</i>	48
4.3.2 Perhitungan risiko tabrakan kapal dengan <i>fuzzy inference</i>	59
4.4 Penyelesaian konflik	61
4.4.1 Peraturan fuzzy inference untuk kontrol kapal	63
4.4.2 Himpunan <i>fuzzy</i>	65

4.4.3 Perhitungan kontrol kapal	67
4.5 Memprediksi Gerak Kapal	68
4.6 Skenario Tabrakan Kapal	69
BAB 5 Simulasi dan Pembahasan.....	71
5.1 Kondisi simulasi.....	71
5.2 Simulasi tabrakan skenario A.....	75
5.2.1 Simulasi Tabrakan Skenario 1	75
5.2.2 Simulasi Tabrakan Skenario 2.....	86
5.2.3 Simulasi Tabrakan Skenario 3	97
5.3 Simulasi Tabrakan Skenario B	107
5.3.1 Simulasi Tabrakan Skenario 1	108
5.3.2 Simulasi Tabrakan Skenario 2.....	118
5.3.3 Simulasi Tabrakan Skenario 3	129
5.3.4 Simulasi Tabrakan Skenario 4.....	140
5.4 Simulasi Tabrakan Skenario C	150
5.4.1 Simulasi Tabrakan Skenario 1	150
5.4.2 Simulasi Tabrakan Skenario 2.....	161
5.5 Simulasi Tabrakan Skenario D.....	171
5.5.1 Simulasi Tabrakan Skenario 1	171
5.6 Hasil Simulasi	181
BAB 6 Kesimpulan dan Saran	185
6.1 Kesimpulan	185
6.2 Saran.....	186
Daftar Pustaka	187
Biodata Penulis	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pengambilan keputusan penghindaran tabrakan kapal dengan berbagai macam kondisi pertemuan antar kapal (Hasegawa dkk., 2012).....	6
Gambar 2.2 Diagram alir sistem penghindaran tabrakan kapal berdsarakan penilain DCPA dan TCPA (Chin & Debnath, 2009)	6
Gambar 2.3 Diagram alir penilaian CR dengan parameter DCPA, TCPA, dan jarak relatif antar kedua kapal (Li & Pang, 2013).....	7
Gambar 2.4 Parameter yang digunakan untuk mendapatkan nilai CR pada situasi bertabrakan (Perera & Guedes Soares, 2015)	8
Gambar 2.5 Empat kriteria domain area (Szlapczynski & Szlapczynska, 2017)...11	
Gambar 2.6 Coldwell domain kapal (Coldwell, 1983)	13
Gambar 2.7 Fujii’s domain area(Fujii & Tanaka, 1971)	13
Gambar 2.8 Goodwin’s domain area (Goodwin, 1975).....	14
Gambar 2.9 Sistem koordinat pada kapal (Choe & Furukawa, 2019).....	15
Gambar 2.10 Koordinat posisi DCPA dan TCPA kapal (Zhang dkk., 2023)	22
Gambar 2.11 Bentuk domain kapal (a) bentuk domain elips, (b) bentuk domain lingkaran, dan (c) bentuk domain telur	24
Gambar 2.12 Titik mulai penghindaran (Ota dkk., 2016).....	26
Gambar 2.13 Titik selesai penghindaran (Ota dkk., 2016)	27
Gambar 2.14 (a) penghindaran normal dan (b) penghindaran darurat (Ota dkk., 2016)	28
Gambar 2.15 Himpunan B yang disederhanakan (Ota dkk., 2016).....	30
Gambar 2.16 Titik temu kapal (Sun dkk., 2023).....	34
Gambar 3.1 Bagan alir pengerjaan tesis.....	35
Gambar 4.1 Komponen – komponen sistem penghindaran tabrakan	39
Gambar 4.2 Proses penghindaran tabrakan kapal	40
Gambar 4.3 Rencana algoritma yang diusulkan	41
Gambar 4.4 Diagram alir penulisan data kapal dan pembacaan data kapal.....	42
Gambar 4.5 Program untuk membaca jumlah kapal.....	43

Gambar 4.6 Program untuk membaca data kondisi kapal.....	43
Gambar 4.7 Program untuk membaca data dimensi kapal.....	44
Gambar 4.8 Variabel tidak tetap untuk perhitungan risiko tabrakan kapal	45
Gambar 4.9 Diagram alir deteksi konflik penghindaran tabrakan	46
Gambar 4.10 Program untuk perhitungan domain kapal berbentuk elips.....	47
Gambar 4.11 Program untuk perhitungan domain kapal berbentuk lingkaran	47
Gambar 4.12 Program untuk perhitungan domain kapal berbentuk telur.....	47
Gambar 4.13 Model program untuk perhitungan DCPA dan TCPA	47
Gambar 4.14 Himpunan <i>fuzzy</i> pada variabel DCPA	48
Gambar 4.15 Himpunan <i>fuzzy</i> pada variabel DCPA dengan bentuk domain lingkaran.....	49
Gambar 4.16 Himpunan <i>fuzzy</i> pada variabel DCPA dengan bentuk domain elips	51
Gambar 4.17 Himpunan <i>fuzzy</i> pada variabel DCPA dengan bentuk domain telur	52
Gambar 4.18 Himpunan <i>fuzzy</i> pada variabel TCPA.....	53
Gambar 4.19 Himpunan <i>fuzzy</i> pada variabel TCPA dengan bentuk domain lingkaran	54
Gambar 4.20 Himpunan <i>fuzzy</i> pada variabel TCPA dengan bentuk domain elips	56
Gambar 4.21 Himpunan <i>fuzzy</i> pada variabel TCPA dengan bentuk domain telur	57
Gambar 4.22 Himpunan <i>fuzzy</i> pada variabel risiko tabrakan (CR).....	59
Gambar 4.23 Diagram alir dari proses pengambilan keputusan dalam manuver penghindaran tabrakan kapal berdasarkan nilai risiko tabrakan	62
Gambar 4.24 Sistem koordinat kontrol kapal (Ota dkk., 2016).....	64
Gambar 4.25 Inferensi <i>yaw rate</i> (Ota dkk., 2016)	65
Gambar 4.26 Himpunan <i>fuzzy</i> untuk jarak kapal terhadap rute targetnya	65
Gambar 4.27 Himpunan <i>fuzzy</i> sudut putar arah kapal.....	66
Gambar 4.28 Himpunan <i>fuzzy</i> untuk deviasi sudut putar kapal	66
Gambar 5.1 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario A1 tanpa resolusi konflik	76
Gambar 5.2 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario A1 selama perhitungan berlangsung	76
Gambar 5.3 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario A1 selama perhitungan berlangsung	77

Gambar 5.4 Riwayat waktu penilai risiko tabrakan kapal skenario A1 selama perhitungan berlangsung	77
Gambar 5.5 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung	77
Gambar 5.6 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A1 dengan bentuk domain kapal elips.....	79
Gambar 5.7 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A1 dengan bentuk domain kapal lingkaran	81
Gambar 5.8 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A1 dengan bentuk domain kapal lingkaran	82
Gambar 5.9 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario A1 selama perhitungan berlangsung	83
Gambar 5.10 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario A1 selama perhitungan berlangsung	83
Gambar 5.11 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A1 selama perhitungan berlangsung.....	84
Gambar 5.12 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A1 selama perhitungan berlangsung	84
Gambar 5.13 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario A1 selama perhitungan berlangsung	84
Gambar 5.14 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A1 selama perhitungan berlangsung	85
Gambar 5.15 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario A1 selama perhitungan berlangsung	85
Gambar 5.16 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario A2 tanpa resolusi konflik	87
Gambar 5.17 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario A2 selama perhitungan berlangsung	88
Gambar 5.18 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario A1 selama perhitungan berlangsung	88

Gambar 5.19 Riwayat waktu penilain risiko tabrakan kapal skenario A1 selama perhitungan berlangsung	89
Gambar 5.20 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung	89
Gambar 5.21 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A2 dengan bentuk domain kapal elips.....	90
Gambar 5.22 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A2 dengan bentuk domain kapal lingkaran	91
Gambar 5.23 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A2 dengan bentuk domain kapal telur.....	93
Gambar 5.24 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario A2 selama perhitungan berlangsung	94
Gambar 5.25 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario A2 selama perhitungan berlangsung	94
Gambar 5.26 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A2	94
Gambar 5.27 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A2 selama perhitungan berlangsung	95
Gambar 5.28 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario A2 selama perhitungan berlangsung	95
Gambar 5.29 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A2 selama perhitungan berlangsung	95
Gambar 5.30 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario A2 selama perhitungan berlangsung	96
Gambar 5.31 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario A3 tanpa resolusi konflik	98
Gambar 5.32 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario A3 selama perhitungan berlangsung	99
Gambar 5.33 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario A1 selama perhitungan berlangsung	99

Gambar 5.34 Riwayat waktu penilain risiko tabrakan kapal skenario A1 selama perhitungan berlangsung	99
Gambar 5.35 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung	100
Gambar 5.36 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A3 dengan bentuk domain kapal elips.....	101
Gambar 5.37 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A3 dengan bentuk domain kapal lingkaran	102
Gambar 5.38 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A2 dengan bentuk domain kapal telur.....	103
Gambar 5.39 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario A3 selama perhitungan berlangsung	104
Gambar 5.40 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario A3 selama perhitungan berlangsung	104
Gambar 5.41 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A3 selama perhitungan berlangsung.....	105
Gambar 5.42 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A3 selama perhitungan berlangsung	105
Gambar 5.43 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario A3 selama perhitungan berlangsung	105
Gambar 5.44 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A3 selama perhitungan berlangsung	106
Gambar 5.45 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario A3 selama perhitungan berlangsung	106
Gambar 5.46 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario B1 tanpa resolusi konflik	109
Gambar 5.47 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario B1 selama perhitungan berlangsung	109
Gambar 5.48 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario B1 selama perhitungan berlangsung	110

Gambar 5.49 Riwayat waktu penilain risiko tabrakan kapal skenario B1 selama perhitungan berlangsung	110
Gambar 5.50 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario B1	110
Gambar 5.51 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B1 dengan bentuk domain kapal elips.....	112
Gambar 5.52 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B1 dengan bentuk domain kapal lingkaran	113
Gambar 5.53 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B1 dengan bentuk domain kapal telur.....	114
Gambar 5.54 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B1 selama perhitungan berlangsung	115
Gambar 5.55 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B1 selama perhitungan berlangsung	115
Gambar 5.56 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B1 selama perhitungan berlangsung.....	116
Gambar 5.57 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B1 selama perhitungan berlangsung	116
Gambar 5.58 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario B1 selama perhitungan berlangsung	116
Gambar 5.59 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B1 selama perhitungan berlangsung	117
Gambar 5.60 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario B1	117
Gambar 5.61 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario B2 tanpa resolusi konflik	119
Gambar 5.62 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario B2 selama perhitungan berlangsung	120
Gambar 5.63 Riwayat perubahan nilai TCPA kapal skenario B2 selama perhitungan berlangsung	120
Gambar 5.64 Riwayat waktu penilain risiko tabrakan kapal skenario B2 selama perhitungan berlangsung	120

Gambar 5.65 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario B2.....	121
Gambar 5.66 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B2 dengan bentuk domain kapal elips.....	122
Gambar 5.67 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B2 dengan bentuk domain kapal lingkaran	123
Gambar 5.68 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B2 dengan bentuk domain kapal telur.....	124
Gambar 5.69 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B2 selama perhitungan berlangsung	125
Gambar 5.70 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B2 selama perhitungan berlangsung	126
Gambar 5.71 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B2	126
Gambar 5.72 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B2 selama perhitungan berlangsung	126
Gambar 5.73 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario B2 selama perhitungan berlangsung	127
Gambar 5.74 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B2 selama perhitungan berlangsung	127
Gambar 5.75 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario B2 selama perhitungan berlangsung	127
Gambar 5.76 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario B3 tanpa resolusi konflik.....	130
Gambar 5.77 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario B3 selama perhitungan berlangsung	131
Gambar 5.78 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario B3 selama perhitungan berlangsung	131
Gambar 5.79 Riwayat waktu penilain risiko tabrakan kapal skenario B3 selama perhitungan berlangsung	131

Gambar 5.80 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario B3	132
Gambar 5.81 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B3 dengan bentuk domain kapal elips.....	133
Gambar 5.82 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B3 dengan bentuk domain kapal lingkaran	134
Gambar 5.83 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B2 dengan bentuk domain kapal telur.....	135
Gambar 5.84 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B3 selama perhitungan berlangsung	136
Gambar 5.85 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B3 selama perhitungan berlangsung	136
Gambar 5.86 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B3	137
Gambar 5.87 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B3 selama perhitungan berlangsung	137
Gambar 5.88 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario B3 selama perhitungan berlangsung	137
Gambar 5.89 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B3 selama perhitungan berlangsung	138
Gambar 5.90 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario B3 selama perhitungan berlangsung	138
Gambar 5.91 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario B4 tanpa resolusi konflik	140
Gambar 5.92 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario B4 selama perhitungan berlangsung	141
Gambar 5.93 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario B4 selama perhitungan berlangsung	141
Gambar 5.94 Riwayat waktu penilain risiko tabrakan kapal skenario B4 selama perhitungan berlangsung	142

Gambar 5.95 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario B4.....	142
Gambar 5.96 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B4 dengan bentuk domain kapal elips.....	143
Gambar 5.97 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B4 dengan bentuk domain kapal lingkaran	144
Gambar 5.98 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B4 dengan bentuk domain kapal telur.....	145
Gambar 5.99 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B4 selama perhitungan berlangsung	146
Gambar 5.100 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B4 selama perhitungan berlangsung	146
Gambar 5.101 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B4	147
Gambar 5.102 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B4 selama perhitungan berlangsung	147
Gambar 5.103 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario B4 selama perhitungan berlangsung	147
Gambar 5.104 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B4 selama perhitungan berlangsung	148
Gambar 5.105 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario B4 selama perhitungan berlangsung	148
Gambar 5.106 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario C1 tanpa resolusi konflik.....	151
Gambar 5.107 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario C1 selama perhitungan berlangsung	152
Gambar 5.108 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario C1 selama perhitungan berlangsung	152
Gambar 5.109 Riwayat waktu penilain risiko tabrakan kapal skenario C1 selama perhitungan berlangsung	152

Gambar 5.110 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario C1	153
Gambar 5.111 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario C1 dengan bentuk domain kapal elips.....	154
Gambar 5.112 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario C1 dengan bentuk domain kapal lingkaran	155
Gambar 5.113 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario C1 dengan bentuk domain kapal telur	156
Gambar 5.114 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario C1 selama perhitungan berlangsung	157
Gambar 5.115 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario C1 selama perhitungan berlangsung	157
Gambar 5.116 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung.....	157
Gambar 5.117 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario C1 selama perhitungan berlangsung	158
Gambar 5.118 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario C1 selama perhitungan berlangsung	158
Gambar 5.119 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario C1 selama perhitungan berlangsung	158
Gambar 5.120 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario C1 selama perhitungan berlangsung	159
Gambar 5.136 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario C2 tanpa resolusi konflik	161
Gambar 5.137 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario C2 selama perhitungan berlangsung	162
Gambar 5.138 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario C2 selama perhitungan berlangsung	162
Gambar 5.139 Riwayat waktu penilain risiko tabrakan kapal skenario C2 selama perhitungan berlangsung	162

Gambar 5.140 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario C2.....	163
Gambar 5.141 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario C2 dengan bentuk domain kapal elips.....	164
Gambar 5.142 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario C2 dengan bentuk domain kapal lingkaran.....	165
Gambar 5.143 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario C2 dengan bentuk domain kapal telur.....	166
Gambar 5.144 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung.....	167
Gambar 5.145 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung.....	167
Gambar 5.146 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung.....	167
Gambar 5.147 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung.....	168
Gambar 5.148 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung.....	168
Gambar 5.149 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung.....	168
Gambar 5.150 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung.....	169
Gambar 5.151 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario D1 tanpa resolusi konflik.....	171
Gambar 5.152 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario D1 selama perhitungan berlangsung.....	172
Gambar 5.153 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario D1 selama perhitungan berlangsung.....	173
Gambar 5.154 Riwayat waktu penilain risiko tabrakan kapal skenario D1 selama perhitungan berlangsung.....	173

Gambar 5.155 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario D1.....	173
Gambar 5.156 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario D1 dengan bentuk domain kapal elips.....	174
Gambar 5.157 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario D1 dengan bentuk domain kapal lingkaran	175
Gambar 5.158 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario D1 dengan bentuk domain kapal telur.....	176
Gambar 5.159 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario D1 selama perhitungan berlangsung.....	177
Gambar 5.160 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario D1 selama perhitungan berlangsung.....	178
Gambar 5.161 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario D1	178
Gambar 5.162 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario D1 selama perhitungan berlangsung	178
Gambar 5.163 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario D1 selama perhitungan berlangsung	179
Gambar 5.164 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario D1 selama perhitungan berlangsung	179
Gambar 5.165 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario D1 selama perhitungan berlangsung	179

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Peraturan <i>fuzzy inference</i> untuk kondisi berhadapan dan menyalip.....	59
Tabel 4.2 Peraturan <i>fuzzy inference</i> untuk kondisi menyebrang.....	60
Tabel 4.3 Penjelasan kondisi risiko tabrakan	61
Tabel 4.4 Peraturan <i>fuzzy inference</i> untuk mendapatkan parameter kontrol kemudi	67
Tabel 4.5 Variabel parameter Kr untuk $r' d$	67
Tabel 4.6 Peraturan <i>fuzzy inference</i> untuk mendapatkan nilai sudut kemudi.....	68
Tabel 4.7 Variabel perubahan sudut kemudi	68
Tabel 5.1 Skenario dimensi kapal	71
Tabel 5.2 Skenario kondisi kapal	71
Tabel 5.3 Skenario yang digunakan untuk simulasi.....	71
Tabel 5.4 Ukuran dan kondisi kapal model skenario A	72
Tabel 5.5 Ukuran dan kondisi kapal model skenario B	72
Tabel 5.6 Ukuran dan kondisi kapal model skenario C	73
Tabel 5.7 Ukuran dan kondisi kapal model skenario D	74
Tabel 5.8 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario A1 terhadap bentuk domain kapal.....	85
Tabel 5.9 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario A2 terhadap bentuk domain kapal.....	96
Tabel 5.10 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario A2 terhadap bentuk domain kapal.....	96
Tabel 5.11 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario A3 terhadap bentuk domain kapal.....	106
Tabel 5.12 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario A3 terhadap bentuk domain kapal.....	107
Tabel 5.13 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario B1 terhadap bentuk domain kapal.....	117

Tabel 5.14 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario B1 terhadap bentuk domain kapal.....	118
Tabel 5.15 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario B2 terhadap bentuk domain kapal.....	128
Tabel 5.16 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario B2 terhadap bentuk domain kapal.....	128
Tabel 5.17 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario B3 terhadap bentuk domain kapal.....	138
Tabel 5.18 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario B3 terhadap bentuk domain kapal.....	139
Tabel 5.19 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario B4 terhadap bentuk domain kapal.....	148
Tabel 5.20 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario B4 terhadap bentuk domain kapal.....	149
Tabel 5.21 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario C1 terhadap bentuk domain kapal.....	159
Tabel 5.22 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario C1 terhadap bentuk domain kapal.....	160
Tabel 5.25 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario C2 terhadap bentuk domain kapal.....	169
Tabel 5.26 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario C2 terhadap bentuk domain kapal.....	170
Tabel 5.27 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario D1 terhadap bentuk domain kapal.....	180
Tabel 5.28 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario D1 terhadap bentuk domain kapal.....	180

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Transportasi maritim memiliki peranan penting dalam menggerakkan perekonomian dunia (Gan dkk., 2023). Karena adanya peningkatan permintaan transportasi maritim untuk berdagang, industri perkapalan mengalami perkembangan pesat (Huang dkk., 2023). Namun, dengan meningkatnya transportasi maritim di daerah pelabuhan dengan kepadatan kapal yang tinggi, lebih banyak kecelakaan terjadi (J. Shi dkk., 2024). Salah satu kecelakaan yang menyebabkan kerusakan serius dan korban jiwa adalah tabrakan kapal (Liu dkk., 2023). Antara tahun 1978 dan 2008, sebanyak 46,23% kecelakaan laut di seluruh dunia disebabkan oleh tabrakan kapal (Marino dkk., 2023).

Di Indonesia, berdasarkan data kecelakaan kapal yang diambil dari Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) dari tahun 2003 - 2019 sebanyak 120 kejadian kecelakaan kapal yang tercatat oleh KNKT, ada 21 kasus tabrakan kapal yang terjadi (Saputra, 2021). Tabrakan kapal telah menjadi faktor penting yang mengancam keselamatan navigasi kapal. Menurut statistik, lebih dari 80% tabrakan disebabkan oleh perilaku pengoperasian yang berbahaya (*human errors*) (He dkk., 2017). Kemampuan menghindari tabrakan kapal sebagai peringatan dan arahan untuk awak kapal menjadi sangat penting seiring dengan realitas bahwa 89-96 % kecelakaan di laut yang terjadi adalah tabrakan kapal (Shi dkk., 2023). Oleh karena itu, awak kapal yang bertugas jaga berperan penting dalam penghindaran tabrakan, mereka diharuskan untuk mendapatkan informasi untuk menilai risiko tabrakan, sebagai dasar untuk merencanakan rute penghindaran yang dinilai sesuai dengan kondisi kapal, serta untuk memutuskan rute yang aman (Song dkk., 2023)

Dalam beberapa tahun terakhir, riset tentang sistem penghindaran tabrakan kapal untuk mendukung dan meningkatkan keselamatan navigasi kapal telah mulai dikembangkan. Sistem penghindaran tabrakan kapal dianggap sebagai elemen kunci dari kapal cerdas untuk meningkatkan keselamatan navigasi kapal (Choe &

Furukawa, 2019). Riset tentang sistem penghindaran tabrakan kapal sangat penting dilakukan untuk memitigasi risiko tabrakan kapal serta meringankan beban awak kapal. Sebuah kapal cerdas yang terintegrasi dengan sistem penghindaran tabrakan kapal menjadi alat yang sangat berguna dalam pengembangan keselamatan navigasi (He dkk., 2017). Sistem penghindaran tabrakan kapal dirancang untuk mendukung pengambilan keputusan bagi para awak kapal dan mengurangi kesalahan manusia selama proses penghindaran tabrakan (Perera dkk., 2012). Dalam pengembangan sistem penghindaran tabrakan kapal, evaluasi risiko tabrakan menjadi hal yang sangat dasar dan penting.

Algoritma evaluasi risiko tabrakan menjadi modul fundamental dalam sistem penghindaran tabrakan kapal untuk memprediksi potensi dan risiko terjadinya tabrakan kapal yang didasarkan pada prediksi perubahan pergerakan (posisi dan arah hadap) kapal baik kapal sendiri (*own ship*) atau kapal lawan (*target ship*). Penentuan risiko tabrakan kapal (*collision risk*) dalam modul deteksi konflik sangat penting dan esensial sebagai dasar penentuan status/kondisi kapal apakah dalam kondisi aman atau kondisi berpotensi bahaya serta sebagai dasar pengambilan keputusan dalam menghindari tabrakan kapal. Di samping itu, evaluasi risiko tabrakan kapal juga digunakan untuk melakukan update evaluasi risiko tabrakan saat kapal menentukan penentuan keputusan ulang (*re-solution*) atau pada saat dalam kondisi rute menghindari saat menghindari tabrakan kapal (Huang dkk., 2020). Beberapa metode untuk mendapatkan nilai risiko tabrakan yang digunakan terdapat dua kelompok model utama dalam permodelan numerik risiko tabrakan yaitu *collision risk index (CRI)* dan *warning rings by ship domain* (Y. Huang dkk., 2020). Dalam praktiknya dengan memanfaatkan dua indeks untuk mengukur risiko, yaitu *Distance of Closest Point of Approach (DCPA)* and *Time to Closest Point of Approach (TCPA)*, dengan mempertimbangkan panjang kapal, kecepatan, jarak antara kapal, dan sudut datang kapal sasaran (Pyo Rhee & Lee, 2001). Sementara itu, kategori metode *warning rings by ship domain* pada umumnya memvisualisasikan risiko tabrakan dengan serangkaian cincin peringatan yang mengelilingi kapal sendiri. Saat kapal lawan memasuki atau akan memasuki wilayah ini, alarm tabrakan dipicu. Penetapan cincin peringatan terkait dengan konsep yang disebut domain kapal, yaitu wilayah yang mengelilingi satu kapal

untuk menghindari rintangan (Fuji & Tanaka, 1971). Studi dan permodelan algoritma risiko tabrakan yang sesuai dan memiliki tingkat akurasi yang baik sangat diperlukan dalam pengembangan algoritma penilaian dan evaluasi risiko tabrakan kapal.

Maka dari itu dilakukan simulasi penghindaran dini tabrakan kapal ini. Dengan menggunakan pendekatan metode fuzzy inference, untuk mendapatkan nilai *risk collision index* (CRI). Pengukuran dilakukan dengan memanfaatkan jarak dan waktu pertemuan antara kedua kapal, serta mempertimbangkan domain kapal. Domain kapal sebagai virtualisasi zona aman kapal, untuk membantu dalam memberikan informasi pasti zona aman kapal. Pada penelitian sebelumnya, penggabungan dengan domain kapal belum banyak dilakukan, karena metode perhitungan domain kapal biasanya berdiri sendiri. Penelitian ini berupaya mengintegrasikan pendekatan tersebut untuk meningkatkan akurasi penilaian risiko tabrakan.

1.2. Perumusan Masalah

Dalam melakukan penelitian tesis, perlu dibutuhkan perumusan masalah untuk menjadi sebuah ide pokok dari penelitian tesis. Perumusan masalah penelitian tesis adalah sebagian berikut:

- 1) Bagaimana mengembangkan program simulasi penghindaran dini tabrakan kapal ?
- 2) Bagaimana mengembangkan algoritma penghindaran tabrakan kapal dengan metode *fuzzy inference* yang berdasarkan pada nilai *collision risk index*?
- 3) Bagaimana menjelaskan hubungan antara risiko tabrakan dengan sudut kemudi kapal ?
- 4) Bagaimana mendemonstrasikan hasil simulasi penghindaran dini tabrakan kapal ?

1.3. Tujuan

Tujuan dilakukan untuk menjawab dari perumusan masalah, sebagai pencapaian penelitian tesis. Tujuan penelitian tesis adalah sebagian berikut:

- 1) Mengembangkan program simulasi penghindaran dini tabrakan kapal,

- 2) Mengembangkan sebuah algoritma penghindaran tabrakan kapal dengan penghindaran tabrakan kapal dengan metode *fuzzy inference* yang berdasarkan pada nilai *collision risk index*,
- 3) Mencari tahu faktor perubahan sudut kemudi kapal terhadap nilai risiko tabrakan,
- 4) Melakukan simulasi simulasi pencegahan tabrakan kapal dan mendemonstrasikan hasilnya untuk mengevaluasi efektivitas algoritma dan metode penilaian risiko yang dikembangkan.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah diberikan untuk penelitian tesis lebih tefokus dan topik penelitian agar sesuai dengan tujuan yang telah ditentukan. Batasan masalah penelitian tesis adalah sebagian berikut:

- 1) Simulasi dilakukan pada kapal model,
- 2) Simulasi mengabaikan kondisi cuaca,
- 3) Simulasi dilakukan dalam kondisi air tenang,
- 4) Penelitian ini berfokus pada simulasi penghindaran tabrakan kapal dalam kondisi perairan terbatas (*restricted waterway*) seperti cannal, jalur masuk pelabuhan, dll,
- 5) Dalam simulasi, kapal dipertimbangkan mempertahankan kecepatannya karena masih dalam zona aman dalam melakukan penghindaran tabrakan,
- 6) Pemodelan penentuan aksi penghindaran menggunakan pengembangan sebelumnya yang telah ditentukan (Ota dkk., 2016).

1.5. Manfaat

Tujuan lain dari penelitian tesis ini adalah dapat bermanfaat untuk kemajuan penelitian di Indonesia. Manfaat penelitian tesis adalah sebagian berikut:

- 1) Membantu mengembangkan sebuah perangkat lunak yang dapat membantu kru kapal dalam mengambil keputusan untuk penghindaran dini tabrakan kapal,

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

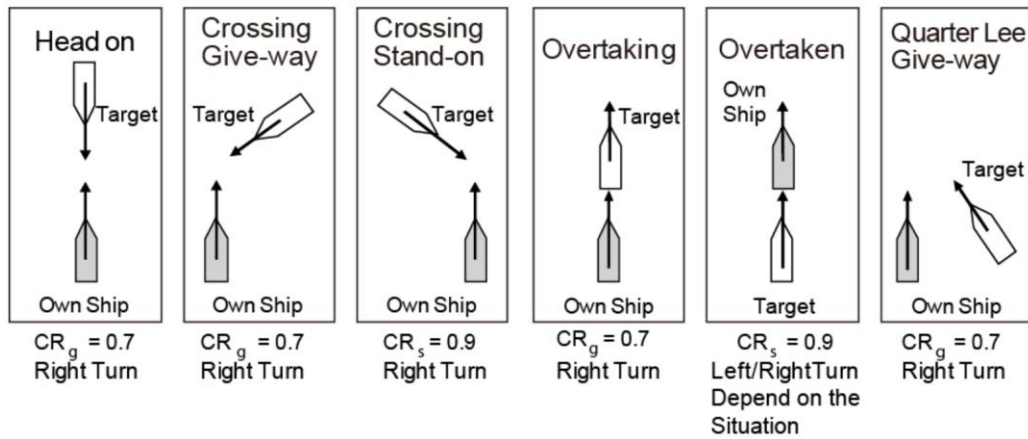
Studi ini terkait dengan topik penghindaran tabrakan kapal. Dalam mengembangkan simulasi penghindaran dini tabrakan kapal dengan metode *fuzzy logic* berbasis nilai *risk collision index* (CRI), penting untuk memperhatikan model atau perhitungan untuk mendapatkan nilai risiko tabrakan. Ini berguna untuk mengevaluasi tabrakan kapal yang terjadi. Banyak metode telah dikembangkan oleh penelitian sebelumnya. Pada Bab 2 ini, beberapa metode yang diusulkan dalam penelitian sebelumnya akan dirangkum.

2.1. Kajian Pustaka

Dalam melakukan perhitungan evaluasi penghindaran tabrakan kapal ada tiga metode yang telah diusulkan pada penelitian sebelumnya yaitu risiko tabrakan, pendekatan berbasis aturan, dan perkiraan daerah tabrakan dan domain kapal (Sawada dkk., 2024).

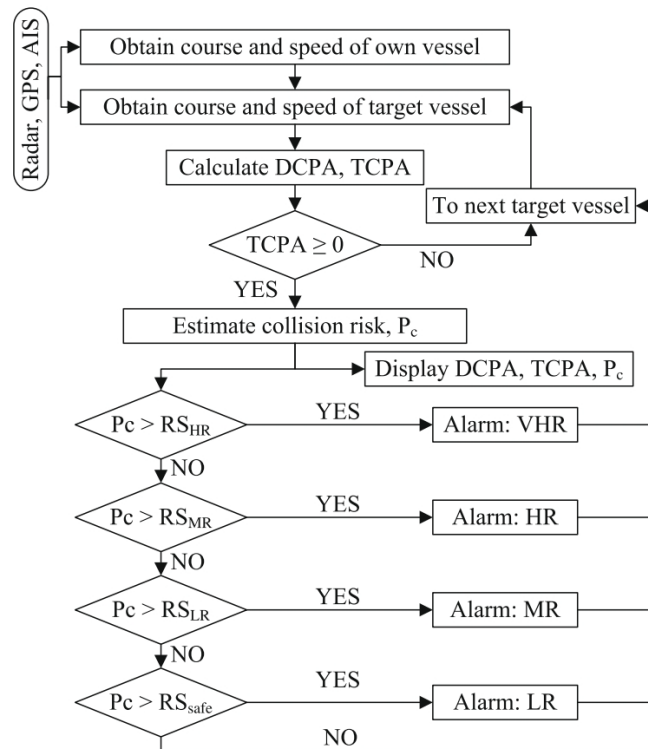
2.1.1. Perhitungan Nilai *collision Risk Index*

Salah satu penelitian pertama kali untuk memperhitungkan risiko tabrakan dilakukan dengan menggunakan simulator manuver kapal dan mengusulkan indeks *Collision Judgement* (CJ) (Kobayashi & Endoh, 1976). Variabel yang digunakan dalam indeks CJ, sebagai berikut: DCPA, TCPA, jarak antara kedua kapal, dan sudut *drift*. Perhitungan nilai *collision risk* (CR) dengan *fuzzy logic* berbasis DCPA dan TCPA telah dilakukan oleh Hasegawa dkk. (2012). Dalam penelitiannya, ada tiga himpunan fuzzy yang digunakan, yaitu: DCPA, TCPA, dan CR. Penilaian CR yang dilakukan menggunakan nilai 0 hingga 1,2 dengan kenaikan sebesar 0,2. Pengambilan keputusan penghindaran dapat dilihat pada Gambar 2.1, dengan menggunakan nilai CR sebagai awal pengambilan keputusan. Keputusan diambil ketika nilai CR sudah berada pada 0,7 dan 0,9, dan sistem akan diperintahkan untuk masuk kedalam *avoiding mode*. Implementasi dari penelitian yang dilakukan oleh Hasegawa dkk. (2012), digunakan untuk "*Bridge Simulator for Navigational Risk Analysis Research*" pada *ship handling simulator of National Maritime Research Institute* (NMRI), Tokyo, Jepang.



Gambar 2.1 Pengambilan keputusan penghindaran tabrakan kapal dengan berbagai macam kondisi pertemuan antar kapal (Hasegawa dkk., 2012)

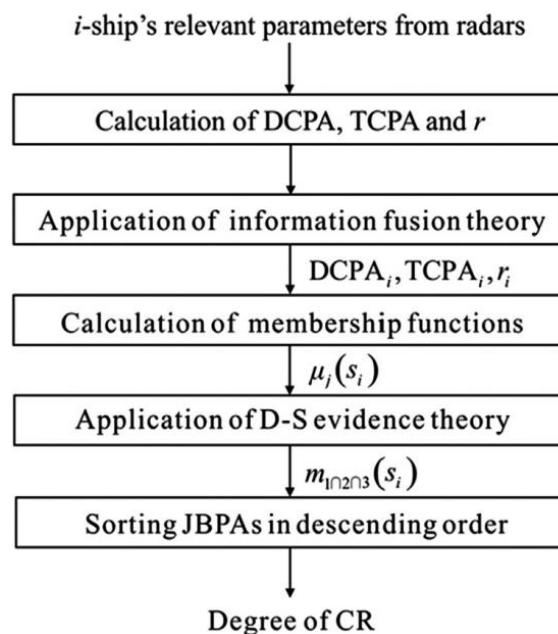
Pendekatan *probit regression* untuk DCPA dan TCPA telah dilakukan oleh Chin & Debnath (2009). Penilaian risiko tabrakan dibagi menjadi lima, yaitu: *safe*, *low*, *moderate*, *high*, dan *very high*. Penilaian tersebut berdsarakan dari batasan *threshold value* (τ_m), contoh: if $-\infty \leq y_i^* \leq \tau_1$ [*Very High Risk (VHR)*], yang dimana *threshold value* didapatkan dari hubungan antara DCPA dan TCPA dan *threshold value* ini merupakan estimasi dari CR.



Gambar 2.2 Diagram alir simulasi penghindaran tabrakan kapal berdsarakan penilain DCPA dan TCPA (Chin & Debnath, 2009)

Penelitian Chin & Debnath (2009) mengusulkan sebuah diagram alir sistem penghindaran tabrakan kapal yang ditampilkan pada Gambar 2.2. Dengan perhitungan estimasi CR yang didapatkan berdasarkan DCPA dan TCPA, diberikan evaluasi yang sesuai dengan hasilnya. Dalam penelitian ini, tindakan yang diambil adalah memberikan alarm sesuai dengan nilai CR yang dihasilkan.

Telah dilakukan beberapa peningkatan untuk mendapatkan nilai CR. Li & Pang (2013) menambahkan jarak relatif antar kedua kapal. Penggabungan antara DCPA, TCPA, dan jarak relatif antar kedua kapal dilakukan untuk mendapatkan nilai CR. Diagram alir dari penelitian Li & Pang (2013) dapat dilihat pada Gambar 2.3, bahwa keluaran dari penelitian tersebut hanya menghasilkan nilai CR.



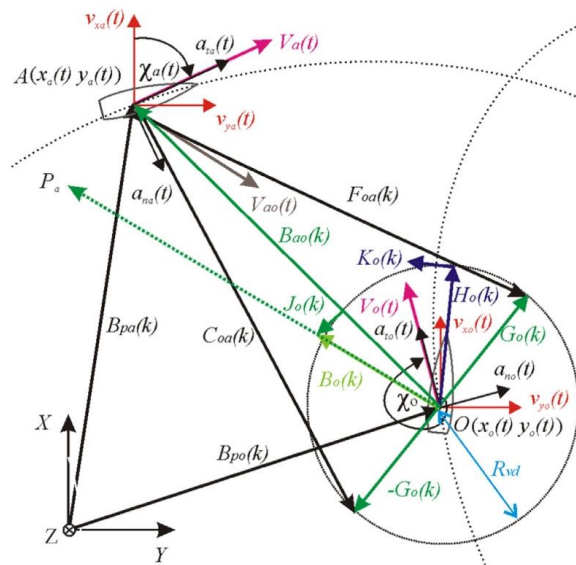
Gambar 2.3 Diagram alir penilaian CR dengan parameter DCPA, TCPA, dan jarak relatif antar kedua kapal (Li & Pang, 2013)

Ahn dkk. (2012) menambahkan pengaruh bentuk domain untuk mendapatkan keputusan penghindaran tabrakan. Nilai CR diperoleh dengan mengintegrasikan fuzzy logic dengan fungsi keanggotaan DCPA dan TCPA. Domain kapal digunakan sebagai ukuran dan ruang gerak kapal dalam menentukan jarak penghindaran yang diambil. Dengan demikian, nilai CR hanya diperoleh dari hubungan DCPA dan TCPA melalui perhitungan *Adaptive Network-based Fuzzy Inference System* (ANFIS).

Lisowski (2002) mengembangkan metode penilaian risiko tabrakan dengan menambahkan faktor jarak aman antara kedua kapal pada evaluasi CR. Selain menggunakan parameter DCPA, TCPA, dan jarak relatif, metode ini memasukkan jarak aman (D_{jmin}) yang diperlukan untuk menghindari tabrakan. Dengan pendekatan ini, penilaian risiko tidak hanya mempertimbangkan kedekatan dan waktu relatif antar kapal, tetapi juga menilai sejauh mana jarak aman dipenuhi, sehingga memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai potensi risiko tabrakan dan kebutuhan untuk manuver evasi.

Ren dkk. (2011) menawarkan penilaian CR berdasarkan metode fuzzy logic. Sama seperti penelitian sebelumnya yang telah dilakukan dengan menggunakan DCPA dan TCPA sebagai himpunan fuzzy, namun ada penambahan parameter sudut pertemuan dengan menggunakan AIS. Penilaian dilakukan dengan prinsip bahwa CR meningkat secara eksponensial seiring dengan penurunan DCPA dan TCPA. Akan tetapi, dalam penelitian ini belum diberikan sebuah metode penghindaran, melainkan hanya perhitungan CR.

Perera & Guedes Soares (2015) penilaian CR yang dilakukan tanpa menggunakan DCPA dan TCPA. DCPA dan TCPA digantikan dengan beberapa variabel yang dapat diamati, yaitu: jarak relatif (d_{ij}), kecepatan relatif (v_{ij}), dll., dengan nilai CR yang digunakan 0 hingga 1.



Gambar 2.4 Parameter yang digunakan untuk mendapatkan nilai CR pada situasi bertabrakan (Perera & Guedes Soares, 2015)

Dikarenakan tidak menggunakan pendekatan yang umum, diperlukan banyak parameter yang dipertimbangkan yang dapat dilihat pada Gambar 2.4. Pada penelitian ini lebih berfokus deteksi bahaya berdasarkan CR dan bagaimana kapal menghadapi kondisi tersebut.

2.1.2. Pendekatan Berbasis Aturan

Metode perhitungan dengan pendekatan berbasis aturan, dilakukan dengan melakukan pendekatan berdasarkan peraturan *Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea* (COLREGs). Pertama ada metode verifikasi berbasis simulasi dengan penalti skor COLREGs (Pedersen dkk., 2019) dan metode evaluasi kuantitatif aturan COLREGs (Woerner dkk., 2016).

Selain pendekatan berbasis aturan berdasarkan dari COLREGs, Huang dkk. (2020) mengusulkan metode untuk menilai apakah terjadi/tidak terjadinya tabrakan atau probabilitas terjadinya tabrakan pada sebuah skenario yang telah dibuat. Pertama adalah aturan kriteria tabrakan biner, yang telah dilakukan oleh Shah dkk. (2016). Dengan menggunakan DCPA sebagai kriteria utama dan asumsi bahwa kapal sasaran memiliki kecepatan yang konstan, aturan yang diberikan adalah: jika nilai DCPA lebih kecil dari jarak aman yang telah ditetapkan, maka tabrakan akan terjadi. Jika tidak, maka kapal dianggap aman. Kedua adalah probabilitas tabrakan, yang telah dilakukan oleh Park & Kim (2017). Perhitungan probabilitas tabrakan dilakukan dengan menggunakan model semianalitik, di mana aliran probabilitas dipisahkan menjadi komponen difusi dan drift. Probabilitas ini kemudian diintegrasikan untuk mengukur risiko tabrakan keseluruhan, berdasarkan peraturan COLREGs yang telah dibuat.

Hermawan dkk. (2023) telah melakukan penelitian mengenai penghindaran tabrakan kapal dengan menggunakan fuzzy logic untuk menentukan peraturan perubahan kemudi kapal berdasarkan laju sudut putar kapal (*yaw rate*). Dengan menggabungkan parameter DCPA, TCPA, dan domain kapal serta bantuan perhitungan penghindaran berdasarkan *track keeping error*, penelitian ini lebih berfokus pada pendekatan numerik sederhana untuk algoritma sistem penghindaran tabrakan otomatis.

2.1.3. Perkiraan Daerah Tabrakan dan Domain Kapal

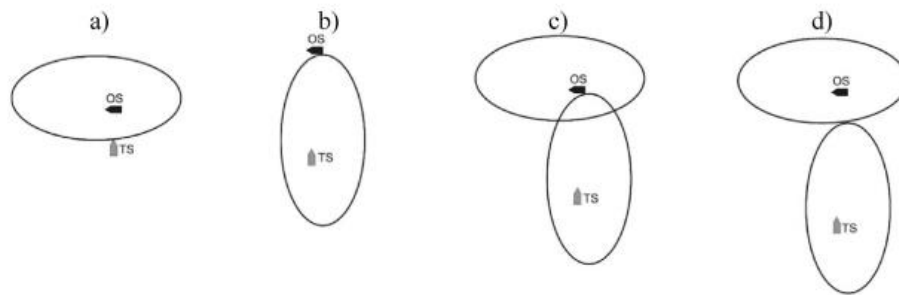
Para peneliti menentukan atau mengusulkan dimensi dari model domain kapal masing-masing. Namun perlu dicatat di sini bahwa dimensi-dimensi ini dapat menghasilkan perbedaan ruang antara kapal-kapal, tergantung pada definisi dari domain kapal dan kriteria keamanan yang terkait. Oleh karena itu, tiga definisi klasik yang dijelaskan di bawah ini dan interpretasi serta implikasinya akan dibahas nanti dalam bagian ini.

Pertama kali istilah domain kapal diperkenalkan oleh Fujii & Tanaka (1971), di mana domain efektif didefinisikan sebagai: 'area dua dimensi yang mengelilingi kapal yang harus dihindari oleh kapal lain - dapat dianggap sebagai area pengelakan'. Dimensi batas domain efektif didefinisikan sebagai jarak dari kapal pusat di mana kerapatan kapal lain mencapai maksimum lokal.

Definisi serupa dapat ditemukan dalam dua karya berikutnya. Menurut Goodwin (1975), domain adalah 'area efektif di sekitar kapal yang ingin dijaga bebas dari kapal lain dan hambatan tetap'. Dalam Coldwell (1983), domain didefinisikan sebagai 'area efektif di sekitar kapal yang seorang navigator biasa jaga bebas dari kapal lain'. Perbedaan yang jelas adalah pada definisi terakhir, hasil daripada preferensi yang ditekankan.

Secara umum, definisi-definisi di atas saling berkaitan, namun diinterpretasikan dengan berbagai cara oleh berbagai penulis, yang mengarah pada penerapan kriteria keamanan yang berbeda dalam penelitian mereka. Dalam praktiknya, penggunaan domain kapal dalam situasi pertemuan dapat dikombinasikan dengan salah satu dari empat kriteria keamanan berikut, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.5, dengan penjelasan sebagai berikut:

- 1) Domain kapal sendiri (OS) tidak boleh dilanggar oleh kapal sasaran (TS).
- 2) Domain kapal sasaran (TS) tidak boleh dilanggar oleh kapal sendiri (OS).
- 3) Tidak ada domain kapal yang boleh dilanggar (konjungsi dari dua kondisi pertama).
- 4) Domain kapal tidak boleh tumpang tindih - area mereka harus tetap saling eksklusif (jarak efektif akan menjadi jumlah jarak yang dihasilkan dari masing-masing domain).



Gambar 2.5 Empat kriteria domain area (Szlapczynski & Szlapczynska, 2017)

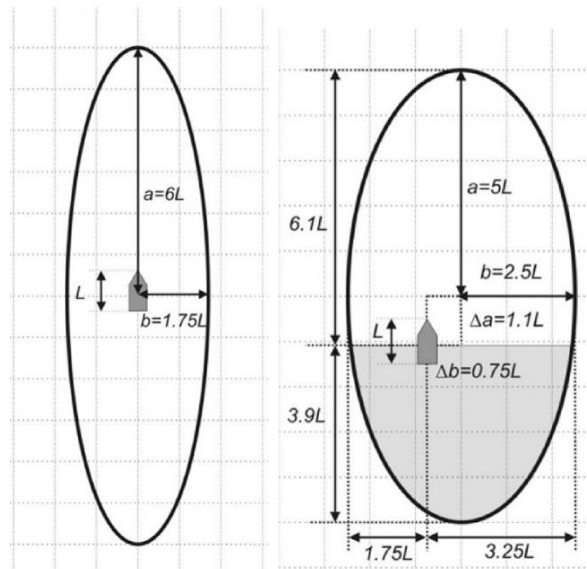
Masing-masing kriteria ini direpresentasikan oleh beberapa peneliti. Definisi Fuji menyiratkan bahwa kapal yang memberi jalan harus berusaha untuk tidak melanggar domain kapal yang mengutamakan. Menurut Coldwell, seorang navigator menjaga domain kapalnya sendiri daripada kapal yang menjadi sasaran. Mengenai Goodwin, istilah "kapal pusat" yang digunakan dalam makalah tersebut tidak secara eksplisit mengindikasikan apakah kapal harus menghindari melanggar domainnya sendiri atau domain kapal yang menjadi sasaran. Namun, dapat dikemukakan bahwa jika definisi tersebut berlaku untuk setiap navigator, maka tidak ada domain yang boleh dilanggar selama pertemuan dua kapal, yang mendukung kriteria ketiga yang tercantum. Kriteria keempat (domain tidak tumpang tindih) baru-baru ini digunakan dalam. Perbedaan praktis antara keempat kriteria tersebut sangat penting dan akan dianalisis secara detail lebih lanjut dalam teks. Secara umum, dampaknya sama pentingnya dengan ukuran dan bentuk domain, karena hal itu sangat mempengaruhi ruang yang efektif antara kapal-kapal. Dua kriteria pertama dapat dianggap asimetris - meskipun menggunakan domain yang sama, mereka dapat menghasilkan estimasi keamanan yang berbeda, tergantung pada kapal mana yang melakukan penilaian. Kedua kriteria lainnya bersifat simetris - selama menggunakan domain yang sama, penilaian situasi akan sama terlepas dari sudut pandang. Dari keempat kriteria tersebut, kriteria terakhir adalah yang paling kuat dan perlu dinyatakan dengan jelas di sini bahwa itu tidak sesuai dengan definisi domain mana pun yang diberikan di atas. Menurut definisi-definisi ini, domain adalah area yang tetap atau harus tetap bebas dari kapal lain, bukan domain dari domain kapal lain (yang akan berarti definisi rekursif dan tidak intuitif bagi seorang navigator). Sayangnya, keempat kriteria tersebut, termasuk

yang terakhir, digunakan oleh para peneliti, yang kemudian membandingkan dimensi domain mereka dengan domain lain, yang tidak berarti dalam kasus kriteria yang berbeda. Tergantung pada kriteria mana dari keempat kriteria yang tercantum di atas yang akan diterapkan, jarak minimum yang berbeda akan dipertahankan, bahkan jika menggunakan model domain yang sama. Dalam praktiknya, perbedaan dalam jarak akibat penerapan kriteria yang berbeda akan sebanding dan kadang-kadang bahkan lebih besar dari perbedaan dalam dimensi domain menurut penulis yang berbeda. Rincian lebih lanjut disediakan di bawah ini. Untuk memudahkan analisis, mari kita asumsikan bentuk dan ukuran domain kapal menurut Coldwell, yang dimensinya (kali lipat panjang kapal yang diberikan sebagai L) diberikan dalam Gambar 2.6. Coldwell menentukan nilai dimensi yang berbeda untuk pertemuan (hadap-hadapan dan lintas) dan penyusulan Karena domain "pertemuan" nya tidak memiliki sektor buritan (yang dapat dimengerti dalam kasus pertemuan hadap-hadapan, tetapi bermasalah untuk pertemuan lintas), domain "pertemuan" telah disesuaikan untuk eksperimen sesuai dengan tren umum yang diidentifikasi oleh sebagian besar peneliti (sektor buritan lebih kecil daripada sektor haluan), seperti yang ditunjukkan dalam. Dengan demikian, dimensi domain adalah sebagai berikut:

- 1) Untuk pertemuan penyusulan: sumbu semi mayor - $6L$, sumbu semi minor - $1,75L$.
- 2) Untuk pertemuan hadap-hadapan dan lintas: sumbu semi mayor - $5L$, sumbu semi minor - $2,5L$.

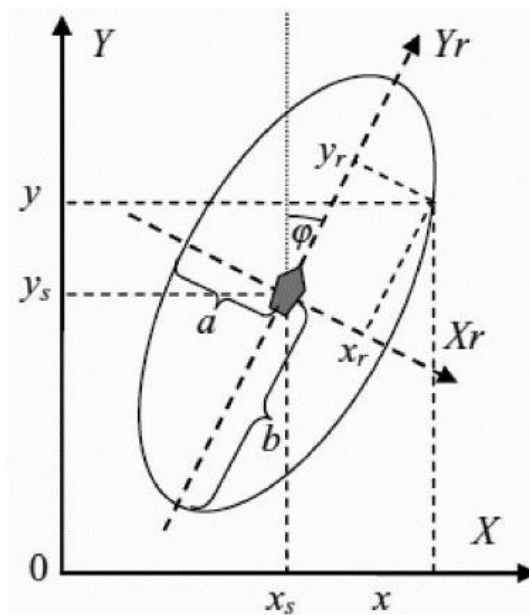
Selain itu, untuk pertemuan hadap-hadapan dan lintas, kapal dipindahkan dari pusat elips ke arah pelabuhan sejauh $0,75L$ dan ke arah buritan sejauh $1,1L$, dengan jarak aman hasilnya untuk masing-masing sektor sebagai berikut:

- 1) Sektor haluan - $6,1L$,
- 2) Sektor buritan - $3,9L$,
- 3) Sektor pelabuhan - $1,75L$,
- 4) Sektor starboard - $3,25L$.

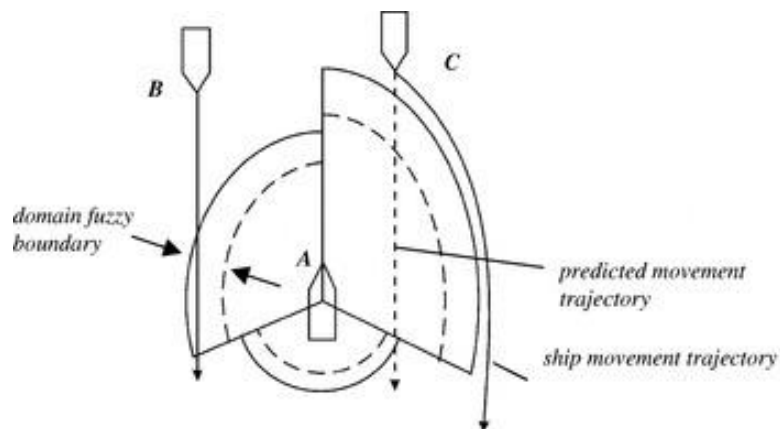


Gambar 2.6 Coldwell domain kapal (Coldwell, 1983)

Selain 2 wilayah domain tersebut ada beberapa lagi jenis wilayah domain kapal yang sering digunakan antara lainnya adalah wilayah domain yang dibuat oleh Fujii dan Goodwin. Wilayah domain yang mereka masih digunakan hingga penilitan sekarang karena dianggap paling sesuai dengan kondisi sekarang, dan sekarang sudah mulai ada beberapa perkembangan wilayah domain dari wilayah domain yang dibuat oleh Fujii dan Goodwin seperti kedua contoh wilayah domain diatas.



Gambar 2.7 Fujii's domain area (Fujii & Tanaka, 1971)



Gambar 2.8 Goodwin's domain area (Goodwin, 1975)

2.1.4. Keterbaruan Penelitian

Keterbaruan penelitian tesis ini adalah mengintegrasikan domain kapal dengan DCPA dan TCPA untuk mendapatkan nilai CR. Metode fuzzy logic digunakan untuk menentukan nilai CR. Hubungan antara DCPA dan TCPA digunakan sebagai masukan untuk inferensi fuzzy guna menghasilkan nilai CR. Selain itu, domain kapal dalam penelitian ini memiliki tiga variasi bentuk: elips, lingkaran, dan telur. Nilai CR nantinya akan digunakan sebagai parameter untuk melakukan penghindaran tabrakan kapal. Bentuk domain kapal juga mempengaruhi proses pengambilan keputusan penghindaran, karena beberapa bentuk domain berkaitan dengan variabel-variabel penghindaran seperti ukuran kapal, kecepatan kapal, dan kemampuan manuver.

2.2. Dasar teori

2.2.1. Manuver Kapal

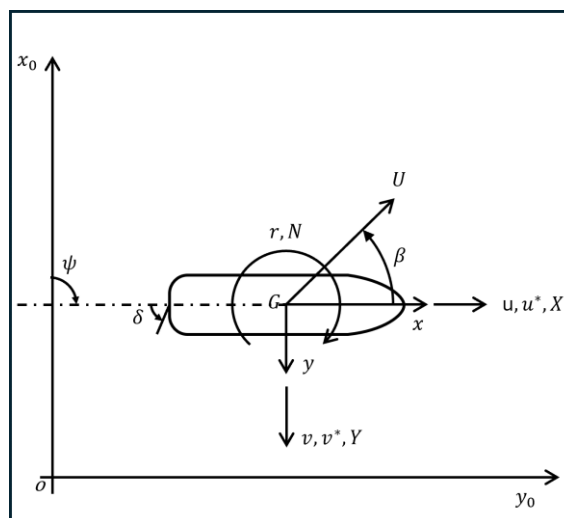
Kemampuan manuver kapal merujuk pada kemampuan yang melekat pada sebuah kapal untuk mengubah arah atau rutenya. Ini adalah aspek penting yang harus dipahami oleh seorang *Naval Architect*, bersama dengan berbagai aspek lain seperti desain struktur, mesin, tenaga penggerak, stabilitas, dan *seakeeping*. Hal ini dikarenakan kapal harus mampu melaksanakan pelayaran yang panjang dengan menghadapi berbagai kondisi cuaca yang berbeda. Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa kinerja kapal selama pelayaran tidak terabaikan. Untuk mengendalikan gerakan kapal di laut, kemudi (*kemudi*) dan berbagai kontrol permukaan lainnya disediakan. Sebuah manuver yang baik membutuhkan interaksi

yang tepat antara *hidrodinamika control surface* dan struktur kapal secara keseluruhan. Dalam konteks ini, semua jenis manuver kapal dipicu oleh penerapan gaya kemudi ke arah yang diinginkan.

Dengan memahami faktor-faktor yang mempengaruhi kemampuan manuver kapal, seorang *Naval Architect* dapat merancang kapal yang memiliki performa manuver yang optimal. Dalam proses perancangan, penting untuk mempertimbangkan berbagai aspek seperti bentuk dan ukuran kapal, posisi dan ukuran kemudi, serta pengaruh dinamika air terhadap kapal. Secara keseluruhan, kemampuan manuver kapal merupakan elemen penting dalam perancangan kapal yang memungkinkan kapal untuk bergerak dengan efektif dan aman dalam berbagai situasi pelayaran. Dengan memastikan kemampuan manuver yang baik, kapal dapat mengatasi tantangan yang mungkin timbul selama pelayaran dan memastikan keberhasilan operasi maritim.

2.2.2. Persamaan Gerak Manuver Kapal

Dinamika gerak kapal dalam bidang horizontal dapat dijelaskan menggunakan tiga derajat kebebasan gerakan *surge*, *sway*, dan *yaw*. Persamaan gerak kapal dapat dirumuskan dengan menggunakan sistem koordinat yang mempertimbangkan pengaruh gangguan lingkungan seperti arus dan angin. Pengaruh gangguan ini dapat diwakili oleh arah dan kecepatan arus dan angin (Choe & Furukawa, 2019). Sistem koordinat kapal digambarkan dalam Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Sistem koordinat pada kapal (Choe & Furukawa, 2019)

Pada Gambar 2.9, $o - x_0y_0$ menunjukkan sistem koordinat tetap bumi (*earth-fixed coordinate system*), sedangkan $G - xy$ merupakan sistem koordinat tetap pada badan kapal dengan G adalah pusat gravitasi kapal sebagai titik asal. Sistem koordinat tetap pada kapal (*body-fixed coordinate system*) dapat berubah mengikuti gerak kapal. Simbol ψ menunjukkan sudut datang kapal (*ship heading angle*). Simbol α dan v menunjukkan sudut/arah datang arus dan angin. Sedangkan V_c dan V_w adalah kecepatan arus dan kecepatan angin.

Dengan menggunakan sistem koordinat yang ditunjukkan pada Gambar 2.9, maka persamaan gerak kapal terhadap sistem koordinat benda tetap (*body-fixed coordinate system*) dapat ditunjukkan pada persamaan (2.1) - (2.3).

$$m(\dot{u} - v\dot{\psi}) = X, \quad (2.1)$$

$$m(\dot{v} + u\dot{\psi}) = Y, \quad (2.2)$$

$$I_{zz}\ddot{\psi} = N. \quad (2.3)$$

dengan:

X, Y, N = gaya yang bekerja pada sumbu x dan y, dan momen pada kapal,

u, v = komponen kecepatan pada arah sumbu x dan y,

m = massa kapal,

I_{zz} = momen inersia pada kapal,

$\ddot{\psi}$ = percepatan yaw.

Jika efek masa tambahan akibat kapal yang bergerak di air, maka persamaan (2.1) - (2.3) menjadi persamaan (2.4) - (2.6).

$$(m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr = X, \quad (2.4)$$

$$(m + m_y)\dot{v} - (m + m_x)ur = Y, \quad (2.5)$$

$$(I_{zz} + i_{zz})\dot{r} = N. \quad (2.6)$$

dengan:

m, m_x, m_y = massa kapal, komponen *added mass* pada arah sumbu x dan y,

i_{zz} = momen dan *added moment* inersia pada kapal,

r = *yaw rate*.

Komponen kecepatan relatif u dan v yang bekerja pada pusat gravitasi kapal, dapat dinyatakan pada persamaan (2.7) - (2.8).

$$u = U \cos\beta, \quad (2.7)$$

$$v = -U \sin\beta. \quad (2.8)$$

dengan:

$$U \quad = \text{kecepatan kapal,}$$

$$\beta \quad = \text{sudut drift kapal.}$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.4) - (2.6) dengan persamaan komponen kecepatan relatif u dan v , maka persamaan manuver pada bidang horizontal dapat dinyatakan dengan persamaan (2.9) - (2.11).

$$(m + m_x)(\dot{U} \cos\beta - U\dot{\beta} \sin\beta) + (m + m_y)Ur \sin\beta = X, \quad (2.9)$$

$$-(m + m_y)(\dot{U} \sin\beta + U\dot{\beta} \cos\beta) + (m + m_x)Ur \cos\beta = Y, \quad (2.10)$$

$$(I_{zz} + i_{zz})\dot{r} = N. \quad (2.11)$$

Dari persamaan (2.9) - (2.11), maka dapat diketahui persamaan manuver non-dimensionalnya dan dapat dinyatakan dengan persamaan (2.12) - (2.14).

$$(m' + m'_x) \left(\frac{L}{U}\right) \left(\frac{\dot{U}}{U} \cos\beta - \dot{\beta} \sin\beta\right) + (m' + m'_y)r' \sin\beta = X', \quad (2.12)$$

$$-(m' + m'_y) \left(\frac{L}{U}\right) \left(\frac{\dot{U}}{U} \sin\beta + \dot{\beta} \cos\beta\right) + (m' + m'_x)r' \cos\beta = Y', \quad (2.13)$$

$$(I'_{zz} + i'_{zz}) \left(\frac{L}{U}\right)^2 \left(\frac{\dot{U}}{L} r' + \frac{U}{L} \dot{r}'\right) = N'. \quad (2.14)$$

Simbol “ ‘ “ menunjukkan parameter non-dimensional. Non-dimensi pada persamaan (2.12) - (2.14) didapatkan melalui persamaan (2.15) - (2.19).

$$m', m'_x, m'_y = m, m_x, \frac{m_y}{\frac{1}{2}\rho L^2 d}, \quad (2.15)$$

$$I'_{zz}, i'_{zz} = I_{zz}, \frac{i_{zz}}{\frac{1}{2}\rho L^4 d}, \quad (2.16)$$

$$X', Y' = X, \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho L d U^2}, \quad (2.17)$$

$$N' = \frac{N}{\frac{1}{2}\rho L^2 d U^2}, \quad (2.18)$$

$$r' = \frac{rL}{U}. \quad (2.19)$$

dengan:

ρ = densitas cairan,

L = panjang antara tegak lurus,

d = sarat

2.2.3. Model Matematika Untuk Gaya Eksternal

Maneuvering Modeling Group (MMG) merupakan salah satu solusi dalam simulasi gerak manuver kapal yang dikembangkan oleh peneliti di Jepang. MMG Model merepresentasikan gaya yang bekerja pada lambung kapal, baling-baling, kemudi, dan interaksi antara gaya-gaya tersebut secara individual. Pada sisi kanan persamaan gerak manuver kapal (Persamaan (2.12) - (2.14)), menunjukkan gaya eksternal non-dimensi X' , Y' , dan yaw moment N' yang dapat dinyatakan menggunakan MMG Model seperti ditunjukkan pada persamaan (2.20) - (2.22) (Yasukawa & Yoshimura, 2015).

$$X' = X'_H + X'_P + X'_R, \quad (2.20)$$

$$Y' = Y'_H + Y'_R, \quad (2.21)$$

$$N' = N'_H + N'_R. \quad (2.22)$$

dengan:

H = lambung (*hull*),

P = baling-baling (*propeller*),

R = kemudi (*kemudi*).

2.2.4. Gaya Dan Momen Hidrodinamik

Gaya dan momen hidrodinamika non-dimensional yang bekerja pada lambung kapal sesuai persamaan (2.20) - (2.22) dinyatakan dengan komponen X'_H , Y'_H , dan N'_H seperti pada persamaan (2.23) - (2.25) (Choe & Furukawa, 2019).

$$X'_H = X'_{\beta r} r' \sin\beta + X'_{uu} \cos^2\beta, \quad (2.23)$$

$$Y'_H = Y'_{\beta\beta} + Y'_{rr'} + Y'_{\beta\beta|\beta|} + Y'_{rrr'}|r'| + (Y'_{\beta\beta r} + Y'_{\beta rr'})\beta r', \quad (2.24)$$

$$N'_H = N'_{\beta\beta} + N'_{rr'} + N'_{\beta\beta|\beta|} + N'_{rrr'}|r'| + (N'_{\beta\beta r} + N'_{\beta rr'})\beta r'. \quad (2.25)$$

dengan:

X'_H, Y'_H, N'_H = gaya longitudinal, lateral, dan momen balik,

$X'_{\beta r}, X'_{uu}$ = mewakili perubahan resistensi karena sudut miring dan reistensi lambung kapal ketika bergerak lurus,

Y'_β, X'_β, dll = derevatif hidrodinamik.

2.2.5. Gaya Baling-Baling

Gaya longitudinal yang dihasilkan oleh baling-baling (*propeller*) lebih besar dibandingkan komponen gaya lateral dan momen baling-baling, sehingga gaya dan momen tersebut diabaikan. Untuk mendapatkan nilai gaya longitudinal yang dihasilkan baling-baling (*propeller force*) ditentukan oleh persamaan (2.26) - (2.28) (Choe & Furukawa, 2019).

$$X'_P = \frac{(1 - t_p)n_p^2 D_p^4 K_T(J_p)}{\frac{1}{2} L d U^2}, \quad (2.26)$$

$$K_T(J_p) = C_3 J_p^2 + C_2 J_p + C_1, \quad (2.27)$$

$$J_p = \frac{(1 - \omega_p) U \cos \beta}{n_p D_p}. \quad (2.28)$$

dengan:

t_p = *thrust deduction factor*,

n_p = jumlah putaran baling-baling,

D_p = diameter baling-baling,

$K_T(J_p)$ = koefisien dorong,

ω_p = efektif *wake fraction*,

Karena kapal diasumsikan quasi-steady, maka faktor pengurang dorong t_p (*thrust deduction factor*) diasumsikan konstan. Koefisien dorong $K_T(J_p)$ dihitung dengan fungsi lanjutan koefisien J_p . ω_p merupakan efektif *wake fraction*, sedangkan $C_1, C_2,$ dan C_3 merupakan konstanta.

2.2.6. Gaya kemudi

Sistem kemudi (*kemudi*) merupakan komponen penting dalam mengendalikan gerakan kapal saat melintasi gelombang yang mengikuti (*following seas*) dan gelombang diagonal (*quartering seas*). Kinerja kemudi sangat dipengaruhi oleh interaksi antara kemudi dengan lambung kapal dan interaksi antara kemudi dengan baling-baling (*propeller*) kapal, yang disebabkan oleh perubahan gaya angkat (*lift*). Gaya kemudi (*kemudi force*) dan momen yang terjadi, termasuk interaksi antara kemudi dan lambung kapal, dirumuskan dalam persamaan (2.29) - (2.32).

$$X'_R = -(1 - t_R)F'_N \sin \delta, \quad (2.29)$$

$$Y'_R = -(1 + \alpha_H)F'_N \cos \delta, \quad (2.30)$$

$$N'_R = -(x_R + \alpha_H x_H)F'_N \cos \delta, \quad (2.31)$$

$$F'_N = \left(\frac{A_R}{Ld}\right) C_N U'_R{}^2 \sin \alpha_R. \quad (2.32)$$

dengan:

X'_R, Y'_R = komponen longitudinal dan lateral dari gaya kemudi,

N'_R = momen dari gaya kemudi,

F'_N = gaya normal kemudi,

t_R = faktor pengurangan tahanan kemudi,

α_H = faktor peningkat gaya kemudi,

x_H, x_R = koordinat dari titik gaya interaksi dan pusat tekanan,

A_R = area kemudi,

C_N = koefisien gradien gaya normal kemudi,

U_R, α_R = kecepatan dan sudut aliran masuk efektif kemudi.

2.2.7. Penyelesaian Masalah Gerak Manuver Kapal

Untuk menyelesaikan persamaan gerak manuver digunakan metode yang dikembangkan oleh Ota dkk (2016). Penjelasan mengenai persamaan manuver kapal dapat dilihat pada sub-bab 2.4.1.. Untuk menyelesaikan persamaan gerak manuver kapal yang tertulis pada persamaan (2.12) - (2.14) perlu dilakukan penyusunan ulang persamaan (2.12) - (2.14) terhadap $d\beta/dt$, dr'/dt , dU/dt sehingga didapatkan persamaan (2.39) - (2.41).

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{U}{L} \left\{ \frac{m' + m'_x}{m' + m'_y} r' \cos^2 \beta + \frac{m' + m'_y}{m' + m'_x} r' \sin^2 \beta - \frac{1}{m' + m'_x} \sin \beta \cdot X' - \frac{1}{m' + m'_y} \cos \beta \cdot Y' \right\} \quad (2.33)$$

$$\frac{dr'}{dt} = \frac{U}{L} \left\{ \frac{N'}{I'_{ZZ} + i'_{ZZ}} - r' \frac{U}{L} \left\{ \frac{X'}{m' + m'_x} \cos \beta - \frac{Y'}{m' + m'_y} \sin \beta - \left(\frac{m' + m'_y}{m' + m'_x} - \frac{m' + m'_x}{m' + m'_y} \right) r' \sin \beta \cos \beta \right\} \right\} \quad (2.34)$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{U^2}{L} \left\{ \frac{X'}{m' + m'_x} \cos \beta - \frac{Y'}{m' + m'_y} \sin \beta - \left(\frac{m' + m'_y}{m' + m'_x} - \frac{m' + m'_x}{m' + m'_y} \right) r' \sin \beta \cos \beta \right\} \quad (2.35)$$

Selain itu terhadap $d\beta/dt$, dr'/dt , dU/dt , perlu dilakukan penyusunan terhadap $d\psi/dt$, dx_0/dt , dy_0/dt , digunakan sebagai mendapatkan data kondisi kapal sendiri maupun kapal musuh yang baru, yang dapat dilihat pada persamaan (2.36) - (2.38).

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{Ur'}{L} \quad (2.36)$$

$$\frac{dx_0}{dt} = U \cos(\psi - \beta) \quad (2.37)$$

$$\frac{dy_0}{dt} = U \sin(\psi - \beta) \quad (2.38)$$

Substitusi persamaan (2.20) - (2.22) ke persamaan (2.39) - (2.38), sehingga didapatkan persamaan diferensial simultan enam elemen dengan $\beta, r', U, \psi, x_0, y_0$

2.2.8. DCPA dan TCPA

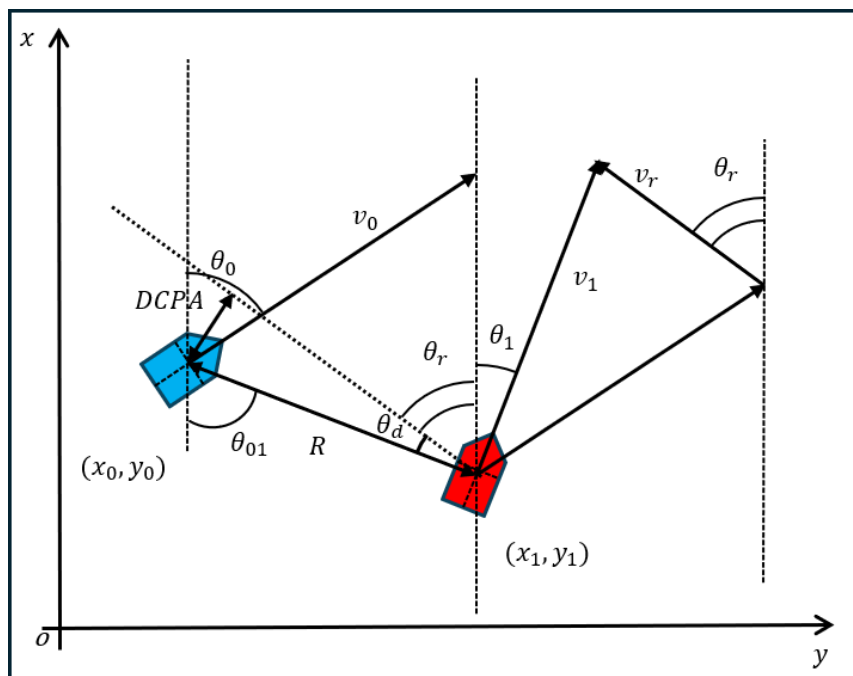
Dalam menentukan *Distance of Closest Point of Approach* (DCPA) dan *Time to Closest Point of Approach* (TCPA) antara dua kapal, diperlukan perhitungan yang sesuai. DCPA merupakan jarak terdekat saat dua kapal menjaga kecepatan dan lintasan mereka dari posisi saat ini, sedangkan TCPA merupakan waktu saat dua kapal menjaga kecepatan dan lintasan mereka dari posisi saat ini. Dalam hal ini,

TCPA menggambarkan waktu hingga kedua kapal mencapai jarak terdekat satu sama lain. Sistem koordinat DCPA dan TCPA ditunjukkan dalam Gambar 2.10.

Perhitungan DCPA melibatkan penentuan jarak antara dua kapal pada saat jarak terdekat mereka. Untuk menghitung DCPA, dapat menggunakan rumus jarak Euclidean atau rumus Great Circle Distance yang mempertimbangkan ketinggian Bumi. Rumus-rumus ini bergantung pada koordinat dan posisi relatif kedua kapal.

Perhitungan TCPA melibatkan estimasi waktu saat kedua kapal mencapai jarak terdekat mereka. Untuk menghitung TCPA, dapat menggunakan rumus waktu tempuh dengan membagi jarak antara dua kapal dengan kecepatan relatif mereka. Kecepatan relatif dapat diperoleh dengan mengurangi kecepatan satu kapal dari kecepatan kapal lainnya.

Dalam praktiknya, perhitungan DCPA dan TCPA biasanya dilakukan dengan menggunakan sistem pemantauan kapal (ship tracking system) yang melibatkan data posisi, kecepatan, dan arah kapal secara real-time. Dengan menggunakan data ini, perhitungan dapat dilakukan secara terus-menerus untuk memperkirakan DCPA dan TCPA saat ini serta memprediksi perubahan dalam situasi pergerakan kapal di masa depan.



Gambar 2.10 Koordinat posisi DCPA dan TCPA kapal (Zhang dkk., 2023)

Perhitungan DCPA dan TCPA penting dalam navigasi kapal dan keselamatan maritim. Informasi ini membantu kapten kapal dalam menghindari potensi tabrakan dan mengambil tindakan pencegahan yang diperlukan untuk menjaga jarak aman antara kapal-kapal yang berpotensi bertemu di laut. Perhitungan DCPA dan TCPA yang digunakan berasal dari Choe & Furukawa (2018), yang dapat dilihat pada persamaan (2.39) - (2.46).

$$V_{xr} = V_1 \cos \theta_1 - V_0 \cos \theta_0, \quad (2.39)$$

$$V_{yr} = V_1 \sin \theta_1 - V_0 \sin \theta_0, \quad (2.40)$$

$$R = \sqrt{(y_1 - y_0)^2 + (x_1 - x_0)^2}, \quad (2.41)$$

$$\theta_{01} = \tan^{-1} \left(\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \right), \quad (2.42)$$

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{V_{yr}}{V_{xr}} \right), \quad (2.43)$$

$$V_r = V_0 \cos(\theta_1 - \theta_r) - V_1 \cos(\theta_1 - \theta_r) \quad (2.44)$$

$$DCPA = R \sin(\theta_{01} - \theta_r) \quad (2.45)$$

$$TCPA = R \cos \left(\frac{\theta_{01} - \theta_r}{V_r} \right). \quad (2.46)$$

dengan:

V_{xr}, V_{yr} = komponen sumbu x dan y kecepatan relatif antara kedua kapal,

V_0, V_1 = kecepatan kapal sendiri dan kapal target,

θ_0, θ_1 = sudut arah kapal sendiri dan kapal target,

R = jarak antara kedua kapal,

x_0, y_0 = posisi awal kapal sendiri,

x_1, y_1 = posisi awal kapal target,

θ_{01} = sudut R terhadap sumbu x,

θ_r = sudut relatif antara kedua kapal,

V_r = kecepatan relatif kedua kapal,

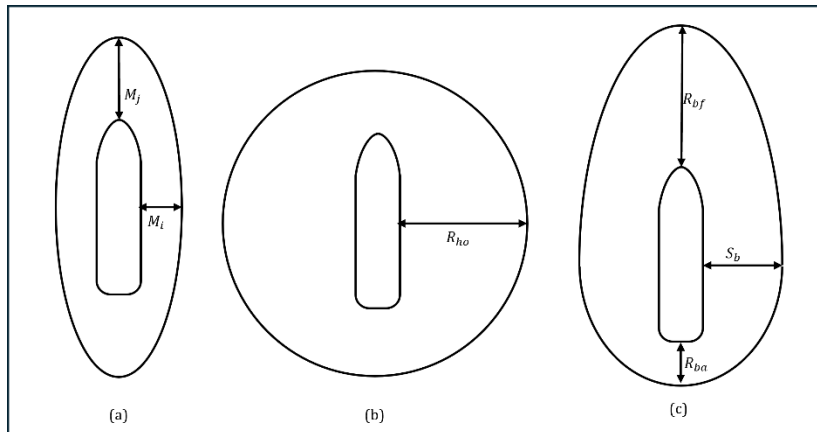
$DCPA$ = jarak pendekatan terdekat antara kedua kapal,

$TCPA$ = waktu untuk mencapai jarak pendekatan terdekat.

2.2.9. Domain Kapal

Domain kapal awalnya dipelajari dalam bidang teknik lalu lintas maritim sebagai parameter untuk mengukur jumlah lalu lintas kapal di sekitar kapal sendiri.

Hal ini dianggap sebagai representasi dari jumlah indeks evaluasi yang terkait dengan margin jarak yang diperlukan untuk mencegah tabrakan antara kapal-kapal, yang diperoleh melalui estimasi operator terhadap spesifikasi dan kinerja kapal lain ketika memutuskan tindakan menghindar. Setelah melakukan kajian pustaka, didapatkan bentuk model domain kapal yang sesuai yaitu elips, lingkaran dan telur dapat dilihat pada Gambar 2.11. Dalam studi ini, untuk bentuk domain kapal telur didefinisikan berdasarkan panjang kapal L (m), lebar kapal B (m), kecepatan kapal U (knot), diameter taktis D_T (m), dan waktu putaran 90 derajat T_{90} (detik). Spesifikasi dan kinerja makroskopis kapal dirumuskan sebagai elemen dan diperkenalkan sebagai parameter untuk menghitung risiko tabrakan antara kapal-kapal. Seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.11, area yang diblokir ke arah haluan adalah R_{bf} , area yang diblokir ke arah buritan adalah R_{ba} , dan radius kecil adalah S_b (Ota dkk., 2016). Setiap elemen tersebut diekspresikan seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan (2.47) - (2.52).



Gambar 2.11 Bentuk domain kapal (a) bentuk domain elips, (b) bentuk domain lingkaran, dan (c) bentuk domain telur

$$R_{bf} = L + 2 \frac{T_{90}}{4} U, \quad (2.47)$$

$$R_{ba} = L + \frac{T_{90}}{4} U, \quad (2.48)$$

$$S_b = B + D_T. \quad (2.49)$$

$$\log_{10} \left(\frac{A_D}{L} \right) = 0.3591 \log_{10} U + 0.0952, \quad (2.50)$$

$$\log_{10} \left(\frac{D_T}{L} \right) = 0.5441 \log_{10} U - 0.0795, \quad (2.51)$$

$$T_{90} \cong \left(\frac{0.67}{U} \right) \sqrt{A_D^2 + \left(\frac{D_T}{2} \right)^2}. \quad (2.52)$$

Bentuk domain kapal lingkaran yang digunakan memiliki ukuran yang dapat dilihat pada persamaan (2.53) (Weng dkk., 2023) dan untuk ukuran domain berbentuk elips dapat dilihat pada persamaan (2.54) dan (2.55) (Lee dkk., 2021).

$$R_{HO} = (5.625 - 0.612S_o - 0.602S_{BG} - 0.561T_D - 0.495V_s - 0.245V_m)l_{ij}, \quad (2.53)$$

$$M_j = L * 5.9, \quad (2.54)$$

$$M_i = L * 4.1, \quad (2.55)$$

dengan:

R_{HO} = radius domain kapal lingkaran,

S_o, S_{BG} = tipe kapal,

T_D = kondisi siang atau malam,

V_s, V_m = kecepatan relatif kedua kapal,

l_{ij} = rata-rata panjang kedua kapal,

M_j = panjang sumbu major domain kapal elips,

M_i = panjang sumbu minor domain kapal elips.

Area blokir adalah ukuran penting dalam analisis risiko tabrakan antara kapal-kapal. Dalam penelitian ini, parameter seperti panjang dan lebar kapal, kecepatan kapal, dan waktu putaran digunakan untuk mengestimasi area yang terhalang di depan dan di belakang kapal. Informasi ini membantu operator kapal dalam menghindari kemungkinan tabrakan dengan mempertimbangkan faktor-faktor tersebut.

2.2.10. *Automatic Collision Avoidance System*

Dalam pengambilan keputusan tabrakan kapal banyak metode yang digunakan, salah satunya adalah *machine learning*. Telah dikembangkan sebuah metode *machine learning* untuk *automatic collision avoidance system* oleh (Ota dkk., 2016). Dijelaskan bahwa dalam penggunaan *machine learning* untuk *automatic collision avoidance system*, Kapal dianggap sebagai agent dan pemilih

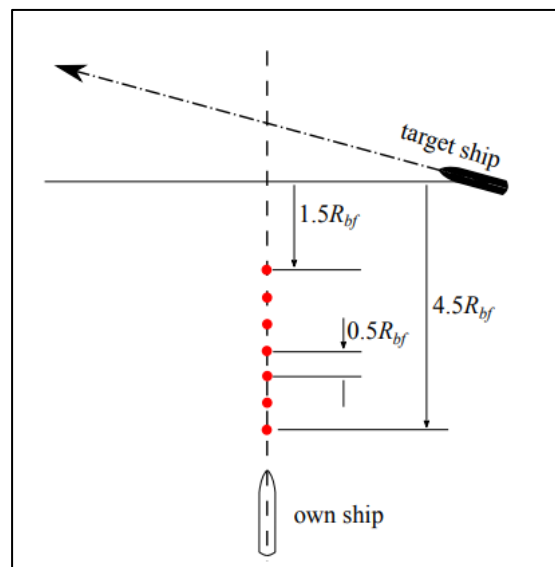
rute penghindaran merupakan aksi yang dilakukan oleh agent tersebut. Aksi agent dibagi menjadi 4, sebagai berikut:

1. Metode kontrol kecepatan kapal

Karena fokus penelitian sebelumnya adalah penghindaran tabrakan, maka aspek mekanis dan efisiensi ekonomis perlu dikorbankan sampai batas tertentu. Oleh karena itu, dikembangkan metode kontrol kecepatan kapal. Dalam penelitian yang telah dilakukan, metode kontrol kecepatan kapal menetapkan opsi untuk mempertahankan kecepatan *propeller* saat ini, mengurangi kecepatan *propeller* sebesar 20%, dan mengurangi kecepatan *propeller* sebesar 40%. Setelah penghindaran selesai, kecepatan *propeller* dikembalikan ke kecepatan awalnya.

2. Titik mulai penghindaran

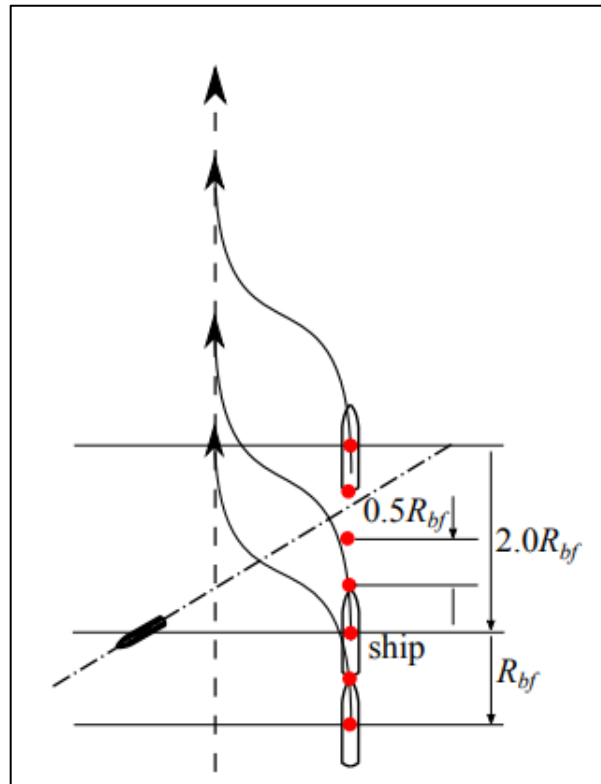
Posisi ketika dimana kapal mulai melakukan navigasi penghindaran. Posisinya dimulai setiap 0,5 dari panjang domain kapal bagian depan (haluan), dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Titik mulai penghindaran (Ota dkk., 2016)

3. Titik selesai penghindaran

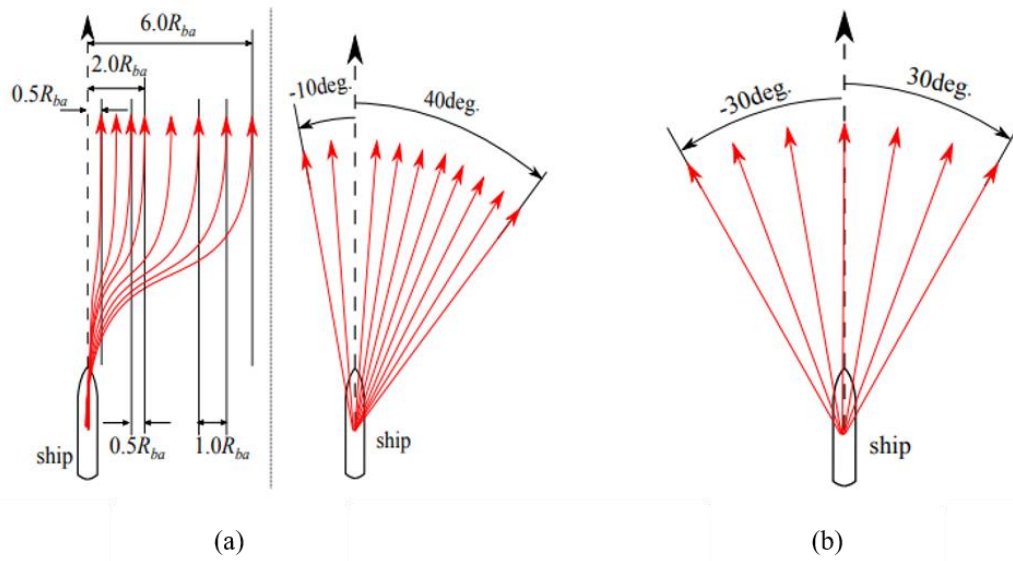
Titik ketika kapal tidak lagi melakukan penghindaran dan kembali ke rute semula. Posisi selesai setiap 0,5 dari panjang domain kapal bagian depan (haluan) dengan batasan 2 kali panjang domain kapal bagian depan, dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Titik selesai penghindaran (Ota dkk., 2016)

4. Rute penghindaran

Metode pemilihan rute penghindaran yang dilakukan akan berubah tergantung dari nilai risiko tabrakan antara kedua kapal. Kritisianya adalah $0 < \text{nilai risiko tabrakan} < 75$ dan $\text{nilai risiko tabrakan} \geq 75$. Jika $0 < \text{nilai risiko tabrakan} < 75$ maka akan dilakukan penghindaran normal. Dan jika $\text{nilai risiko tabrakan} \geq 75$ akan dilakukan penghindaran darurat. Gambar 2.14 menunjukan penghidaran normal dan penghindaran darurat dan penghindaran tersebut sudah ditetapkan. Untuk penghindaran normal dapat dilakukan perubahan rute kearah *starboard* dengan jarak setiap 0,5 dari panjang domain kapal (bagian belakang) dengan maksimal jaraknya adalah 6 kali panjang domain kapal (bagian belakang). Selain itu perubahan arah kapal setiap 5 derajat dengan maksimal 40 derajat untuk *straboard*, dan setiap 5 derajat maksimal -10 derajat untuk *portside*. Untuk penghindaran darurat aksi yang dilakukan adalah langsung merubah sudut arah kapalnya setiap 10 deraja dengan maksimal 30 derajat untuk *starboard* dan -30 derajat untuk *portside*.



Gambar 2.14 (a) penghindaran normal dan (b) penghindaran darurat (Ota dkk., 2016)

2.2.11. Logika Fuzzy

Logika *fuzzy* dapat divisualisasikan sebagai kotak hitam yang menghubungkan antara ruang *input* dan ruand *output*. Kotak hitam tersebut bersisi metode yang dapat digunakan untuk mengeloha data *input* menjadi data *output* yang telah ditemukan dalam bentuk informasi yang baik (Retno Andani, 2013).

1. Himpunan *fuzzy*

Pada himpunan *fuzzy crisp*, nilai keanggotaan suatu item x dalam suatu himpunan A , yang dapat ditulis $\mu_A(X) \rightarrow [0,1]$, dengan adanya dua kemungkinan, yaitu :

- a. Nol (0), yang berarti bahwa suatu item tidak menjadi anggota dalam suatu himpunan, atau
- b. Satu (1), yang berarti bahwa suatu item menjadi anggota dalam suatu himpunan.

2. Fungsi keanggotaan

Fungsi keanggotaan adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik - titik input data kedalam nilai keanggotaanya (derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 samapai .

3. Operator dasar zاده untuk operasi himpunan *fuzzy*

Seperti halnya himpunan lainnya, ada beberapa operasi yang didefinisikan secara khusus untuk mengkombinasi dan memodifikasi himpunan *fuzzy*. Nilai keanggotaan sebagai hasil dari operasi 2 himpunan sering dikenal dengan nama *fire strength*. Ada 3 operator dasar yang digunakan, yaitu:

a. Operator AND

Operator ini berhubungan dengan operasi interseksi pada himpunan. *Fire strength* yang diperoleh diambil dari nilai keanggotaan terkecil antar elemen pada himpunan – himpunan yang bersangkutan.

$$C = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.56)$$

b. Operator OR

Operator ini berhubungan dengan operasi union pada himpunan. *Fire strength* yang diperoleh diambil dari nilai keanggotaan terbesar antar elemen pada himpunan – himpunan yang bersangkutan.

$$D = \mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.57)$$

c. Operator NOT

Operator ini berhubungan dengan operasi komplemen pada himpunan. *Fire strength* yang diperoleh dengan mengurangkan nilai keanggotaan elemen pada himpunan yang bersangkutan dari 1.

$$A^c = 1 - \mu_A(x) \quad (2.58)$$

Dengan penggunaan operator maka dapat ditentukan hubungan dari peraturan *fuzzy inference* (Tzafestas, 2014). Diberikan sebuah contoh peraturan *fuzzy inference*.

IF $x_1 = A_{11}$ AND $x_2 = A_{12}$, THEN $y = B_1$

IF $x_1 = A_{21}$ AND $x_2 = A_{22}$, THEN $y = B_2$

⋮

IF $x_1 = A_{n1}$ AND $x_2 = A_{n2}$, THEN $y = B_n$

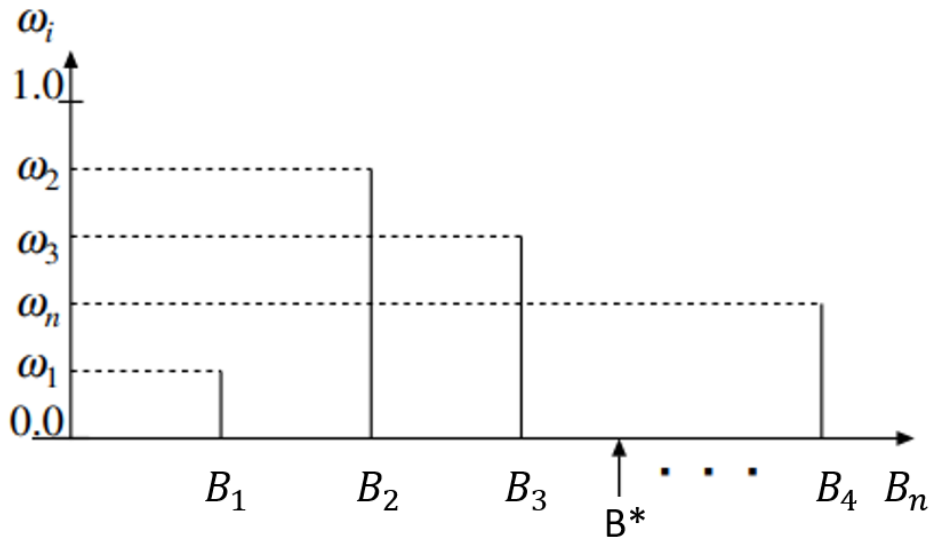
Hubungan antara x_1 dan x_2 dapat dimisalkan dengan ω_i sehingga menjadi.

$$\omega_i = \mu_{A_{i1}}(x_1^*) \times \mu_{B_{i2}}(x_2^*) \quad (i = 1 \sim n) \quad (2.59)$$

Hubungan anatar IF dan THEN dapat dituliskan menjadi.

$$\mu_{B_i^*}(y) = \omega_i \times \mu_{B_i}(y) \quad (i = 1 \sim n) \quad (2.60)$$

Untuk mempermudah mencari nilai dari hasil inference B^* , maka dilakukan metode penyederhanaan dalam hubungan IF dan THEN. Penyederhanaan dilakukan dengan melakukan perhitungan pusat gravitasi dari himpunan B.



Gambar 2.15 Himpunan B yang disederhanakan (Ota dkk., 2016)

Gambar 2.15 menunjukan gambar himpunan B yang disederhanakan. Dengan menggunakan penyederhanaan dilakukan perhitungan pusat gravitasi untuk mencari nilai B^* .

$$B^* = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot B_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (2.61)$$

2.2.12. Perilaku Kapal Menurut COLREGs

Dalam COLREGs part B “*steering and sailing*” dibagi menjadi 3 *section* yaitu:

- 1) *Section 1* : perilaku kapal dalam kondisi visibilitas apa pun,
- 2) *Section 2* : perilaku kapal dalam pandangan satu sama lain dengan kapal lainnya,
- 3) *Section 3* : perilaku kapal dalam kondisi visibilitas yang terbatas.

Setiap *section* menjelaskan bagaimana perilaku kapal atau keputusan kapal yang harus diambil, supaya tidak terjadi sebuah kecelakaan antara kapal (*collision*). COLREGs *part B* terdiri dari 16 *rule*, di mana *section 1* dari *rule 4 – rule 10*, *section 2* dari *rule 11 – rule 18*, dan *section 3* hanya terdiri dari *rule 19*.

COLREGs *part B section 1* berlaku untuk semua kapal yang memenuhi kondisi visibilitas apapun. Pembagian *section 1* dapat dilihat di bawah ini :

- 1) *Rule 4* : *application,*
- 2) *Rule 5* : *look out,*
- 3) *Rule 6* : *safe speed,*
- 4) *Rule 7* : *risk of collision,*
- 5) *Rule 8* : *action to avoid collision,*
- 6) *Rule 9* : *narrow channels,*
- 7) *Rule 10* : *traffic separation schemes.*

Section 1 dibagi menjadi 7, dan lebih berfokus secara umum. *Rule 5* tentang *look out*, menjelaskan bahwa setiap kapal harus selalu memperhatikan penglihatan dan pendengaran dengan sarana yang tersedia yang sesuai dengan kondisi yang ada, sehingga dapat menilai situasi secara optimal tentang risiko *collision*. *Rule 6* tentang *safe speed*, menjelaskan bahwa setiap kapal setiap waktu harus berjalan dengan kecepatan aman sehingga jika terjadi sebuah *collision* dapat dijegah dan kapal dapat berhenti dengan mudah dijarak tertentu, sehingga *collision* dapat dihindarkan. *Rule 7* tentang *risk of collision*, menjelaskan tentang pencegahan risiko kecelakaan yang terjadi, sehingga persentase sebuah kecelakaan dapat menjadi 0% dan rule ini menjelaskan juga bahwa setiap kesalahan bisa membuat presentasi kecelakaan naik walaupun itu hanya 0.1% dan itupun dianggap bahwa kapal masih memiliki risiko kecelakaan.

Setiap kapal harus menggunakan peringatan/saran yang berlaku sesuai dengan keadaan dan kondisi yang berlaku untuk menentukan risiko kecelakaan yang ada. Jika terjadi keraguan maka risiko dianggap ada walaupun dengan presentasi yang sangat kecil. *Rule 8* tentang *action to avoid collision*, menjelaskan tentang bagaimana kapal harus mengambil tindakan agar tidak terjadi sebuah kecelakaan. Tindakan menurut COLREGs adalah segala tindakan harus diambil agar tidak terjadi sebuah kecelakaan sesuai dengan peraturan yang tertulis ini dan bersifat wajib, jika kecelakaan terjadi, tetap berpikir positif, sehingga dalam waktu yang sedikit dibuatlah keputusan yang baik dengan pengamatan ilmu pelayaran yang baik. *Rule 9* tentang *narrow channels*, menjelaskan tentang kapal yang sedang

atau akan melewati kanal sempit, supaya dapat melalui rute tersebut tanpa adanya kejadian. Tindakan yang harus dilakukan seperti kapal yang melewati kanal sempit sebisa mungkin berada di dekat sisi kanal dibagian sebelah *starboard* kapal. Kapal dengan panjang kurang dari 20 m atau kapal layar tidak diperbolehkan untuk menghalangi rute kapal yang dapat melewati kanal sempit dengan aman. Kapal yang sedang berkegiatan seperti memancing juga tidak boleh menghalangi jalan kapal lainnya ketika melewati kanal sempit. Kapal tidak disarankan menyeberang di kanal sempit, penyeberangan dapat dilakukan jika bisa dilakukan dengan aman dan tidak menghalangi rute kapal lainnya diperbolehkan. Selanjutnya jika kapal ingin menyeberang disarankan menggunakan sinyal suara sesuai dengan *rule 34*, jika masih ragu dalam melakukan penyeberangan. Di dalam kanal sempit jika ingin menyalip dapat dilakukan jika kapal yang akan disalip telah mendapatkan izin lewat. Jika ada kapal di tikungan kanal sempit, yang di mana terlihat kapal lainnya sedang lewat, maka perjalanan harus dilakukan dengan waspada agar tidak terjadi kecelakaan. Seluruh kapal jika tidak ada kondisi yang mengharuskan untuk jangkar, maka tidak diperbolehkan untuk melakukan jangkar di kanal sempit. *Rule 10* tentang *traffic separation schemes*, menjelaskan peraturan tentang skema pemisahan lalu lintas pada kapal. Peraturan ini berlaku untuk setiap organisasi yang memiliki peraturan ini.

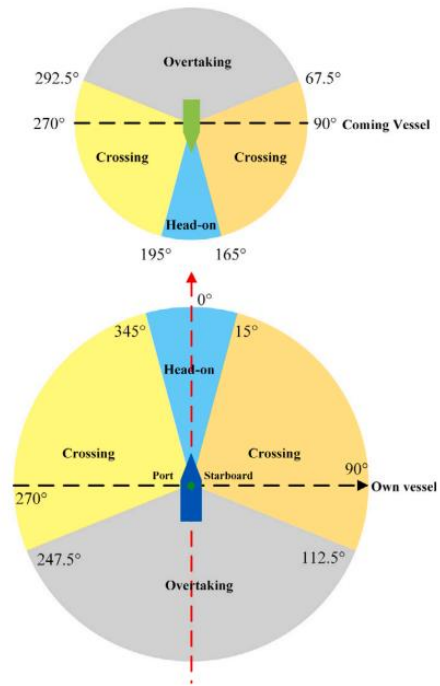
COLREGs part B section 2 terdiri dari 8 rule dan dibagi menjadi seperti:

- 1) *Rule 11* : *application*,
- 2) *Rule 12* : *sailing vessels*,
- 3) *Rule 13* : *overtaking*,
- 4) *Rule 14* : *head on situation*,
- 5) *Rule 15* : *crossing situation*,
- 6) *Rule 16* : *action by give way vessel*,
- 7) *Rule 17* : *action by stand on vessel*,
- 8) *Rule 18* : *responsibilities between vessels*.

Aplikasi *section 2* ini berlaku untuk setiap kapal dengan perilaku dalam pandangan satu sama lain dengan kapal lainnya. Maksudnya disini jadi jika ada kapal ada yang masuk jarak pandang kapal lainnya maka harus diambil keputusan sesuai dengan peraturan ini, yaitu *COLREGs part B section 2. Rule 12* tentang

sailing vessels, menjelaskan tentang apa yang harus dilakukan jika ada 2 kapal layar yang dalam satu jarak pandang. Hal yang harus dilakukan adalah Jika ada angin disetiap sisi, maka kapal yang mempunyai angin di bagian *port side* harus mengalah atau keluar rute dari kapal lainnya; Jika semua kapal memiliki arah angin yang sama, maka kapal yang dari mana angin bertiup harus mengalah atau keluar rute dari kapal yang berada dibawah angin; Jika ada kapal dan angin bertiup dibagian *port side* dan melihat kapal dari angin bertiup dan tidak dapat menilai kapal tersebut memiliki angin bertiup kearah mana, maka kapal yang pertama harus keluar dari rute kapal kedua. *Rule 13* tentang *overtaking*, menjelaskan bahwa kapal yang akan melewati atau menyalip kapal lain harus tidak mengahalingi jalan kapal yang akan disalip. Kondisi *overtaking* ini dapat dilakukan jika ada kapal muncul didepannya dengan sudut lebih dari 22.5 derajat, dan ketika malam hari kapal yang akan *overtaking* harus mampu melihat *strenlight* dari kapal yang akan di *overtaking*. *Rule 14* tentang *head on head situation*, dijelaskan ketika kapal dalam keadaan berhadapan dan akan terjadinya tabrakan, maka setiap kapal yang bersangkutan harus membelokan arah kebagian *statboard* nya sehingga melewati bagian *portside* kapal yang dilewati. *Rule* ini harus dilakukan jika kondisi ketika ada 2 kapal atau lebih sedang berhadapan atau memasuki jarak pandang dan ketika malam kondisi *masthead light* dapat terlihat maka harus menjalankan *rule 14*. *Rule 15* tentang *crossing situation* terjadi ketika ada dua kapal *power driven* bersebarangan dan ada kemungkinan terjadi kecelakaan, kapal yang yang berada dibagian *starboard* harus menjaga jarak, jika kondisi terjadi, untk menghindari kecelakaan dengan kapal lainnya. *Rule 16* tentang *action by give way vessel* , dimana setiap kapal harus menjaga jarak dari kapal lainnya, sejauh mungkin, ambil keputusan secepatnya dan sepentingnya untuk menjaga jarak dengan baik. *Rule 17* tentang *action by stand on vessel* , di mana salah satu dari dua kapal harus menjaga jarak maupun kecepatan. Disuatu saat ketika kapal mengambil tindakan untuk menghindari kecelakaan, maka sebisa mungkin tidak mengambil tindakan yang menyalahi *rule*.

Dapat disimpulkan bahwa dari peraturan di atas, ketika peran kedua kapal sudah diputuskan, kapal harus bergerak ke bagian *starboard* senagai hal yang utama. Titik temu kapal dapat didefinisikan seperti Gambar 2.16.



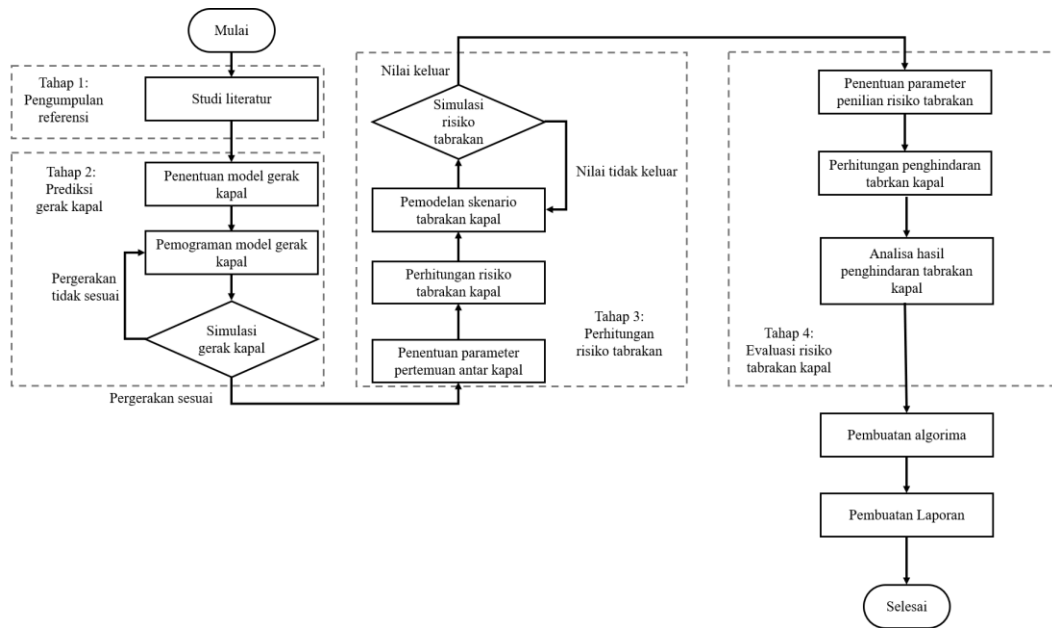
Gambar 2.16 Titik temu kapal (Sun dkk., 2023)

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1. Bagan Alir

Metodologi dalam pengerjaan tesis ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Bagan alir pengerjaan tesis

3.2. Pengumpulan Referensi Data

Tahap ini merupakan tahap awal di mana pada tahap ini dilakukan studi dan pengumpulan data yang diperlukan dalam pengembangan algoritma dasar sistem peringatan dini tabrakan kapal dengan metode penilaian indeks risiko tabrakan. Studi dilakukan dengan mengumpulkan penelitian yang telah dilakukan yang berhubungan dengan tabrakan kapal hingga penilaian risiko tabrakan kapal. Hal ini dilakukan guna untuk melakukan pengembangan yang lebih terarah dan dapat dijamin kualitas penilitan yang dihasilkan.

3.3. Prediksi Gerak Kapal

Dilakukan penentuan model gerak kapal yang akan digunakan dalam penelitian ini. Sesuai dengan yang telah di tentukan bahwa akan digunakan model

MMG. Pada tahap ini akan diselesaikan perhitungan manuver kapal yang telah di jelaskan di dasar teori.

3.4. Perhitungan Risiko Tabrakan Kapal

Setelah persamaan gerak manuver kapal terselesaikan, langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan risiko tabrakan kapal. Parameter yang digunakan dalam perhitungan ini adalah *Distance of Closest Point of Approach* (DCPA), *Time to Closest Point of Approach* (TCPA), dan domain kapal.

DCPA dan TCPA digunakan sebagai parameter karena keduanya penting untuk mengetahui potensi tabrakan. DCPA mengukur jarak terdekat yang akan dicapai antara dua objek yang bergerak. Jika nilai DCPA kecil atau nol, ini menunjukkan bahwa dua objek berada dalam rute tabrakan atau akan mendekati satu sama lain dengan sangat dekat. Namun, mengetahui DCPA saja tidak cukup tanpa mengetahui kapan jarak terdekat itu akan terjadi. Oleh karena itu, diperlukan TCPA untuk memberikan informasi tentang berapa banyak waktu yang tersisa sebelum kedua objek mencapai jarak terdekat tersebut. Jika DCPA kecil tetapi TCPA menunjukkan waktu yang lama, mungkin masih ada cukup waktu untuk mengambil tindakan pencegahan.

DCPA dan TCPA adalah parameter kunci dalam menentukan potensi tabrakan karena memberikan informasi kritis mengenai jarak terdekat dan waktu yang tersisa sebelum mencapai jarak tersebut.

Pemilihan domain kapal sebagai parameter juga penting. Domain kapal adalah area aman di sekitar kapal di mana kapal lain tidak direkomendasikan untuk masuk. Konsep ini masih menjadi hal yang penting dalam manajemen lalu lintas laut. Menggabungkan analisis DCPA dengan domain kapal memungkinkan tindakan penghindaran diambil jika jarak terdekat berada dalam domain kapal. Selain itu, domain kapal mempermudah perhitungan waktu akan terjadinya tabrakan.

Setelah berbagai kajian pustaka dilakukan, ditemukan bahwa logika fuzzy memiliki tingkat akurasi yang baik dalam perhitungan risiko tabrakan kapal. Logika fuzzy memberikan kebebasan yang luas dalam pengambilan keputusan dan menunjukkan pola berpikir yang mendalam dalam analisis ini.

3.5. Indeks Risiko Tabrakan

Tahap ini melibatkan perekapan data hasil perhitungan risiko tabrakan kapal. Tujuannya adalah untuk memberikan evaluasi mengenai hasil perhitungan yang telah dilakukan. Dengan demikian, nantinya akan dilakukan penyesuaian algoritma berdasarkan hasil perhitungan tersebut, sehingga hasilnya dapat mendekati nilai yang diinginkan.

3.6. Penilaian Risiko Tabrakan Kapal

Penilaian dan evaluasi risiko tabrakan kapal dilakukan untuk memberikan informasi kepada awak kapal mengenai kondisi kapal mereka sendiri serta kapal lain di sekitarnya. Jika penilaian menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi bahaya, maka evaluasi atau peringatan akan diberikan kepada awak kapal. Sebaliknya, jika penilaian menunjukkan bahwa kapal tidak berada dalam kondisi bahaya, maka tidak akan ada peringatan yang diberikan.

3.7. Aksi Setelah Penilaian Risiko Tabrakan

Setelah penilaian risiko tabrakan kapal dilakukan, langkah selanjutnya adalah menentukan aksi yang harus dilakukan oleh awak kapal untuk menghindari tabrakan. Pada tahap ini, dijelaskan tindakan-tindakan yang perlu diambil oleh awak kapal, seperti menghentikan kapal, memperlambat kecepatan, atau mengubah haluan.

BAB 4

PERANCANGAN ALGORITMA DAN PENGEMBANGAN PROGRAM

4.1 Tinjauan rancangan algoritma

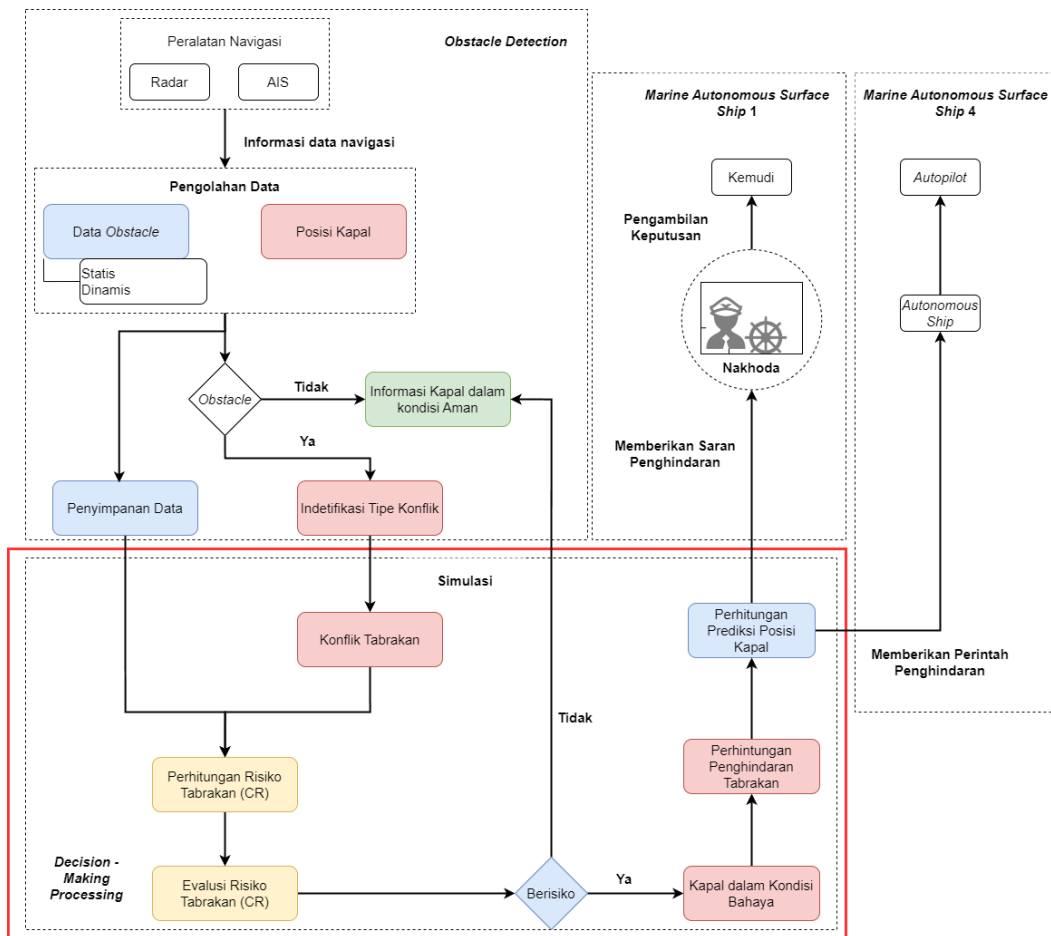
Dalam sebuah sistem penghindaran tabrakan dibagi menjadi beberapa bagian. Berdasarkan jurnal yang ditulis oleh Huang dkk (2020) terdapat komponen – komponen yang mempengaruhi sistem tabrakan kapal. Komponen – komponen tersebut terdiri dari:

1. Pengamat (*observer*) menyediakan data untuk mendukung komponen lain.
2. Prediksi gerakan (*motion prediction*) memprediksi lintasan.
3. Deteksi konflik (*conflict detection*) memperhitungkan risiko tabrakan dan memberikan penilaian yang sesuai dengan kondisi.
4. Resolusi konflik (*conflict resolution*) menentukan solusi penghindaran yang harus dilakukan oleh kapal.
5. Aktuator (*actuator*) menerapkan solusi yang telah ke sebuah perangkat.



Gambar 4.1 Komponen – komponen sistem penghindaran tabrakan

Gambar 4.1 menunjukkan komponen-komponen sistem penghindaran tabrakan kapal yang telah dimodifikasi. Komponen prediksi gerak kapal diletakkan setelah resolusi konflik. Hal ini dilakukan karena dalam penelitian ini ditemukan bahwa deteksi konflik penting dilakukan di awal untuk melakukan penilaian yang akurat. Dengan mendeteksi konflik terlebih dahulu, prediksi gerak kapal yang dilakukan dapat lebih sesuai dengan perhitungan konflik yang terjadi. Selain itu, pendekatan ini memungkinkan sistem untuk merespons secara lebih cepat dan efektif terhadap potensi tabrakan, meningkatkan keselamatan navigasi.



Gambar 4.2 Proses penghindaran tabrakan kapal

Gambar 4.2 menunjukkan alur proses penghindaran tabrakan kapal yang terdiri dari beberapa komponen utama yang terhubung secara sistematis. Diagram ini menggambarkan bagaimana informasi navigasi diproses untuk mendeteksi potensi tabrakan dan mengambil tindakan penghindaran. Komponen utama dalam proses penghindaran tabrakan kapal, sebagai berikut:

1. Peralatan navigasi
Terdiri dari radar dan AIS digunakan untuk mendeteksi keberadaan *obstacle*.
2. Pengolahan data
Data *obstacle* yang mencakup informasi statis, dinamis, dan posisi kapal diproses untuk mendeteksi potensi konflik. Jika terdapat *obstacle*, sistem akan memberi tahu perlunya perhitungan konflik; jika tidak ada, sistem akan menyatakan kapal dalam kondisi aman.

3. Penyimpanan data dan identifikasi tipe konflik

Setelah data dari radar dan AIS diperoleh, data tersebut diolah untuk memudahkan pembacaan dan kemudian disimpan. Sistem akan menyimpan informasi dan mengidentifikasi jenis konflik yang mungkin terjadi.

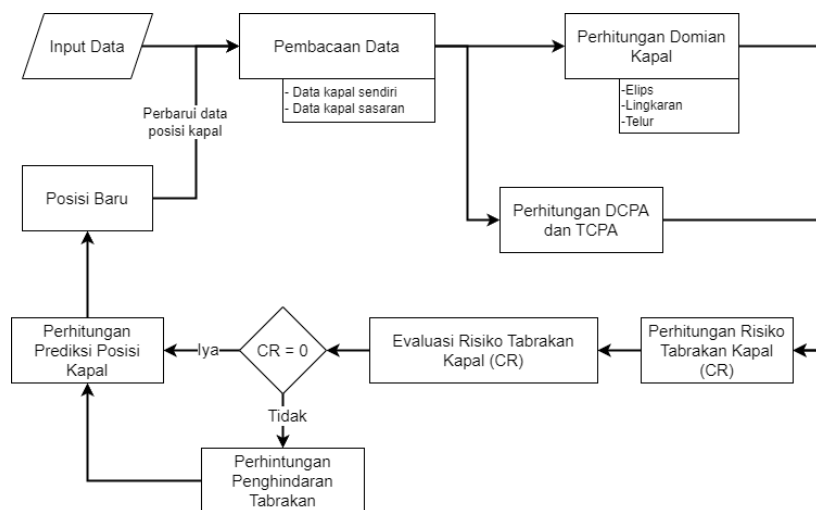
4. Proses pengambilan keputusan

Melakukan perhitungan risiko tabrakan (CR) dan evaluasi untuk menentukan apakah kondisi kapal aman atau berisiko. Jika kondisi kapal aman, sistem akan memberikan informasi bahwa kapal dalam kondisi aman. Jika berisiko, perhitungan penghindaran dilakukan, termasuk perhitungan posisi baru atau rute baru kapal. Informasi ini akan disampaikan kepada nakhoda atau sistem kapal.

5. Marine autonomous surface ship (MASS)

Output dari simulasi ini memberikan informasi ke MASS. MASS level 1 adalah kapal konvensional yang dibantu sistem otonom, seperti *collision avoidance*, sementara MASS level 4 adalah sepenuhnya otonom. Untuk MASS level 1, informasi penghindaran diberikan kepada nakhoda sebagai saran, dan pengambilan keputusan tetap berada di tangan nakhoda. Namun, pada MASS level 4, hasil simulasi sepenuhnya menguasai kontrol kapal.

Fokus penelitian ini adalah bagian yang dikotak berwarna merah. Gambar 4.2 membantu menjelaskan bagaimana setiap komponen bekerja secara terpadu untuk mendeteksi, mengevaluasi, dan mengambil tindakan penghindaran tabrakan yang diperlukan untuk menjaga keselamatan kapal

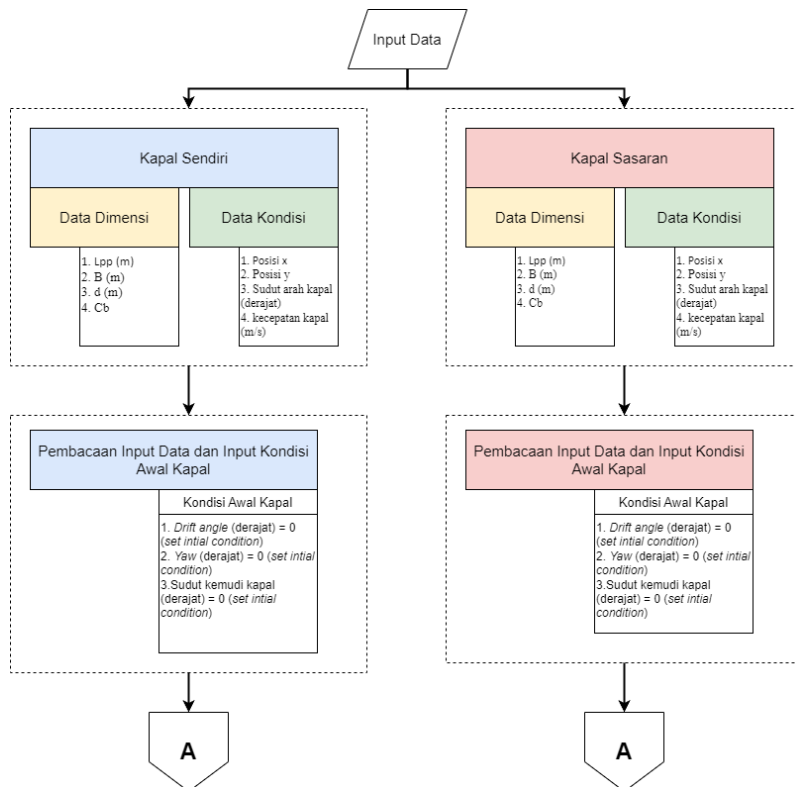


Gambar 4.3 Rencana algoritma yang diusulkan

Gambar 4.3 merupakan rencana algoritma yang diusulkan dalam penelitian ini. Algoritma yang diusulkan terdiri dari beberapa tahap, yaitu: input data, pembacaan data, perhitungan domain kapal, perhitungan DCPA dan TCPA, perhitungan risiko tabrakan kapal, evaluasi risiko tabrakan kapal, perhitungan penghindaran tabrakan, dan perhitungan prediksi posisi kapal. Setiap tahap masing – masing akan dijelaskan kedalam sub-bab.

4.2 Pembacaan data kapal

Langkah pertama yang dilakukan untuk melakukan penghindaraan adalah pengamat dan pada usulan algoritma yang yaitu pada tahap input data dan pembacaan data. Dilakukan pengamatan untuk mendapatkan data – data kapal sasaran yang terdeteksi oleh alat seperti Automatic Identification System (AIS), radar, dan Automatic Radar Plotting Aid (ARPA) dan ada risiko konflik dengan kapal sendiri. Akan tetapi, dalam penelitian ini tidak dilakukan proses pengamatan tersebut. Melainkan, menggunakan data dummy dan memasukan data secara manual. Sehingga data – data kapal yang mengalami konflik satu sama lain sudah ditetapkan sebelumnya.



Gambar 4.4 Diagram alir penulisan data kapal dan pembacaan data kapal

Data – data yang di input terbagi menjadi dua bagian, yaitu data kapal sendiri dan data kapal sasaran. Selain itu data yang akan di input juga terbagi menjadi dua bagian, yaitu data dimensi kapal dan data kondisi kapal. Dimana nanti data dimensi kapal selama proses perhitungan tidak mengalami perubahan dan data kondisi kapal akan mengalami perubahan selama proses perhitungan, untuk lebih detail data apa saja perlu di input selama proses perhitungan untuk pengembangan algoritma yang telah diusulkan dapat dilihat pada Gambar 4.4.

Gambar 4.4 menunjukan diagram alir penulisan data kapal. Ada dua data yang harus dimasukkan, yaitu: data jumlah kapal, data kondisi kapal, dan data dimensi kapal. Data – data tersebut ditulis pada suatu berkas, yang kemudian akan dibaca oleh program yang dibuat dan akan dijadikan data awal perhitungan.

```
! Memuat data perhitungan kapal sasaran
open (1, file = 'input\condition.dat', status = 'old')

! Jumlah kapal yang harus dihitung
read (1, *) num_ship
```

Gambar 4.5 Program untuk membaca jumlah kapal

Gambar 4.5 merupakan programan yang digunakan untuk membaca jumlah kapal. Sebuah berkas akan dibuat dengan nama ‘condition.dat’. Berkas tersebut berisi jumlah kapal, di mana jika target kapal sasaran satu maka jumlah kapal yang dituliskan dalam berkas tersebut adalah dua, dan jika ada dua kapal sasaran maka yang ditulis pada berkas adalah tiga, dan seterusnya. Untuk masing-masing jumlah kapal dilakukan pembacaan data kondisi kapal dan data dimensi kapal.

```
do i = 1, num_ship
  write(number, '(i1)') i

  ! Data nama kapal perhitungan kapal target
  mship(i)%shipname = 'ship_' // number

  ! Memuat data untuk setiap kapal target perhitungan
  open(1, file = 'input\' // mship(i)%shipname//
'_condition.dat'&
  & , status = 'old')

  ! Koordinat posisi awal (x0, y0), sudut belok awal (derajat),
  kecepatan awal kapal
  read (1, *) mship(i)%x0, mship(i)%y0, mship(i)%psi0,
mship(i)%u0
  mship(i)%psi0 = mship(i)%psi0 * pi / 180.0
```

Gambar 4.6 Program untuk membaca data kondisi kapal

Gambar 4.6 merupakan program yang digunakan untuk membaca kondisi kapal. Langkah pertama yang dilakukan adalah membuat berkas dengan nama ‘mship(i)%Shipname_condition.dat’. Tulisan ‘mship(i)%Shipname’ adalah nama kapal; untuk kapal sendiri diberi nama 1 dan untuk kapal sasaran diberi nama 2, 3, 4, ..., n (sesuai jumlah kapal sasaran yang akan diperhitungkan). Dengan demikian, berkas tersebut akan menjadi ‘1_condition.dat’, ‘2_condition.dat’, dan seterusnya. Isi dari berkas tersebut meliputi posisi awal kapal (koordinat x dan koordinat y), sudut arah kapal (derajat), dan kecepatan kapal (m/s). Data dimensi kapal yang digunakan adalah ukuran utama kapal, koefisien kapal, propeller dan kemudi kapal, dan koefisien hidrodinamik kapal.

```

! Menampilkan waktu mulai pemrosesan dalam subrutin
sub_name = 'dread'
call sub_start(sub_name)

open(1, file='input\\ship%shipname\\.dat',status='old')

read(1, fmt = '(a42)') title
read(1, fmt = '(a21)') dummy0
read(1, 1000) dummy, ship%length ! Ship length, L (m)
read(1, 1000) dummy, ship%breadth ! Ship breadth, B (m)
read(1, 1000) dummy, ship%draught ! Ship draught, d (m)
read(1, 1000) dummy, ship%cb ! Block coefficient, Cb

```

Gambar 4.7 Program untuk membaca data dimensi kapal

Gambar 4.7 merupakan model pemrograman untuk membaca data dimensi kapal. Untuk dapat membaca data dimensi kapal, perlu dibuat sebuah berkas dengan nama ‘Ship%Shipname.dat’. Tulisan ‘Ship%Shipname’ adalah nama kapal; untuk kapal sendiri diberi nama 1 dan untuk kapal sasaran diberi nama 2, 3, 4, ..., n (sesuai jumlah kapal sasaran yang akan diperhitungkan). Data dimensi kapal yang digunakan dalam pengembangan ini berjumlah sekitar 21, dan data tersebut dimasukkan secara manual ke dalam berkas yang telah dibuat sesuai dengan format yang terdapat pada Gambar 4.7.

Data-data tersebut akan disimpan dalam penyimpanan yang telah disediakan. Setelah mendapatkan data-data tersebut, langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan konstanta, added masses, derivatives, koefisien interaksi, dan trim kapal. Dalam penelitian ini, trim kapal adalah 0, yang berarti kapal dianggap even keel. Perhitungan added masses dalam penelitian ini merujuk pada Motora dkk (1969). Perhitungan derivatives dilakukan untuk membaca berkas

masukan yang telah diberikan. Dalam pengembangan algoritma dasar sistem peringatan dini tabrakan kapal dengan metode penilaian indeks risiko tabrakan, masukan yang diberikan masih dalam bentuk data manual.

Setelah data terbaca, akan dibuat sebuah variabel yang digunakan untuk perhitungan risiko tabrakan kapal. Variabel tersebut berasal dari data kondisi kapal dan beberapa data tambahan. Jumlah variabel untuk perhitungan risiko tabrakan kapal ada delapan, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8.

betagr = var(1)	!	Drift angle (rad.)
rdashg = var(2)	!	Nondimensional yaw rate
usg = var(3)	!	Ship speed (m/s)
psir = var(4)	!	Heading angle (rad.)
posixg = var(5)	!	x-position (m)
posiyg = var(6)	!	y-position (m)

Gambar 4.8 Variabel tidak tetap untuk perhitungan risiko tabrakan kapal

Ada enam variabel yang tercantum pada Gambar 4.8 dan dua variabel lainnya adalah variabel yang berfungsi menjaga konsistensi variabel lainnya. Pada Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa variabel-variabel tersebut adalah *drift angle*, *nondimensional yaw rate*, kecepatan kapal, sudut arah kapal, posisi x, dan posisi y.

4.3 Deteksi konflik

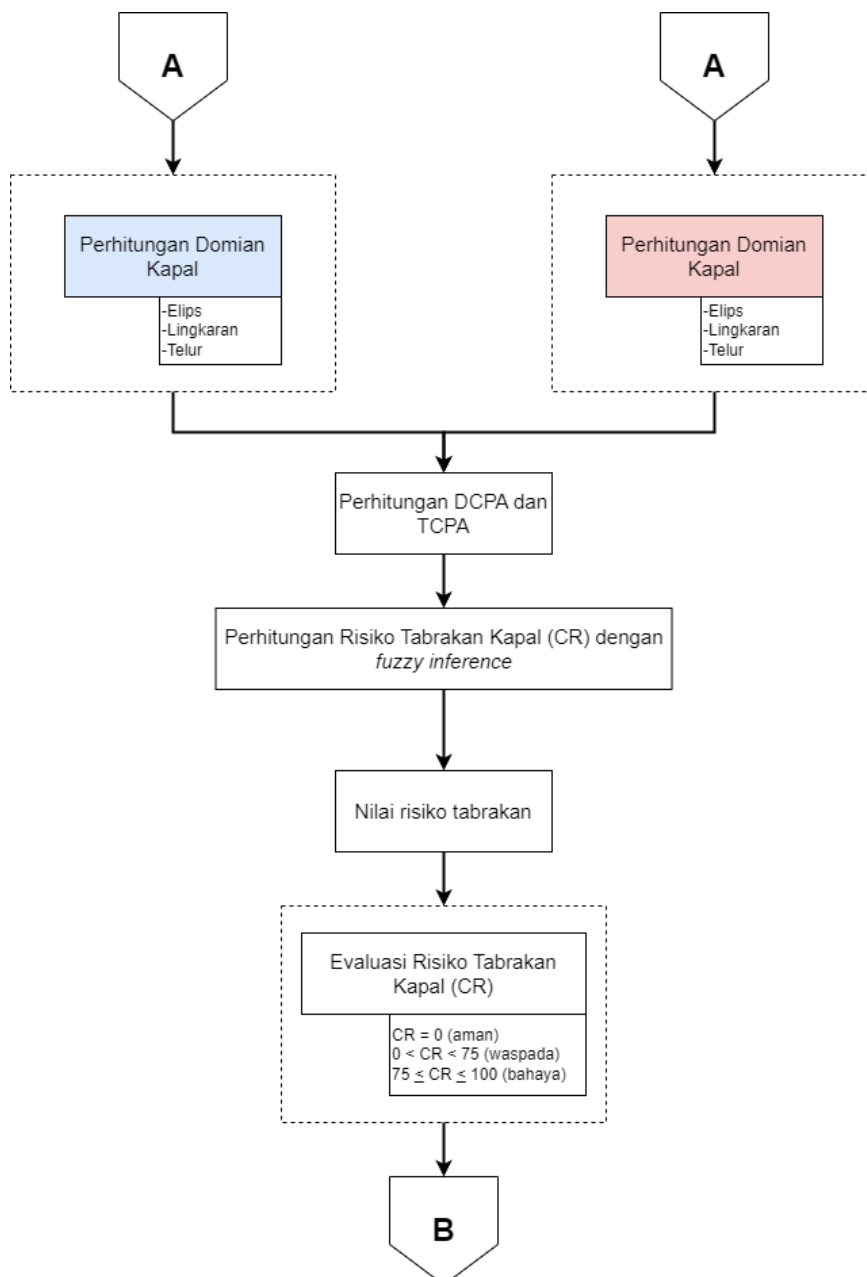
Deteksi konflik dibagi menjadi 3 bagian, yaitu: *input*, *process*, dan *output*. *Input* dari deteksi konflik ini adalah parameter – parameter yang akan digunakan untuk melakukan perhitungan risiko tabrakan kapal. Perhitungan tabrakan kapal adalah proses dari deteksi konflik sehingga dari proses tersebut maka dapat kelau nilai risiko tabrakan. Parameter – parameter yang digunakan sebagai *input* adalah domain kapal dan DCPA dan TCPA.

Gambar 4.9 menunjukan diagram alir dari deteksi konflik tabrakan kapal. Karena ini menjadi salah satu parameter penilai risiko tabrakan kapal, maka akan diberikan variasi bentuk domain. Bentuk domain yang akan dipakai, yaitu: elips, lingkaran, dan telur. Bentuk dan ukuran domain dapat dilihat pada Gambar 2.11 dan persamaan (2.47) - (2.55). Dengan diberikan variasi pengaruh domain diharapkan dapat mempengaruhi penilaian risiko tabrakan kapal.

Parameter yang kedua adalah DCPA dan TCPA. DCPA adalah jarak pertemuan terdekat ketika dua kapal tetap berada di rute dengan mempertahankan

kecepatannya. TCPA adalah jarak ketika dua kapal tetap berada pada rutenya dengan mempertahankan kecepatannya, dalam hal ini, TCPA mewakili waktu hingga kedua kapal berada di posisi terdekat satu sama lain. Detail dari perhitungan DCPA dan TCPA dapat dilihat pada sub-bab 2.4.7.

Perhitungan domain kapal dilakukan dengan membuat program perhitungannya. Dengan menggunakan persamaan (2.47) - (2.55), program dapat dibuat.



Gambar 4.9 Diagram alir deteksi konflik penghindaran tabrakan


```

do i_ship = 1, num_ship
  Mj(i_ship) = mship(i_ship)%length * 5.9
  Mi(i_ship) = mship(i_ship)%length * 4.1
end do

```

Gambar 4.10 Program untuk perhitungan domain kapal berbentuk elips

Gambar 4.10 menunjukkan pemrograman yang digunakan untuk melakukan perhitungan bentuk elips. Program yang dibuat cukup mudah untuk dipahami, Mj adalah panjang sumbu mayor dari elips dan Mi adalah panjang sumbu minor dari elips.

```

Rho(i_ship) = (5.625 - (0.612 * s_o) - (0.602 * sb_g) -
(0.561 * t_d) - (0.495 * vo_s) - (0.245 * vo_m)) * l_ij

```

Gambar 4.11 Program untuk perhitungan domain kapal berbentuk lingkaran

Gambar 4.11 menunjukkan pemrograman yang digunakan untuk melakukan perhitungan bentuk lingkaran. Nilai – nilai dalam perhitungan jari – jari lingkaran dapat dilihat pada persamaan (2.53). Nilai jari-jari lingkaran dituliskan dengan kode ‘Rho’.

```

rb_f(i_ship) = mship(i_ship)%length + 2.0 * t90 * u0_kt
rb_a(i_ship) = mship(i_ship)%length + t90 * u0_kt
sb(i_ship) = mship(i_ship)%breadth + dt

```

Gambar 4.12 Program untuk perhitungan domain kapal berbentuk telur

Gambar 4.12 merupakan model pemrograman yang digunakan untuk memperhitungkan domain kapal berbentuk telur. Nilai panjang sumbu mayor bagian depan dituliskan dengan kode ‘rb_f’, panjang sumbu minor dituliskan dengan kode ‘sb’, dan panjang sumbu mayor bagian belakang dituliskan dengan kode ‘rb_a’.

```

! Kecepatan relatif, sudut relatif, dll.
v_xr = v_1 * cos(theta_1) - v_0 * cos(theta_0)
v_yr = v_1 * sin(theta_1) - v_0 * sin(theta_0)
r_distance = sqrt((y_1 - y_0)**2 + (x_1 - x_0)**2)
theta_01 = atan2(y_1 - y_0, x_1 - x_0)
theta_r = atan2(v_yr, v_xr)
v_r = v_0 * cos(theta_0 - theta_r) &
& - v_1 * cos(theta_1 - theta_r)

! DPCA, TCPA
dcpa(i, j) = r_distance * abs(sin(theta_01 - theta_r))
tcpa(i, j) = r_distance * cos(theta_01 - theta_r) / v_r

```

Gambar 4.13 Model program untuk perhitungan DCPA dan TCPA

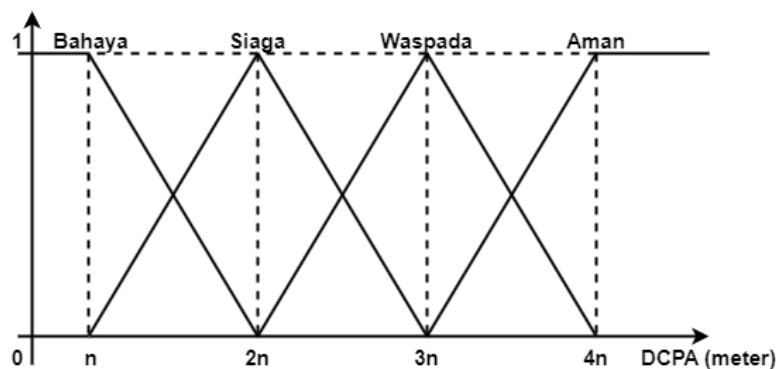
Gambar 4.13 menunjukkan model program yang digunakan untuk menghitung DCPA dan TCPA. Model ini berdasarkan penjelasan persamaan (2.39) - (2.46). Untuk setiap jumlah kapal, masing – masing dilakukan perhitungan DCPA dan TCPA. Domain kapal yang digunakan dalam penelitian ini ada tiga bentuk, yaitu berbentuk elips, lingkaran, dan telur. Perhitungan domain dapat dilihat pada sub-bab 2.4.8 untuk lebih jelasnya. Dari hasil perhitungan domain kapal, didapatkan nilai untuk jari-jari setiap sumbu yang berhubungan. Hasil perhitungan tersebut akan digunakan sebagai parameter dalam menghitung risiko tabrakan (CR) kapal.

Perhitungan risiko tabrakan kapal dilakukan dengan menggunakan *fuzzy inference*. Langkah pertama yang harus dilakukan dalam melakukan perhitungan dengan fuzzy inference adalah menentukan himpunan *fuzzy*. Dalam melakukan perhitungan tabrakan kapal menggunakan tiga buah variabel, yaitu variabel DCPA, TCPA dan risiko tabrakan (CR), dengan domain kapal sebagai variasi fungsi keanggotaan.

4.3.1 Himpunan *fuzzy*

Dari variabel – variabel yang sudah disebutkan di atas, selanjutnya akan ditentukan himpunan *fuzzy* dari kedua variabel. Himpunan *fuzzy* dari setiap variabel, sebagai berikut:

1. Himpunan *fuzzy* untuk DCPA



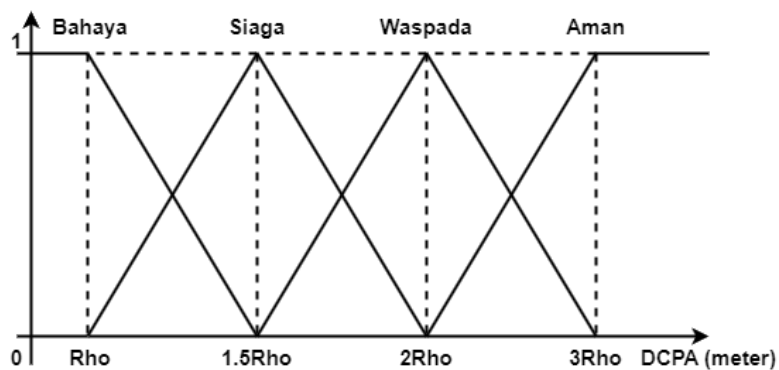
Gambar 4.14 Himpunan *fuzzy* pada variabel DCPA

Gambar 4.14 menunjukkan himpunan *fuzzy* pada variabel DCPA. Domain dari himpunan *fuzzy* dibagi menjadi empat, yaitu Aman, Waspada, Siaga, dan Bahaya. Pembagian domain tersebut berdasarkan penilaian bahaya aktifitas gunung berapi yang ditulis oleh Farah Virkhansa dkk. (2019) yang berasal dari Pusat

Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) yang mengklasifikasikan status gunung berapi menjadi empat level, yaitu normal (level I), waspada (level II), siaga (level III), dan awas (level IV). Berdasarkan status tersebut, maka dapat digunakan sebagai pendekatan status kondisi untuk DCPA dan TCPA pada himpunan fuzzy. Aman merupakan status normal, Waspada merupakan status waspada, Siaga merupakan status siaga, Bahaya adalah status awas.

Status "Aman" berarti risiko tabrakan sangat rendah, kapal berada pada jarak aman dan tidak memerlukan tindakan penghindaran. Status "Waspada" menunjukkan peningkatan risiko tabrakan, kapal harus lebih hati-hati dan siap untuk bertindak jika situasi memburuk. Status "Siaga" menunjukkan risiko signifikan, tindakan penghindaran harus segera dipertimbangkan. Status "Bahaya" berarti tabrakan hampir pasti terjadi jika tidak segera dihindari, tindakan darurat harus segera diambil. Pada nilai fungsi keanggotaan yang ditulis adalah n , $2n$, $3n$, dan $4n$. Nilai – nilai tersebut akan dirubah sesuai dengan bentuk domain yang akan digunakan.

Gambar 4.15 adalah himpunan *fuzzy* pada variabel DCPA dengan bentuk domain lingkaran. Nilai fungsi semesta yang digunakan berubah menjadi jari – jari domain kapal lingkaran yang telah diperhitungkan.



Gambar 4.15 Himpunan *fuzzy* pada variabel DCPA dengan bentuk domain lingkaran

Semesta pembicara untuk variabel DCPA dengan bentuk domain lingkaran: $[0 \ 3Rho]$. Batas domain himpunan *fuzzy*, sebagai berikut:

- Bahaya = $[Rho \ 1.5Rho]$
- Siaga = $[Rho \ 2Rho]$
- Waspada = $[1.5Rho \ 3Rho]$

$$\text{Aman} = [2Rho \ 3Rho]$$

Nilai Rho diperoleh melalui perhitungan pada persamaan (2.53). Batasan ini didasarkan pada semakin mendekatnya kapal sasaran ke daerah domain kapal sendiri, yang menunjukkan status 'Bahaya'. Jika hasil perhitungan DCPA menunjukkan bahwa pertemuan kedua kapal berada dalam domain kapal sendiri, maka statusnya adalah 'Bahaya'. Oleh karena itu, batasan bahaya tersebut ditentukan oleh panjang jari-jari lingkaran karena pada setiap sisinya memiliki ukuran yang sama dan tidak ada perbedaan. Fungsi keanggotaan untuk variabel DCPA berbentuk domain lingkaran adalah sebagai berikut:

$$\mu_{Bahaya} = \begin{cases} 1; x \leq Rho \\ \frac{(x - Rho)}{(1.5Rho - Rho)}; Rho < x < 1.5Rho \\ 0; x \geq 1.5Rho \end{cases}$$

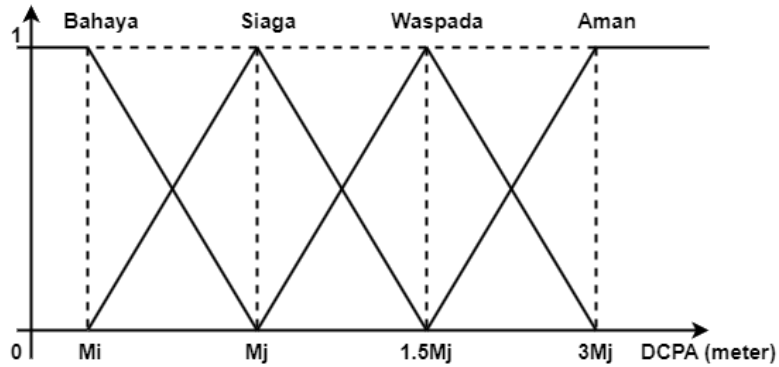
$$\mu_{Siaga} = \begin{cases} 0; x \leq Rho \\ \frac{(x - Rho)}{(1.5Rho - Rho)}; Rho < x < 1.5Rho \\ \frac{(2Rho - x)}{(2Rho - 1.5Rho)}; 1.5Rho < x < 2Rho \\ 0; x \geq 3Rho \end{cases}$$

$$\mu_{Waspada} = \begin{cases} 0; x \leq 1.5Rho \\ \frac{(x - 1.5Rho)}{(2Rho - 1.5Rho)}; 1.5Rho < x < 2Rho \\ \frac{(3Rho - x)}{(3Rho - 2Rho)}; 2Rho < x < 3Rho \\ 0; x \geq 1.5Rho \end{cases}$$

$$\mu_{Aman} = \begin{cases} 1; x \leq 3Rho \\ \frac{(2Rho - x)}{(3Rho - 2Rho)} - 1; 2Rho < x < 3Rho \\ 0; x \geq 2Rho \end{cases}$$

Fungsi keanggotaan ini digunakan untuk menentukan nilai keanggotaan variabel DCPA dan apakah nilai tersebut termasuk dalam salah satu himpunan domain yang ditentukan. Hal ini dilakukan sesuai dengan aturan fungsi keanggotaan dari fuzzy logic.

Gambar 4.16 adalah himpunan *fuzzy* pada variabel DCPA dengan bentuk domain elips. Nilai fungsi keanggotaan yang digunakan berubah menjadi panjang sumbu utama (Mj) dan sisi (Mi) yang telah diperhitungkan.



Gambar 4.16 Himpunan *fuzzy* pada variabel DCPA dengan bentuk domain elips

Semesta pembicara untuk variabel DCPA dengan bentuk domain lingkaran: $[0 \ 3Mj]$. Batas domain himpunan *fuzzy*, sebagai berikut:

- Bahaya = $[Mi \ Mj]$
- Siaga = $[Mi \ 1.5Mj]$
- Waspada = $[Mj \ 3Mj]$
- Aman = $[1.5Mj \ 3Mj]$

Nilai Mi dan Mj diperoleh melalui perhitungan pada persamaan (2.54) dan (2.55). Batasan ini didasarkan pada semakin mendekatnya kapal sasaran ke daerah domain kapal sendiri, yang menunjukkan status 'Bahaya'. Jika hasil perhitungan DCPA menunjukkan bahwa pertemuan kedua kapal berada dalam domain kapal sendiri, maka statusnya adalah 'Bahaya'. Dalam kasus ini, karena domain elips memiliki dua ukuran yang berbeda, yaitu Mi dan Mj , nilai terkecil adalah Mi . Oleh karena itu, batas untuk status 'Bahaya' ditentukan oleh Mi dan Mj . Jika nilai DCPA sudah berada di bawah nilai Mi , maka statusnya menjadi 'Bahaya'. Fungsi keanggotaan untuk variabel DCPA berbentuk domain elips adalah sebagai berikut:

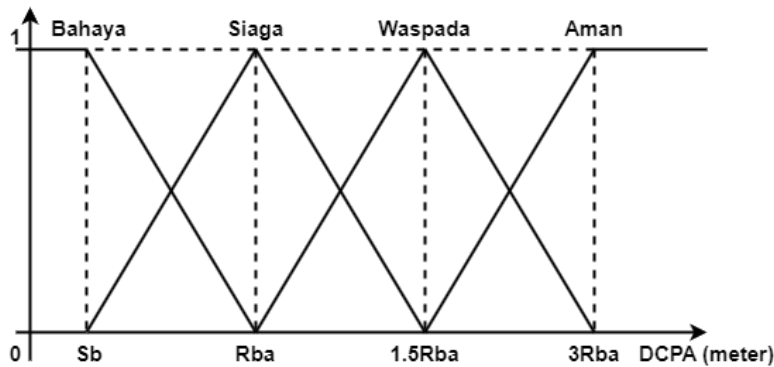
$$\mu_{Bahaya} = \begin{cases} 1 ; x \leq Mi \\ \frac{(x - Mi)}{(Mj - Mi)} ; Mi < x < Mj \\ 0 ; x \geq Mj \end{cases}$$

$$\mu_{Siaga} = \begin{cases} 0 ; x \leq Mi \\ \frac{(x - Mi)}{(Mj - Mi)} ; Mi < x < Mj \\ \frac{(1.5Mj - x)}{(1.5Mj - Mj)} ; Mj < x < 1.5Mj \\ 0 ; x \geq 1.5Mj \end{cases}$$

$$\mu_{Waspada} = \begin{cases} 0 ; x \leq Mj \\ \frac{(x - Mj)}{(1.5Mj - Mj)} ; Mj < x < 1.5Mj \\ \frac{(3Mj - x)}{(3Mj - 1.5Mj)} ; 1.5Mj < x < 3Mj \\ 0 ; x \geq 3Mj \end{cases}$$

$$\mu_{Aman} = \begin{cases} 1 ; x \leq 3Mj \\ \frac{(1.5Mj - x)}{(3Mj - 1.5Mj)} - 1 ; 1.5Mj < x < 3Mj \\ 0 ; x \geq 1.5Mj \end{cases}$$

Gambar 4.17 adalah himpunan *fuzzy* pada variabel DCPA dengan bentuk domain telur. Nilai fungsi keanggotaan yang digunakan berubah menjadi panjang bagian belakang telur (R_{ba}) dan panjang sisi telur (S_b) yang telah diperhitungkan.



Gambar 4.17 Himpunan *fuzzy* pada variabel DCPA dengan bentuk domain telur

Semesta pembicara untuk variabel DCPA dengan bentuk domain lingkaran: $[0 \ 3b_a]$. Batas domain himpunan *fuzzy*, sebagai berikut:

- Bahaya = $[S_b \ R_{ba}]$
- Siaga = $[S_b \ 1.5R_{ba}]$
- Waspada = $[R_{ba} \ 3R_{ba}]$
- Aman = $[1.5R_{ba} \ 3R_{ba}]$

Nilai R_{ba} dan S_b diperoleh melalui perhitungan pada persamaan (2.48) dan (2.49). Batasan ini didasarkan pada semakin mendekatnya kapal sasaran ke daerah domain kapal sendiri, yang menunjukkan status 'Bahaya'. Jika hasil perhitungan DCPA menunjukkan bahwa pertemuan kedua kapal berada dalam domain kapal sendiri, maka statusnya adalah 'Bahaya'. Dalam kasus ini, karena domain telur memiliki tiga ukuran yang berbeda, yaitu R_{bf} , R_{ba} , dan S_b , nilai terkecil adalah R_{ba} dan S_b . Oleh karena itu, batas untuk status 'Bahaya' ditentukan

oleh Rba dan Sb. Jika nilai DCPA sudah berada di bawah nilai Sb, maka statusnya menjadi 'Bahaya'. Fungsi keanggotaan untuk variabel DCPA berbentuk domain telur adalah sebagai berikut:

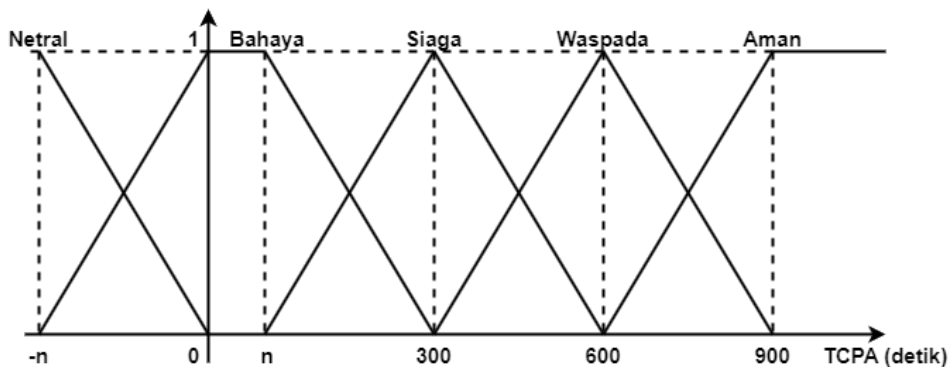
$$\mu_{Bahaya} = \begin{cases} 1; x \leq Sb \\ \frac{(x - Sb)}{(Rba - Sb)}; Sb < x < Rba \\ 0; x \geq Rba \end{cases}$$

$$\mu_{Siaga} = \begin{cases} 0; x \leq Sb \\ \frac{(x - Sb)}{(Rba - Sb)}; Sb < x < Rba \\ \frac{(1.5Rba - x)}{(1.5Rba - Rba)}; Rba < x < 1.5Rba \\ 0; x \geq 1.5Rba \end{cases}$$

$$\mu_{Waspada} = \begin{cases} 0; x \leq Rba \\ \frac{(x - Rba)}{(1.5Rba - Rba)}; Rba < x < 1.5Rba \\ \frac{(3Rba - x)}{(3Rba - 1.5Rba)}; 1.5Rba < x < 3Rba \\ 0; x \geq 3Rba \end{cases}$$

$$\mu_{Aman} = \begin{cases} 1; x \leq 3Rba \\ \frac{(1.5Rba - x)}{(3Rba - 1.5Rba)} - 1; 1.5Rba < x < 3Rba \\ 0; x \geq 1.5Rba \end{cases}$$

2. Himpunan *fuzzy* untuk TCPA

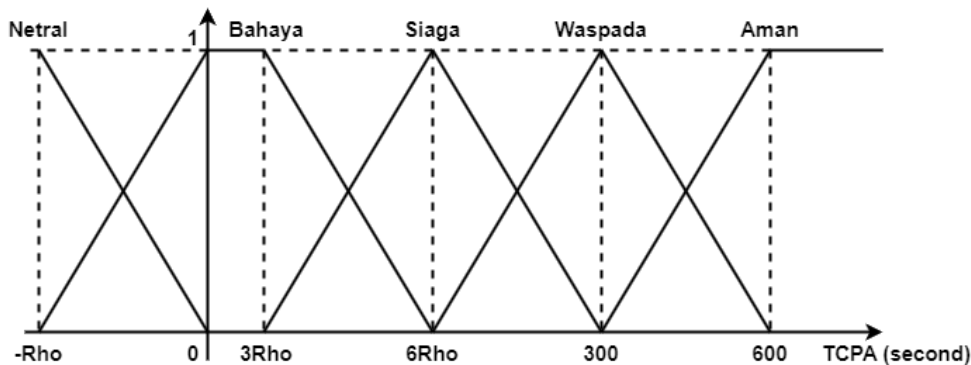


Gambar 4.18 Himpunan *fuzzy* pada variabel TCPA

Gambar 4.18 menunjukkan himpunan fuzzy pada variabel TCPA. Domain dari himpunan *fuzzy* pada variabel TCPA ini sama dengan yang telah dijelaskan pada himpunan *fuzzy* DCPA, yaitu Aman, Waspada, Siaga, dan Bahaya. Terdapat tambahan satu domain, yaitu Netral, yang berlaku ketika kedua kapal sudah

melewati satu sama lain. Dalam kondisi ini, nilai fungsi keanggotaannya berada di negatif, karena kedua kapal sudah tidak saling bertemu lagi. Pada nilai fungsi keanggotaan yang ditulis adalah $-n$, n , 300 , 600 , 900 . Nilai n akan berubah sesuai dengan bentuk domain yang digunakan dan nilai 300 , 600 , 900 berasal dari Choe & Furukawa (2018).

Gambar 4.19 menunjukkan himpunan fuzzy pada variabel TCPA dengan bentuk domain lingkaran. Nilai fungsi keanggotaan yang digunakan berubah menjadi jari-jari lingkaran (Rho), sama seperti pada himpunan fuzzy DCPA, karena semua ukuran panjang sama pada domain lingkaran.



Gambar 4.19 Himpunan *fuzzy* pada variabel TCPA dengan bentuk domain lingkaran

Semesta pembicara untuk variabel TCPA dengan bentuk domain lingkaran: $[-Rho \ 600]$. Batas domain himpunan *fuzzy*, sebagai berikut:

- Netral = $[-Rho \ 0]$
- Bahaya = $[-Rho \ 6Rho]$
- Siaga = $[3Rho \ 300]$
- Waspada = $[6Rho \ 600]$
- Aman = $[300 \ 600]$

Nilai Rho diperoleh melalui perhitungan pada persamaan (2.53). Karena TCPA berguna untuk mengetahui kapan kedua kapal bertemu, batasan himpunan yang digunakan adalah bagian domain depan, sehingga kapal memiliki waktu yang cukup untuk memberikan penilaian yang baik. Pada bentuk domain lingkaran, karena memiliki panjang yang sama pada setiap sisi, tetap digunakan Rho sebagai batasannya, namun dengan penambahan. Hal ini dikarenakan penggunaan Rho saja membuat nilai deteksi terlalu kecil, sehingga kapal terlambat dalam mendeteksi.

Oleh karena itu, Rho dikalikan tiga agar kapal memiliki waktu yang cukup untuk mengambil keputusan. Ini adalah salah satu kekurangan dari bentuk domain lingkaran. Seiring dengan semakin mendekatnya jarak antara kedua kapal, waktu tabrakan juga semakin dekat. Dengan asumsi tersebut, jika waktu pertemuan semakin mendekati atau sam dengan panjang domain bagian depan, maka status 'Bahaya' akan diberikan. Fungsi keanggotaan untuk variabel TCPA berbentuk domain lingkaran adalah sebagai berikut:

$$\mu_{Netral} = \begin{cases} 1; x \leq -Rho \\ \frac{(x - (-Rho))}{(0 - (-Rho))}; -Rho < x < 0 \\ 0; x \geq 0 \end{cases}$$

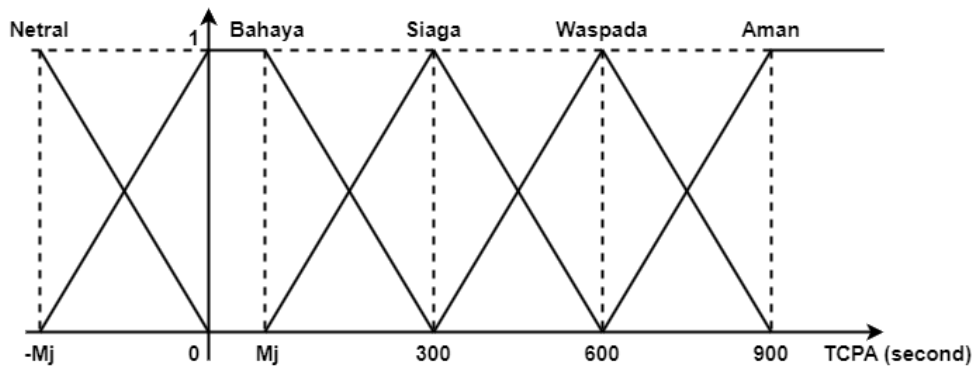
$$\mu_{Bahaya} = \begin{cases} 0; x \leq -Rho \\ \frac{(x - (-Rho))}{(0 - (-Rho))}; -Rho < x < 0 \\ 1; 0 < x < 3Rho \\ \frac{(6Rho - x)}{(6Rho - 3Rho)}; 3Rho < x < 6Rho \\ 0; x \geq 6Rho \end{cases}$$

$$\mu_{Siaga} = \begin{cases} 0; x \leq 3Rho \\ \frac{(x - 3Rho)}{(6Rho - 3Rho)}; 3Rho < x < 6Rho \\ \frac{(300 - x)}{(300 - 6Rho)}; 6Rho < x < 300 \\ 0; x \geq 300 \end{cases}$$

$$\mu_{Waspada} = \begin{cases} 0; x \leq 6Rho \\ \frac{(x - 6Rho)}{(300 - 6Rho)}; 6Rho < x < 300 \\ \frac{(600 - x)}{(600 - 300)}; 300 < x < 600 \\ 0; x \geq 600 \end{cases}$$

$$\mu_{Aman} = \begin{cases} 0; x \leq 300 \\ \frac{(300 - x)}{(600 - 300)} - 1; 300 < x < 600 \\ 1; x \geq 600 \end{cases}$$

Gambar 4.20 adalah himpunan *fuzzy* pada variabel TCPA dengan bentuk domain elips. Nilai fungsi keanggotaan yang digunakan berubah menjadi panjang sumbu utama elips (Mj). Karena bagian depan berfungsi untuk deteksi awal keberadaan kapal sasaran, sehingga menggunakan sumbu utama elips.



Gambar 4.20 Himpunan *fuzzy* pada variabel TCPA dengan bentuk domain elips

Semesta pembicara untuk variabel TCPA dengan bentuk domain lingkaran: $[-Mj \ 900]$. Batas domain himpunan *fuzzy*, sebagai berikut:

- Netral = $[-Mj \ 0]$
- Bahaya = $[-Mj \ 300]$
- Siaga = $[Mj \ 600]$
- Waspada = $[300 \ 900]$
- Aman = $[600 \ 900]$

Nilai Mj diperoleh melalui perhitungan pada persamaan (2.54). Mj digunakan sebagai pendeteksi awal keberadaan kapal sasaran. Tidak ada perubahan pada himpunan *fuzzy* pada bentuk domain elips ini karena ada perbedaan pada setiap panjang domain. Oleh karena itu, sesuai dengan penjelasan sebelumnya, Mj digunakan sebagai batasan himpunan *fuzzy* pada variabel TCPA ini. Fungsi keanggotaan untuk variabel TCPA berbentuk domain elips adalah sebagai berikut:

$$\mu_{Netral} = \begin{cases} 1; x \leq -Mj \\ \frac{(x - (-Mj))}{(0 - (-Mj))}; -Mj < x < 0 \\ 0; x \geq 0 \end{cases}$$

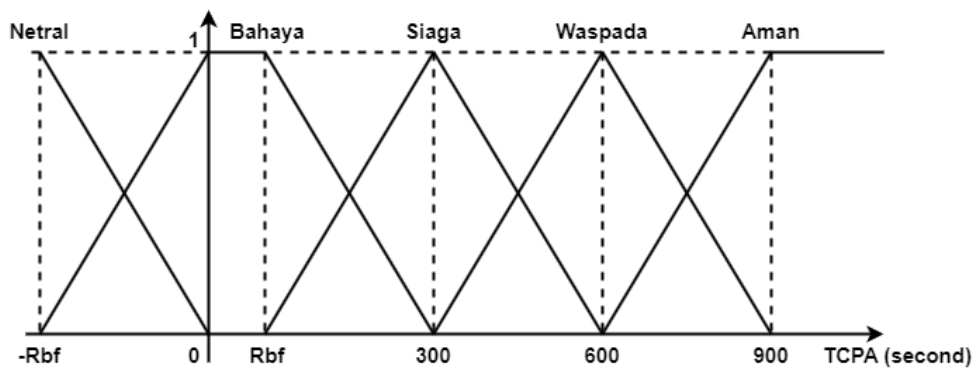
$$\mu_{Bahaya} = \begin{cases} 0; x \leq -Mj \\ \frac{(x - (-Mj))}{(0 - (-Mj))}; -Mj < x < 0 \\ 1; 0 < x < Mj \\ \frac{(300 - x)}{(300 - Mj)}; Mj < x < 300 \\ 0; x \geq 300 \end{cases}$$

$$\mu_{Siaga} = \begin{cases} 0 ; x \leq Mj \\ \frac{(x - Mj)}{(300 - Mj)} ; Mj < x < 300 \\ \frac{(600 - x)}{(600 - 300)} ; 300 < x < 600 \\ 0 ; x \leq 600 \end{cases}$$

$$\mu_{Waspada} = \begin{cases} 0 ; x \leq 300 \\ \frac{(x - 300)}{(600 - 300)} ; 300 < x < 600 \\ \frac{(900 - x)}{(900 - 600)} ; 600 < x < 900 \\ 0 ; x \leq 900 \end{cases}$$

$$\mu_{Aman} = \begin{cases} 0 ; x \leq 600 \\ \frac{(600 - x)}{(900 - 600)} - 1 ; 1.5Rba < x < 900 \\ 1 ; x \geq 900 \end{cases}$$

Gambar 4.21 adalah himpunan *fuzzy* pada variabel TCPA dengan bentuk domain telur. Nilai fungsi keanggotaan yang digunakan berubah menjadi panjang sumbu utama telur (Rbf). Karena bagian depan berfungsi untuk deteksi awal keberadaan kapal sasaran, sehingga menggunakan sumbu utama telur.



Gambar 4.21 Himpunan *fuzzy* pada variabel TCPA dengan bentuk domain telur

Semesta pembicara untuk variabel TCPA dengan bentuk domain lingkaran: $[-Rbf \ 900]$. Batas domain himpunan *fuzzy*, sebagai berikut:

- Netral = $[-Rbf \ 0]$
- Bahaya = $[-Rbf \ 300]$
- Siaga = $[Rbf \ 600]$
- Waspada = $[300 \ 900]$
- Aman = $[600 \ 900]$

Nilai Rbf diperoleh melalui perhitungan pada persamaan (2.47). Rbf digunakan sebagai pendeteksi awal keberadaan kapal sasaran. Tidak ada perubahan pada himpunan *fuzzy* pada bentuk domain telur ini karena ada perbedaan pada setiap panjang domain. Oleh karena itu, sesuai dengan penjelasan sebelumnya, Rbf digunakan sebagai batasan himpunan *fuzzy* pada variabel TCPA ini. Fungsi keanggotaan untuk variabel TCPA berbentuk domain telur adalah sebagai berikut:

$$\mu_N = \begin{cases} 1; x \leq -Rbf \\ \frac{(x - (-Rbf))}{(0 - (-Rbf))}; -Rbf < x < 0 \\ 0; x \geq 0 \end{cases}$$

$$\mu_{ZO} = \begin{cases} 0; x \leq -Rbf \\ \frac{(x - (-Rbf))}{(0 - (-Rbf))}; -Rbf < x < 0 \\ 1; 0 < x < Rbf \\ \frac{(300 - x)}{(300 - Rbf)}; Rbf < x < 300 \\ 0; x \geq 300 \end{cases}$$

$$\mu_{PS} = \begin{cases} 0; x \leq Rbf \\ \frac{(x - Rbf)}{(300 - Rbf)}; Rbf < x < 300 \\ \frac{(600 - x)}{(600 - 300)}; 300 < x < 600 \\ 0; x \leq 600 \end{cases}$$

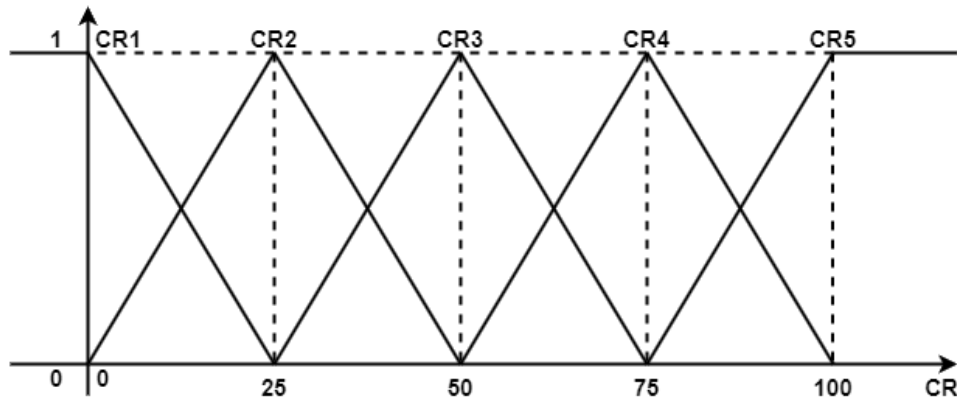
$$\mu_{PM} = \begin{cases} 0; x \leq 300 \\ \frac{(x - 300)}{(600 - 300)}; 300 < x < 600 \\ \frac{(900 - x)}{(900 - 600)}; 600 < x < 900 \\ 0; x \leq 900 \end{cases}$$

$$\mu_{PB} = \begin{cases} 0; x \leq 600 \\ \frac{(600 - x)}{(900 - 600)} - 1; 1.5Rba < x < 900 \\ 1; x \geq 900 \end{cases}$$

3. Himpunan *fuzzy* untuk risiko tabrakan (CR)

Gambar 4.22 menunjukkan respons dari himpunan *fuzzy* DCPA dan himpunan *fuzzy* TCPA, yang merupakan himpunan *fuzzy* untuk penilaian CR. Dalam sebuah himpunan logika *fuzzy*, fungsi keanggotaan terdiri dari nilai [0, 1]. Nilai 0 berarti tidak termasuk dalam himpunan tersebut, sedangkan nilai 1 berarti

sepenuhnya termasuk. Jika nilai berada antara 0 dan 1 ($0 < x \leq 1$), maka masih termasuk dalam himpunan *fuzzy* tersebut. Dalam penelitian ini, nilai 0 menunjukkan tidak terjadinya tabrakan, dan nilai 1 menunjukkan kepastian terjadinya tabrakan.



Gambar 4.22 Himpunan *fuzzy* pada variabel risiko tabrakan (CR)

Namun, pada Gambar 4.22, batasan nilai CR digunakan dengan skala 0 hingga 100. Oleh karena itu, nilai fungsi keanggotaan dikalikan dengan nilai domain yang telah ditetapkan. Domain ini dibagi menjadi lima kategori: CR1, CR2, CR3, CR4, dan CR5, masing-masing dengan nilai 0, 25, 50, 75, dan 100.

4.3.2 Perhitungan risiko tabrakan kapal dengan *fuzzy inference*

Setelah dilakukan pembuatan himpunan *fuzzy* maka tahap selanjutnya melakukan perhitungan CR. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan metode yang telah dijelaskan pada sub – bab 2.4.11. Untuk dapat menyelesaikan persamaan tersebut dibuatlah peraturan *fuzzy*, sehingga dari hubungan DCPA dan TCPA akan dihasilkan sebuah nilai yang digunakan untuk mendapatkan CR berdasarkan respon yang diberikan melalui himpunan CR dan peraturan yang telah dibuat.

Tabel 4.1 Peraturan *fuzzy inference* untuk kondisi berhadapan dan menyalip.

Berhadapan, menyalip		TCPA				
		Netral	Bahaya	Siaga	Waspada	Aman
DCPA	Bahaya	CR1	CR5	CR3	CR1	CR1
	Siaga	CR1	CR3	CR2	CR1	CR1
	Waspada	CR1	CR1	CR1	CR1	CR1
	Aman	CR1	CR1	CR1	CR1	CR1

Tabel 4.1 menunjukan aturan fuzzy untuk kondisi pertemuan saat berhadapan dan menyalip. Kondisi ini ketika sudut arah kapal sasaran sebesar 175

– 180 derajat dan -175 – (-180) derajat untuk kondisi pertemuan berhadapan. Sedangkan kondisi pertemuan sudut arah kapal sasaran sebesar -5 – 5 derajat.

Tabel 4.2 Peraturan *fuzzy inference* untuk kondisi menyebrang

menyebrang		TCPA				
		Netral	Bahaya	Siaga	Waspada	Aman
DCPA	Bahaya	CR1	CR5	CR5	CR3	CR1
	Siaga	CR1	CR5	CR4	CR3	CR1
	Waspada	CR1	CR4	CR3	CR2	CR1
	Aman	CR1	CR3	CR2	CR1	CR1

Tabel 4.2 menunjukan aturan *fuzzy* untuk kondisi pertemuan saat menyebrang. Kondisi ini ketika sudut arah kapal sasaran selaiian sebesar 175 – 180 derajat, -175 – (-180) derajat, dan -5 – 5 derajat.

Contoh cara membaca peraturan peraturan *fuzzy inference* supaya dapat mendapatkan nilai risiko tabrakan kapal sebagai berikut:

1. IF TCPA Bahaya AND DCPA Bahaya
THEN nilai risiko tabrakan CR5
Didapatkan nilai hubungan TCPA dan DCPA sebesar 0,5 dan dengan peraturan tersebut maka nilai CR adalah $0,5 \times 100 = 50$.
2. IF TCPA Aman AND DCPA Bahaya
THEN nilai risiko tabrakan CR1
Didapatkan nilai hubungan TCPA dan DCPA sebesar 1 dan dengan peraturan tersebut maka nilai CR adalah $1 \times 0 = 0$

Begitu seterusnya, untuk peraturan lainnya, sehingga secara umum nilai yang digunakan adalah [0, 1], tetapi untuk mempermudah interpretasi dan perhitungan, nilai-nilai ini diubah ke skala 0 hingga 100.

Pendekatan ini memastikan bahwa hasil analisis risiko tabrakan lebih mudah dipahami dan dapat diterapkan dalam pengambilan keputusan operasional. Dengan menggunakan skala yang lebih luas, seperti 0 hingga 100, kita dapat memberikan representasi yang lebih rinci tentang tingkat risiko dan membuat langkah-langkah mitigasi yang lebih tepat dan efektif. Kondisi dari CR1 – CR5 dapat dilihat padat Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Penjelasan kondisi risiko tabrakan

Simbol	Nilai CR	Penjelasan
CR1	0.0	Situasi pertemuan aman
CR2	25.0	Situasi pertemuan tergolong aman
CR3	50.0	Situasi pertemuan dengan sedikit risiko
CR4	75.0	Situasi pertemuan yang berbahaya
CR5	100.0	Situasi pertemuan dengan berisiko tabrakan

Sehingga dari situasi tersebut dibuatlah sebuah evaluasi, sebagai berikut:

1. Jika nilai $CR = 0$ maka kapal dalam kondisi yang aman,
2. Jika nilai $0 < CR < 75$ maka kapal dalam kondisi waspada sehingga perlu bersiap – siap bermanuver jika dirasa akan bertabrakan,
3. Jika nilai $75 \leq CR \leq 100$ maka kapal dalam kondisi berbahaya sehingga kapal harus segera melakukan manuver untuk menghindari tabrakan kapal.

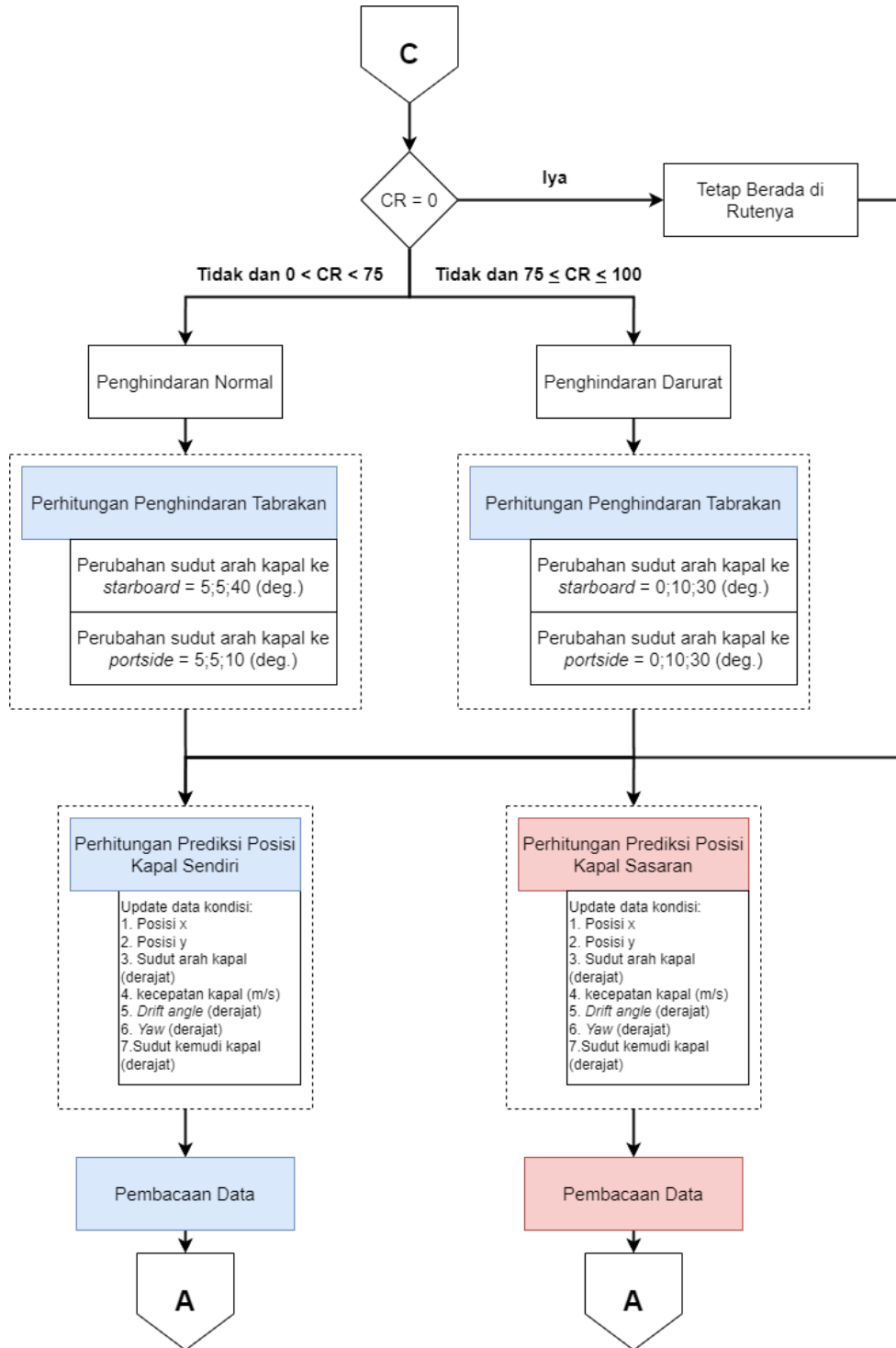
4.4 Penyelesaian konflik

Penyelesaian konflik adalah menentukan solusi penghindaran agar tidak terjadinya tabrakan kapal. Pada penelitian ini resolusi konflik menggunakan metode *machine learning* untuk *automatic collision avoidance system*. Metode yang dilakukan menggunakan program yang telah dikembangkan oleh Ota dkk (2016) yang telah dijelaskan pada sub – bab 2.4.10.

Gambar 4.23 menunjukkan diagram alir dari proses pengambilan keputusan dalam manuver penghindaran tabrakan kapal berdasarkan nilai risiko tabrakan yang dihitung dengan fuzzy inference. Proses ini dimulai dengan pengecekan apakah nilai risiko tabrakan (CR) sama dengan 0. Jika ya, kedua kapal tetap berada pada jalurnya tanpa melakukan perubahan. Jika nilai risiko tabrakan lebih dari 0, proses dilanjutkan dengan pengambilan keputusan berdasarkan kondisi penghindaran yang dihadapi.

Dalam kondisi penghindaran normal, jika $0 < CR < 75$, kapal target dan kapal sasaran akan melakukan manuver dengan mengubah sudut arah kapal atau mengubah jalur kapal sesuai dengan perubahan sudut dan jarak tertentu. Kapal target dapat mengubah sudut arah ke starboard atau portside, dan kapal sasaran dapat mengubah sudut arah atau jalur kapal dengan parameter yang ditentukan. Data yang di-update selama manuver termasuk posisi x dan y, sudut arah, kecepatan

kapal, dan sudut kemudi. Proses ini dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan bahwa setiap perubahan arah atau jalur dilakukan dengan aman dan efisien, tanpa mengganggu navigasi kapal lain di sekitarnya.



Gambar 4.23 Diagram alir dari proses pengambilan keputusan dalam manuver penghindaran tabrakan kapal berdasarkan nilai risiko tabrakan

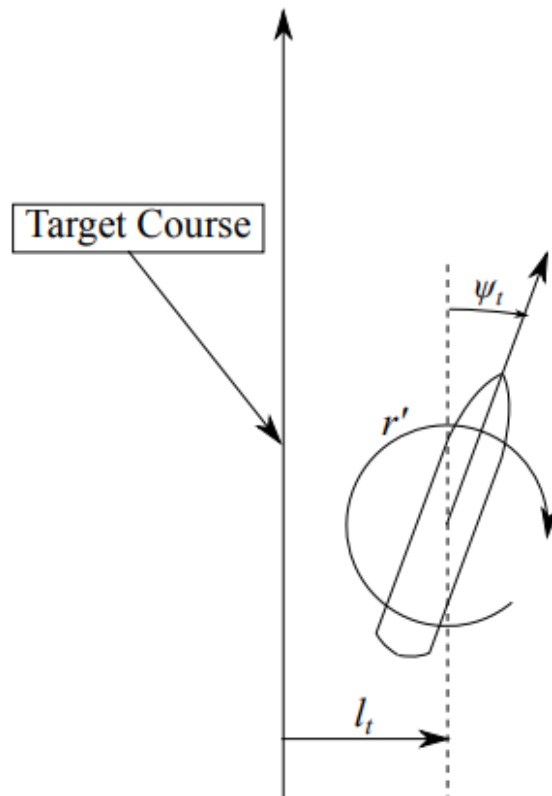
Namun, jika nilai $75 \leq CR \leq 100$, kondisi penghindaran darurat diterapkan. Dalam situasi ini, baik kapal target maupun kapal sasaran akan melakukan perubahan sudut arah yang lebih tajam ke *starboard* atau *portside* untuk menghindari tabrakan. Proses penghindaran darurat ini juga melibatkan pembaruan data posisi, sudut arah, kecepatan kapal, dan sudut kemudi secara lebih intensif untuk memastikan penghindaran tabrakan dapat dilakukan secara efektif. Selain itu, penggunaan algoritma penghindaran yang responsif dan *real-time* sangat penting dalam skenario ini untuk mengurangi risiko kesalahan manusia. Algoritma ini dirancang untuk merespons dengan cepat perubahan situasi dan memberikan rekomendasi manuver yang tepat dalam hitungan detik.

Kapten dan awak kapal harus siap melakukan manuver cepat sesuai dengan rekomendasi sistem penghindaran otomatis. Mereka perlu memahami dan mempercayai sistem ini untuk memastikan respons yang tepat waktu. Tindakan koordinatif dan komunikasi yang baik antara kapal-kapal yang terlibat juga menjadi kunci keberhasilan dalam menghindari tabrakan. Penggunaan radio komunikasi VHF untuk berkoordinasi dan memastikan bahwa setiap kapal memahami niat dan tindakan kapal lain sangat penting. Dalam situasi darurat, komunikasi yang jelas dan tegas antara kru kapal dapat membuat perbedaan antara penghindaran tabrakan yang sukses dan kegagalan.

Selain itu, latihan rutin dan simulasi manuver penghindaran darurat perlu dilakukan oleh kru kapal untuk memastikan bahwa mereka dapat merespons dengan cepat dan efektif dalam situasi nyata. Dengan persiapan yang matang dan penggunaan teknologi canggih, risiko tabrakan dapat diminimalkan, menjamin keselamatan kapal dan awaknya dalam kondisi navigasi yang padat dan berisiko tinggi.

4.4.1 Peraturan fuzzy inference untuk kontrol kapal

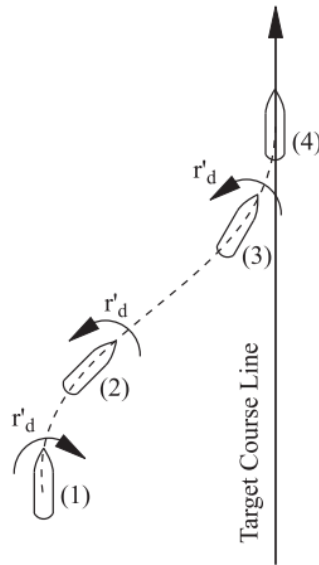
Berdasarkan penjelasan Ota dkk (2016), variabel yang membuat struktur *fuzzy inference* untuk kontrol kapal, sebagai berikut: jarak horizontal (l_t) dari rute sasaran ke kapal, sudut putar arah kapal (ψ_t) terhadap rute sasaran, laju percepatan sudut putar (r'), dan sudut kemudi kapal (δ).



Gambar 4.24 Sistem koordinat kontrol kapal (Ota dkk., 2016)

Gambar 4.24 menunjukan sistem koordinat kontrol kapal. Komponen – komponen pada Gambar 4.24 merupakan variabel yang akan digunakan dalam pembuatan peraturan *fuzzy inference* yang telah dijelaskan diatas. Dalam pembuatan peraturan *fuzzy inference* untuk kontrol perlu dipahami batasan – batasannya.

1. Ketika jarak terhadap rute sasaran jauh, kecepatan sudut putar berubah agar kapal melaju kembali ke rute sasarannya.
2. Jika jarak ke rute sasaran jauh dan kapal mengarah ke arah rute sasaran dengan sudut putar besar,
3. Ketika jarak ke jalur sasaran dekat, sudut belok dikembalikan dengan mengubah kecepatan sudut belok sehingga kapal tidak melampaui jalur sasaran (tidak *overshoot*).
4. Ketika kapal berada pada jalur sasaran, kecepatan sudut belokan diubah untuk menghilangkan inersia belokan sehingga kapal tetap pada jalurnya.

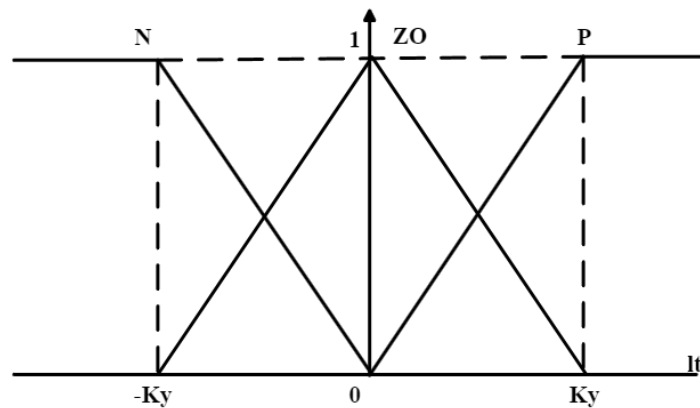


Gambar 4.25 Inferensi yaw acceleration (Ota dkk., 2016)

4.4.2 Himpunan fuzzy

Dari variabel – variabel yang sudah disebutkan di atas, selanjutnya akan ditentukan himpunan fuzzy dari kedua variabel. Himpunan fuzzy dari setiap variabel, sebagai berikut:

1. Himpunan fuzzy untuk l_t

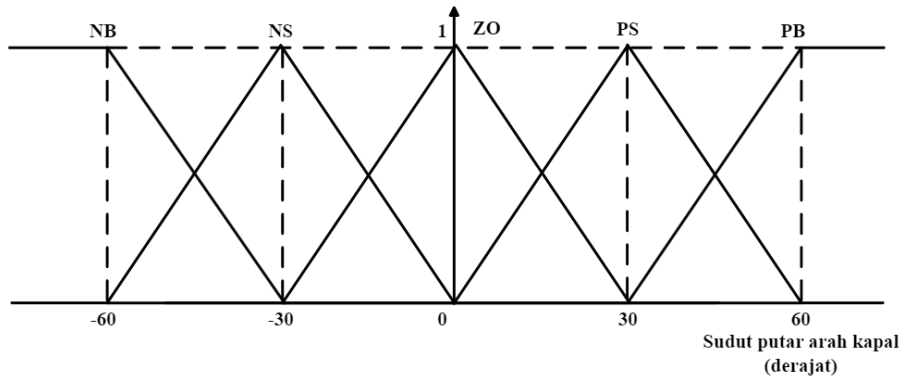


Gambar 4.26 Himpunan fuzzy untuk jarak kapal terhadap rute targetnya

Gambar 4.26 menunjukkan himpunan fuzzy untuk l_t . Fungsi semesta adalah $-Ky$ dan Ky , di mana nilai Ky diperoleh dari kondisi penghindaran kapal. Jika kapal tidak menghindari, nilai Ky adalah $4 * Lpp$. Jika kapal menghindari, nilai Ky adalah $2 * Lpp$. Jika kapal akan kembali ke rutanya, nilai Ky adalah $3 * Lpp$. Domain dari himpunan fuzzy untuk l_t terbagi menjadi tiga bagian yaitu P (*positive*), ZO (*zero*), dan N (*negative*). P terjadi jika kapal bergerak ke arah starboard, ZO

terjadi jika tidak ada perubahan rute, dan N terjadi jika kapal bergerak ke arah portside.

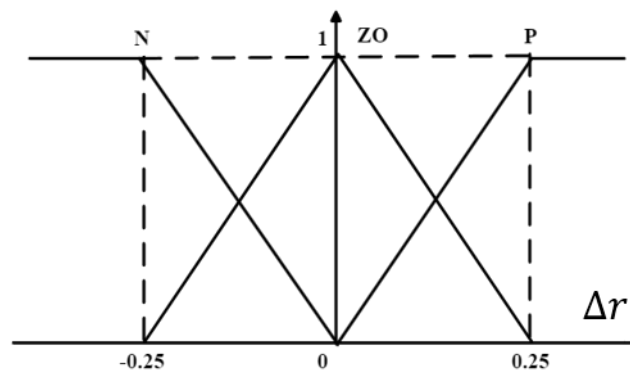
2. Himpunan fuzzy untuk ψ_t



Gambar 4.27 Himpunan fuzzy sudut putar arah kapal

Gambar 4.27 menunjukkan himpunan fuzzy untuk sudut putar arah kapal. Jika kondisi kapal melakukan penghindaran normal, sudut yang dapat dicapai untuk sudut putar arah kapal adalah 40 derajat ke *starboard* dan 10 derajat ke *portside*. Berbeda dengan penghindaran darurat, sudut putarnya adalah 30 derajat untuk setiap sisi kapal. Batasan maksimal untuk kapal melakukan perubahan sudut putar adalah 40 derajat ke *starboard* maupun ke *portside*. Domainnya terdiri dari PB (*positive big*), PS (*positive small*), ZO (*zero*), NS (*negative small*), dan NB (*negative big*). Penentuan domain itu terjadi sesuai dengan perubahan arah kapal yang terjadi, dengan rentang setiap domain adalah 30 derajat ke *starboard* maupun *portside*. ZO berlaku ketika kapal tidak mengalami perubahan arah.

3. Himpunan fuzzy untuk deviasi laju percepatan sudut putar ($\Delta r'$)



Gambar 4.28 Himpunan fuzzy untuk deviasi sudut putar kapal

Gambar 4.28 menunjukkan himpunan fuzzy untuk $\Delta r'$. Himpunan fuzzy ini merupakan input untuk perhitungan kontrol. $\Delta r'$ adalah perbedaan antara laju

percepatan sudut putar yang diinginkan (hasil perhitungan) (r'_d). dan laju percepatan sudut putar awal (r'). Pembagian domain sama seperti himpunan *fuzzy* l_t , yaitu P, ZO, dan N. P jika kapal merubah arahnya ke *starboard*, ZO jika tetap berada di rutennya, dan N jika kapal merubah arahnya ke *portside*.

4.4.3 Perhitungan kontrol kapal

Hubungan antara himpunan *fuzzy* l_t dan himpunan ψ_t menghasilkan nilai r'_d . Nilai tersebut didapatkan melalui peraturan *fuzzy inference* yang ditunjukkan pada Tabel 4.4. Dibagi menjadi tiga parameter, yaitu P, ZO, dan N. Nilai – nilai dari parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.5, Nilai K_r tergantung dari penghindaran yang dilakukan oleh kapal, jika tidak ada penghindaran yang dilakukan maka nilai K_r adalah 0,20. Jika terjadi penghindaran maka nilai K_r adalah 0,30. Dan untuk pengembalian rute nya maka nilai K_r adalah 0.4.

Tabel 4.4 Peraturan *fuzzy inference* untuk mendapatkan parameter kontrol kemudi

		ψ_t				
		NB	NS	ZO	PS	PB
l_t	N	P	P	P	ZO	N
	ZO	P	P	ZO	N	N
	P	P	ZO	N	N	N

Tabel 4.5 Variabel parameter K_r untuk r'_d

N	$-K_r$
ZO	0,0
P	K_r

Parameter K_r menunjukan hasil dari r'_d . r'_d digunakan untuk mendapatkan nilai $\Delta r'$, jadi $\Delta r' = r'_d - r'$. Hasil perhitungan ini kemudian diproses dengan inferensi *fuzzy* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.28. espon dari perhitungan ini dapat berupa P (*positive*), ZO (*zero*), atau N (*negative*). Hasil tersebut akan diterjemahkan dalam sebuah peraturan yang dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7. Tabel 4.6 adalah peraturan untuk perhitungan $\Delta r'$, selanjutnya dari peraturan tersebut dilanjut pada Tabel 4.7 untuk mendapatkan respon perubahan sudut kemudinya.

Tabel 4.6 Peraturan *fuzzy inference* untuk mendapatkan nilai sudut kemudi

	$\Delta r'$		
	NB	NS	ZO
Input	N	ZO	P
Output	N	ZO	P

Tabel 4.7 Variabel perubahan sudut kemudi

N	-35,0
ZO	0,0
P	35,0

4.5 Memprediksi Gerak Kapal

Dalam pengembangan algoritma ini, perhitungan simulasi gerak manuver kapal digunakan untuk memprediksi gerak kapal secara akurat. Penjelasan mengenai persamaan gerak kapal dapat dilihat pada sub-bab 2.4.1 hingga sub-bab 2.4.7. Persamaan-persamaan ini mencakup berbagai aspek dari dinamika kapal, termasuk gaya-gaya yang bekerja pada kapal, momen, dan respons dinamis kapal terhadap manuver tertentu.

Untuk menyelesaikan persamaan tersebut, dibuatlah sebuah program yang menggunakan metode Runge-Kutta orde 4 (RK4). Metode RK4 adalah salah satu metode numerik yang sangat efektif untuk memecahkan persamaan diferensial biasa (*ordinary differential equations* - ODEs). Metode ini dipilih karena keakuratannya yang tinggi dalam memprediksi solusi pada setiap langkah waktu yang digunakan dalam simulasi.

Proses penyelesaian dengan RK4 melibatkan penghitungan beberapa estimasi terhadap kemiringan (*slope*) dari fungsi pada titik-titik tertentu dalam interval langkah waktu. Empat evaluasi kemiringan dihitung dan dikombinasikan untuk memberikan perkiraan yang lebih baik terhadap nilai fungsi pada langkah waktu berikutnya. Implementasi metode ini dalam program simulasi memastikan bahwa prediksi gerak kapal dapat dilakukan dengan tingkat akurasi yang tinggi, memungkinkan pengambilan keputusan manuver penghindaran yang tepat berdasarkan prediksi tersebut.

4.6 Skenario Tabrakan Kapal

Ketika sebuah kapal menghadapi risiko tabrakan, serangkaian tindakan penghindaran yang sistematis dan terkoordinasi harus segera dilakukan untuk mengurangi kemungkinan terjadinya kecelakaan. Langkah pertama adalah mengurangi kecepatan kapal dengan menurunkan throttle, misalnya dari 15 knot menjadi 10 knot, guna memberikan waktu lebih banyak untuk melakukan manuver. Setelah itu, perubahan arah harus dilakukan dengan memutar kemudi, seperti mengubah arah 10 derajat ke kanan atau kiri, tergantung pada posisi dan arah kapal yang mendekat. Dalam beberapa situasi, kombinasi antara pengurangan kecepatan dan perubahan arah diperlukan untuk mengurangi momentum kapal sekaligus mengubah jalur sehingga dapat menghindari tabrakan. Jika situasi sudah sangat mendesak dan tabrakan tampak tidak terelakkan, manuver darurat seperti "*hard to starboard*" atau "*hard to port*" harus dilakukan dengan memutar kemudi sepenuhnya untuk menghindari kapal lain yang mendekat. Seluruh tindakan ini harus dikomunikasikan dengan jelas kepada kapal lain melalui radio *very high frequency* (VHF) untuk memastikan koordinasi yang tepat dan mencegah kesalahpahaman. Setelah manuver dilaksanakan, monitoring lanjutan harus terus dilakukan untuk memastikan bahwa jalur baru aman dan risiko tabrakan telah tereliminasi.

Penelitian ini berfokus pada simulasi penghindaran tabrakan kapal dalam kondisi perairan terbatas (*restricted waterway*). Mengingat kompleksitas dalam memodelkan aspek mekanis (mesin) dan ekonomis (efisiensi bahan bakar), penelitian ini mengorbankan beberapa elemen tersebut dan mempertahankan kecepatan kapal selama manuver penghindaran. Meskipun demikian, penelitian ini tetap mempertahankan berbagai parameter kritis yang relevan untuk analisis penghindaran tabrakan.

Parameter yang diperhatikan meliputi ukuran kapal, kecepatan kapal, hidrodinamika kapal, serta jarak antara kapal dalam perhitungan DCPA dan TCPA. Selain itu, penelitian ini juga memasukkan perhitungan domain kapal, yang penting dalam menentukan zona aman di sekitar kapal. Beberapa domain kapal juga memperhitungkan aspek tersebut. Pada Bentuk domain elips dan lingkaran

menggunakan ukuran kapal sebagai parameter utama. Bentuk domain telur lebih kompleks dalam perhitungannya, karena memperhatikan kemampuan manuver kapal.

Penelitian ini menggunakan model matematis gerak kapal berdasarkan metode MMG, yang memperhitungkan faktor massa tambahan (*added mass*) dan gaya-gaya hidrodinamika yang bekerja pada kapal. Dengan demikian, meskipun ada beberapa aspek yang dikorbankan, penelitian ini tetap relevan dan dapat digunakan untuk simulasi penghindaran tabrakan. Namun, untuk penerapan dalam kondisi nyata (*real-time*), perlu memperhatikan faktor-faktor yang telah dikecualikan, seperti aspek mekanis dan efisiensi rute, yang dapat mempengaruhi hasil simulasi. Penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan lebih lanjut dan aplikasi dalam situasi sebenarnya dengan mempertimbangkan faktor-faktor tambahan tersebut.

BAB 5

SIMULASI DAN PEMBAHASAN

5.1 Kondisi simulasi

Dalam penelitian ini, digunakan sebuah model kapal kontainer sebagai kapal subjek untuk simulasi numerik. Simulasi ini dilakukan pada beberapa skenario yang berbeda, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.1 dan Tabel 5.2. Simulasi mengabaikan pengaruh gangguan lingkungan seperti angin dan arus.

Tabel 5.1 Skenario dimensi kapal

Skenario	A	B	C	D
Kecepatan kapal	sama	berbeda	sama	berbeda
Panjang kapal	sama	sama	berbeda	berbeda

Tabel 5.2 Skenario kondisi kapal

Skenario	1	2	3	4
Sudut arah datang kapal sasaran	180 derajat	-135 derajat	-90 derajat	0 derajat

Tabel 5.1 dan Tabel 5.2 menunjukkan skenario yang digunakan dalam penelitian ini untuk membantu menilai risiko tabrakan kapal. Pada kecepatan sama untuk skenario C yang dimaksud adalah perbandingan nilai froud numbernya sama. Namun, tidak semua skenario yang ditulis dapat dijalankan. Oleh karena itu, dilakukan pemasangan setiap skenario, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Skenario yang digunakan untuk simulasi

Skenario		Skenario kondisi			
		1	2	3	4
Skenario dimensi	A	√	√	√	-
	B	√	√	√	√
	C	√	-	√	-
	D	√	-	-	-

Tabel 5.3 merupakan skenario yang akan dilakukan simulasi. Data kapal subjek yang digunakan dalam menjalankan simulasi dapat dilihat pada sumber yang

disebutkan. Kapal yang digunakan adalah kapal model, yang ukuran kapalnya didapatkan dari Kijima & Furukawa (2003). Kapal model tersebut akan disesuaikan skalanya sesuai dengan skenario yang akan dilakukan.

Tabel 5.4 Ukuran dan kondisi kapal model skenario A

Skenario	A1		A2		A3	
	1	2	1	2	1	2
Ship No.						
x/l	0,00	45,00	0,00	45,00	0,00	25,00
y/l	0,00	45,00	0,00	18,63	0,00	25,00
heading (deg)	0,00	-180,00	0,00	-135,00	0,00	-90,00
length (m)	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
speed (m/s)	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
speed model (kn)	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
speed asli (kn)	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50
Fn	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

Tabel 5.4 menunjukkan ukuran dan kondisi kapal model yang digunakan dalam skenario A. Kapal model memiliki panjang 3 meter dan kecepatan 0,51 m/s. Setiap skenario yang diberikan memiliki panjang dan kecepatan yang sama. Dengan panjang kapal yang sama, analisis dalam skenario A dapat lebih fokus pada evaluasi pertemuan kapal dan risiko tabrakan tanpa dipengaruhi oleh variasi panjang kapal.

Tabel 5.5 Ukuran dan kondisi kapal model skenario B

Skenario	1-A		1-B		1-C		1-E	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Ship No.								
x/l	0,00	45,00	0,00	45,00	0,00	18,80	-10,00	10,00
y/l	0,00	0,00	0,00	22,00	0,00	25,00	0,00	0,00
heading (deg)	0,00	-180,0	0,00	-135,0	0,00	-90,00	0,00	0,00
length (m)	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
speed (m/s)	0,51	0,67	0,51	0,67	0,51	0,67	0,51	0,67
speed model (kn)	0,98	1,31	0,98	1,31	0,98	1,31	0,98	1,31
speed asli (kn)	7,50	10,00	7,50	10,00	7,50	10,00	7,50	10,00
Fn	0,09	0,12	0,09	0,12	0,09	0,12	0,09	0,12

Tabel 5.5 menunjukkan ukuran dan kondisi kapal model yang digunakan dalam skenario B. Kapal model memiliki panjang 3 meter. Untuk kecepatan, kapal model 1 (kapal sendiri) adalah 0,51 m/s dan kapal model 2 (kapal sasaran) adalah 0.67 m/s. Setiap skenario yang diberikan memiliki panjang yang sama dan kecepatan yang berbeda. Dalam skenario B, meskipun panjang kapal model sama, kecepatan kedua kapal berbeda untuk mencerminkan situasi nyata di mana kapal-kapal memiliki kecepatan yang bervariasi. Dengan memvariasikan kecepatan kapal, simulasi dapat mengevaluasi risiko tabrakan dalam kondisi yang lebih dinamis dan realistis. Variasi kecepatan antara kapal sendiri dan kapal sasaran membantu dalam memahami bagaimana perbedaan kecepatan mempengaruhi kemungkinan terjadinya tabrakan dan bagaimana sistem peringatan dini harus beradaptasi terhadap kondisi ini. Dengan demikian, hasil dari skenario ini akan memberikan wawasan yang lebih komprehensif mengenai penilaian risiko tabrakan dan tindakan yang diperlukan untuk menghindari tabrakan dalam berbagai situasi pertemuan di laut.

Tabel 5.6 Ukuran dan kondisi kapal model skenario C

Skenario	C1		C2	
	1	2	1	2
Ship No.				
x (meter)	0,00	45,00	0,00	13,0
y (meter)	0,00	0,00	0,00	25
heading (deg)	0,00	-180,00	0,00	-90,00
length (m)	3,00	12,00	3,00	12,00
speed (m/s)	0,34	0,67	0,34	0,67
speed model (kn)	0,66	3,38	0,66	3,38
speed asli (kn)	5,00	5,00	5,00	5,00
Fn	0,62	0,62	0,62	0,62

Tabel 5.6 menunjukkan ukuran dan kondisi kapal model yang digunakan dalam skenario C. Dalam skenario ini, kapal model 1 memiliki panjang 3 meter, sedangkan kapal model 2 memiliki panjang 12 meter. Kedua kapal memiliki perbandingan *Froude number* yang sama, yaitu 0,62, yang menunjukkan bahwa keduanya bergerak dengan kecepatan yang proporsional terhadap panjang kapal mereka. Dalam skenario C, meskipun panjang kapal berbeda, penggunaan *Froude number* yang sama memastikan bahwa dinamika gerak kapal tetap sebanding.

Froude number adalah angka tak berdimensi yang digunakan dalam arsitektur kapal dan hidrodinamika untuk menunjukkan pengaruh kecepatan kapal terhadap panjangnya, yang sangat penting dalam memprediksi perilaku kapal dalam air. Dengan memperhatikan panjang kapal yang berbeda dan *Froude number* yang sama, simulasi ini dapat mengevaluasi risiko tabrakan dalam kondisi di mana kapal-kapal memiliki dimensi yang sangat berbeda namun kecepatan relatifnya serupa. Ini membantu dalam memahami bagaimana perbedaan ukuran kapal mempengaruhi interaksi dan risiko tabrakan, serta bagaimana sistem peringatan dini harus menyesuaikan diri dengan variasi ini.

Tabel 5.7 Ukuran dan kondisi kapal model skenario D

Skenario	D1	
	1	2
Ship No.	1	2
x (meter)	0,00	45,00
y (meter)	0,00	0,00
heading (deg)	0,00	-180,00
length (m)	3,00	9,00
speed (m/s)	0,34	0,87
speed model (kn)	0,65	1,70
speed asli (kn)	5,00	7,50
Fn	0,06	0,09

Tabel 5.7 menunjukkan ukuran dan kondisi kapal model yang digunakan dalam skenario D. Dalam skenario ini, kapal model 1 memiliki panjang 3 meter, sedangkan kapal model 2 memiliki panjang 9 meter. Kecepatan kapal model 1 adalah 0,34 m/s dan kecepatan kapal model 2 adalah 0,87 m/s. Simulasi dalam skenario ini hanya dilakukan untuk kondisi pertemuan berhadapan. Dalam skenario D, perbedaan ukuran dan kecepatan antara kedua kapal memberikan konteks yang berbeda dalam hal risiko tabrakan, khususnya dalam situasi pertemuan berhadapan. Kondisi ini sangat relevan untuk mengevaluasi bagaimana kapal dengan ukuran dan kecepatan yang berbeda harus berinteraksi untuk menghindari tabrakan. Pertemuan berhadapan biasanya dianggap sebagai salah satu skenario yang lebih berisiko dalam navigasi maritim, sehingga simulasi ini penting untuk memahami tindakan penghindaran yang diperlukan dan menguji efektivitas sistem peringatan dini.

Definisi tabrakan yang digunakan dalam penelitian ini adalah ketika kapal sasaran memasuki dari domain kapal sendiri. Sehingga ketika kapal sasaran berada pada di domain kapal sendiri maka nilai risiko tabrakan yang terjadi juga akan besar.

5.2 Simulasi tabrakan skenario A

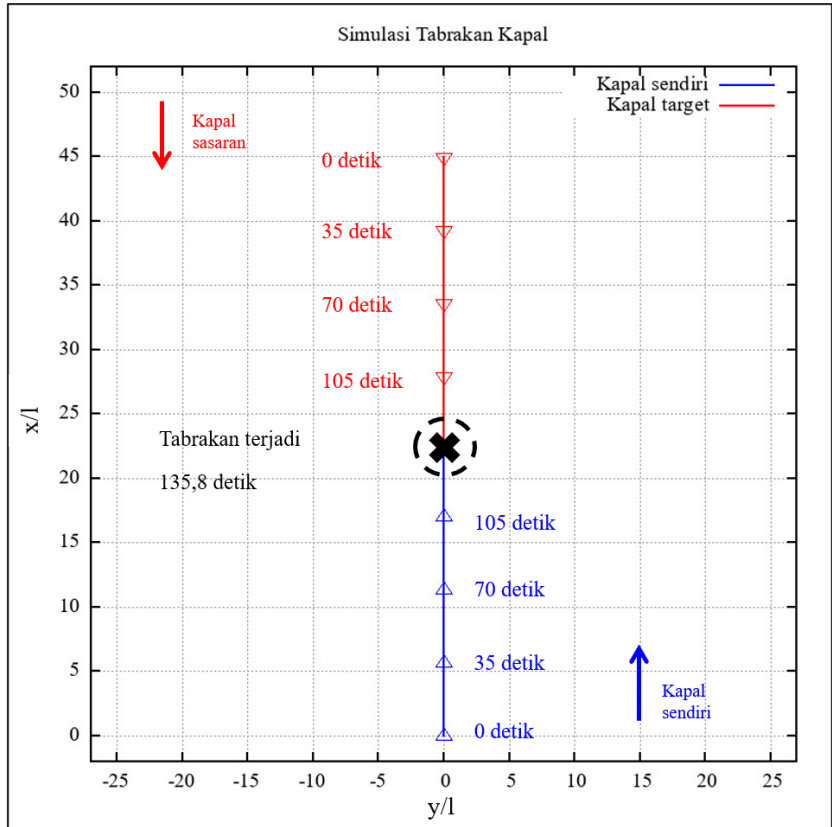
Simulasi skenario A dilakukan dengan kapal model subjek yang memiliki ukuran dan kecepatan yang sama, serta beberapa variasi sudut datang kapal sasaran sesuai dengan skenario yang telah diberikan. Hasil simulasi akan menampilkan pergerakan rute kapal (perubahan posisi kapal), nilai risiko tabrakan, nilai DCPA dan TCPA, serta jarak antara kedua kapal saat simulasi tabrakan. Pada simulasi pengambilan keputusan, hasil pergerakan kemudi kapal, kecepatan kapal, dan sudut arah kapal juga akan ditunjukkan. Kapal sendiri divisualisasikan dengan garis berwarna biru dan mata panah berwarna biru sebagai kapal sendiri yang bergerak, dan Kapal sasaran divisualisasikan dengan garis berwarna merah dan mata panah berwarna merah sebagai kapal sasaran yang bergerak.

5.2.1 Simulasi Tabrakan Skenario 1

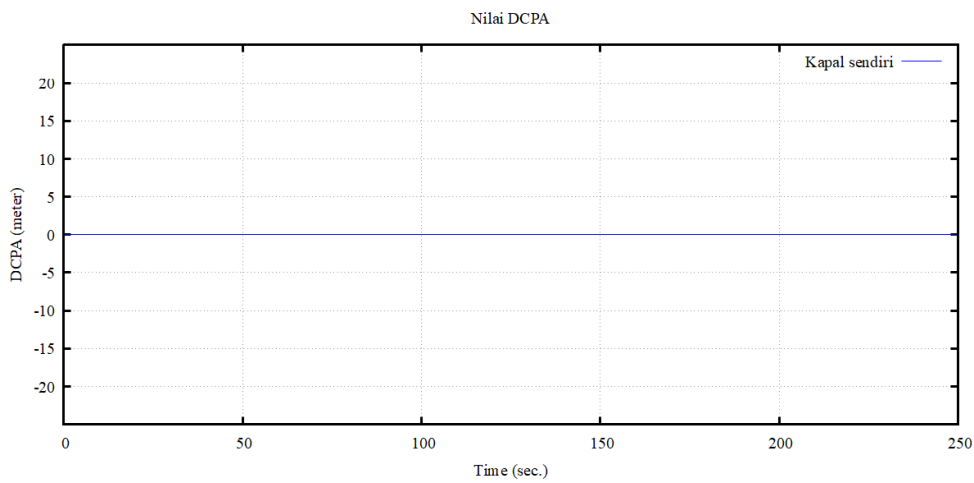
Simulasi tabrakan pada skenario A1 adalah situasi pertemuan antara dua kapal. Pada situasi ini dilakukan sebuah simulasi bertabrakan, sehingga kedua kapal tidak ada yang mengambil tindakan penghindaran. Pada Gambar 5.2 dapat dilihat $DCPA = 0,0$ meter karena kedua kapal berada di satu garis lurus pada posisi awal, akan tetapi nilai risiko tabrakan $= 0,0$ (Gambar 5.4) karena nilai TCPA masih terlalu besar (Gambar 5.3). Setelah dilakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.1, kedua kapal berjalan lurus sepanjang rute dan kedua kapal saling berhadapan satu sama lain dan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.2 - Gambar 5.5 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan $DCPA = 0,0$ meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada 56 detik ($TCPA = 78,46$ detik) dan selama perhitungan, nilai risiko tabrakan $= 100$ untuk pertama kali terjadi pada waktu 117,6 detik.

Pada waktu 117,6 detik, jarak antara kedua kapal adalah 17,94 meter. Sedangkan panjang dari domain kapal bagian depan adalah 18,72 meter, sehingga kapal sasaran sudah masuk ke dalam domain kapal sendiri. Melalui perhitungan *fuzzy inference*, pada waktu 117,6 detik nilai TCPA adalah 17,76 yang

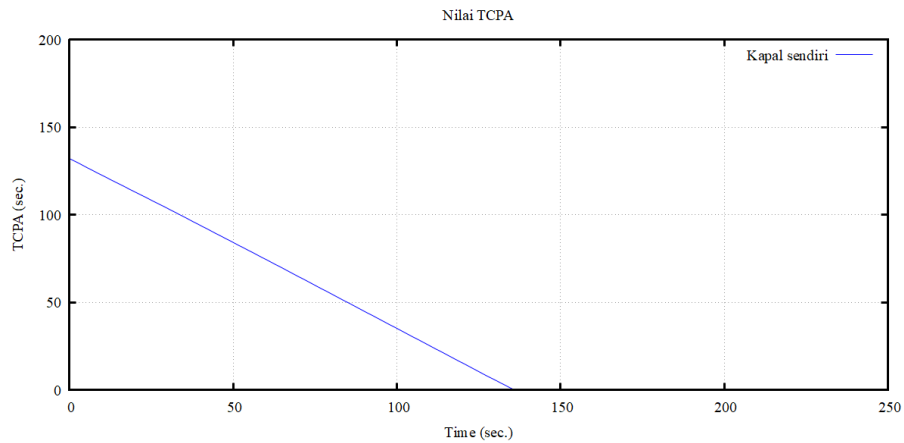
mengakibatkan domain bahaya pada himpunan fuzzy dari TCPA. Karena nilai DCPA adalah 0, ini menjadikan kondisi "IF DCPA Bahaya AND TCPA Bahaya THEN risiko tabrakan CR5", di mana $CR5 = 100$. Nilai risiko sebesar 100 terjadi hingga kedua kapal bertemu satu sama lain pada waktu 135,8 detik.



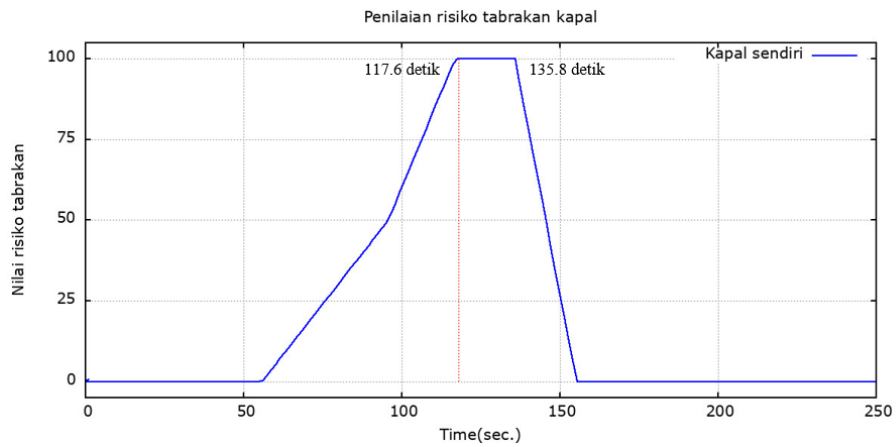
Gambar 5.1 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario A1 tanpa resolusi konflik



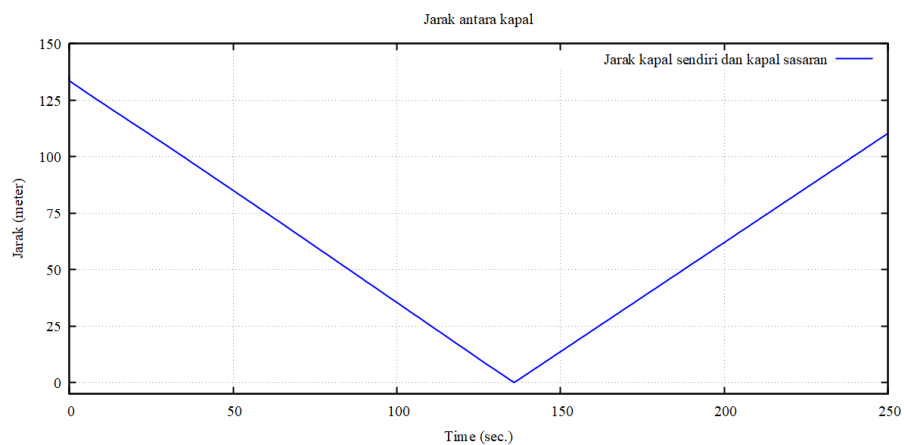
Gambar 5.2 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario A1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.3 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario A1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.4 Riwayat waktu penilai risiko tabrakan kapal skenario A1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.5 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung

Untuk mengetahui pengaruh bentuk domain kapal terhadap penilaian risiko tabrakan, maka perlu dilakukan perhitungan resolusi konflik dan untuk mengetahui hasil pengaruh bentuk domain terhadap pengambilan keputusan.

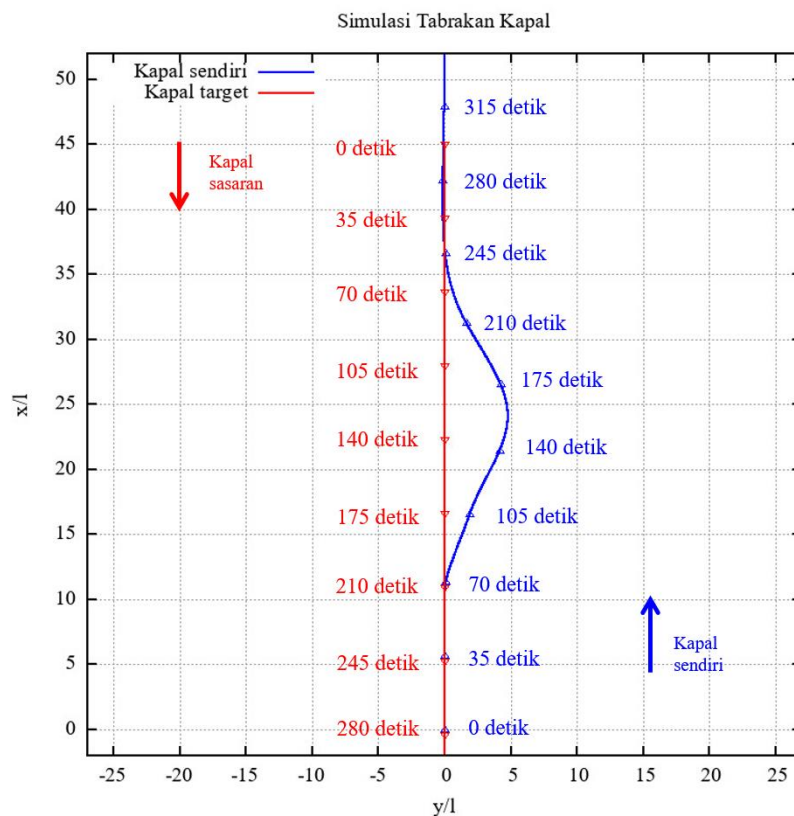
5.2.1.1 Bentuk Domain Kapal Elips

Domain kapal berbentuk elips memiliki ukuran panjang elips bagian *fore* dan *after* = 17,70 meter dan panjang elips bagian sisi = 12,30. Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.6, kedua kapal berjalan lurus sepanjang rute dan kedua kapal saling berhadapan satu sama lain dan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.11 - Gambar 5.15 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan > 0,0 untuk pertama kali terjadi pada waktu 56 detik, nilai TCPA = 78,46 detik dan nilai DCPA = 0,0 meter hal tersebut membuat peraturan *fuzzy inference* perhitungan risiko tabrakan mengakibatkan hubungan CR3 dan CR4 dan dihasilkan nilai risiko tabrakan = 0,12 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdasarkan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *starboard*.

Dengan kapal sendiri yang melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak melakukan manuver penghindaran, tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri, sedangkan nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risikonya meningkat seiring berjalannya waktu. Kemudian ketika pada waktu 78 detik, nilai risiko tabrakan > 75, sehingga mengharuskan kapal sendiri untuk mengambil keputusan untuk mengalah dalam kondisi penghindaran darurat. Pada waktu 98 detik nilai risiko tabrakan kapal sendiri = 100. Namun, jarak antara kedua kapal adalah 39,05 meter dan kedua kapal tidak masuk pada setiap domainnya. Hal ini bisa terjadi karena pada waktu 98 detik nilai TCPA = 38 detik dan DCPA = 11 meter. Hubungan *fuzzy inference* yang terjadi “IF TCPA Bahaya AND IF DCPA Bahaya THEN CR5” dan “IF TCPA Siaga AND IF DCPA Bahaya THEN CR3” dengan terjadinya dua hubungan dan dilakukan perhitungan didapatkan nilai risiko tabrakan = 100.

Ditunjukkan pada Gambar 5.6, kedua kapal memiliki jarak terdekat pada waktu 137,2 detik sekitar 12.76 meter, sehingga posisi kapal sasaran masih berada di luar area domain kapal dan kapal sendiri dapat melakukan manuver penghindaran

secara aman. Akan tetapi dapat dilihat pada riwayat perubahan sudut kemudi kapal dan nilai risiko tabrakan kapal, dari waktu 98 detik hingga 138 detik ketika nilai risiko tabrakan = 100, dapat dilihat bahwa kapal sendiri sering merubah arah kemudi. Hal ini disebabkan karena ketika ≥ 75 sudut kemudi mengalami perubahan sudut yang lebih besar dan lebih sering untuk segera menghindari bahaya. Dan pada machine learning yang digunakan ketika dalam kondisi itu manuver kapal lebih agresif yang mengakibatkan adanya osilasi pada perubahan sudut kemudi.



Gambar 5.6 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A1 dengan bentuk domain kapal elips

5.2.1.2 Bentuk Domain Kapal Lingkaran

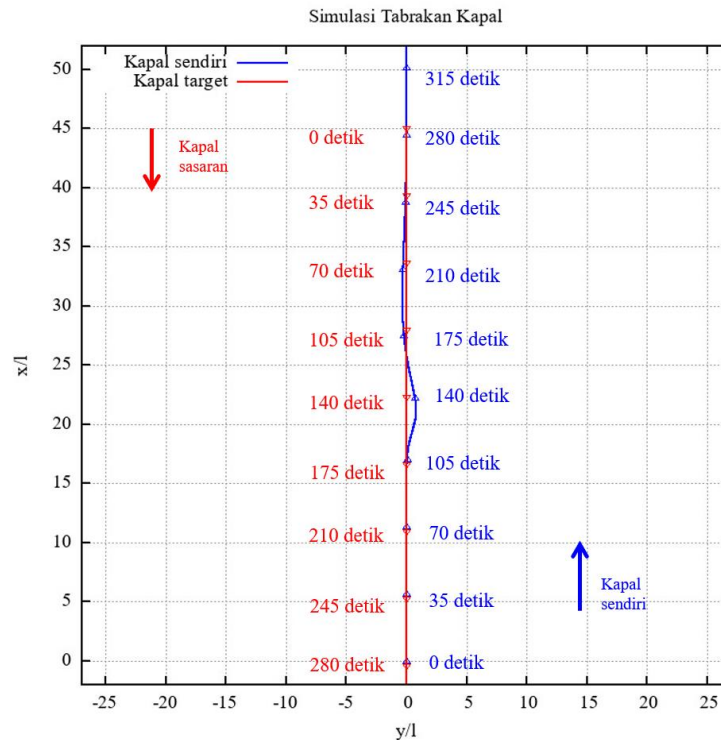
Domain kapal berbentuk lingkaran memiliki jari – jari $Rho = 11,90$ meter. Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.7, kedua kapal berjalan lurus sepanjang jalur dan saling berhadapan satu sama lain. Hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.11 - Gambar 5.15 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada waktu 64 detik, nilai TCPA =

70.64 detik dan nilai DCPA = 0,0 meter. Hal tersebut membuat peraturan fuzzy inference perhitungan risiko tabrakan mengakibatkan hubungan CR3 dan CR4, dan dihasilkan nilai risiko tabrakan = 1. Keputusan penghindaran harus dibuat berdasarkan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *starboard*.

Dengan kapal sendiri yang melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak melakukan manuver penghindaran, usaha ini tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri, sedangkan nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risikonya meningkat seiring berjalannya waktu. Pada waktu 90 detik, nilai risiko tabrakan > 75 , sehingga mengharuskan kapal sendiri untuk mengambil keputusan untuk mengalah dalam kondisi penghindaran darurat. Pada waktu 100,8 detik, nilai risiko tabrakan kapal sendiri = 100. Namun, jarak antara kedua kapal adalah 27 meter, sehingga kapal sasaran sudah masuk ke dalam domain kapal sendiri. Hal ini juga bisa terjadi karena pada waktu 98 detik nilai TCPA = 37 detik dan DCPA = 1,1 meter. Hubungan fuzzy inference yang terjadi adalah “IF TCPA Bahaya AND IF DCPA Bahaya THEN CR5” dan “IF TCPA Siaga AND IF DCPA Bahaya THEN CR3”. Dengan terjadinya dua hubungan dan perhitungan dilakukan, didapatkan nilai risiko tabrakan = 100.

Ditunjukkan pada Gambar 5.7, kedua kapal memiliki jarak terdekat pada waktu 137,2 detik sekitar 2,4 meter, Kapal sasaran berada pada domain kapal sendiri, walaupun begitun kapal masih dapat menghindar dan setelah itu kedua jarak annatar kapal mulai naik. Dapat dilihat pada riwayat perubahan sudut kemudi kapal dan nilai risiko tabrakan kapal, dari waktu 100,8 detik hingga 137,2 detik ketika nilai risiko tabrakan = 100, menunjukkan kapal sendiri sering merubah arah kemudi. Hal ini disebabkan karena dalam metode pengambilan keputusan penghindaran yang digunakan ada perhitungan perubahan sudut deviasi, dan dicari nilai terkecilnya.

Gambar 5.7 menunjukkan hasil perhitungan program penghindaran tabrakan kapal untuk skenario A1 dengan bentuk domain kapal lingkaran, dan dilakukan evaluasi agar tidak terjadinya tabrakan kapal. Dapat dilihat perbedaan rute penghindaraan yang berbeda karena adanya bentuk domain yang berbeda. Karena ukuran domain yang lebih kecil sehingga



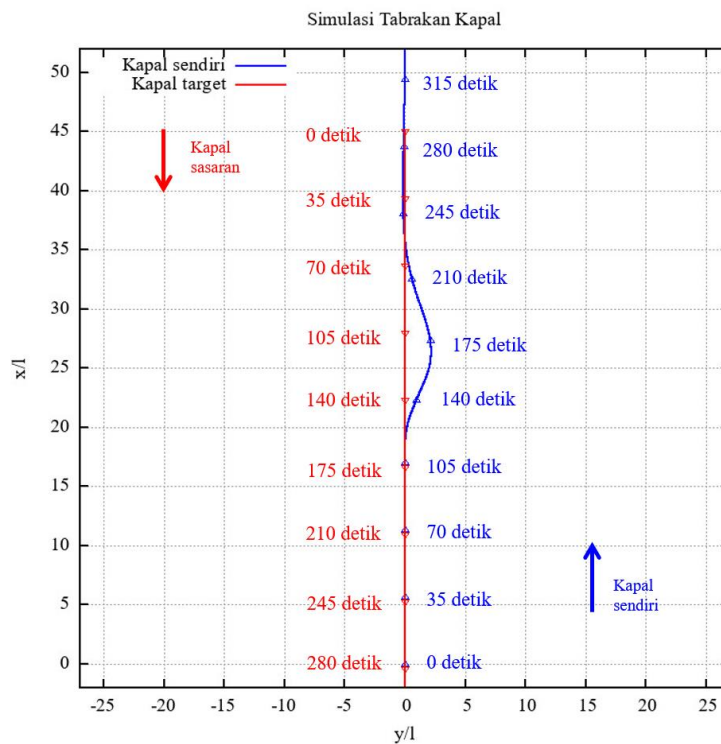
Gambar 5.7 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A1 dengan bentuk domain kapal lingkaran

5.2.1.3 Bentuk Domain Kapal Telur

Domain kapal berbentuk telur dengan $R_{bf} = 18,72$ meter, $R_{ba} = 10,86$ meter, dan panjang $S_b = 2,91$ meter. Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.8, kedua kapal berjalan lurus sepanjang jalur dan saling berhadapan satu sama lain. Hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.11 - Gambar 5.15 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada waktu 56 detik, nilai TCPA = 78,46 detik dan nilai DCPA = 0,0 meter. Hal tersebut membuat peraturan fuzzy inference perhitungan risiko tabrakan mengakibatkan hubungan CR3 dan CR4, dan dihasilkan nilai risiko tabrakan = 0,12. Keputusan penghindaran harus dibuat berdasarkan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *starboard*.

Dengan kapal sendiri yang melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak melakukan manuver penghindaran, usaha ini tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri, sedangkan nilai TCPA terus menurun,

sehingga nilai risikonya meningkat seiring berjalannya waktu. Pada waktu 106 detik, nilai risiko tabrakan > 75 , sehingga mengharuskan kapal sendiri untuk mengambil keputusan untuk mengalah dengan kondisi penghindaran darurat. Pada waktu 113,4 detik, nilai risiko tabrakan kapal sendiri = 100. Namun, jarak antara kedua kapal adalah 22,22 meter, dan kapal sasaran tidak masuk ke dalam domain kapal sendiri. Hal ini juga bisa terjadi karena pada waktu 113,4 detik nilai TCPA = 22 detik dan DCPA = 1 meter. Hubungan fuzzy inference yang terjadi adalah “IF TCPA Bahaya AND IF DCPA Bahaya THEN CR5” dan “IF TCPA Siaga AND IF DCPA Bahaya THEN CR3”. Dengan terjadinya dua hubungan dan perhitungan dilakukan, didapatkan nilai risiko tabrakan = 100.



Gambar 5.8 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A1 dengan bentuk domain kapal lingkaran

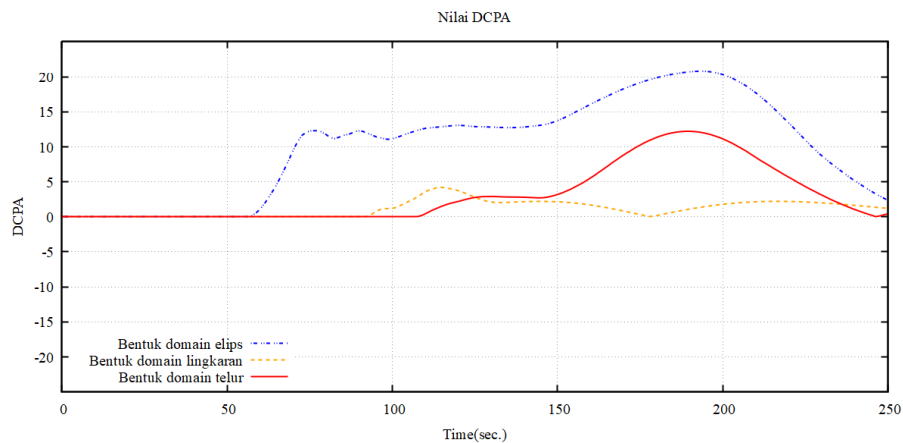
Ditunjukkan pada Gambar 5.8, kedua kapal memiliki jarak terdekat pada waktu 137,2 detik sekitar 2,8 meter, sehingga posisi kapal sasaran masih berada di luar area domain kapal dan kapal sendiri dapat melakukan manuver penghindaran secara aman. Dapat dilihat pada riwayat perubahan sudut kemudi kapal dan nilai risiko tabrakan kapal, dari waktu 113,4 detik hingga 135,8 detik ketika nilai risiko tabrakan = 100, menunjukkan kapal sendiri sering merubah arah kemudi. Hal ini

disebabkan karena dalam metode pengambilan keputusan penghindaran yang digunakan ada perhitungan perubahan sudut deviasi, dan dicari nilai terkecilnya.

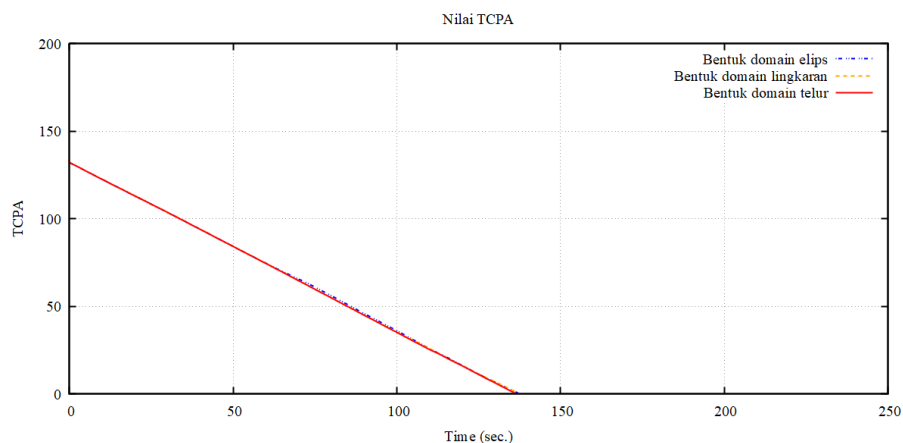
5.2.1.4 Perbandingan Hasil Perhitungan

Gambar 5.9 - Gambar 5.15 merupakan hasil perhitungan dari ketiga bentuk domain kapal. Warna biru menunjukkan hasil dari bentuk domain elips, warna oranye menunjukkan hasil dari bentuk domain lingkaran, dan warna merah menunjukkan hasil dari bentuk domain telur. Tujuan dari perbandingan hasil perhitungan, sebagai berikut:

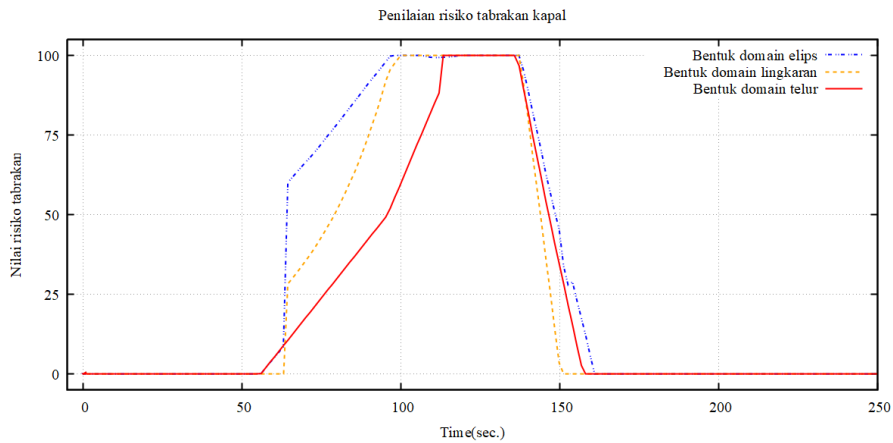
1. Pengaruh bentuk domain terhadap penilaian risiko tabrakan



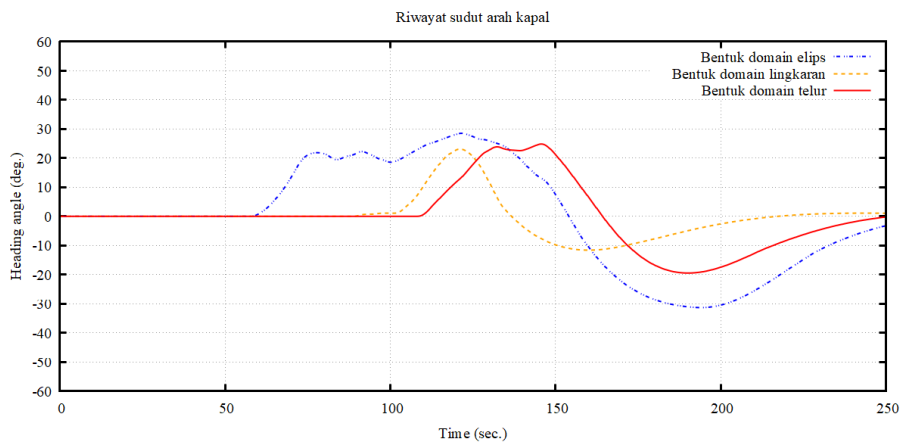
Gambar 5.9 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario A1 selama perhitungan berlangsung



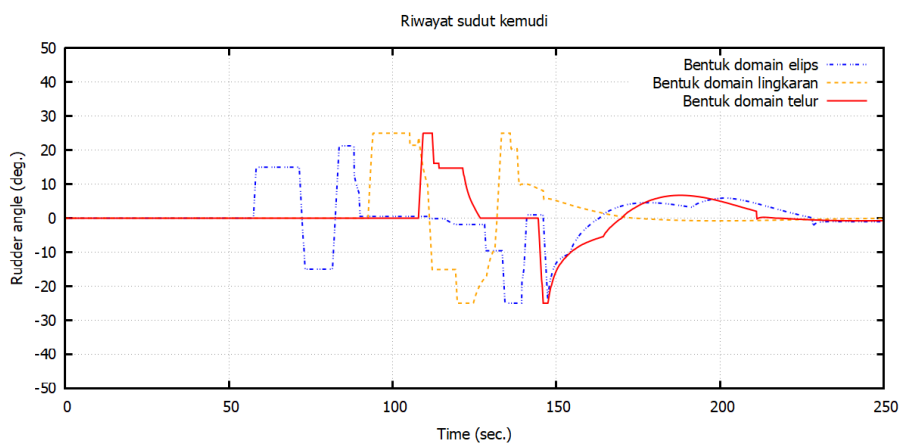
Gambar 5.10 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario A1 selama perhitungan berlangsung



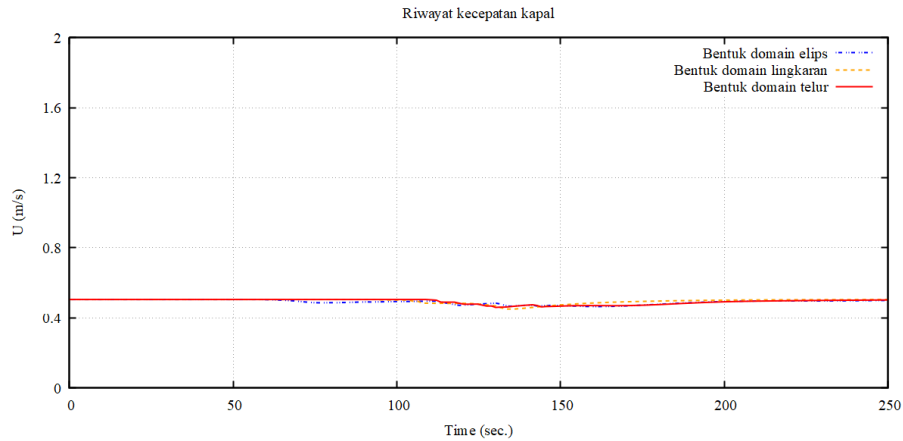
Gambar 5.11 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A1 selama perhitungan berlangsung



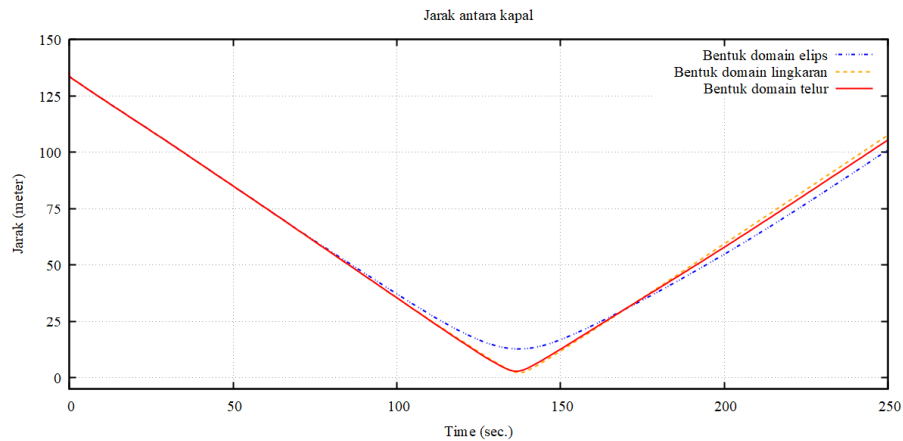
Gambar 5.12 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.13 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario A1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.14 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.15 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario A1 selama perhitungan berlangsung

Tabel 5.8 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario A1 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Luas Area
1	Elips	103,6	7855,58
2	Lingkaran	85,4	6543,99
3	Telur	100,8	5580,98

Berdasarkan Tabel 5.8 yang merupakan hasil perhitungan dari Gambar 5.11, menunjukkan bahwa bentuk domain telur memiliki luas area terkecil dibandingkan dengan bentuk domain elips dan lingkaran. Meskipun demikian, bentuk domain telur mencapai nilai risiko tabrakan tinggi dalam waktu yang relatif cepat. Ini menunjukkan bahwa bentuk domain telur lebih efisien dalam mendeteksi

risiko tabrakan dalam penelitian yang dilakukan. Walaupun begitu, bentuk domain yang paling aman dalam melakukan penghindaran adalah domain kapal elips.

Berdasarkan grafik riwayat sudut arah kapal dan riwayat sudut kemudi kapal yang ditampilkan pada Gambar 5.12 dan Gambar 5.13, dapat dilihat perbedaan respon penghindaran tabrakan dari masing – masing bentuk domain. Pada bentuk domain elips terjadinya osilasi yang signifikan, terutama setelah titik waktu sekita 100 detik, hal ini ditunjukkan karena adanya pengaruh penghindaran bahaya. Dan menunjukkan bahwa kapal perlu melakukan beberapa penyesuaian untuk memepertahankan jalur penghindarannya, yang mengindikasikan manuver yang kurang stabil.

Pada bentuk domain lingkaran, kapal menunjukkan respons yang lebih teratur dibandingkan dengan domain elips, namun tetap terdapat osilasi yang signifikan. Osilasi ini terjadi terutama ketika kapal sendiri mendekati kapal sasaran dan ketika kondisi penghindaran bahaya. Dikarenakan penyesuaian yang sering dalam jalur penghindaran, yang dapat mengidikasikan bahwa manuver yang dilakukan tidak sepenuhnya stabil dan optimal

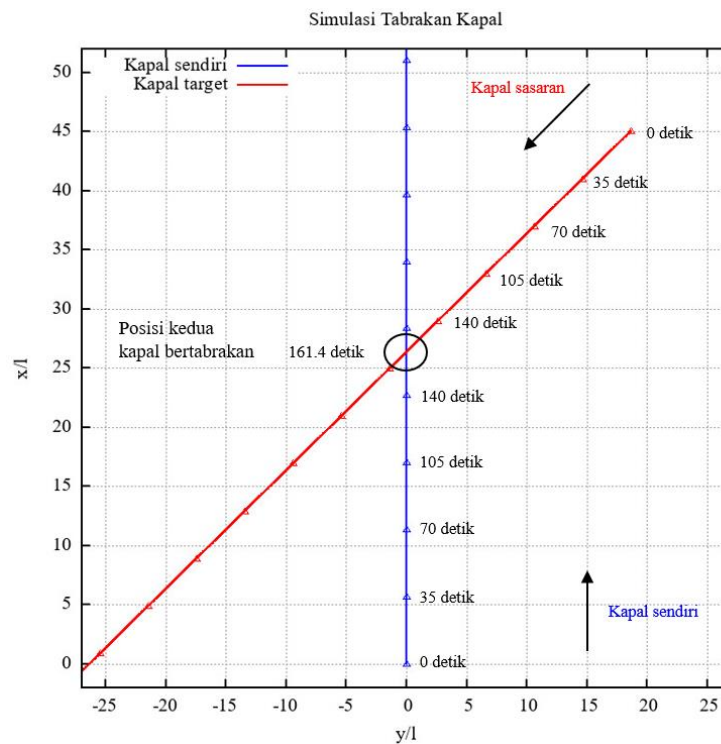
Untuk domain bentuk telur, respons kapal terhadap penghindaran bahaya jauh lebih stabil. Perubahan sudut kemudi dan arah kapal relatif lebih halus dan konsisten dibandingkan dengan bentuk domain lainnya. Hal tersebut trajadi karena respons yang cepat terhadap risiko tabrakan, yang memeungkian untuk melakukan manuver penghindaran dengan sedikit osilasi

Dari sini dapat dilihat bahwa memilih bentuk domain yang efisien dan aman adalah penting untuk pengembangan sistem peringatan dini tabrakan kapal yang efektif. Bentuk domain telur, dengan luas area yang lebih kecil namun respons yang lebih cepat dan stabil, menawarkan solusi yang optimal untuk pengembangan algoritma sistem peringatan dini tabrakan kapal dalam penelitian ini untuk skenario berhadapan dengan dimensi dan kecepatan kapal sendiri sama dengan kapal sasaran.

5.2.2 Simulasi Tabrakan Skenario 2

Simulasi tabrakan pada skenario A2 adalah situasi pertemuan antara dua kapal dan dengan arah kapal sasaran sebesar -135 derajat terhadap kapal sendiri . Pada situasi ini dilakukan sebuah simulasi bertabrakan, sehingga kedua kapal tidak

ada yang mengambil tindakan penghindaran. Pada Gambar 5.17 dapat dilihat DCPA = 0,0 meter karena kedua kapal berada pada rute dimana dapat terjadinya tabrakan, akan tetapi nilai risiko tabrakan = 0 (Gambar 5.19) karena nilai TCPA masih terlalu besar (Gambar 5.18). Setelah dilakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.16, kedua kapal berjalan mengikuti rute yang telah ditentukan dan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.17 - Gambar 5.19 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada 39,2 detik (TCPA = 117,68 detik) dan selama perhitungan, nilai risiko tabrakan = 100 untuk pertama kali terjadi pada waktu 120,4 detik.

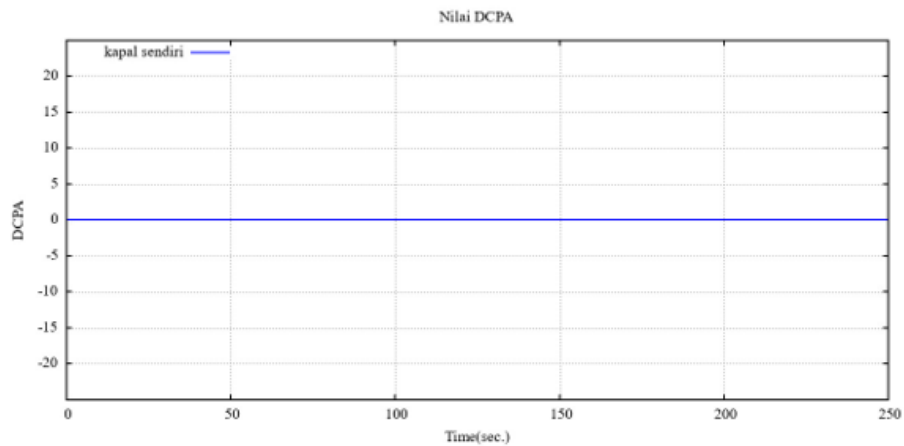


Gambar 5.16 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario A2 tanpa resolusi konflik

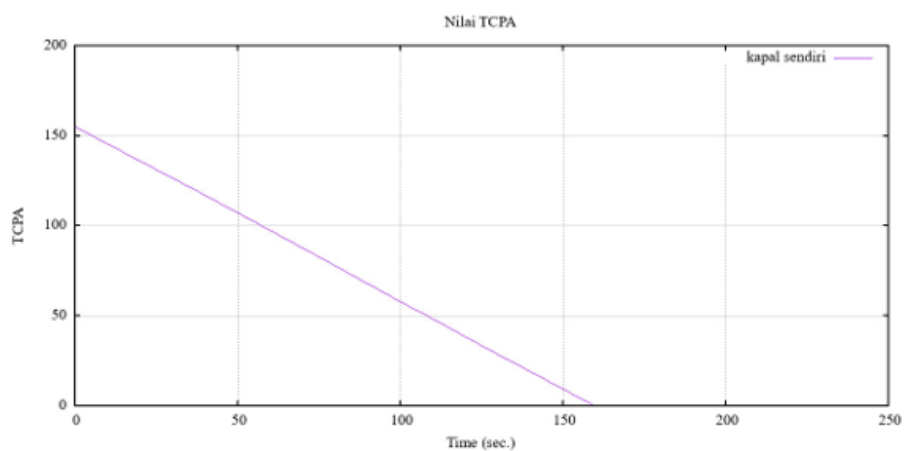
ada waktu 120,4 detik, jarak antara kedua kapal adalah 35,44 meter. Panjang domain kapal bagian depan adalah 18,72 meter, yang menunjukkan bahwa kapal sasaran belum memasuki domain kapal sendiri. Namun, melalui perhitungan *fuzzy inference*, pada waktu yang sama, nilai TCPA adalah 37,94 detik. Nilai ini mengakibatkan masuknya domain bahaya pada himpunan fuzzy dari TCPA.

Karena nilai DCPA adalah 0, ini mengaktifkan aturan *fuzzy inference* yang menyatakan, "IF DCPA Bahaya AND TCPA Siaga THEN risiko tabrakan CR5." Dalam konteks ini, CR5 diberi nilai 100, yang mengikuti peraturan fuzzy inference dalam kondisi kapal sedang menyebrang. Akibatnya, risiko tabrakan ditetapkan pada nilai maksimum, yaitu 100.

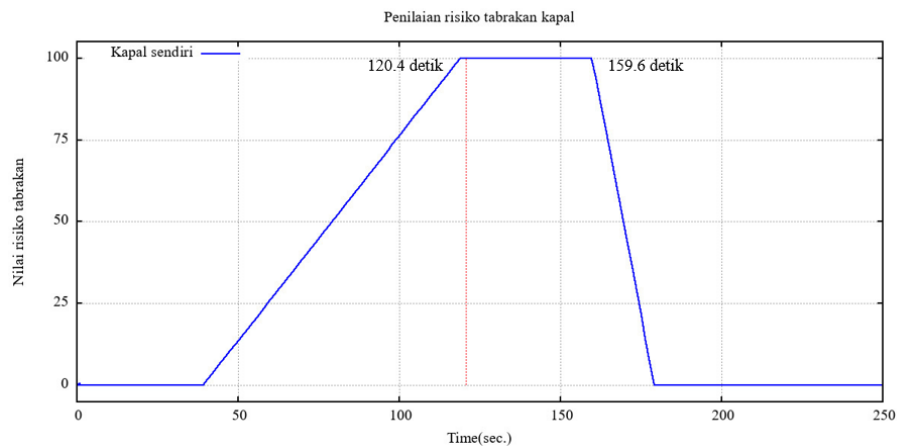
Nilai risiko sebesar 100 ini tetap terjaga hingga kedua kapal bertemu satu sama lain pada waktu 159,6 detik. Selama periode ini, sistem *fuzzy inference* terus memantau perubahan nilai TCPA dan DCPA untuk memastikan bahwa risiko tabrakan tetap dihitung dengan tepat. Sistem ini memberikan peringatan dini yang sangat penting bagi para navigator kapal untuk mengambil tindakan penghindaran yang tepat waktu.



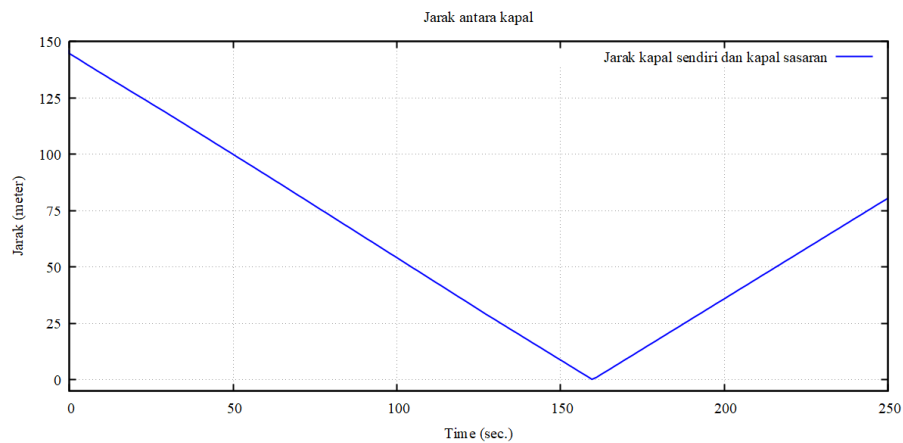
Gambar 5.17 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario A2 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.18 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario A1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.19 Riwayat waktu penilai risiko tabrakan kapal skenario A1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.20 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung

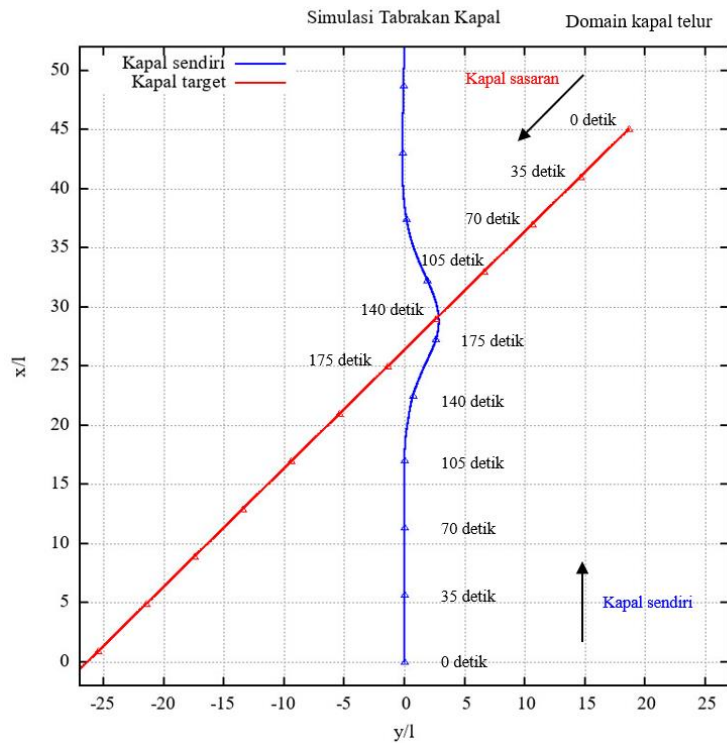
Untuk mengetahui pengaruh bentuk domain kapal terhadap penilaian risiko tabrakan, maka perlu dilakukan perhitungan resolusi konflik dan untuk mengetahui hasil pengaruh bentuk domain terhadap pengambilan keputusan.

5.2.2.1 Bentuk Domain Kapal Elips

Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.21, kedua kapal berjalan mengikuti rute dan kedua kapal saling bersebrangan satu sama lain dan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.24 - Gambar 5.30 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan nilai DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan > 0,0 untuk pertama kali terjadi pada waktu 39,2 detik, nilai TCPA = 117 detik dan nilai DCPA = 0 hal tersebut membuat peraturan *fuzzy inference* perhitungan risiko tabrakan mengakibatkan hubungan

CR3 dan CR4 dan dihasilkan nilai risiko tabrakan = 0,19 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdasarakan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *starboard*.

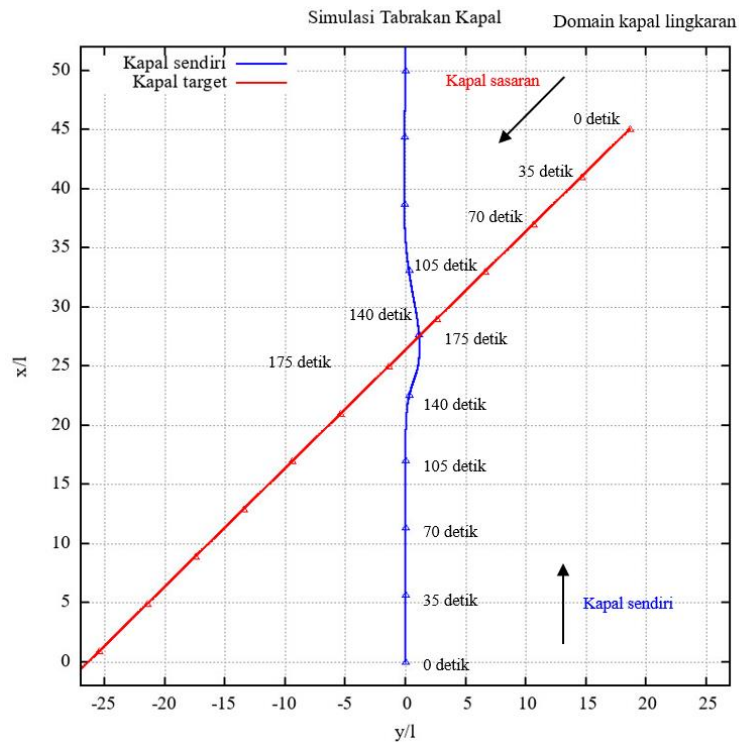
Dengan kapal sendiri yang melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak melakukan manuver penghindaran, tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri, sedangkan nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risikonya meningkat seiring berjalannya waktu. Kemudian ketika pada waktu 99 detik, nilai risiko tabrakan > 75 , sehingga mengharuskan kapal sendiri untuk mengambil keputusan untuk mengalah dalam kondisi penghindaran darurat. Pada waktu 119 detik nilai risiko tabrakan kapal sendiri = 100. Namun, jarak antara kedua kapal adalah 36,58 meter dan kapal sasaran tidak melangar batas domain kapal sendiri. Hal ini bisa terjadi karena pada waktu 119 detik nilai TCPA = 37,8 detik dan DCPA = 4,9 meter. Hubungan *fuzzy inference* yang terjadi “IF TCPA Bahaya AND IF DCPA Bahaya THEN CR5” dan “IF TCPA Siaga AND IF DCPA Bahaya THEN CR3” dengan terjadinya dua hubungan dan dilakukan perhitungan didapatkan nilai risiko tabrakan = 100.



Gambar 5.21 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A2 dengan bentuk domain kapal elips

5.2.2.2 Bentuk Domain Kapal Lingkaran

Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.22, kedua kapal berjalan mengikuti rute dan kedua kapal saling bersebrangan satu sama lain dan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.25 - Gambar 5.30 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan nilai DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan > 0,0 untuk pertama kali terjadi pada waktu 64,4 detik, nilai TCPA = 70,26 detik dan nilai DCPA = 0,0 meter hal tersebut membuat peraturan *fuzzy inference* perhitungan risiko tabrakan mengakibatkan hubungan CR3 dan CR4 dan dihasilkan nilai risiko tabrakan = 28,29 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdsarakan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *starboard*.



Gambar 5.22 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A2 dengan bentuk domain kapal lingkaran

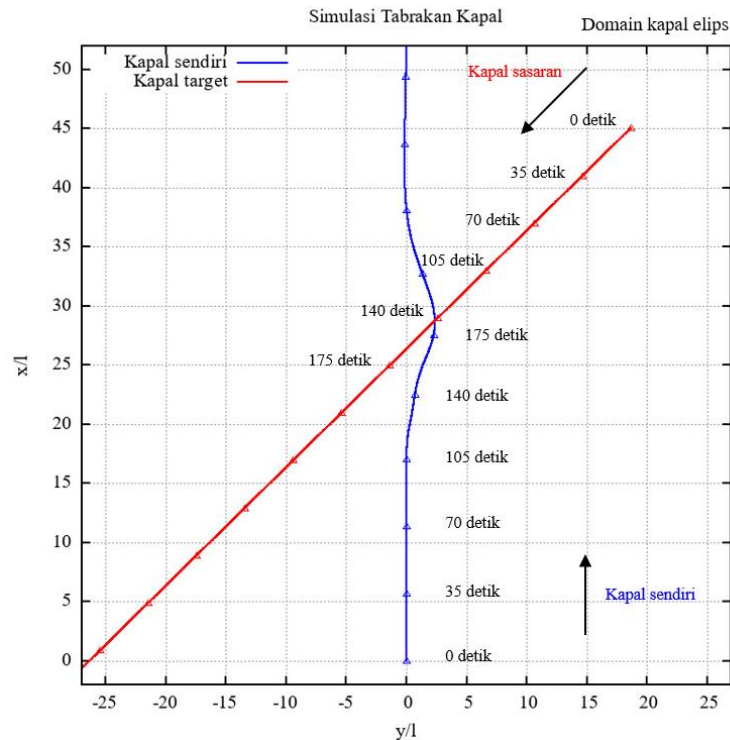
Dengan kapal sendiri yang melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak melakukan manuver penghindaran, tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri, sedangkan nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risikonya meningkat seiring berjalannya waktu. Kemudian ketika pada waktu 90 detik, nilai risiko tabrakan > 75, sehingga mengharuskan kapal sendiri untuk mengambil

keputusan untuk mengalah dalam kondisi penghindaran darurat. Pada waktu 100,8 detik nilai risiko tabrakan kapal sendiri = 100. Namun, jarak antara kedua kapal adalah 53,45 meter dan kapal sasaran tidak melangar batas domian kapal sendiri. Hal ini bisa terjadi karena pada waktu 100,8 detik nilai TCPA = 34,5d etik dan DCPA = 1,28 meter. Hubungan fuzzy inference yang terjadi “IF TCPA Bahaya AND IF DCPA Bahaya THEN CR5” dan “IF TCPA Siaga AND IF DCPA Bahaya THEN CR3” dengan terjadinya dua hubungan dan dilakukan perhitungan didapatkan nilai risiko tabrakan = 100.

5.2.2.3 Bentuk Domain Kapal Telur

Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.21, kedua kapal berjalan mengikuti rute dan kedua kapal saling bersebrangan satu sama lain dan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.25 - Gambar 5.30 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan nilai DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada waktu 56 detik, nilai TCPA = 78,46 detik dan nilai DCPA = 0,0 meter hal tersebut membuat peraturan *fuzzy inference* perhitungan risiko tabrakan mengakibatkan hubungan CR3 dan CR4 dan dihasilkan nilai risiko tabrakan = 0,19 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdsarakan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah staboard.

Dengan kapal sendiri yang melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak melakukan manuver penghindaran, tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri, sedangkan nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risikonya meningkat seiring berjalannya waktu. Kemudian ketika pada waktu 106 detik, nilai risiko tabrakan > 75 , sehingga mengharuskan kapal sendiri untuk mengambil keputusan untuk mengalah dalam kondisi penghindaran darurat. Pada waktu 113,4 detik nilai risiko tabrakan kapal sendiri = 100. Namun, jarak antara kedua kapal adalah 41,92 meter dan kapal sasara tidak melangar batas domian kapal sendiri. Hal ini bisa terjadi karena pada waktu 113,4 detik nilai TCPA = 22,33 detik dan DCPA = 1,19 meter. Hubungan fuzzy inference yang terjadi “IF TCPA Bahaya AND IF DCPA Bahaya THEN CR5” dan “IF TCPA Siaga AND IF DCPA Bahaya THEN CR3” dengan terjadinya dua hubungan dan dilakukan perhitungan didapatkan nilai risiko tabrakan = 100.

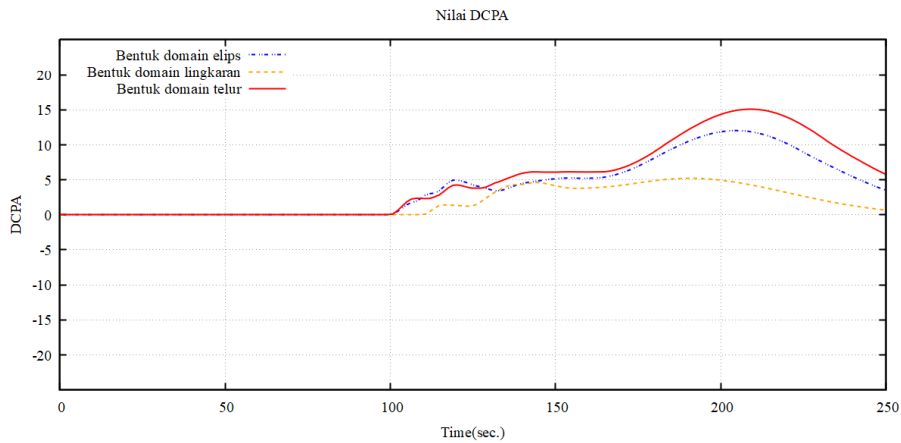


Gambar 5.23 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A2 dengan bentuk domain kapal telur

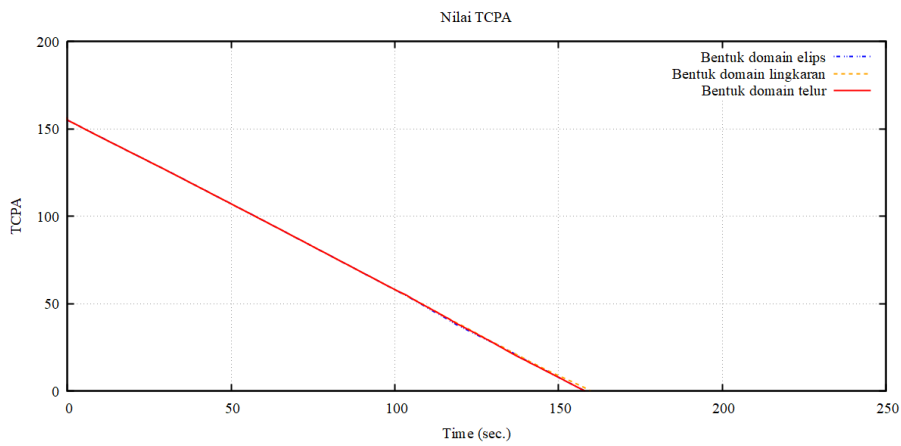
5.2.2.4 Perbandingan Hasil Perhitungan

Gambar 5.24 - Gambar 5.30 merupakan hasil perhitungan dari ketiga bentuk domain kapal. Warna biru menunjukan hasil dari bentuk domain elips, warna oranye menunjukan hasil dari bentuk domain lingkaran, dan warna merah menunjukan hasil dari bentuk domain telur. Perbandingan hasil perhitungan ini untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi efektivitas masing-masing bentuk domain dalam konteks navigasi dan manuver penghindaran tabrakan. Perbandingan ini juga bertujuan untuk memahami bagaimana masing-masing bentuk domain mempengaruhi penilaian risiko tabrakan dalam berbagai skenario yang telah diujikan. Bentuk domain yang berbeda memiliki karakteristik unik dalam hal distribusi risiko dan jarak terdekat antar kapal. Oleh karena itu, dengan membandingkan hasil perhitungan ini, kita dapat menentukan bentuk domain mana yang memberikan hasil terbaik dalam menjaga keselamatan navigasi dan mengurangi risiko tabrakan. Tujuan dari perbandingan hasil perhitungan, sebagai berikut:

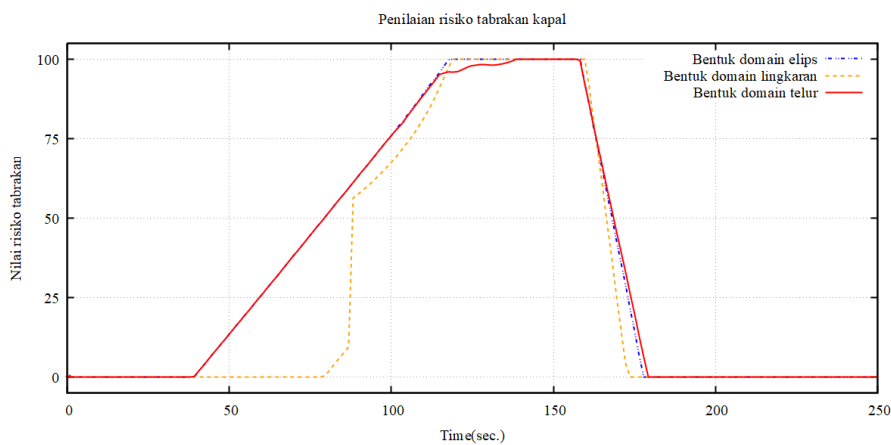
1. Pengaruh bentuk domain terhadap penilaian risiko tabrakan



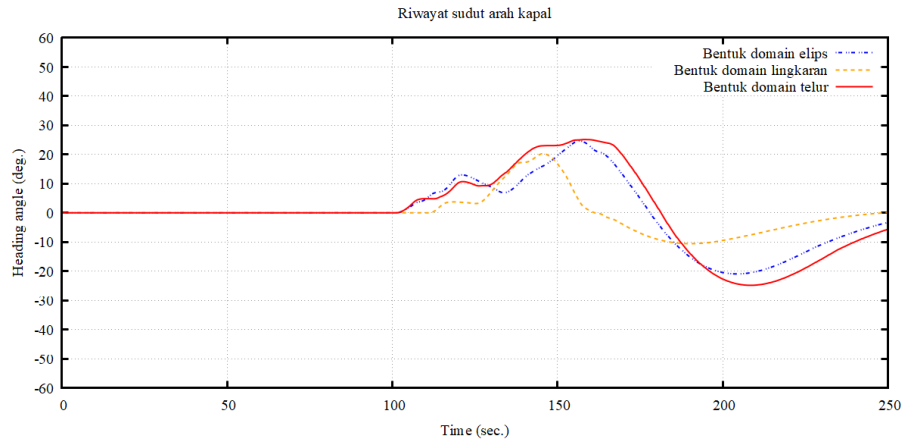
Gambar 5.24 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario A2 selama perhitungan berlangsung



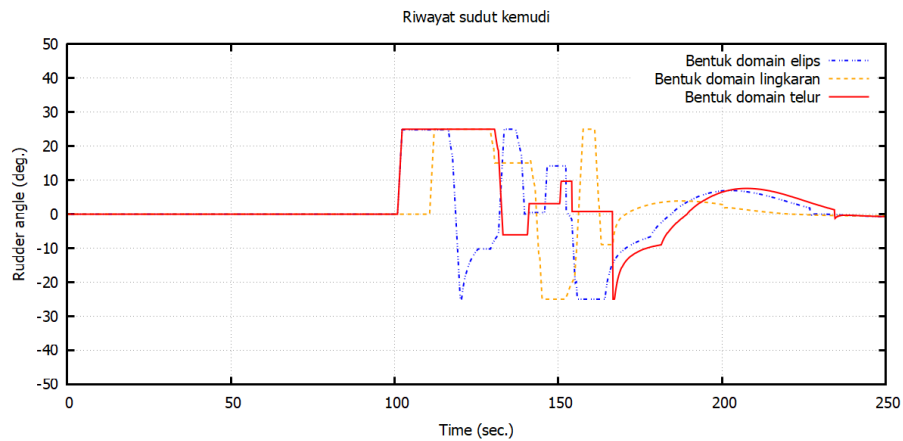
Gambar 5.25 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario A2 selama perhitungan berlangsung



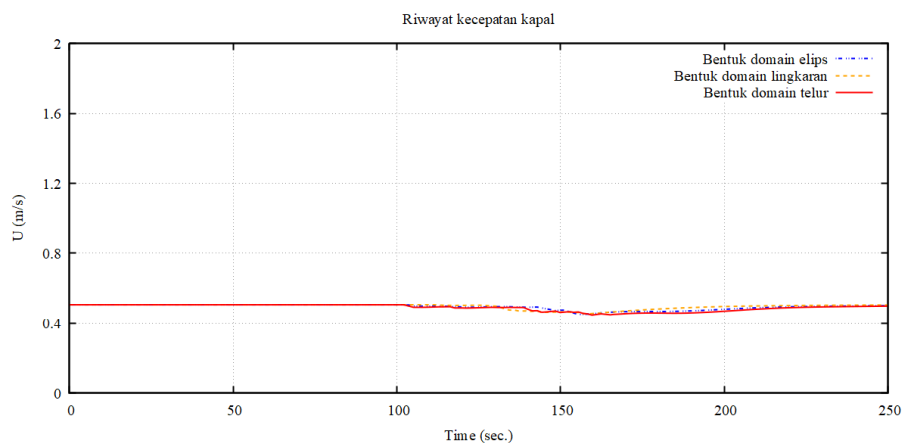
Gambar 5.26 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A2



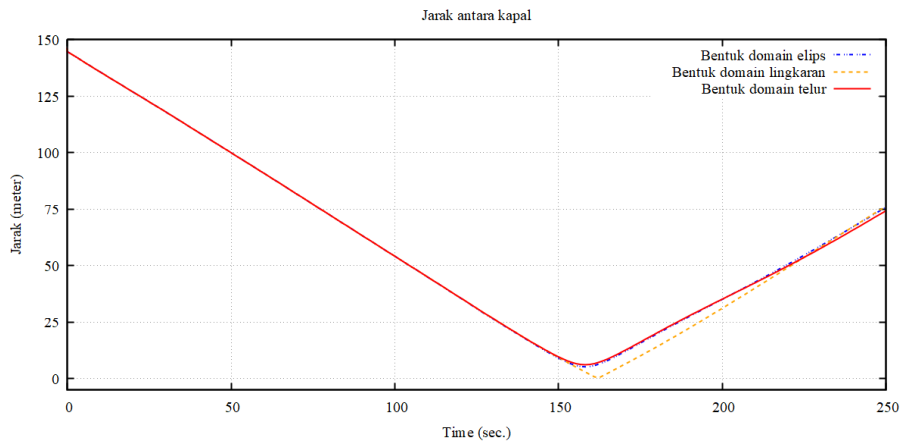
Gambar 5.27 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A2 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.28 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario A2 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.29 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A2 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.30 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario A2 selama perhitungan berlangsung

Tabel 5.9 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario A2 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Luas Area
1	Elips	103,6	7855,55
2	Lingkaran	85,4	6543,95
3	Telur	100,8	5580,99

Berdasarkan Tabel 5.9 yang merupakan hasil perhitungan dari Gambar 5.26, menunjukkan bahwa bentuk domain telur memiliki luas area terkecil dibandingkan dengan bentuk domain elips dan lingkaran. Meskipun demikian, bentuk domain telur mencapai nilai risiko tabrakan tinggi dalam waktu yang relatif cepat. Ini menunjukkan bahwa bentuk domain telur lebih efisien dalam mendeteksi risiko tabrakan dalam penelitian yang dilakukan. Walaupun begitu, bentuk domain yang paling aman dalam melakukan penghindaran adalah domain kapal telur.

Tabel 5.10 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario A2 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Jarak terdekat antar dua kapal (meter)
1	Elips	158,20	5,21
2	Lingkaran	162,40	0,39
3	Telur	158,20	6,12

Selain melihat dari hasil penilai risiko tabrakan kapal perlu melihat juga pengaruh lainnya. Pada Tabel 5.10 ditampilkan jarak terdekat antara kedua kapal, melalui tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa:

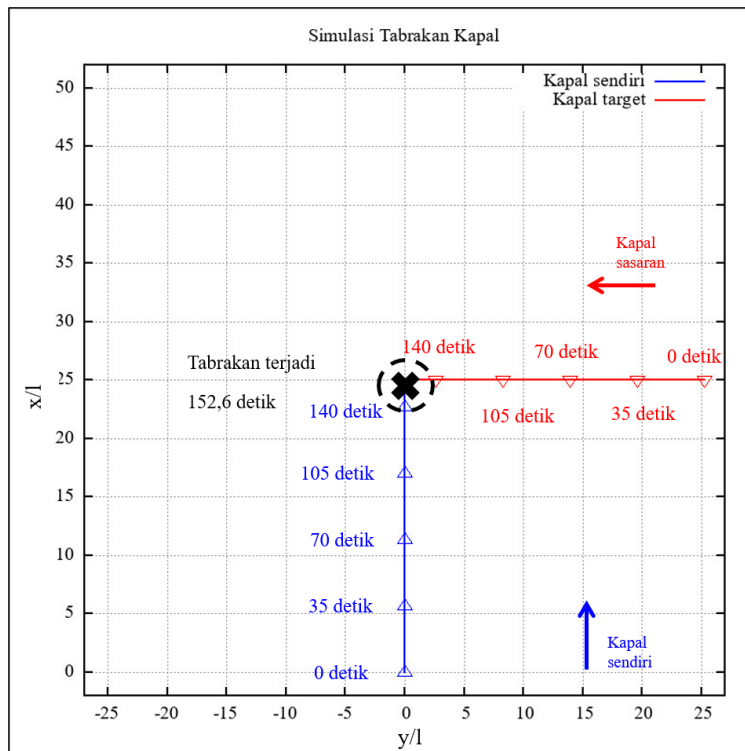
1. Bentuk domain elips memiliki luas area terbesar dan waktu penghindaran yang lebih lama, namun memberikan jarak terdekat yang cukup aman (5,21 meter).
2. Bentuk domain lingkaran meskipun memiliki waktu tercepat untuk mencapai penghindaran, akan tetapi jarak terdekat antara kedua kapal sangat kecil (0,39 meter), yang menunjukkan risiko tabrakan yang tinggi.
3. Bentuk domain telur menawarkan kombinasi terbaik antara efisiensi ruang dan keamanan, dengan luas area terkecil, serta waktu penghindaran yang relatif cepat, dan jarak terdekat yang paling aman (6,12 meter).

Berdasarkan grafik riwayat sudut arah kapal dan riwayat sudut kemudi kapal yang ditampilkan pada Gambar 5.27 dan Gambar 5.28, dapat dilihat perbedaan respon penghindaran tabrakan dari masing – masing bentuk domain. Pada setiap bentuk domain kapal, ketika melakukan penghindaran terlihat pada sudut arahnya kapal sendiri berusaha untuk mensatiblkn posisinya, dikarenakan aksi penghindaran yang diambil adalah penghindaran darurat. Dengan begitu hal tersebut mempengaruhi perubahan sudut kemudi kapalnya.

Pada domain kapal elips dapat terlihat bahwa osilasi

5.2.3 Simulasi Tabrakan Skenario 3

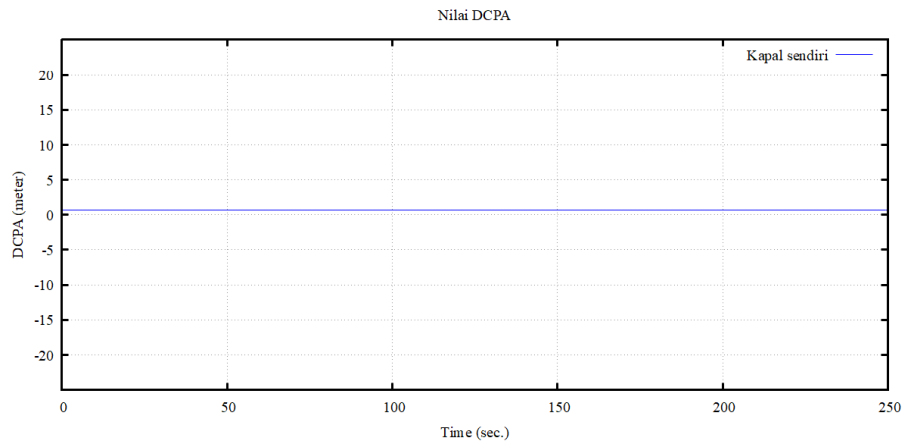
Simulasi tabrakan pada skenario A3 adalah situasi pertemuan antara dua kapal dan dengan arah kapal sasaran sebesar -135 derajat terhadap kapal sendiri . Pada situasi ini dilakukan sebuah simulasi bertabrakan, sehingga kedua kapal tidak ada yang mengambil tindakan penghindaran. Pada Gambar 5.34 dapat dilihat DCPA = 0,0 meter karena kedua kapal berada pada rute dimana dapat terjadinya tabrakan, akan tetapi nilai risiko tabrakan = 0,0 (Gambar 5.33) karena nilai TCPA masih terlalu besar (Gambar 5.32). Setelah dilakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.31, kedua kapal berjalan mengikuti rute yang telah ditentukan dan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.34 - Gambar 5.35 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan > 0,0 untuk pertama kali terjadi pada 32,2 detik (TCPA = 117,2 detik) dan selama perhitungan, nilai risiko tabrakan = 100 untuk pertama kali terjadi pada waktu 112 detik.



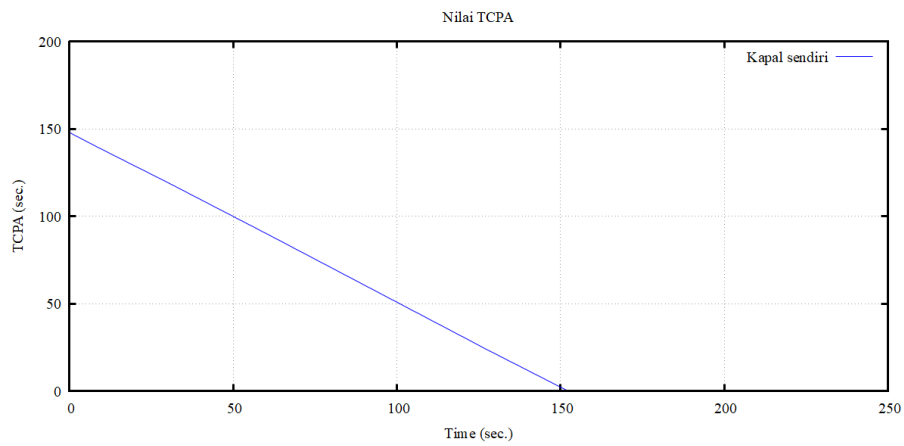
Gambar 5.31 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario A3 tanpa resolusi konflik

Pada waktu 112 detik, jarak antara kedua kapal adalah 27,86 meter. Sedangkan panjang dari domain kapal bagian depan adalah 18,72 meter, menunjukkan bahwa kapal sasaran belum masuk ke dalam domain kapal sendiri. Namun, melalui perhitungan *fuzzy inference*, pada waktu 112 detik nilai TCPA adalah 38,9. Nilai ini mengakibatkan domain bahaya pada himpunan fuzzy dari TCPA. Karena nilai DCPA adalah 0, ini menjadikan kondisi "IF DCPA Bahaya AND TCPA Siaga THEN risiko tabrakan CR5", di mana CR5 = 100, mengikuti peraturan fuzzy inference dalam kondisi menyebarkan.

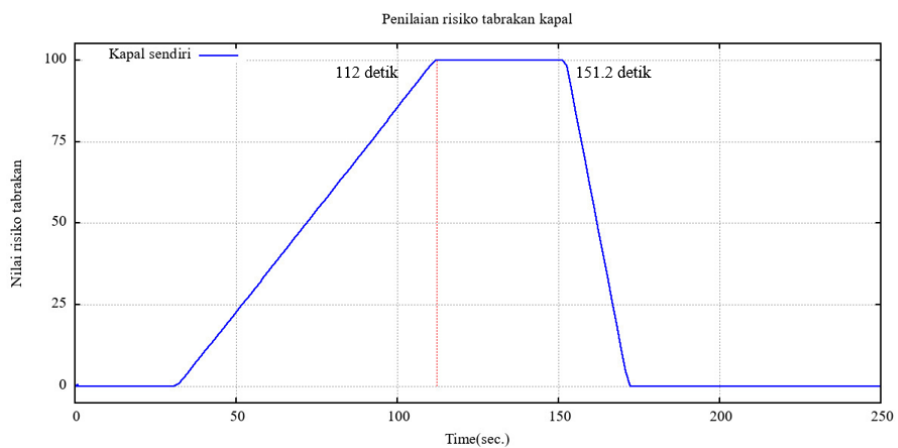
Nilai risiko sebesar 100 ini mencerminkan risiko tabrakan yang sangat tinggi dan menunjukkan bahwa tindakan penghindaran harus segera dilakukan. Nilai ini terjaga hingga waktu 151,20 detik, menunjukkan bahwa kedua kapal tetap berada dalam situasi berbahaya selama periode ini. Periode ini sangat kritis karena meskipun jarak antar kapal pada awalnya tidak terlalu dekat, namun risiko tabrakan tetap tinggi akibat nilai TCPA dan DCPA yang tidak menguntungkan.



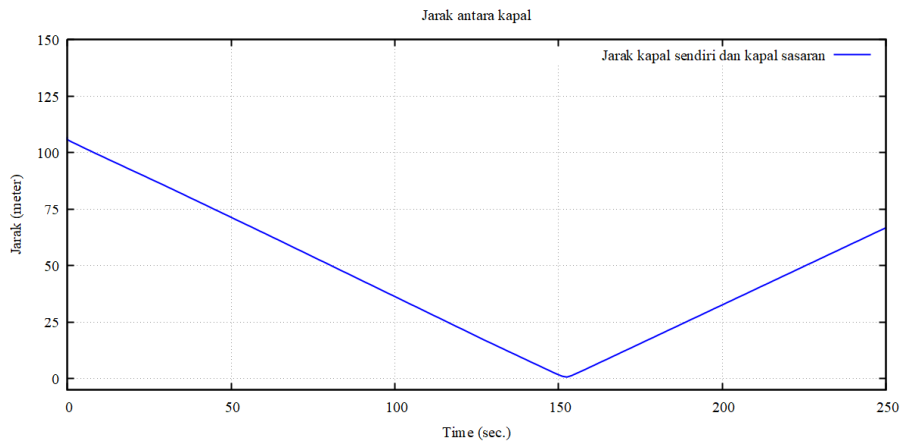
Gambar 5.32 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario A3 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.33 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario A1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.34 Riwayat waktu penilain risiko tabrakan kapal skenario A1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.35 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung

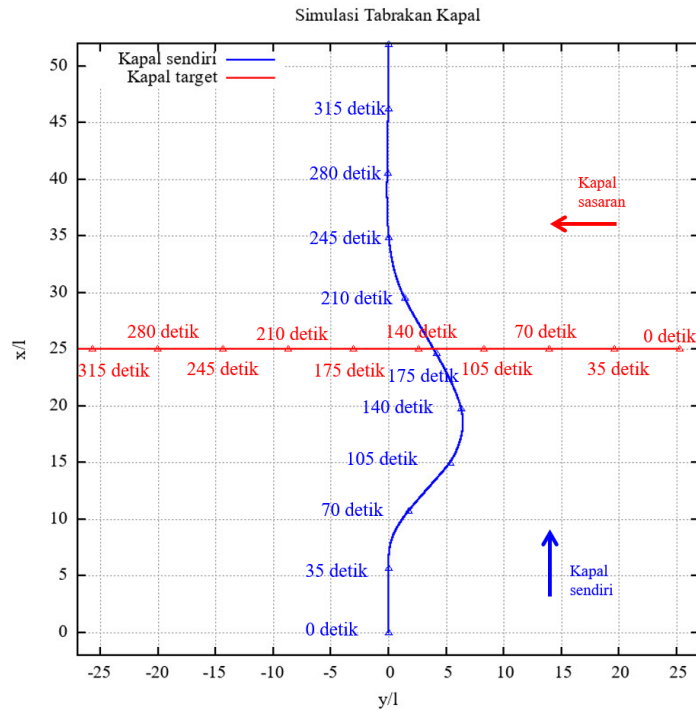
Untuk mengetahui pengaruh bentuk domain kapal terhadap penilaian risiko tabrakan, maka perlu dilakukan perhitungan resolusi konflik dan untuk mengetahui hasil pengaruh bentuk domain terhadap pengambilan keputusan.

5.2.3.1 Bentuk Domain Kapal Elips

Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.36, kedua kapal berjalan mengikuti rute dan kedua kapal saling bersebrangan satu sama lain dan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.39 - Gambar 5.45 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan nilai DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan > 0,0 untuk pertama kali terjadi pada waktu 32,2 detik, nilai TCPA = 117,2 detik dan nilai DCPA = 0,0 meter hal tersebut membuat peraturan fuzzy inference perhitungan risiko tabrakan mengakibatkan hubungan CR3 dan CR4 dan dihasilkan nilai risiko tabrakan = 0,68 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdasarakan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *starboard*.

Dengan kapal sendiri yang melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak melakukan manuver penghindaran, tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri, sedangkan nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risikonya meningkat seiring berjalannya waktu. Kemudian ketika pada waktu 100 detik, nilai risiko tabrakan > 75. Perhitungan yang dilakukan pada bentuk domain kapal elips memiliki nilai risiko tabrakan < 100, Nilai risiko tabrakan maksimal = 97,6 yang

terjadi pada waktu 144,2 detik. Nilai TCPA = 3,2 detik, dan nilai DCPA = 18,54 meter.



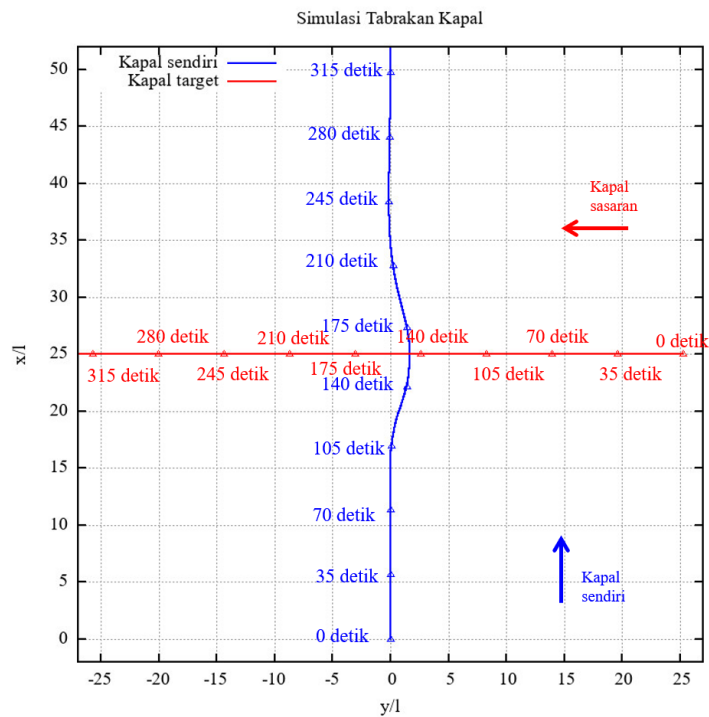
Gambar 5.36 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A3 dengan bentuk domain kapal elips

5.2.3.2 Bentuk Domain Kapal Lingkaran

Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.37, kedua kapal berjalan mengikuti rute dan kedua kapal saling bersebrangan satu sama lain dan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.39 - Gambar 5.45 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan nilai DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada waktu 72,8 detik, nilai TCPA = 77,69 detik dan nilai DCPA = 0,0 meter hal tersebut membuat peraturan *fuzzy inference* perhitungan risiko tabrakan mengakibatkan hubungan CR3 dan CR4 dan dihasilkan nilai risiko tabrakan = 1,09 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdasarakan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *starboard*.

Dengan kapal sendiri yang melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak melakukan manuver penghindaran, tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri, sedangkan nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risiko nya

meningkat seiring berjalannya waktu. Kemudian ketika pada waktu 97 detik, nilai risiko tabrakan > 75 , sehingga mengharuskan kapal sendiri untuk mengambil keputusan untuk mengalah dalam kondisi penghindaran darurat. Pada waktu 109,2 detik nilai risiko tabrakan kapal sendiri = 100. Namun, jarak antara kedua kapal adalah 29,46 meter dan kapal sasaran tidak melangar batas domain kapal sendiri. Hal ini bisa terjadi karena pada waktu 109,2 detik nilai TCPA = 38,16 detik dan DCPA = 3,28 meter. Hubungan fuzzy inference yang terjadi “IF TCPA Bahaya AND IF DCPA Bahaya THEN CR5” dan “IF TCPA Siaga AND IF DCPA Bahaya THEN CR3” dengan terjadinya dua hubungan dan dilakukan perhitungan didapatkan nilai risiko tabrakan = 100



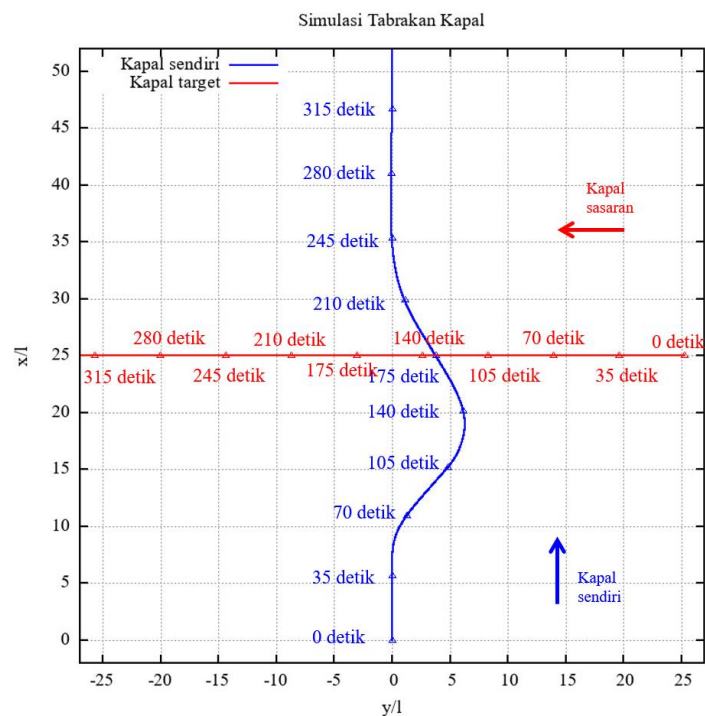
Gambar 5.37 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A3 dengan bentuk domain kapal lingkaran

5.2.3.3 Bentuk Domain Kapal Telur

Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.38, kedua kapal berjalan mengikuti rute dan kedua kapal saling bersebrangan satu sama lain dan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.39 - Gambar 5.45 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan nilai DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada

waktu 32,2 detik, nilai TCPA = 117,2 detik dan nilai DCPA = 0,0 meter hal tersebut membuat peraturan fuzzy inference perhitungan risiko tabrakan mengakibatkan hubungan CR3 dan CR4 dan dihasilkan nilai risiko tabrakan = 0,68 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdsarakan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *starboard*.

Dengan kapal sendiri yang melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak melakukan manuver penghindaran, tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri, sedangkan nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risiko nya meningkat seiring berjalannya waktu. Perhitungan yang dilakukan pada bentuk domain kapal telur memiliki nilai risiko tabrakan < 75, Nilai risiko tabrakan maksimal = 70,39 yang terjadi pada waktu 144,2 detik. Nilai TCPA = 3,96 detik, dan nilai DCPA = 17,29 meter.



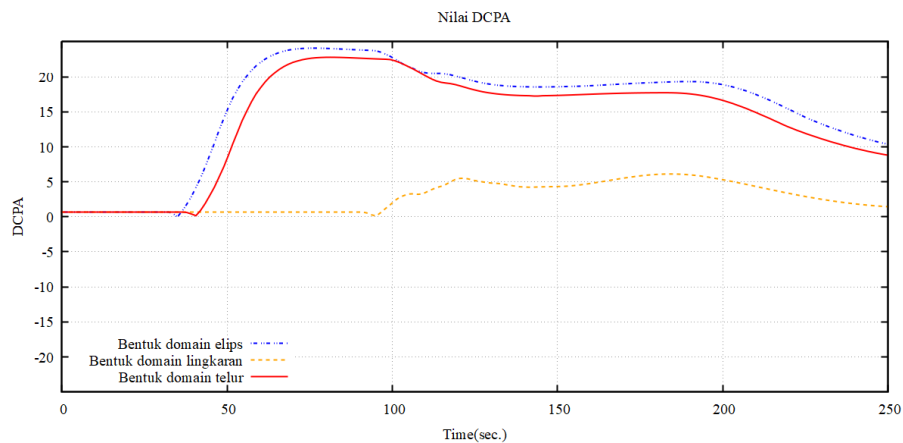
Gambar 5.38 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario A2 dengan bentuk domain kapal telur

5.2.3.4 Perbandingan Hasil Perhitungan

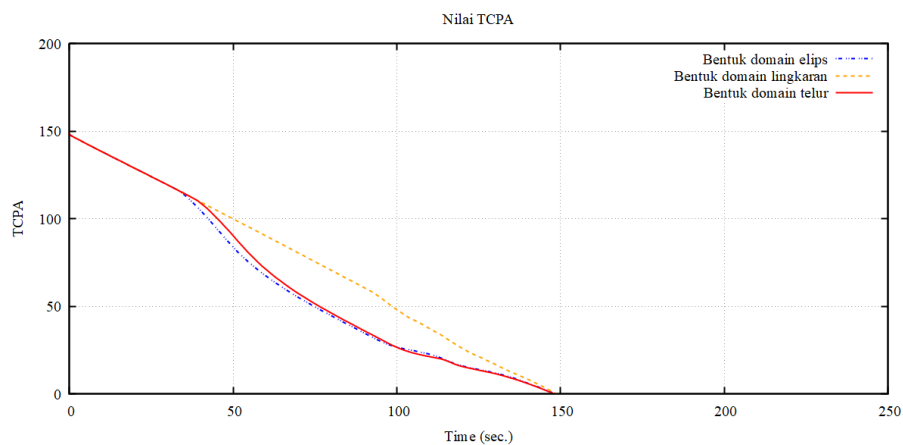
Gambar 5.39 - Gambar 5.45 merupakan hasil perhitungan dari ketiga bentuk domain kapal. Warna biru menunjukan hasil dari bentuk domain elips, warna oranye menunjukan hasil dari bentuk domain lingkaran, dan warna merah

menunjukkan hasil dari bentuk domain telur. Perbandingan hasil perhitungan ini untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi efektivitas masing-masing bentuk domain dalam konteks navigasi dan manuver penghindaran tabrakan. Perbandingan ini juga bertujuan untuk memahami bagaimana masing-masing bentuk domain mempengaruhi penilaian risiko tabrakan dalam berbagai skenario yang telah diujikan. Bentuk domain yang berbeda memiliki karakteristik unik dalam hal distribusi risiko dan jarak terdekat antar kapal. Tujuan dari perbandingan hasil perhitungan, sebagai berikut:

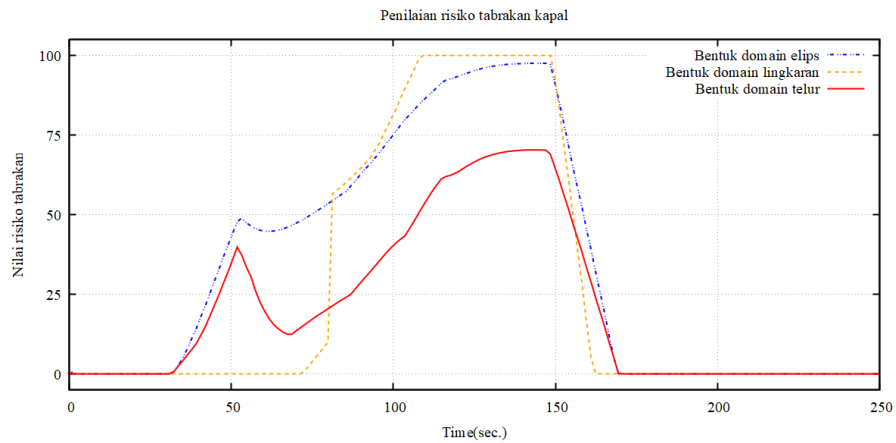
1. Pengaruh bentuk domain terhadap penilaian risiko tabrakan



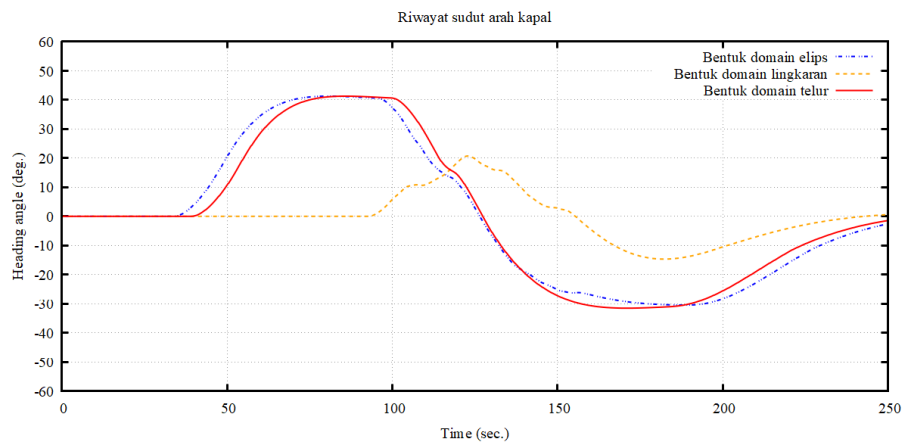
Gambar 5.39 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario A3 selama perhitungan berlangsung



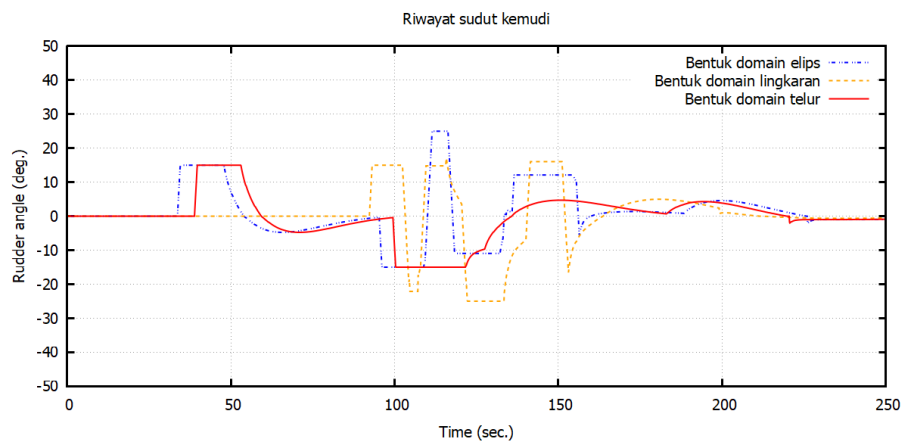
Gambar 5.40 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario A3 selama perhitungan berlangsung



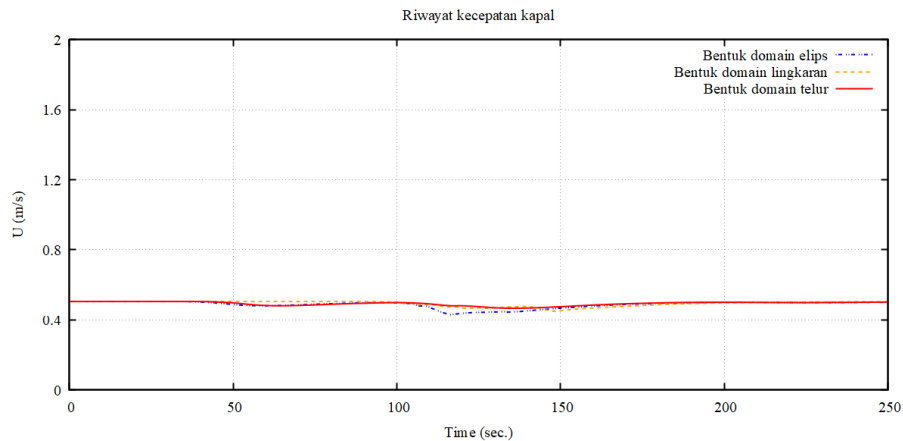
Gambar 5.41 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A3 selama perhitungan berlangsung



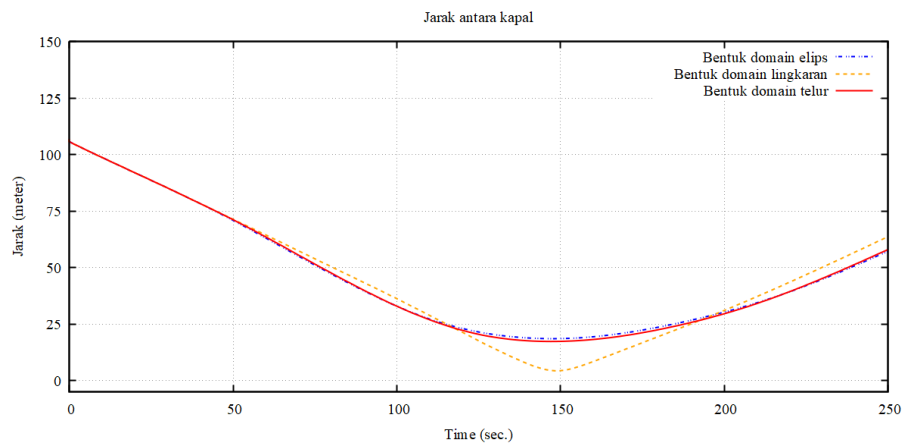
Gambar 5.42 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A3 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.43 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario A3 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.44 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario A3 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.45 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario A3 selama perhitungan berlangsung

Tabel 5.11 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario A3 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Luas Area
1	Elips	135,8	8535,01
2	Lingkaran	88,2	6800,33
3	Telur	137,2	5253,40

Berdasarkan Tabel 5.11 yang merupakan hasil perhitungan dari Gambar 5.41, menunjukkan bahwa bentuk domain telur memiliki luas area terkecil dibandingkan dengan bentuk domain elips dan lingkaran. Bentuk domain elips memiliki luas area terbesar, menunjukkan bahwa kapal mengalami nilai risiko tabrakan tinggi untuk waktu yang lebih lama, yang tidak diinginkan. Bentuk domain

lingkaran memiliki luas area yang cukup besar, menunjukkan bahwa kapal mengalami nilai risiko tabrakan yang signifikan, tetapi lebih singkat dibandingkan elips. Bentuk domain telur memiliki luas area terkecil, menunjukkan bahwa nilai risiko tabrakan lebih rendah. Meskipun dibutuhkan waktu yang lebih lama, akan tetapi kondisi siaga yang dihadapi kapal tetap lebih kecil.

Tabel 5.12 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario A3 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Jarak terdekat antar dua kapal (meter)
1	Elips	147,00	18,56
2	Lingkaran	148,4	4,32
3	Telur	147,00	17,31

Selain melihat dari hasil penilain risiko tabrakan kapal perlu melihat juga pengaruh lainnya. Pada Tabel 5.12 ditampilkan jarak terdekat antara kedua kapal, melalui tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa:

1. Bentuk domain elips memiliki jarak terdekat yang aman, namun kapal mengalami nilai risiko tabrakan tinggi untuk waktu yang lebih lama.
2. Bentuk domain lingkaran meskipun memiliki waktu tercepat untuk mencapai penghindaran, akan tetapi jarak terdekat yang sangat kecil, menunjukkan risiko tabrakan yang tinggi.
3. Bentuk domain telur menawarkan kombinasi terbaik antara efisiensi ruang dan keamanan, dengan luas area terkecil, serta jarak terdekat yang cukup aman, dengan kapal mengalami nilai risiko tabrakan yang lebih rendah.

Berdasarkan grafik riwayat sudut arah kapal dan riwayat sudut kemudi kapal yang ditampilkan pada Gambar 5.42 dan Gambar 5.43, dapat dilihat perbedaan respon penghindaran tabrakan dari masing – masing bentuk domain. Pada setiap bentuk domain kapal, ketika melakukan penghindaran terlihat pada sudut arahnya kapal sendiri berusaha untuk mensatiblakn posisinya, dikarenakan aksi penghindaran yang diambil adalah penghindaran darurat. Dengan begitu hal tersebut mempengaruhi perubahan sudut kemudi kapalnya.

5.3 Simulasi Tabrakan Skenario B

Simulasi skenario B dilakukan dengan kapal model subjek yang memiliki ukuran yang sama dengan kecepatan yang berbeda, serta beberapa variasi sudut

datang kapal sasaran sesuai dengan skenario yang telah diberikan. Hasil simulasi akan menampilkan pergerakan rute kapal (perubahan posisi kapal), nilai risiko tabrakan, nilai DCPA dan TCPA, serta jarak antara kedua kapal saat simulasi tabrakan. Pada simulasi pengambilan keputusan, hasil pergerakan kemudi kapal, kecepatan kapal, dan sudut arah kapal juga akan ditunjukkan. Kapal sendiri divisualisasikan dengan garis berwarna biru dan mata panah berwarna biru sebagai kapal sendiri yang bergerak, dan Kapal sasaran divisualisasikan dengan garis berwarna merah dan mata panah berwarna merah sebagai kapal sasaran yang bergerak.

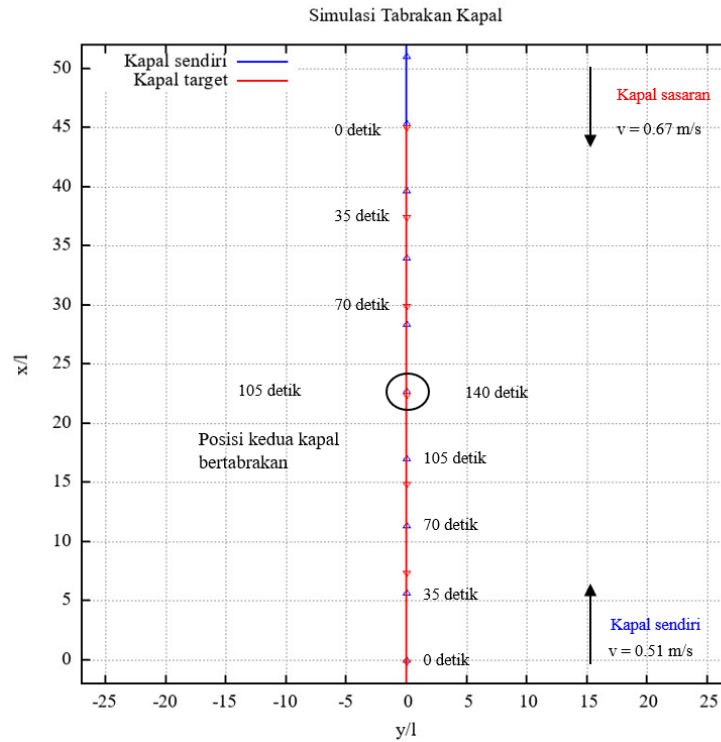
5.3.1 Simulasi Tabrakan Skenario 1

Simulasi tabrakan pada skenario B1 adalah situasi pertemuan antara dua kapal. Pada situasi ini dilakukan sebuah simulasi bertabrakan, sehingga kedua kapal tidak ada yang mengambil tindakan penghindaran. Pada Gambar 5.47 dapat dilihat $DCPA = 0,0$ meter karena kedua kapal berada di satu garis lurus pada posisi awal, akan tetapi nilai risiko tabrakan $= 0,0$ (Gambar 5.49) karena nilai TCPA masih terlalu besar (Gambar 5.48). Setelah dilakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.46, kedua kapal berjalan lurus sepanjang rute dan kedua kapal saling berhadapan satu sama lain dan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.47 - Gambar 5.49 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan $DCPA = 0,0$ meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada 56,0 detik ($TCPA = 78,46$ detik) dan selama perhitungan, nilai risiko tabrakan $= 100$ untuk pertama kali terjadi pada waktu 117,6 detik.

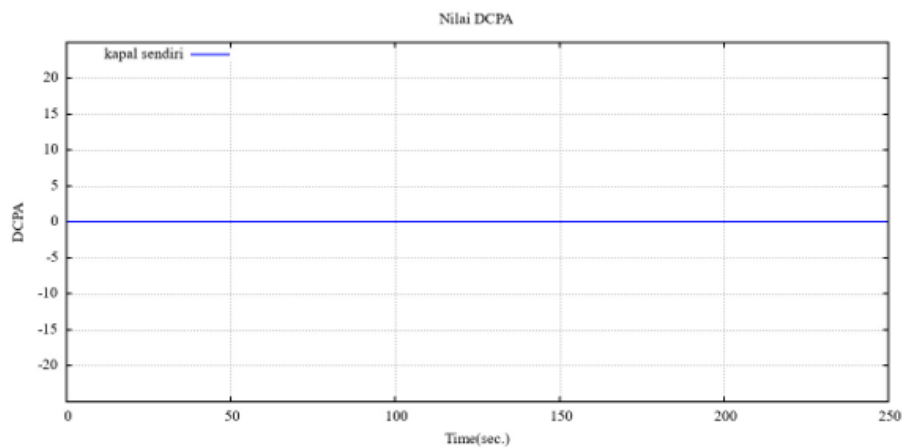
Pada waktu 117,6 detik, jarak antara kedua kapal adalah 34,71 meter. Sedangkan panjang dari domain kapal bagian depan adalah 23,45 meter, sehingga kapal sasaran belum masuk ke dalam domain kapal sendiri. Melalui perhitungan *fuzzy inference*, pada waktu 117,6 detik nilai TCPA adalah 17,76 yang mengakibatkan domain bahaya pada himpunan fuzzy dari TCPA. Karena nilai DCPA adalah 0,0 meter, ini menjadikan kondisi "IF DCPA Bahaya AND TCPA Bahaya THEN risiko tabrakan CR5", di mana $CR5 = 100$. Nilai risiko sebesar 100 terjaga hingga kedua kapal bertemu satu sama lain pada waktu 135,8 detik.

Analisis ini menunjukkan bahwa pada waktu 117,6 detik, kapal sudah berada dalam kondisi sangat berbahaya karena kapal sasaran telah masuk ke dalam

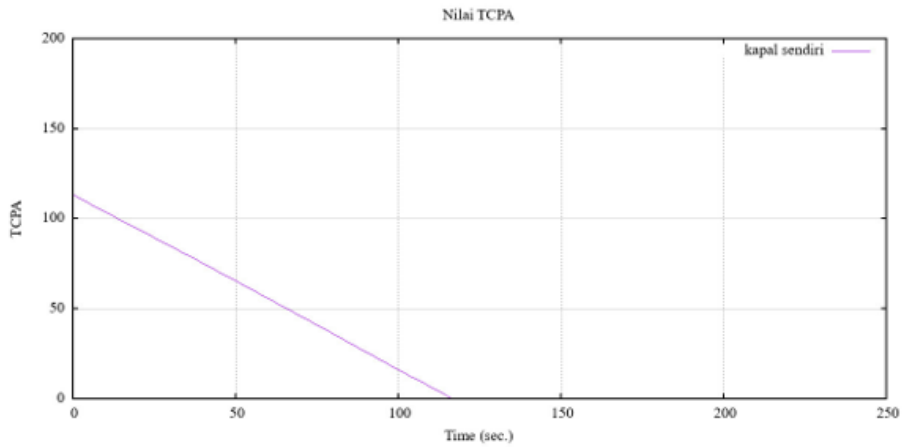
domain kapal sendiri. Nilai TCPA yang rendah menandakan bahwa waktu hingga potensi tabrakan sangat singkat, dan dengan nilai DCPA yang nol, risiko tabrakan menjadi sangat tinggi.



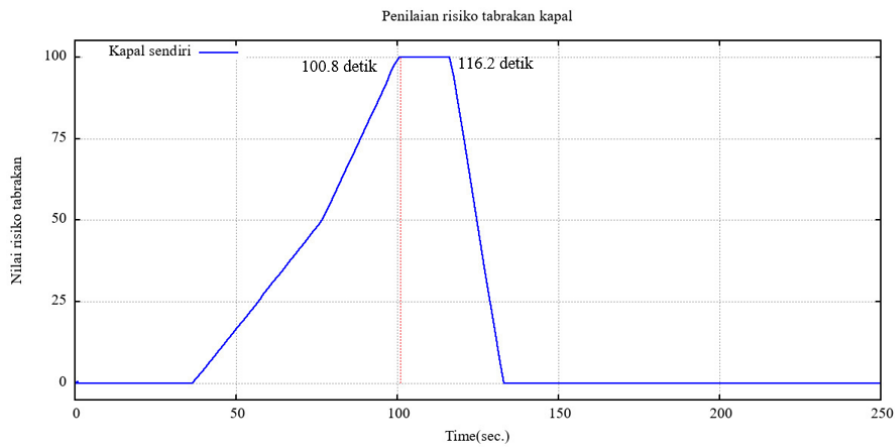
Gambar 5.46 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario B1 tanpa resolusi konflik



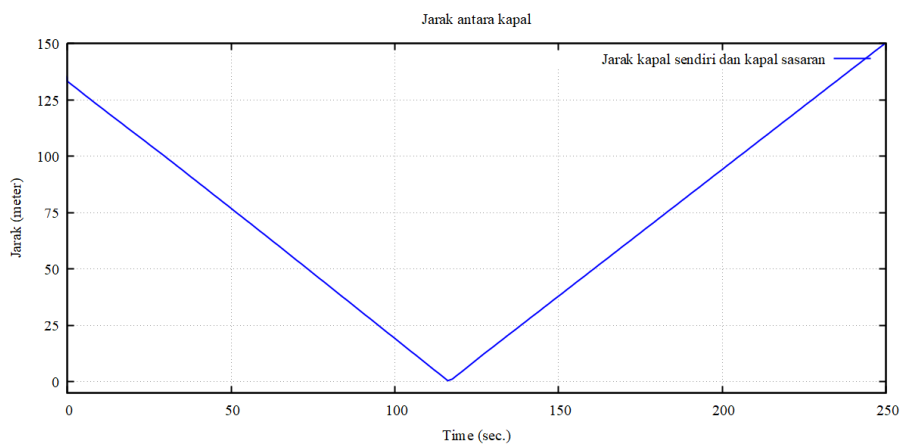
Gambar 5.47 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario B1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.48 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario B1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.49 Riwayat waktu penilain risiko tabrakan kapal skenario B1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.50 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario B1

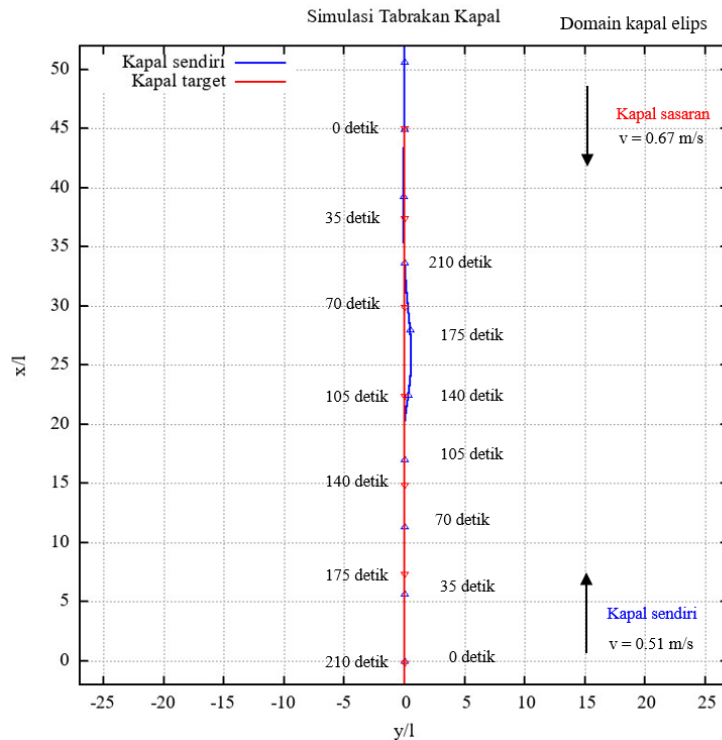
Untuk mengetahui pengaruh bentuk domain kapal terhadap penilaian risiko tabrakan, maka perlu dilakukan perhitungan resolusi konflik dan untuk mengetahui hasil pengaruh bentuk domain terhadap pengambilan keputusan.

5.3.2.1 Bentuk Domain Kapal Elips

Domain kapal berbentuk elips memiliki panjang elips pada sumbu utama (Mj) sebesar 17,70 meter, serta panjang elips pada bagian sisi (Mi) sebesar 12,30 meter. Setelah melakukan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.51, kedua kapal berjalan lurus sepanjang rute dan saling berhadapan satu sama lain. Hasil perhitungan yang terlihat pada Gambar 5.54 hingga Gambar 5.60 menunjukkan bahwa nilai TCPA menurun sedangkan DCPA tetap 0,0 meter. Sebagai hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ pertama kali terjadi pada waktu 37,8 detik, dengan nilai TCPA sebesar 77,29 detik dan nilai DCPA sebesar 0,0 meter. Hal ini membuat peraturan *fuzzy inference* perhitungan risiko tabrakan menghasilkan hubungan CR3 dan CR4, dengan nilai risiko tabrakan sebesar 1,61. Keputusan penghindaran harus dibuat berdasarkan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah starboard.

Meskipun kapal sendiri melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak, hal ini tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri. Sementara itu, nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risiko meningkat seiring berjalannya waktu. Pada waktu 89,6 detik, nilai risiko tabrakan > 75 , sehingga mengharuskan kapal sendiri mengambil keputusan untuk mengalah dalam kondisi penghindaran darurat. Pada waktu 102,2 detik, nilai risiko tabrakan kapal sendiri mencapai 100. Namun, jarak antara kedua kapal adalah 16,68 meter, dan kedua kapal tidak berada di dalam setiap domainnya. Hal ini terjadi karena pada waktu 102,2 detik, nilai TCPA adalah 14,19 detik dan DCPA adalah 0,0 meter. Hubungan fuzzy inference yang terjadi adalah “IF TCPA Bahaya AND IF DCPA Bahaya THEN CR5”. Dengan dua hubungan tersebut dan perhitungan yang dilakukan, didapatkan nilai risiko tabrakan sebesar 100.

Ditunjukkan pada Gambar 5.51, kedua kapal memiliki jarak terdekat pada waktu 116,2 detik, yaitu sekitar 0,60 meter. Ini menunjukkan bahwa dalam kondisi seperti ini, dengan adanya perbedaan kecepatan pendekatan dan bentuk elips, risikonya sedikit kurang.



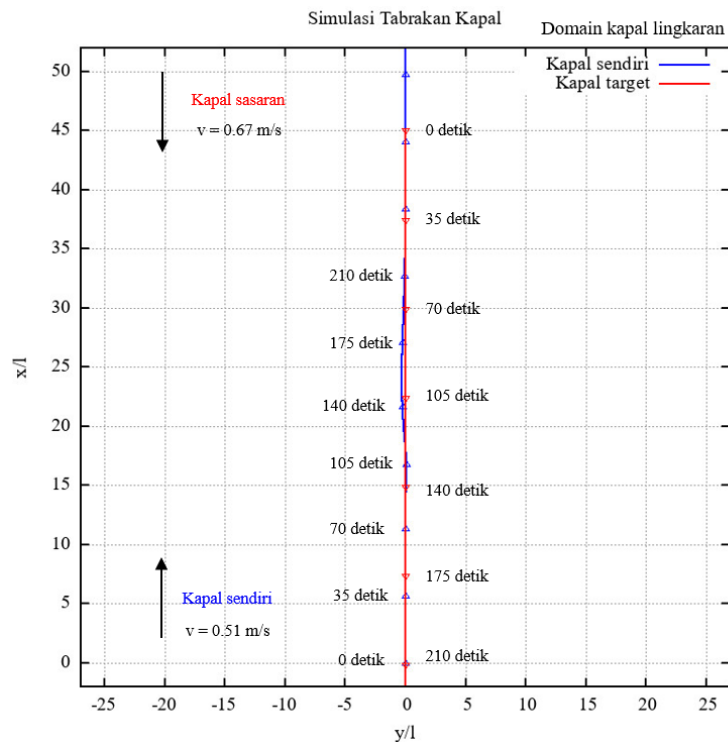
Gambar 5.51 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B1 dengan bentuk domain kapal elips

5.3.2.2 Bentuk Domain Kapal Lingkaran

Domain kapal berbentuk lingkaran memiliki jari-jari (Rho) sebesar 11,90 meter. Setelah melakukan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.52, kedua kapal berjalan mengikuti rute dan saling berseberangan satu sama lain. Hasil perhitungan yang terlihat pada Gambar 5.54 hingga Gambar 5.60 menunjukkan bahwa nilai TCPA menurun sedangkan nilai DCPA tetap 0,0 meter. Sebagai hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ pertama kali terjadi pada waktu 56 detik, dengan nilai TCPA sebesar 59,69 detik dan nilai DCPA sebesar 0,0 meter. Hal ini menyebabkan peraturan *fuzzy inference* perhitungan risiko tabrakan menghasilkan hubungan CR3 dan CR4, dengan nilai risiko tabrakan sebesar 34,06. Keputusan penghindaran harus dibuat berdasarkan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah starboard.

Meskipun kapal sendiri melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak, hal ini tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri. Sementara itu, nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risiko meningkat seiring berjalannya waktu. Pada waktu 74,2 detik, nilai risiko tabrakan > 75 , sehingga

mengharuskan kapal sendiri mengambil keputusan untuk mengalah dalam kondisi penghindaran darurat. Pada waktu 86,8 detik, nilai risiko tabrakan kapal sendiri mencapai 100. Namun, jarak antara kedua kapal adalah 34,54 meter, dan kapal sasaran tidak melanggar batas domain kapal sendiri. Hal ini terjadi karena pada waktu 86,8 detik, nilai TCPA adalah 29,7 detik dan DCPA adalah 0,88 meter. Hubungan fuzzy inference yang terjadi adalah “IF TCPA Bahaya AND IF DCPA Bahaya THEN CR5” dan “IF TCPA Siaga AND IF DCPA Bahaya THEN CR3”. Dengan dua hubungan tersebut dan perhitungan yang dilakukan, didapatkan nilai risiko tabrakan sebesar 100.

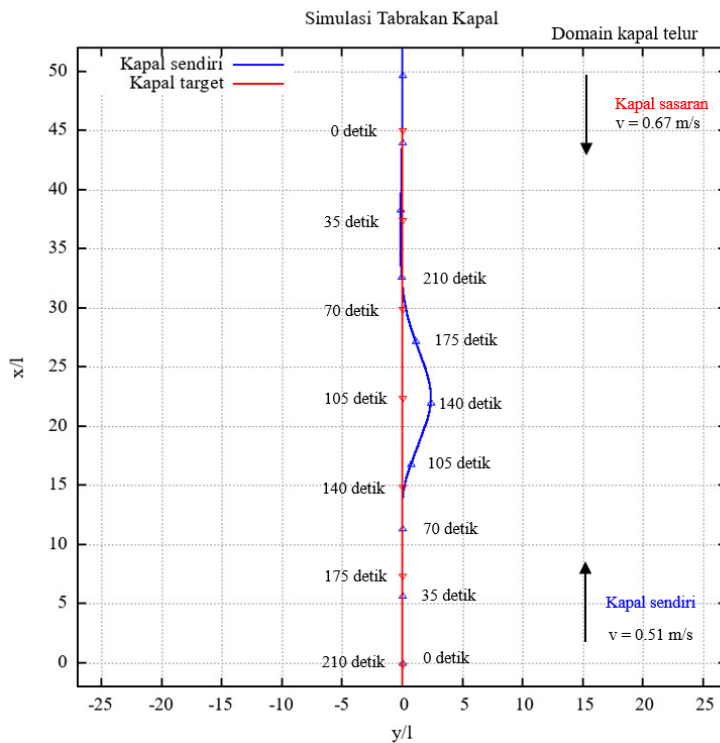


Gambar 5.52 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B1 dengan bentuk domain kapal lingkaran

5.3.2.3 Bentuk Domain Kapal Telur

Domain kapal berbentuk telur memiliki $R_{bf} = 23,45$ meter, $R_{ba} = 13,22$ meter, dan panjang $S_b = 4,04$ meter. Setelah melakukan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.53, kedua kapal berjalan lurus sepanjang jalur dan saling berhadapan satu sama lain. Hasil perhitungan yang terlihat pada Gambar 5.54 hingga Gambar 5.60 menunjukkan bahwa nilai TCPA menurun sedangkan DCPA tetap 0,0 meter. Sebagai hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ pertama kali terjadi

pada waktu 37,8 detik, dengan nilai TCPA sebesar 77,29 detik dan nilai DCPA sebesar 0,0 meter. Hal ini menyebabkan peraturan *fuzzy inference* perhitungan risiko tabrakan menghasilkan hubungan CR3 dan CR4, dengan nilai risiko tabrakan sebesar 1,61. Keputusan penghindaran harus dibuat berdasarkan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah starboard.



Gambar 5.53 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B1 dengan bentuk domain kapal telur

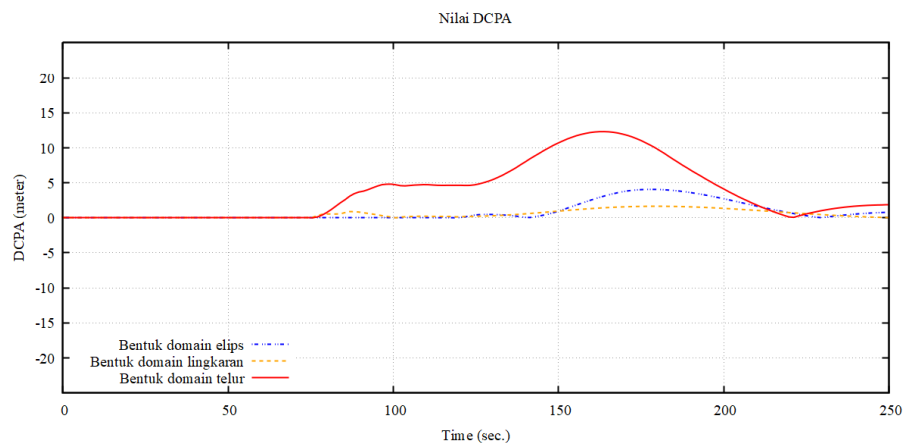
Meskipun kapal sendiri melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak, usaha ini tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri. Sementara itu, nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risiko meningkat seiring berjalannya waktu. Pada waktu 82,6 detik, nilai risiko tabrakan kapal sendiri mencapai 100. Namun, jarak antara kedua kapal adalah 39,37 meter, dan kapal sasaran tidak masuk ke dalam domain kapal sendiri. Hal ini juga bisa terjadi karena pada waktu 82,6 detik, nilai TCPA adalah 33,62 detik dan DCPA adalah 1,6 meter. Hubungan *fuzzy inference* yang terjadi adalah “IF TCPA Bahaya AND IF DCPA Bahaya THEN CR5” dan “IF TCPA Siaga AND IF DCPA Bahaya THEN CR3”.

Dengan terjadinya dua hubungan tersebut dan perhitungan yang dilakukan, didapatkan nilai risiko tabrakan sebesar 100.

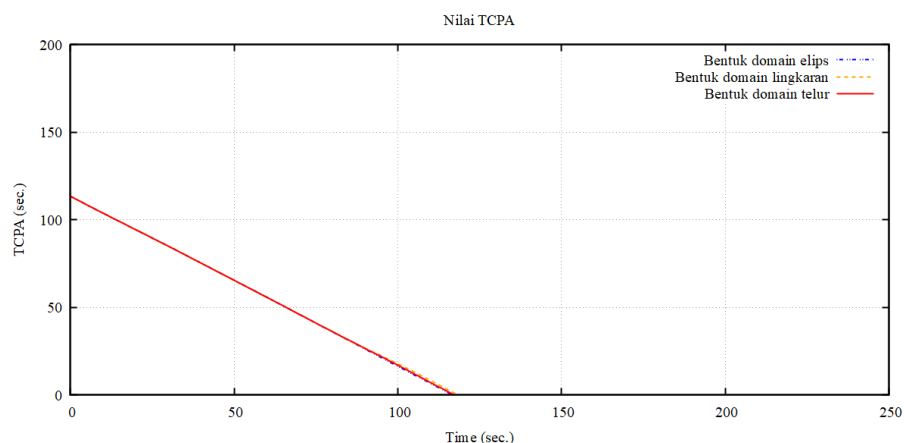
5.3.2.4 Perbandingan Hasil Perhitungan

Gambar 5.54 - Gambar 5.60 merupakan hasil perhitungan dari ketiga bentuk domain kapal. Warna biru menunjukan hasil dari bentuk domain elips, warna oranye menunjukan hasil dari bentuk domain lingkaran, dan warna merah menunjukan hasil dari bentuk domain telur. Tujuan dari perbandingan hasil perhitungan, sebagai berikut:

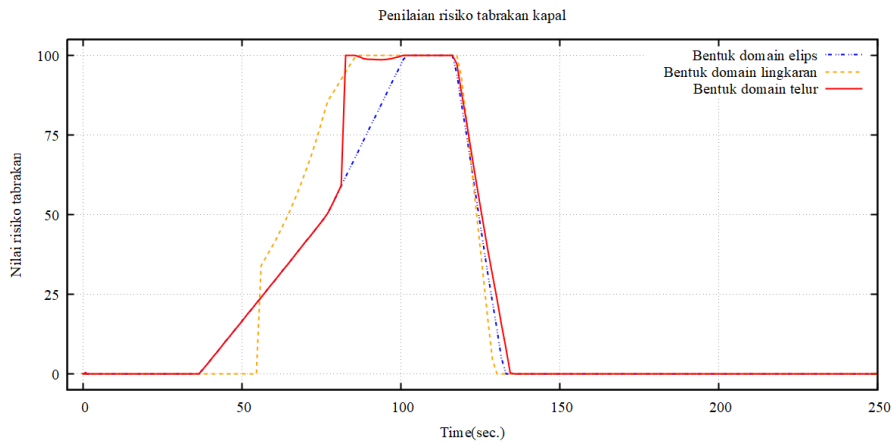
1. Pengaruh bentuk domain terhadap penilaian risiko tabrakan



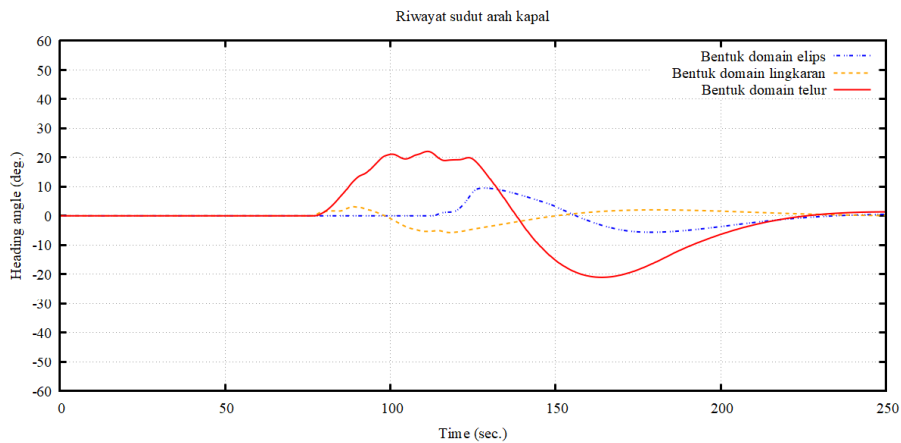
Gambar 5.54 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B1 selama perhitungan berlangsung



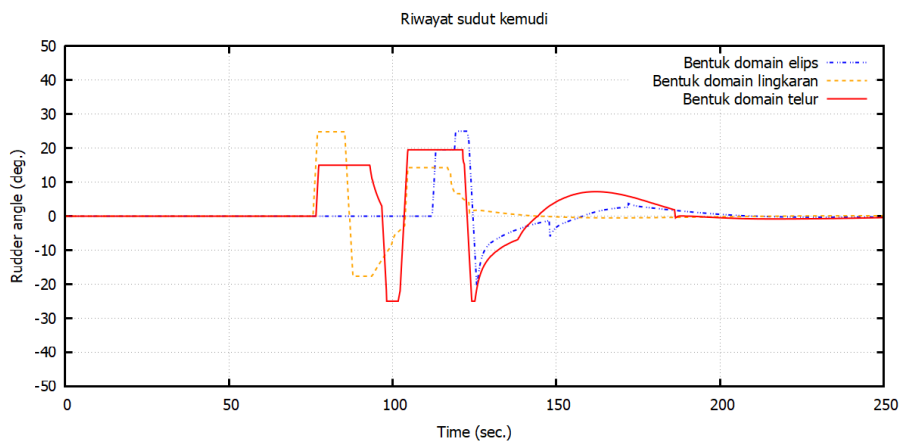
Gambar 5.55 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B1 selama perhitungan berlangsung



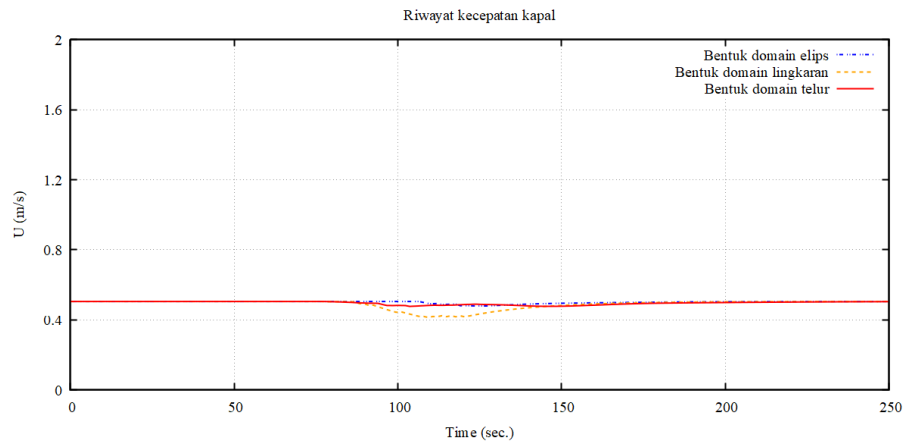
Gambar 5.56 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B1 selama perhitungan berlangsung



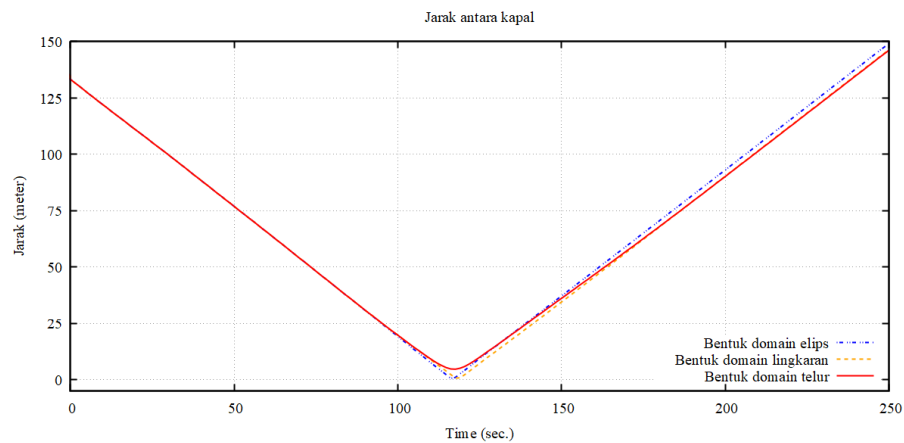
Gambar 5.57 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.58 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario B1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.59 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.60 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario B1

Tabel 5.13 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario B1 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Luas Area
1	Elips	93,8	5164,77
2	Lingkaran	72,8	5828,07
3	Telur	96,6	5643.59

Berdasarkan Tabel 5.13 yang merupakan hasil perhitungan dari Gambar 5.56, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Bentuk domain elips memiliki luas area terbesar, menunjukkan bahwa kapal mengalami nilai risiko tabrakan tinggi untuk waktu yang cukup lama, dengan luas area yang signifikan.

2. Bentuk domain lingkaran memiliki luas area yang lebih besar, menunjukkan risiko tabrakan yang cukup tinggi, meskipun dalam waktu yang lebih singkat.
3. Bentuk domain telur memiliki luas area terkecil, menunjukkan bahwa nilai risiko tabrakan lebih rendah. Walaupun dengan waktu yang lebih lama, akan tetapi kondisi siaga yang dihadapi kapal tetap lebih kecil.

Tabel 5.14 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario B1 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Jarak terdekat antar dua kapal (meter)
1	Elips	116,2	0,6
2	Lingkaran	117,6	0,78
3	Telur	117,6	4,67

Selain melihat dari hasil penilain risiko tabrakan kapal perlu melihat juga pengaruh lainnya. Pada Tabel 5.12 ditampilkan jarak terdekat antara kedua kapal, melalui tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa:

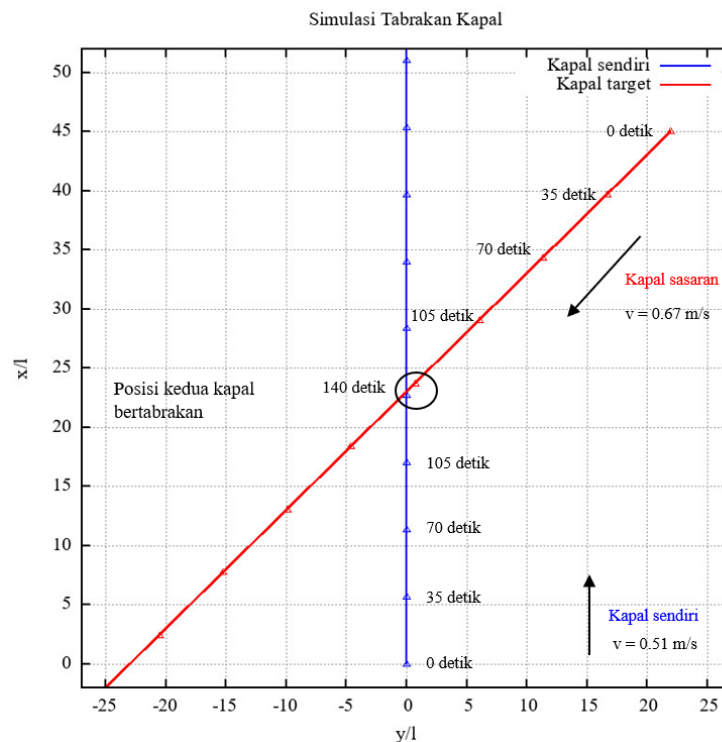
1. Bentuk domain elips memiliki jarak terdekat yang sangat kecil menunjukkan risiko tabrakan yang tinggi, dan manuver penghindaran kurang efektif.
2. Bentuk domain lingkaran meskipun memiliki waktu tercepat untuk mencapai penghindaran, akan tetapi jarak terdekat yang sangat kecil menunjukkan risiko tabrakan yang tinggi, meskipun sedikit lebih baik daripada bentuk elips.
3. Bentuk domain telur memiliki jarak terdekat yang cukup besar menunjukkan bahwa manuver penghindaran efektif, dengan risiko tabrakan yang lebih rendah.

5.3.2 Simulasi Tabrakan Skenario 2

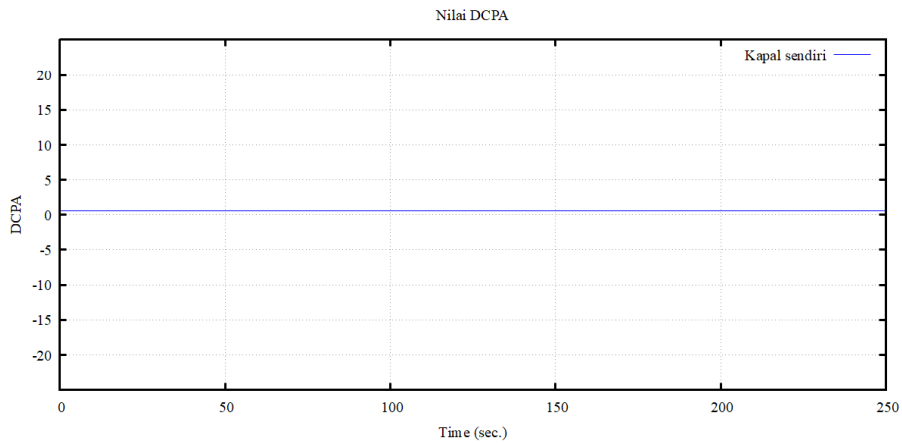
Simulasi tabrakan pada skenario B2 adalah situasi pertemuan antara dua kapal dan dengan arah kapal sasaran sebesar -135 derajat terhadap kapal sendiri . Pada situasi ini dilakukan sebuah simulasi bertabrakan, sehingga kedua kapal tidak ada yang mengambil tindakan penghindaran. Pada Gambar 5.61 dapat dilihat DCPA = 0,0 meter karena kedua kapal berada di satu garis lurus pada posisi awal, akan tetapi nilai risiko tabrakan = 0,0 (Gambar 5.64) karena nilai TCPA masih terlalu

besar (Gambar 5.63). Setelah dilakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.61, kedua kapal berjalan lurus sepanjang rute dan kedua kapal saling berhadapan satu sama lain dan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.62 hingga Gambar 5.65 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada 21 detik (TCPA = 116,69detik) dan selama perhitungan, nilai risiko tabrakan = 100 untuk pertama kali terjadi pada waktu 100,8 detik.

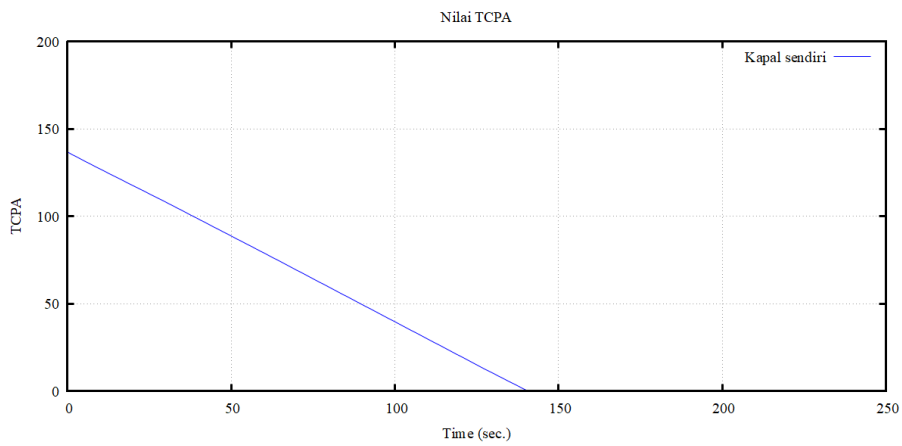
Pada waktu 100,8 detik, jarak antara kedua kapal adalah 42,29 meter. Sedangkan panjang dari domain kapal bagian depan adalah 23,45 meter, sehingga kapal sasaran sudah belum masuk ke dalam domain kapal sendiri. Melalui perhitungan fuzzy inference, pada waktu 100,8 detik nilai TCPA adalah 38,88 yang mengakibatkan domain bahaya pada himpunan *fuzzy* dari TCPA. Karena nilai DCPA adalah 0,0 meter, ini menjadikan kondisi "IF DCPA Bahaya AND TCPA Siaga THEN risiko tabrakan CR5", di mana CR5 = 100, mengikuti peraturan *fuzzy inference* dalam kondisi menyebrang. Nilai risiko sebesar 140 terjaga hingga kedua kapal bertemu satu sama lain pada waktu 135,8 detik.



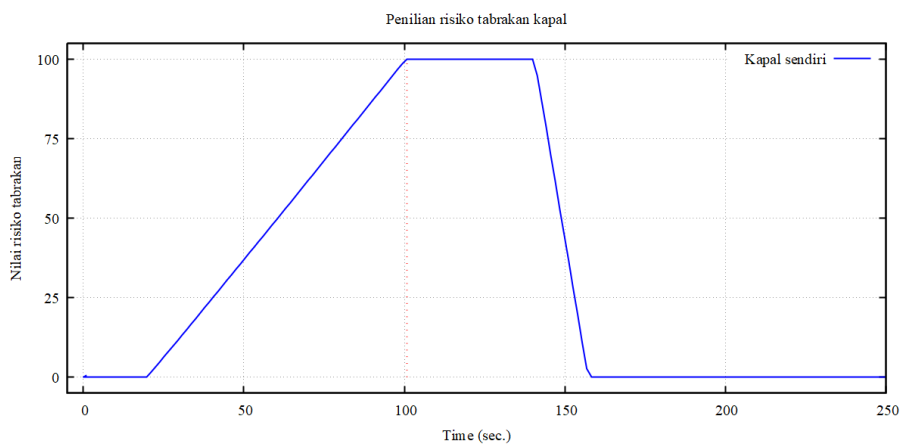
Gambar 5.61 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario B2 tanpa resolusi konflik



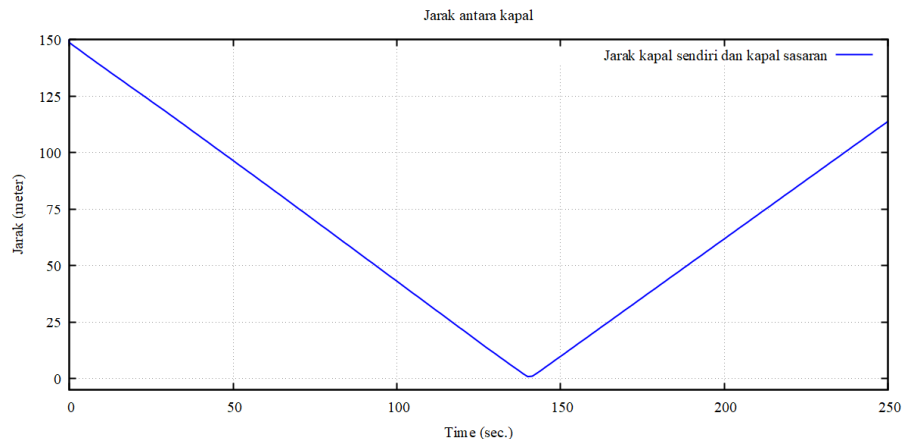
Gambar 5.62 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario B2 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.63 Riwayat perubahan nilai TCPA kapal skenario B2 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.64 Riwayat waktu penilai risiko tabrakan kapal skenario B2 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.65 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario B2

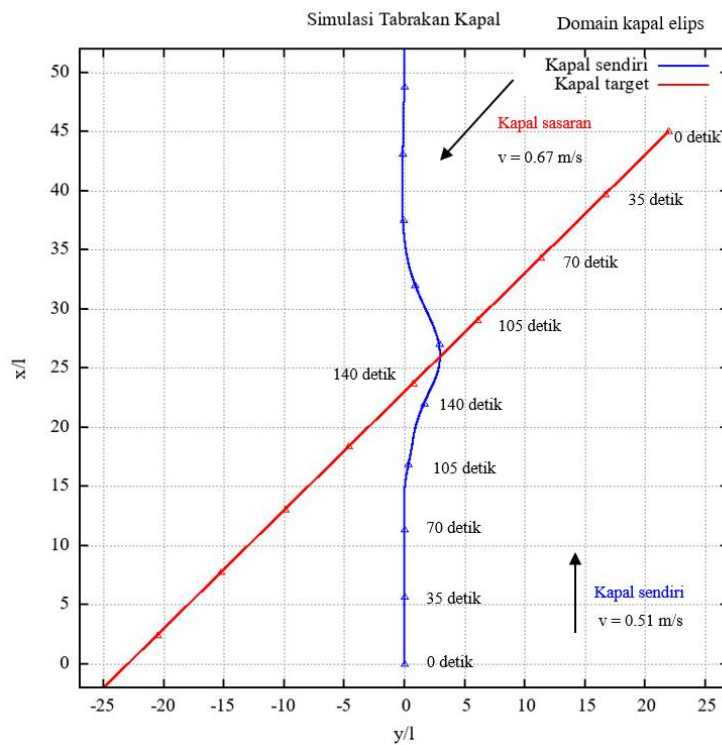
Untuk mengetahui pengaruh bentuk domain kapal terhadap penilaian risiko tabrakan, maka perlu dilakukan perhitungan resolusi konflik dan untuk mengetahui hasil pengaruh bentuk domain terhadap pengambilan keputusan.

5.3.2.1 Bentuk Domain Kapal Elips

Setelah melakukan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.66, kedua kapal berjalan mengikuti rute dan saling berseberangan satu sama lain. Hasil perhitungan yang terlihat pada Gambar 5.69 hingga Gambar 5.75 menunjukkan bahwa nilai TCPA menurun sedangkan nilai DCPA tetap 0,0 meter. Sebagai hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ pertama kali terjadi pada waktu 21 detik, dengan nilai TCPA sebesar 116,69 detik dan nilai DCPA sebesar 0,0 meter. Hal ini menyebabkan peraturan *fuzzy inference* perhitungan risiko tabrakan menghasilkan hubungan CR3 dan CR4, dengan nilai risiko tabrakan sebesar 1,45. Keputusan penghindaran harus dibuat berdasarkan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *starboard*.

Meskipun kapal sendiri melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak, usaha ini tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri. Sementara itu, nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risiko meningkat seiring berjalannya waktu. Pada waktu 81,2 detik, nilai risiko tabrakan > 75 , sehingga mengharuskan kapal sendiri mengambil keputusan untuk mengalah dalam kondisi penghindaran darurat. Pada waktu 100,8 detik, nilai risiko tabrakan kapal sendiri mencapai 100. Namun, jarak antara kedua kapal adalah 42,32 meter, dan kapal

sasaran tidak melanggar batas domain kapal sendiri. Hal ini bisa terjadi karena pada waktu 100,8 detik, nilai TCPA adalah 38,14 detik dan DCPA adalah 4,69 meter. Hubungan *fuzzy inference* yang terjadi adalah "IF DCPA Bahaya AND TCPA Siaga THEN risiko tabrakan CR5," di mana $CR5 = 100$, mengikuti peraturan fuzzy inference dalam kondisi menyeberang. Dengan terjadinya dua hubungan tersebut dan perhitungan yang dilakukan, didapatkan nilai risiko tabrakan sebesar 100.

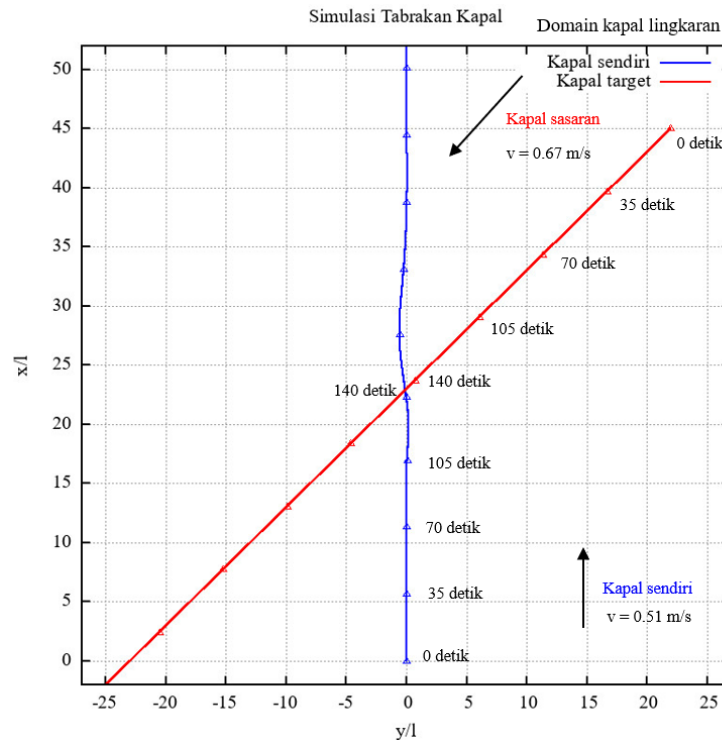


Gambar 5.66 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B2 dengan bentuk domain kapal elips

5.3.2.2 Bentuk Domain Kapal Lingkaran

Setelah melakukan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.67, kedua kapal berjalan mengikuti rute dan saling berseberangan satu sama lain. Hasil perhitungan yang terlihat pada Gambar 5.69 hingga Gambar 5.75 menunjukkan bahwa nilai TCPA menurun sedangkan nilai DCPA tetap 0,0 meter. Sebagai hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ pertama kali terjadi pada waktu 61,6 detik, dengan nilai TCPA sebesar 77,49 detik dan nilai DCPA sebesar 0,0 meter. Hal ini menyebabkan peraturan *fuzzy inference* perhitungan risiko tabrakan menghasilkan hubungan CR3 dan CR4, dengan nilai risiko tabrakan sebesar 1,36. Keputusan

penghindaran harus dibuat berdasarkan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *starboard*.

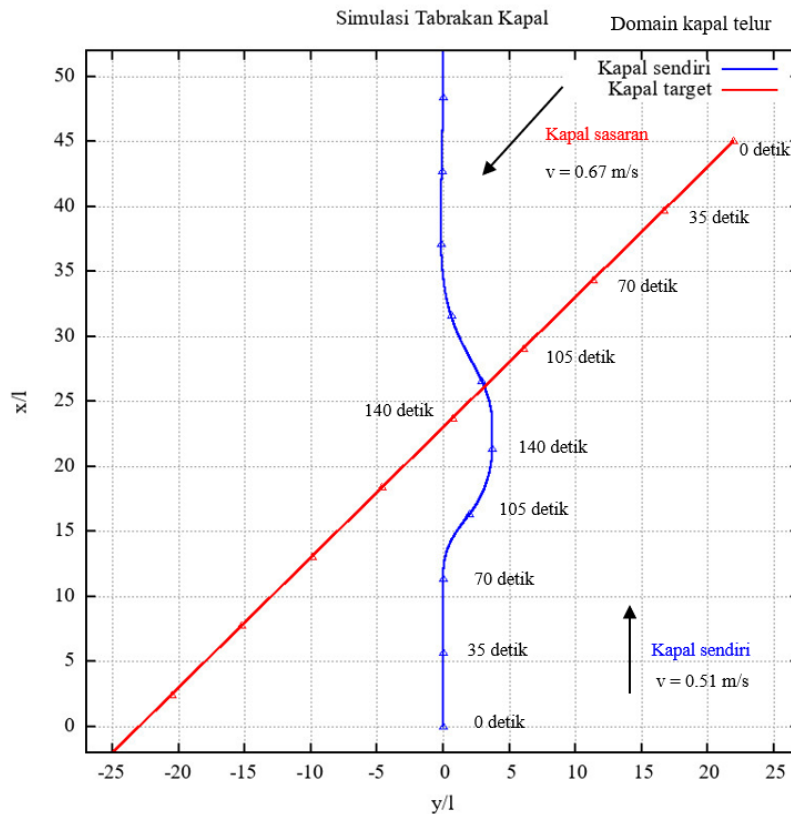


Gambar 5.67 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B2 dengan bentuk domain kapal lingkaran

Meskipun kapal sendiri melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak, usaha ini tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri. Sementara itu, nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risiko meningkat seiring berjalannya waktu. Pada waktu 88,2 detik, nilai risiko tabrakan > 75 , sehingga mengharuskan kapal sendiri mengambil keputusan untuk mengalah dalam kondisi penghindaran darurat. Pada waktu 100,8 detik, nilai risiko tabrakan kapal sendiri mencapai 100. Namun, jarak antara kedua kapal adalah 42,34 meter, dan kapal sasaran tidak melanggar batas domain kapal sendiri. Hal ini bisa terjadi karena pada waktu 100,8 detik, nilai TCPA adalah 38,68 detik dan DCPA adalah 1,09 meter. Hubungan *fuzzy inference* yang terjadi adalah "IF DCPA Bahaya AND TCPA Siaga THEN risiko tabrakan CR5," di mana $CR5 = 100$, mengikuti peraturan fuzzy inference dalam kondisi menyeberang. Dengan terjadinya dua hubungan tersebut dan perhitungan yang dilakukan, didapatkan nilai risiko tabrakan sebesar 100.

5.3.2.3 Bentuk Domain Kapal Telur

Setelah melakukan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.68, kedua kapal berjalan mengikuti rute dan saling berseberangan satu sama lain. Hasil perhitungan yang terlihat pada Gambar 5.69 hingga Gambar 5.75 menunjukkan bahwa nilai TCPA menurun sedangkan nilai DCPA tetap 0,0 meter. Sebagai hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ pertama kali terjadi pada waktu 21 detik, dengan nilai TCPA sebesar 116,69 detik dan nilai DCPA sebesar 0,0 meter. Hal ini menyebabkan peraturan *fuzzy inference* perhitungan risiko tabrakan menghasilkan hubungan CR3 dan CR4, dengan nilai risiko tabrakan sebesar 1,45. Keputusan penghindaran harus dibuat berdasarkan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *starboard*.



Gambar 5.68 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B2 dengan bentuk domain kapal telur

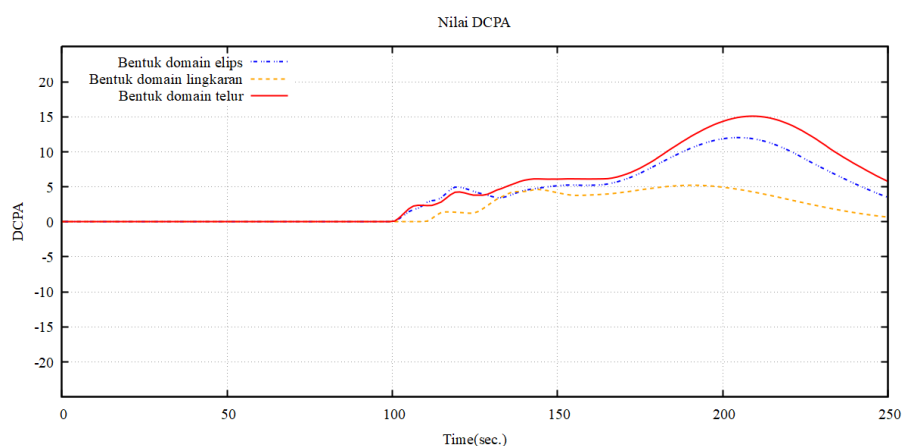
Meskipun kapal sendiri melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak, usaha ini tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri, sedangkan nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risikonya meningkat seiring

berjalannya waktu. Kemudian, pada waktu 110,6 detik, nilai risiko tabrakan > 75 , sehingga mengharuskan kapal sendiri untuk mengambil keputusan untuk mengalah dalam kondisi penghindaran darurat. Pada waktu 134,4 detik, nilai risiko tabrakan kapal sendiri mencapai 98,14. Namun, jarak antara kedua kapal adalah 12,32 meter dan kapal sasaran melanggar batas domain kapal sendiri. Meskipun demikian, kapal masih dapat menghindari dan setelah itu jarak antara kedua kapal mulai meningkat.

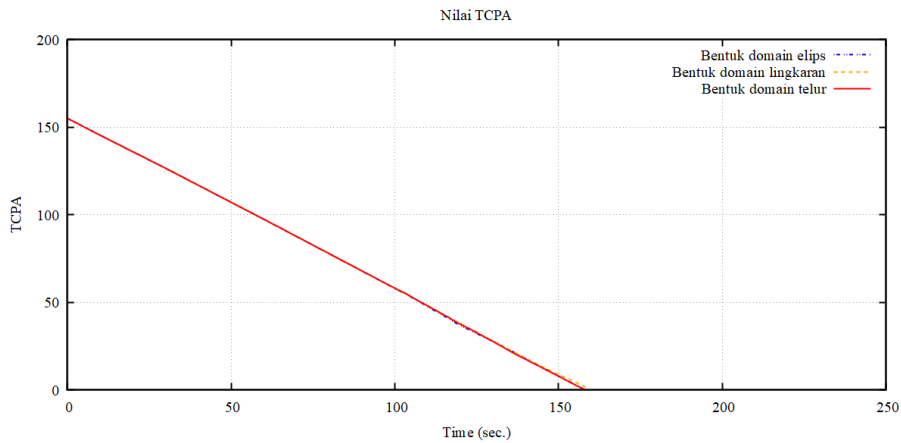
5.3.2.4 Perbandingan Hasil Perhitungan

Gambar 5.69 - Gambar 5.75 merupakan hasil perhitungan dari ketiga bentuk domain kapal. Warna biru menunjukkan hasil dari bentuk domain elips, warna oranye menunjukkan hasil dari bentuk domain lingkaran, dan warna merah menunjukkan hasil dari bentuk domain telur. Perbandingan hasil perhitungan ini untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi efektivitas masing-masing bentuk domain dalam konteks navigasi dan manuver penghindaran tabrakan. Perbandingan ini juga bertujuan untuk memahami bagaimana masing-masing bentuk domain mempengaruhi penilaian risiko tabrakan dalam berbagai skenario yang telah diujikan. Bentuk domain yang berbeda memiliki karakteristik unik dalam hal distribusi risiko dan jarak terdekat antar kapal. Tujuan dari perbandingan hasil perhitungan, sebagai berikut:

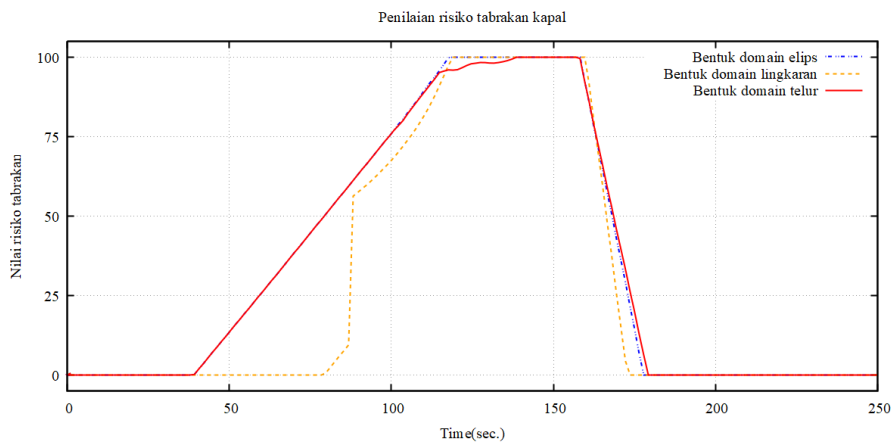
1. Pengaruh bentuk domain terhadap penilaian risiko tabrakan



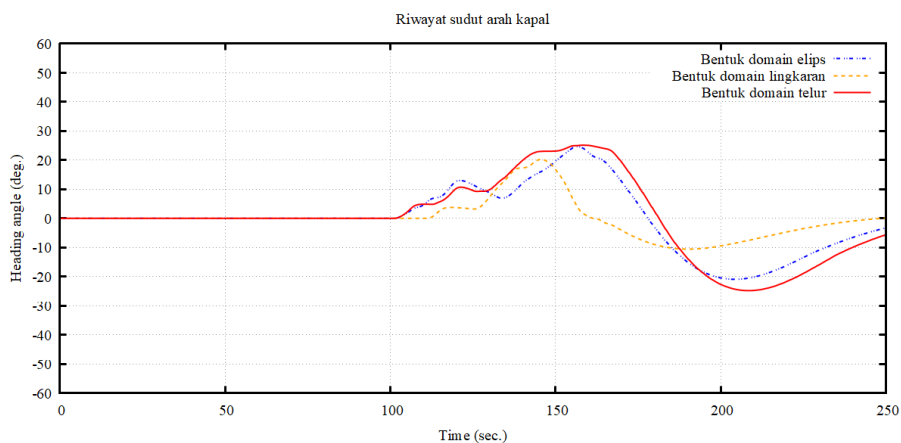
Gambar 5.69 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B2 selama perhitungan berlangsung



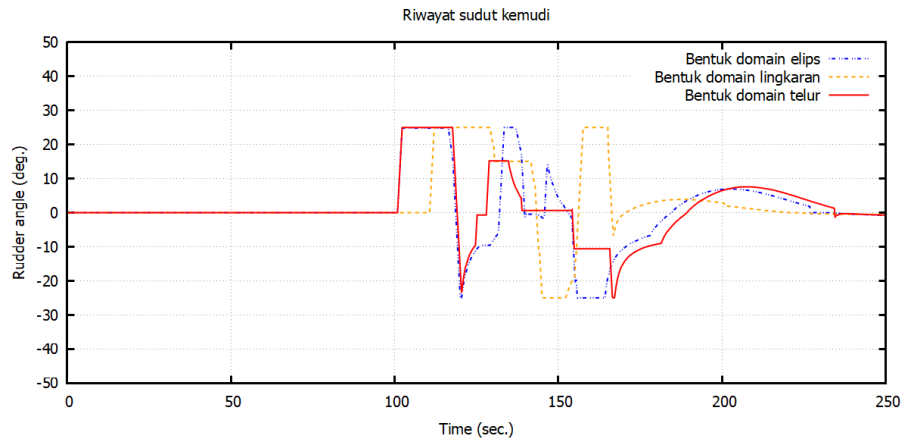
Gambar 5.70 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B2 selama perhitungan berlangsung



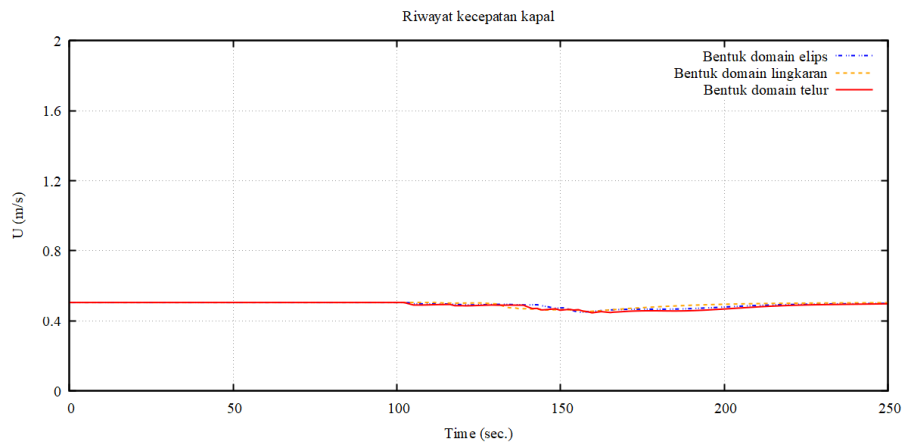
Gambar 5.71 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B2



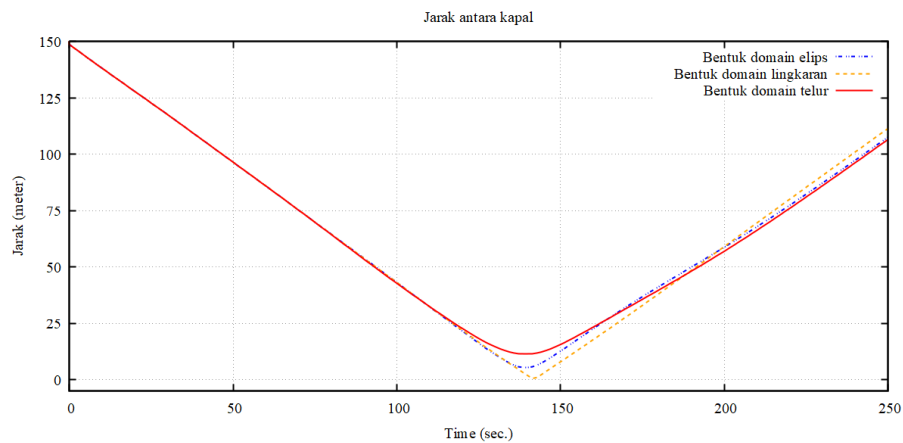
Gambar 5.72 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B2 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.73 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario B2 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.74 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B2 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.75 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario B2 selama perhitungan berlangsung

Tabel 5.15 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario B2 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Luas Area
1	Elips	137,2	8902,87
2	Lingkaran	92,4	7103,26
3	Telur	138,6	8904,05

Berdasarkan Tabel 5.15 yang merupakan hasil perhitungan dari Gambar 5.71, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pada bentuk domain elips menunjukkan bahwa kapal mengalami nilai risiko tabrakan tinggi untuk waktu yang cukup lama, dengan luas area yang signifikan.
2. Bentuk domain lingkaran memiliki luas area yang lebih kecil menunjukkan risiko tabrakan yang lebih rendah, dalam waktu yang lebih singkat.
3. Bentuk domain telur memiliki luas area terbesar menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi siaga yang lebih lama, dengan nilai risiko tabrakan yang besar.

Tabel 5.16 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario B2 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Jarak terdekat antar dua kapal (meter)
1	Elips	138,6	5,3
2	Lingkaran	141,4	0,53
3	Telur	138,6	11,34

Selain melihat dari hasil penilain risiko tabrakan kapal perlu melihat juga pengaruh lainnya. Pada Tabel 5.16 ditampilkan jarak terdekat antara kedua kapal, melalui tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa:

1. Bentuk domain elips memiliki jarak terdekat yang cukup besar, menunjukkan manuver penghindaran yang efektif. Walaupun begitu kapal tetap berada dalam kondisi siaga untuk waktu yang lama.
2. Bentuk domain lingkaran memiliki jarak terdekat yang sangat kecil, menunjukkan risiko tabrakan yang sangat tinggi dan manuver penghindaran kurang efektif.

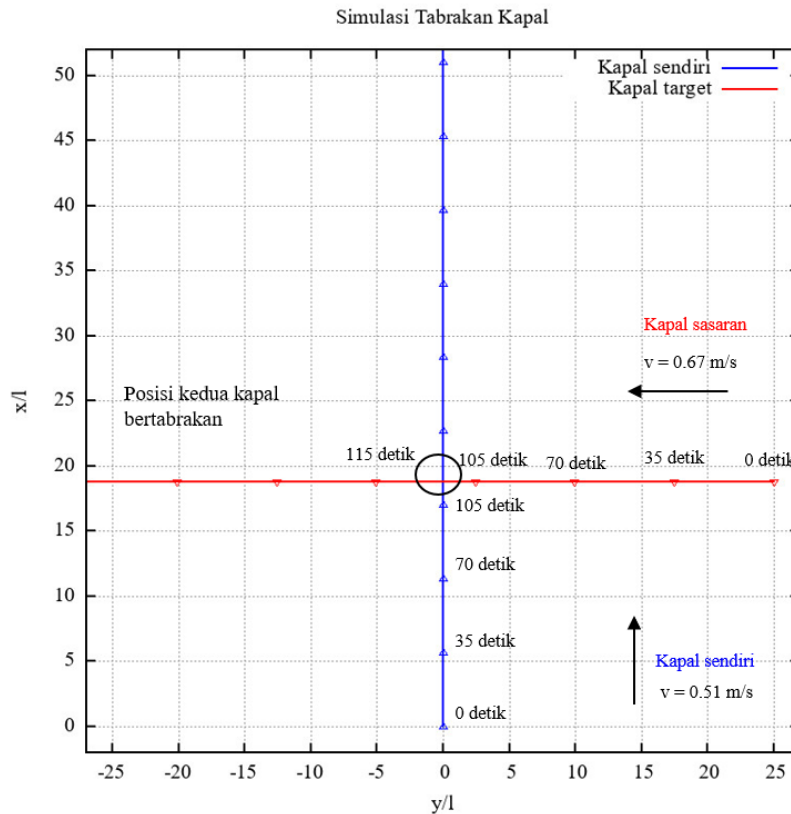
3. Bentuk domain telur memiliki jarak terdekat yang paling besar, menunjukkan manuver penghindaran yang sangat efektif, dengan risiko tabrakan yang sangat rendah.

Berdasarkan hasil analisis ini, bentuk domain telur tetap dapat dianggap lebih efektif dalam mendeteksi dan menghindari risiko tabrakan dengan lebih efisien dan aman. Meskipun kapal berada dalam kondisi siaga untuk waktu yang lama, manuver penghindaran yang dilakukan dengan bentuk domain telur menjaga jarak aman yang lebih besar dari kapal lain, meminimalkan risiko tabrakan.

Berdasarkan grafik riwayat sudut arah kapal dan riwayat sudut kemudi kapal yang ditampilkan pada Gambar 5.72 dan Gambar 5.73, dapat dilihat perbedaan respon penghindaran tabrakan dari masing – masing bentuk domain. Pada setiap bentuk domain kapal, ketika melakukan penghindaran terlihat pada sudut arahnya kapal sendiri berusaha untuk mensatiblakn posisinya, dikarenakan aksi penghindaran yang diambil adalah penghindaran darurat. Dengan begitu hal tersebut mempengaruhi perubahan sudut kemudi kapalnya.

5.3.3 Simulasi Tabrakan Skenario 3

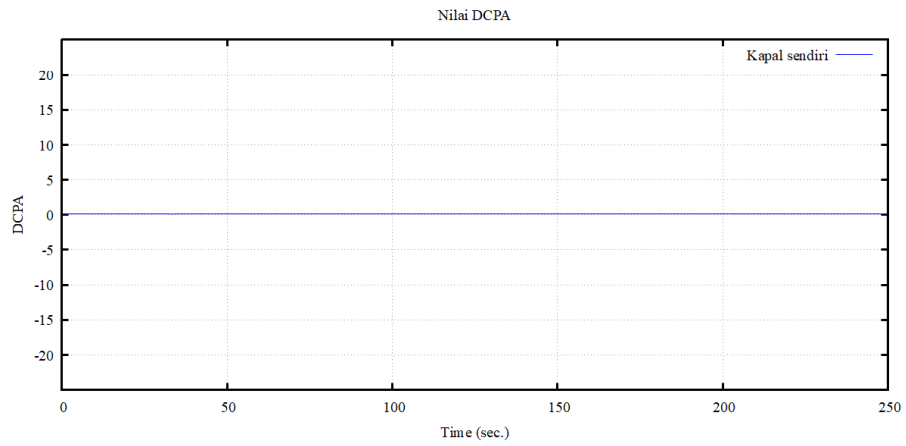
Simulasi tabrakan pada skenario B3 adalah situasi pertemuan antara dua kapal dan dengan arah kapal sasaran sebesar -90 derajat terhadap kapal sendiri . Pada situasi ini dilakukan sebuah simulasi bertabrakan, sehingga kedua kapal tidak ada yang mengambil tindakan penghindaran. Pada Gambar 5.77 dapat dilihat DCPA = 0,0 meter karena kedua kapal berada pada rute dimana dapat terjadinya tabrakan, akan tetapi nilai risiko tabrakan sudah memiliki nilai (Gambar 5.79) hal ini diakibatkan karena nilai dari TCPA yang kecil dan pengaruh perbedaan kecepatan antar kedua kapal (Gambar 5.78). Setelah dilakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.76, kedua kapal berjalan mengikuti rute yang telah ditentukan dan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.77 - Gambar 5.80 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada 0 detik (TCPA = 111,84 detik) dan selama perhitungan, nilai risiko tabrakan = 100 untuk pertama kali terjadi pada waktu 74,2 detik.



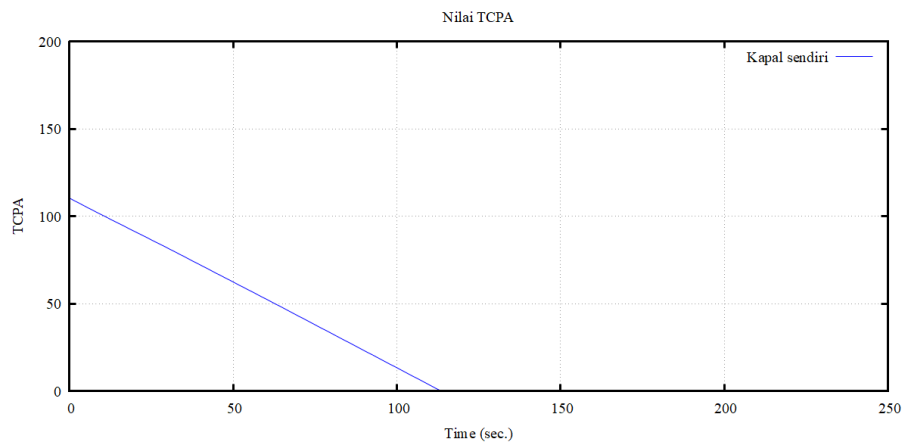
Gambar 5.76 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario B3 tanpa resolusi konflik

Pada waktu 74,2 detik, jarak antara kedua kapal adalah 32,51 meter. Sedangkan panjang dari domain kapal bagian depan adalah 18,72 meter, sehingga kapal sasaran belum masuk ke dalam domain kapal sendiri. Akan tetapi, melalui perhitungan *fuzzy inference*, pada waktu 74,2 detik nilai TCPA adalah 38,74 yang mengakibatkan domain bahaya pada himpunan *fuzzy* dari TCPA. Karena nilai DCPA adalah 0,0 meter, ini menjadikan kondisi "IF DCPA Bahaya AND TCPA Siaga THEN risiko tabrakan CR5", di mana $CR5 = 100$, mengikuti peraturan fuzzy inference dalam kondisi menyebrang. Nilai risiko sebesar 100 terjaga hingga waktu 113,4 detik.

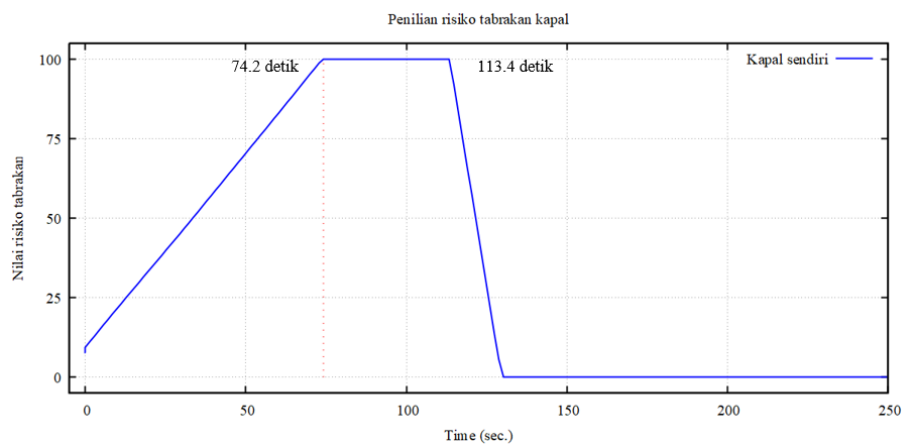
Analisis ini menunjukkan bahwa pada waktu 74,2 detik, meskipun kapal sasaran belum masuk ke dalam domain kapal sendiri, perhitungan *fuzzy inference* sudah mengidentifikasi situasi sebagai berbahaya. Nilai TCPA yang relatif tinggi menunjukkan bahwa waktu hingga potensi tabrakan masih cukup panjang, namun karena nilai DCPA adalah 0,0 meter, risiko tabrakan dinilai sangat tinggi.



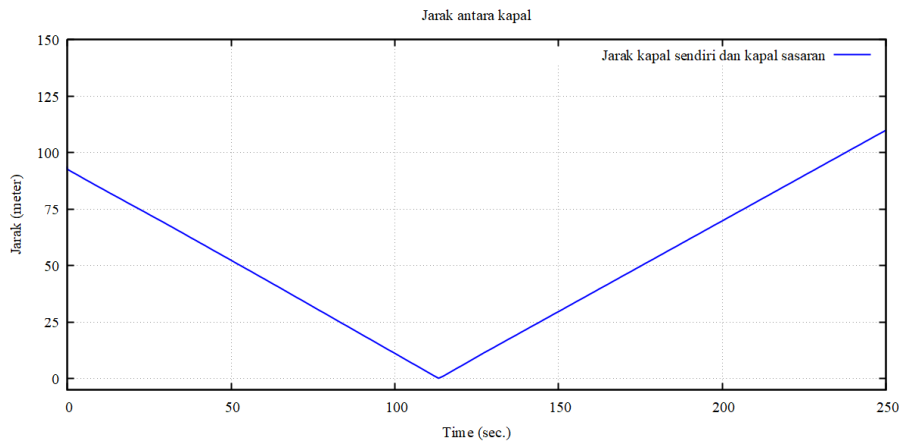
Gambar 5.77 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario B3 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.78 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario B3 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.79 Riwayat waktu penilain risiko tabrakan kapal skenario B3 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.80 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario B3

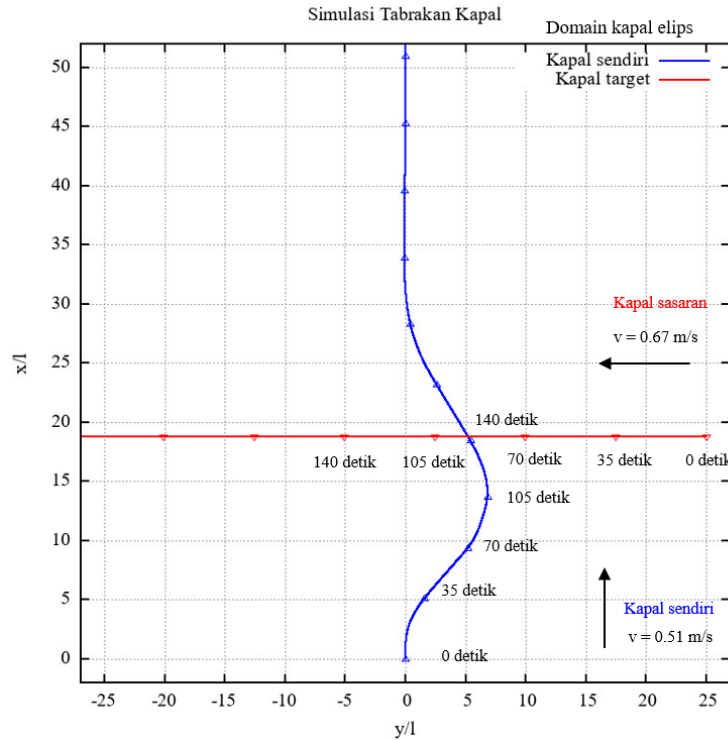
Untuk mengetahui pengaruh bentuk domain kapal terhadap penilaian risiko tabrakan, maka perlu dilakukan perhitungan resolusi konflik dan untuk mengetahui hasil pengaruh bentuk domain terhadap pengambilan keputusan.

5.3.3.1 Bentuk Domain Kapal Elips

Setelah melakukan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.81, kedua kapal berjalan mengikuti rute dan saling berseberangan satu sama lain. Hasil perhitungan yang terlihat pada Gambar 5.84 hingga Gambar 5.90 menunjukkan bahwa nilai TCPA menurun sedangkan nilai DCPA tetap 0,0 meter. Sebagai hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ pertama kali terjadi pada waktu 0 detik, dengan nilai TCPA sebesar 111,84 detik dan nilai DCPA sebesar 0,0 meter. Hal ini menyebabkan peraturan *fuzzy inference* perhitungan risiko tabrakan menghasilkan hubungan CR3 dan CR4, dengan nilai risiko tabrakan sebesar 7,62. Keputusan penghindaran harus dibuat berdasarkan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah starboard.

Meskipun kapal sendiri melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak, usaha ini tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri, sedangkan nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risikonya meningkat seiring berjalannya waktu. Kemudian, pada waktu 61,6 detik, nilai risiko tabrakan > 75 . Perhitungan yang dilakukan pada bentuk domain kapal elips menunjukkan bahwa nilai risiko tabrakan tidak melebihi 100, dengan nilai risiko tabrakan maksimal

sebesar 94,44 yang terjadi pada waktu 79,8 detik. Nilai TCPA pada saat itu adalah 16,03 detik, dan nilai DCPA adalah 19,66 meter.



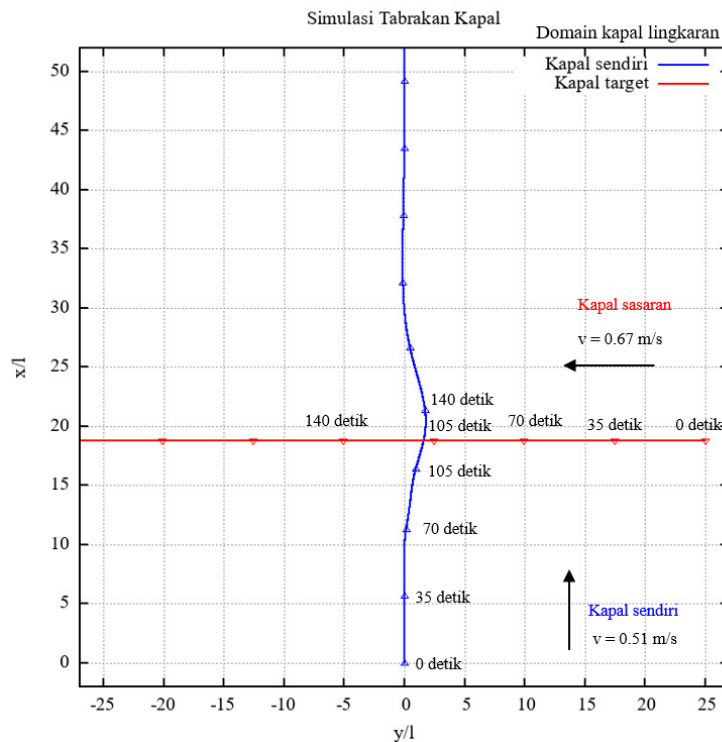
Gambar 5.81 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B3 dengan bentuk domain kapal elips

5.3.3.2 Bentuk Domain Kapal Lingkaran

Setelah melakukan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.82, kedua kapal berjalan mengikuti rute dan saling berseberangan satu sama lain. Hasil perhitungan yang terlihat pada Gambar 5.84 hingga Gambar 5.90 menunjukkan bahwa nilai TCPA menurun sedangkan nilai DCPA tetap 0,0 meter. Sebagai hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ pertama kali terjadi pada waktu 33,6 detik, dengan nilai TCPA sebesar 78,34 detik dan nilai DCPA sebesar 0,0 meter. Hal ini menyebabkan peraturan fuzzy inference perhitungan risiko tabrakan menghasilkan hubungan CR3 dan CR4, dengan nilai risiko tabrakan sebesar 0,26. Keputusan penghindaran harus dibuat berdasarkan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *starboard*.

Meskipun kapal sendiri melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak, usaha ini tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri, sedangkan nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risikonya meningkat seiring

berjalannya waktu. Kemudian, pada waktu 60,2 detik, nilai risiko tabrakan > 75 . Pada waktu 71,4 detik, nilai risiko tabrakan kapal sendiri mencapai 100. Namun, jarak antara kedua kapal adalah 73,83 meter dan kapal sasaran tidak melanggar batas domain kapal sendiri. Hal ini dapat terjadi karena pada waktu 71,4 detik, nilai TCPA adalah 38,32 detik dan DCPA adalah 3,05 meter. Hubungan *fuzzy inference* yang terjadi adalah "IF DCPA Bahaya AND TCPA Siaga THEN risiko tabrakan CR5," di mana $CR5 = 100$, mengikuti peraturan *fuzzy inference* dalam kondisi menyeberang. Dengan terjadinya dua hubungan tersebut dan perhitungan yang dilakukan, didapatkan nilai risiko tabrakan sebesar 100.



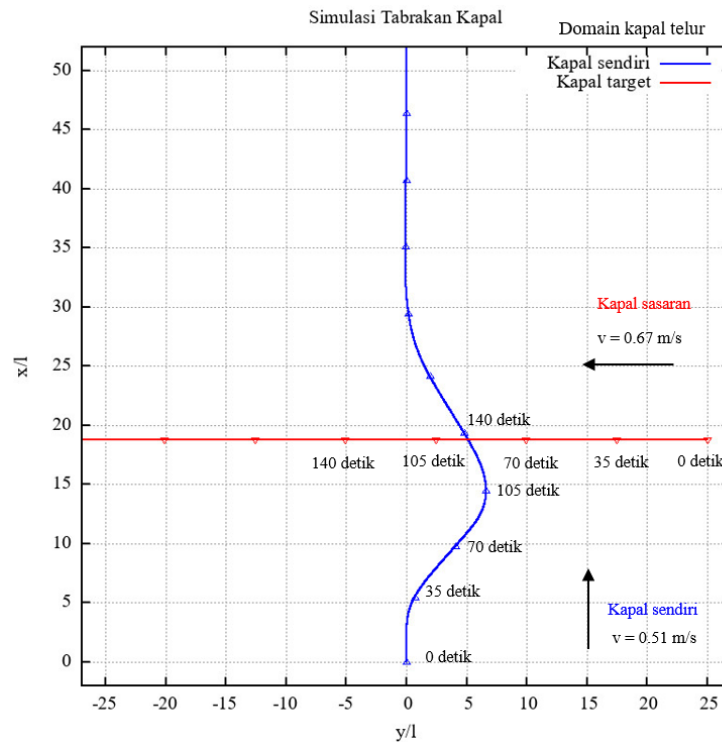
Gambar 5.82 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B3 dengan bentuk domain kapal lingkaran

5.3.3.3 Bentuk Domain Kapal Telur

Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.83, kedua kapal berjalan mengikuti rute dan kedua kapal saling bersebrangan satu sama lain dan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.84 hingga Gambar 5.90 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan nilai DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada waktu 0 detik, nilai TCPA = 111,84 detik dan nilai DCPA = 0,0 meter hal tersebut

membuat peraturan *fuzzy inference* perhitungan risiko tabrakan mengakibatkan hubungan CR3 dan CR4 dan dihasilkan nilai risiko tabrakan = 7,62 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdsarakan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *starboard*.

Dengan kapal sendiri yang melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak melakukan manuver penghindaran, tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri, sedangkan nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risikonya meningkat seiring berjalannya waktu. Akan tetapi nilai dari risiko tabrakannya = 68,28 dan merupakan nilai maksimal yang didapatkan dari perhitungan yang telah dilakukan.



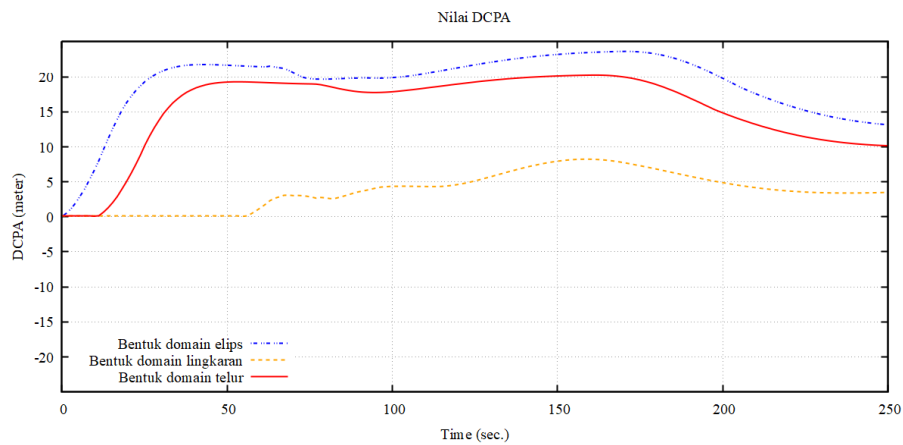
Gambar 5.83 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B2 dengan bentuk domain kapal telur

5.3.3.4 Perbandingan Hasil Perhitungan

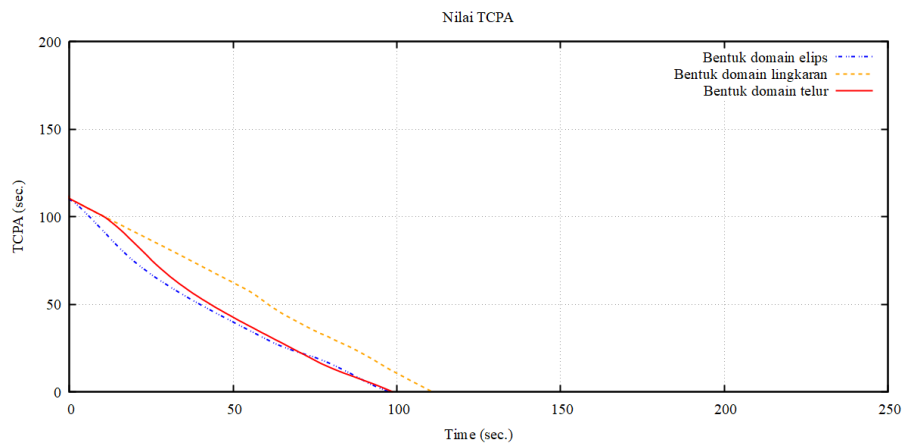
Gambar 5.84 - Gambar 5.90 merupakan hasil perhitungan dari ketiga bentuk domain kapal. Warna biru menunjukan hasil dari bentuk domain elips, warna oranye menunjukan hasil dari bentuk domain lingkaran, dan warna merah menunjukan hasil dari bentuk domain telur. Perbandingan ini juga bertujuan untuk memahami bagaimana masing-masing bentuk domain mempengaruhi penilaian

risiko tabrakan dalam berbagai skenario yang telah diujikan. Bentuk domain yang berbeda memiliki karakteristik unik dalam hal distribusi risiko dan jarak terdekat antar kapal. Perbandingan hasil perhitungan ini untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi efektivitas masing-masing bentuk domain dalam konteks navigasi dan manuver penghindaran tabrakan. Oleh karena itu, dengan membandingkan hasil perhitungan ini, kita dapat menentukan bentuk domain mana yang memberikan hasil terbaik dalam menjaga keselamatan navigasi dan mengurangi risiko tabrakan. Tujuan dari perbandingan hasil perhitungan, sebagai berikut:

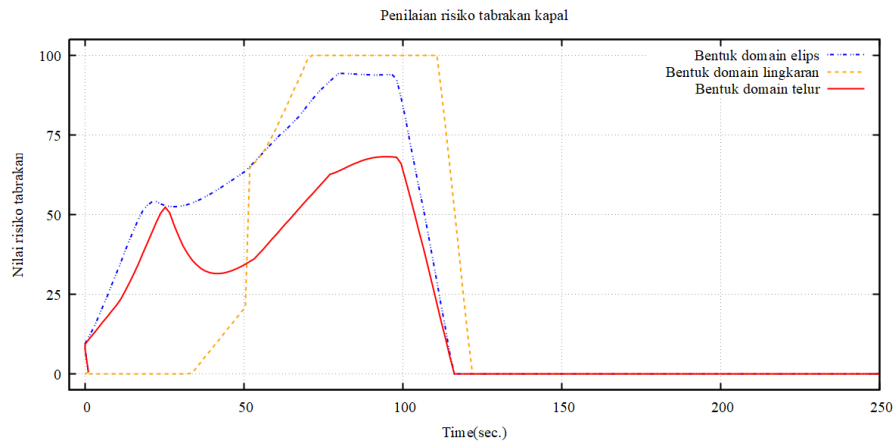
1. Pengaruh bentuk domain terhadap penilaian risiko tabrakan



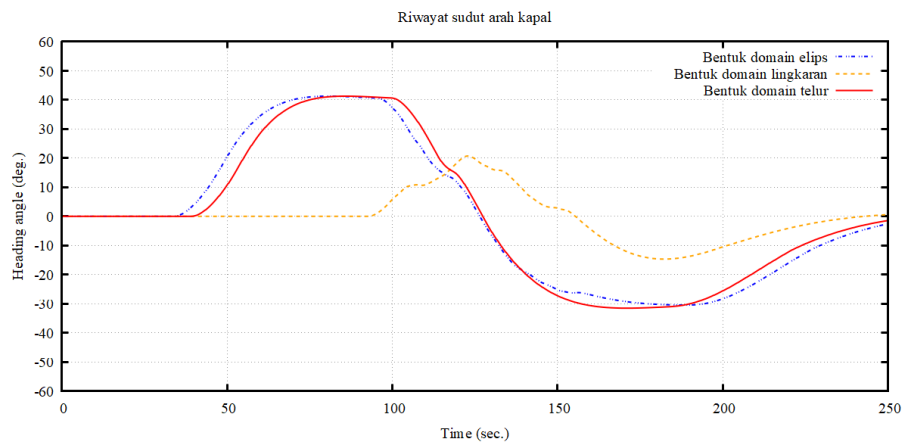
Gambar 5.84 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B3 selama perhitungan berlangsung



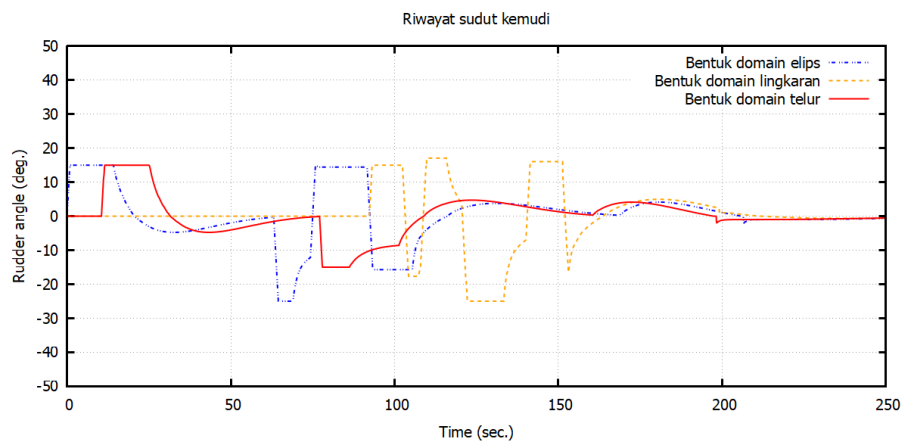
Gambar 5.85 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B3 selama perhitungan berlangsung



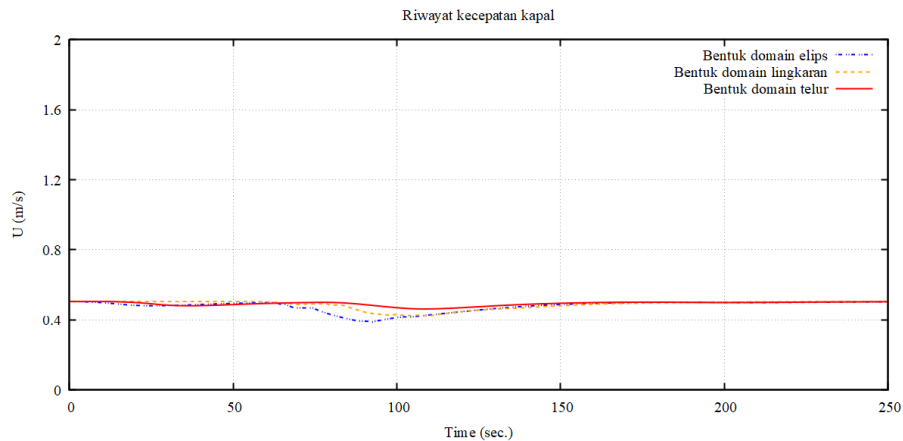
Gambar 5.86 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B3



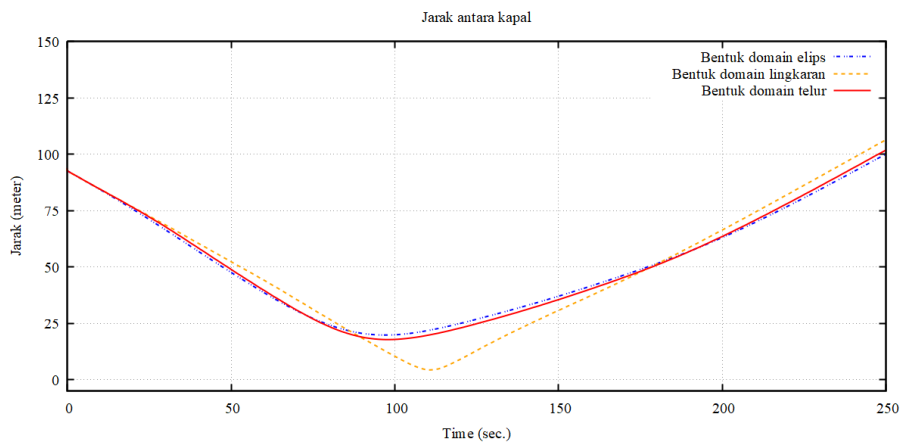
Gambar 5.87 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B3 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.88 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario B3 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.89 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B3 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.90 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario B3 selama perhitungan berlangsung

Tabel 5.17 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario B3 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Luas Area
1	Elips	135,8	8535,01
2	Lingkaran	88,2	6800,33
3	Telur	137,4	5253,40

Berdasarkan Tabel 5.17 yang merupakan hasil perhitungan dari Gambar 5.86, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pada bentuk domain elips menunjukkan bahwa kapal mengalami nilai risiko tabrakan tinggi untuk waktu yang cukup lama, dengan luas area yang signifikan.

2. Bentuk domain lingkaran memiliki luas area yang lebih kecil, walaupun lebih kecil dari bentuk domain elips tapi berada pada nilai risiko 100 dalam waktu yang cukup lama.
3. Bentuk domain telur memiliki luas area terkecil menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi siaga yang paling singkat dan dengan nilai risiko tabrakan yang lebih rendah.

Tabel 5.18 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario B3 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Jarak terdekat antar dua kapal (meter)
1	Elips	96,60	19,82
2	Lingkaran	110,60	4,33
3	Telur	98,00	17,81

Selain melihat dari hasil penilain risiko tabrakan kapal perlu melihat juga pengaruh lainnya. Pada Tabel 5.18 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario B3 terhadap bentuk domain kapal ditampilkan jarak terdekat antara kedua kapal, melalui tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa:

1. Bentuk domain elips memiliki jarak terdekat yang cukup besar menunjukkan manuver penghindaran yang efektif, meskipun kapal tetap berada dalam kondisi siaga untuk waktu yang lama.
2. Bentuk domain lingkaran memiliki jarak terdekat yang kecil menunjukkan risiko tabrakan yang tinggi, dan manuver penghindaran kurang efektif.
3. Bentuk domain telur memiliki jarak terdekat yang cukup besar menunjukkan manuver penghindaran yang efektif, dengan risiko tabrakan yang lebih rendah.

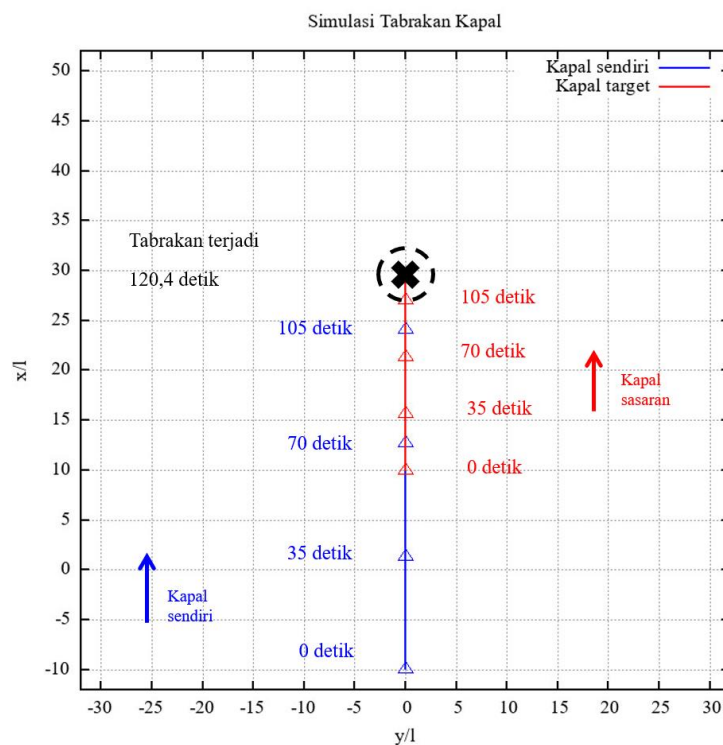
Berdasarkan hasil analisis ini, bentuk domain telur tetap dapat dianggap lebih efektif dalam mendeteksi dan menghindari risiko tabrakan dengan lebih efisien dan aman. Luas area yang lebih kecil menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi siaga yang lebih singkat, dan jarak terdekat yang lebih besar menunjukkan manuver penghindaran yang lebih efektif.

Berdasarkan grafik riwayat sudut arah kapal dan riwayat sudut kemudi kapal yang ditampilkan pada Gambar 5.87 dan Gambar 5.88, dapat dilihat perbedaan respon penghindaran tabrakan dari masing – masing bentuk domain. Pada

setiap bentuk domain kapal, ketika melakukan penghindaran terlihat pada sudut arahnya kapal sendiri berusaha untuk mensatiblakn posisinya, dikarenakan aksi penghindaran yang diambil adalah penghindaran darurat. Dengan begitu hal tersebut mempengaruhi perubahan sudut kemudi kapalnya.

5.3.4 Simulasi Tabrakan Skenario 4

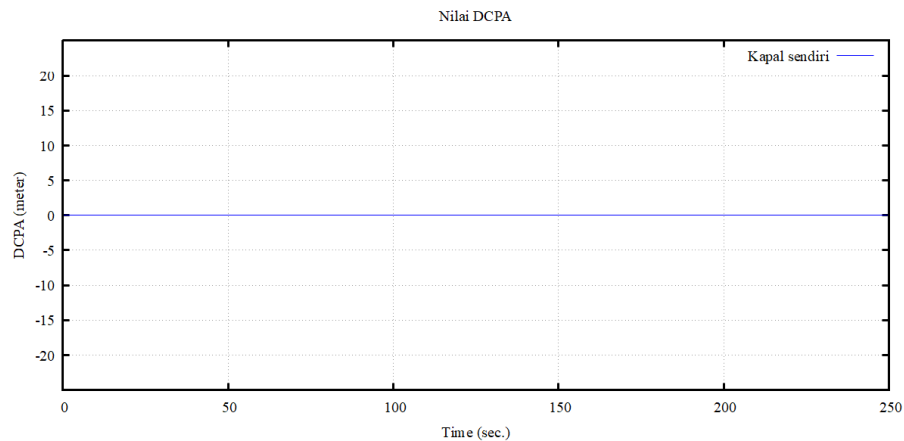
Simulasi tabrakan pada skenario B4 menggambarkan situasi di mana kapal sendiri berada di belakang kapal sasaran. Dalam skenario ini, dilakukan simulasi tabrakan tanpa adanya tindakan penghindaran dari kedua kapal. Jarak antara kedua kapal sebesar 60 meter, hal ini menyebabkan nilai risiko tabrakan yang tinggi (Gambar 5.94), yaitu 25. Selain itu, karena perbedaan kecepatan akan mempengaruhi nilai TCPA seperti yang terlihat pada Gambar 5.93. Pada posisi awal, nilai TCPA adalah 118,81 detik, yang sudah berada dalam domain “Waspada” dan “Siaga”, sehingga nilai risiko tabrakan sebesar 25.



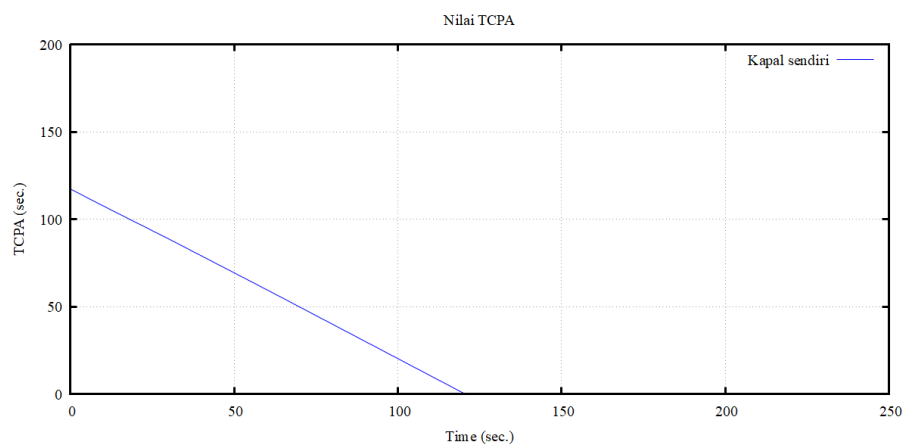
Gambar 5.91 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario B4 tanpa resolusi konflik

Hasil perhitungan dapat dilihat pada Gambar 5.92 hingga Gambar 5.95. Setelah dilakukan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.91, kedua kapal

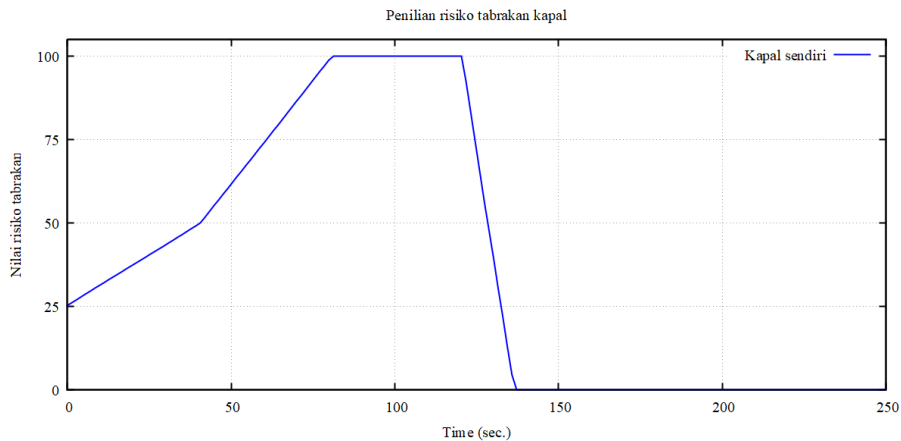
diprediksi akan bertabrakan pada waktu 120,4 detik. Nilai risiko tabrakan kapal sendiri mencapai 100 untuk pertama kalinya pada waktu 81,2 detik. Pada saat itu, nilai TCPA adalah 38,8 detik dan DCPA adalah 0,0 meter, dengan jarak antara kedua kapal sebesar 19,8 meter. Dengan Rbf sebesar 23,45 meter, kapal sasaran sudah berada dalam domain kapal sendiri, yang menyebabkan nilai risiko tabrakan kapal menjadi 100. Simulasi ini menunjukkan bahwa pada waktu 81,2 detik, kapal sasaran sudah memasuki domain aman dari kapal sendiri, yang berarti risiko tabrakan langsung meningkat menjadi 100. Nilai TCPA yang tinggi menunjukkan bahwa ada cukup waktu hingga potensi tabrakan terjadi, namun karena nilai DCPA adalah 0,0 meter dan jarak antara kedua kapal sudah berada dalam radius aman, situasi ini dinilai sangat berbahaya.



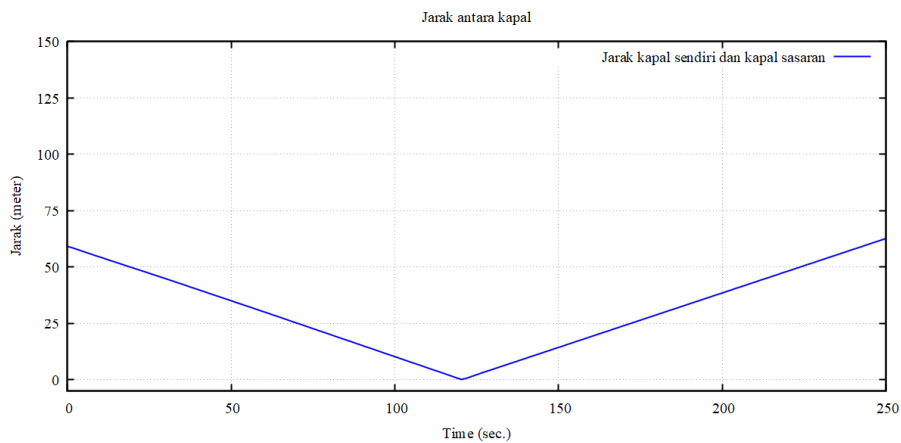
Gambar 5.92 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario B4 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.93 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario B4 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.94 Riwayat waktu penilai risiko tabrakan kapal skenario B4 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.95 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario B4

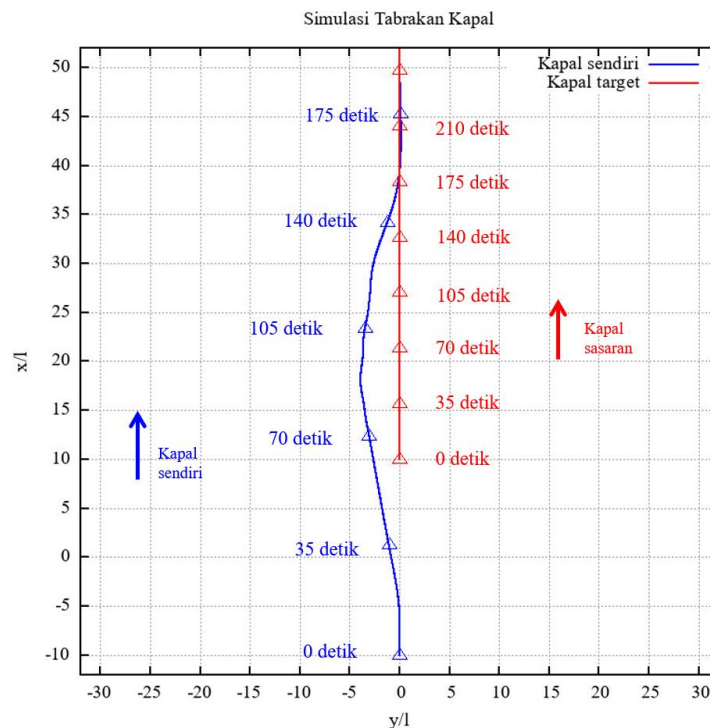
Untuk mengetahui pengaruh bentuk domain kapal terhadap penilaian risiko tabrakan, maka perlu dilakukan perhitungan resolusi konflik dan untuk mengetahui hasil pengaruh bentuk domain terhadap pengambilan keputusan.

5.3.4.1 Bentuk Domain Kapal Elips

Setelah melakukan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.96, kedua kapal berjalan mengikuti rute di mana kapal sasaran membelakangi kapal sendiri. Hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.99 hingga Gambar 5.105 menunjukkan bahwa nilai TCPA menurun sedangkan nilai DCPA tetap 0,0 meter. Hasil ini mengindikasikan bahwa nilai risiko tabrakan pertama kali lebih besar dari 0 terjadi pada waktu 0 detik ketika kedua kapal berada di posisi awalnya, dengan nilai TCPA sebesar 118,81 detik dan nilai DCPA sebesar 0,0 meter.

Menggunakan *fuzzy inference*, dihasilkan nilai risiko tabrakan sebesar 25, sehingga keputusan penghindaran harus dibuat berdasarkan kondisi penghindaran normal. Kapal sendiri kemudian memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *portside* pada waktu 10,2 detik dengan perubahan sudut kemudi yang kecil.

Pada waktu 67,2 detik, nilai risiko tabrakan menjadi lebih besar dari 75, yang mengharuskan kapal sendiri untuk mengambil keputusan untuk mengalah dalam kondisi penghindaran darurat. Pada waktu 92,4 detik, nilai risiko tabrakan kapal sendiri mencapai 100. Hal ini terjadi karena jarak antara kedua kapal adalah 19,48 meter dan kapal sasaran sudah melanggar batas domain kapal sendiri. Dengan demikian, tindakan penghindaran darurat harus segera diambil untuk mencegah tabrakan yang tidak diinginkan.



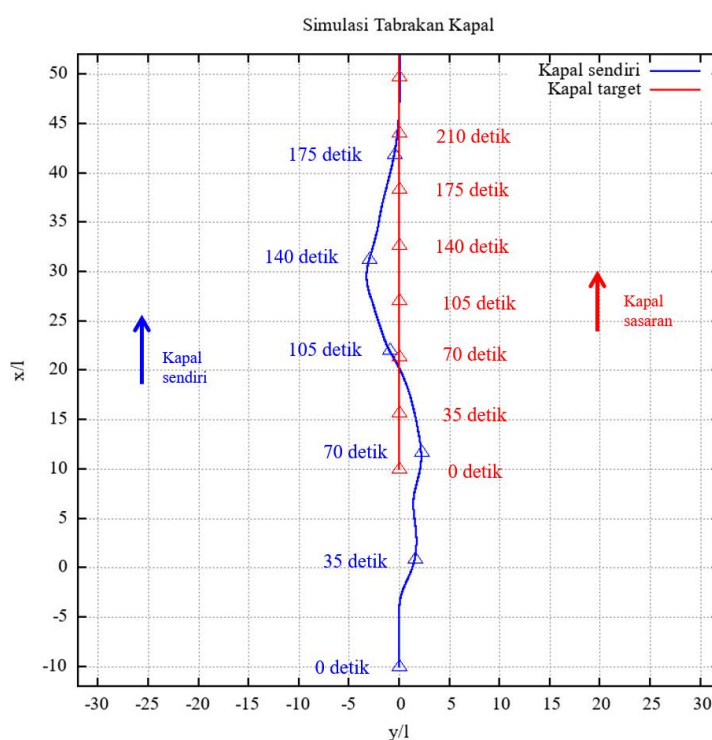
Gambar 5.96 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B4 dengan bentuk domain kapal elips

5.3.4.2 Bentuk Domain Kapal Lingkaran

Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.97, kedua kapal berjalan mengikuti rute dan kapal sasaran membelakangi kapal sendiri dan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.99 hingga Gambar 5.105 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan nilai DCPA = 0,0 meter.

Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada waktu 0 detik ketika kedua kapal di posisi awalnya, nilai TCPA = 117,41 detik dan nilai DCPA = 0,0 meter menggunakan *fuzzy inference* dihasilkan nilai risiko tabrakan = 0,54 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdsarakan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *portside* pada waktu 14,2 detik dengan perubahan sudut kemudi yang kecil.

Ketika 71,4 detik, nilai risiko tabrakan > 75 , sehingga mengharuskan kapal sendiri untuk mengambil keputusan untuk mengalah dalam kondisi penghindaran darurat. Pada waktu 86,8 detik nilai risiko tabrakan kapal sendiri = 100. walupun, jarak antara kedua kapal adalah 21,26 meter dan kapal sasaran belum melanggar batas domian kapal sendiri. Hal ini dikarenakan ketidakstabilan program dalam melakukan penilai untuk bentuk domain lingkaran.



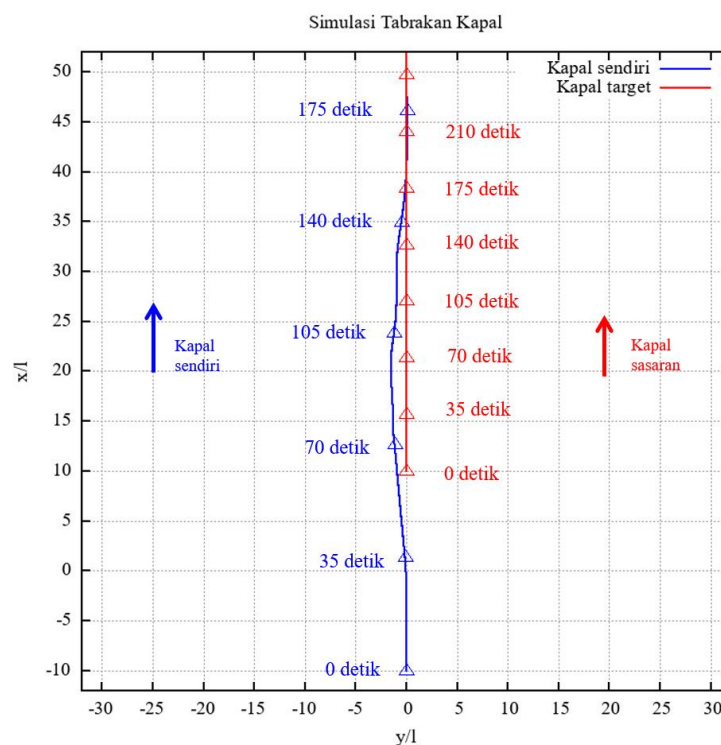
Gambar 5.97 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B4 dengan bentuk domain kapal lingkaran

5.3.4.3 Bentuk Domain Kapal Telur

Setelah melakukan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.98, kedua kapal berjalan mengikuti rute di mana kapal sasaran membelakangi kapal sendiri. Hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.99 hingga Gambar

5.105 menunjukkan bahwa nilai TCPA menurun sedangkan nilai DCPA tetap 0,0 meter. Hasil ini mengindikasikan bahwa nilai risiko tabrakan pertama kali lebih besar dari 0 terjadi pada waktu 0 detik ketika kedua kapal berada di posisi awalnya, dengan nilai TCPA sebesar 118,8 detik dan nilai DCPA sebesar 0,0 meter. Menggunakan *fuzzy inference*, dihasilkan nilai risiko tabrakan sebesar 25, sehingga keputusan penghindaran harus dibuat berdasarkan kondisi penghindaran normal. Kapal sendiri kemudian memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *portside* pada waktu 24 dengan perubahan sudut kemudi yang kecil.

Pada waktu 64,4 detik, nilai risiko tabrakan menjadi lebih besar dari 75, yang mengharuskan kapal sendiri untuk mengambil keputusan untuk mengalah dalam kondisi penghindaran darurat. Pada waktu 93,8 detik, nilai risiko tabrakan kapal sendiri mencapai 100. Hal ini terjadi karena jarak antara kedua kapal adalah 14,45 meter dan kapal sasaran sudah melanggar batas domain kapal sendiri



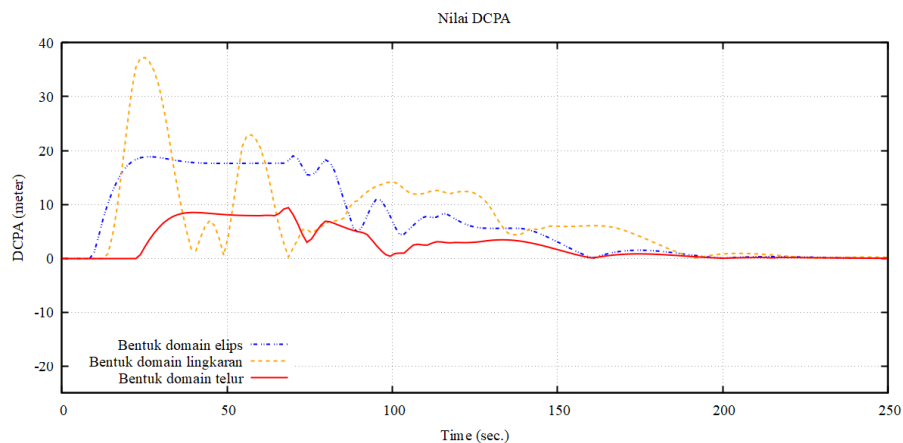
Gambar 5.98 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario B4 dengan bentuk domain kapal telur

5.3.4.4 Perbandingan Hasil Perhitungan

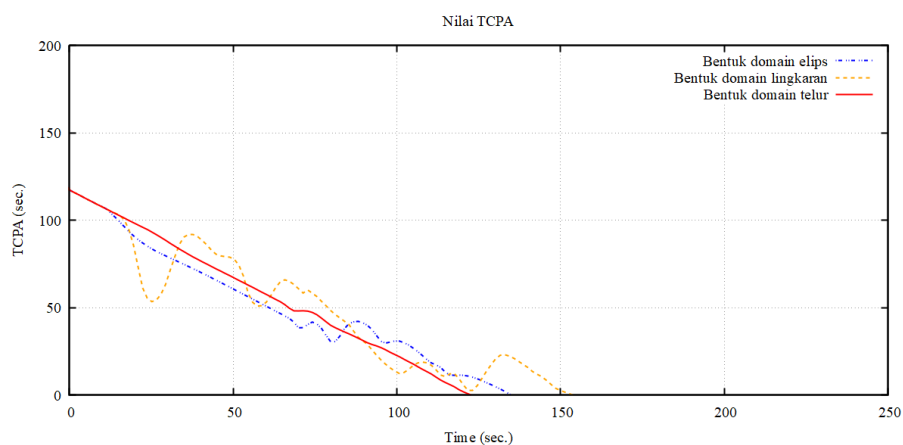
Gambar 5.39 - Gambar 5.45 merupakan hasil perhitungan dari ketiga bentuk domain kapal. Warna biru menunjukan hasil dari bentuk domain elips, warna

orange menunjukkan hasil dari bentuk domain lingkaran, dan warna merah menunjukkan hasil dari bentuk domain telur. Perbandingan hasil perhitungan ini untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi efektivitas masing-masing bentuk domain dalam konteks navigasi dan manuver penghindaran tabrakan. Perbandingan ini juga bertujuan untuk memahami bagaimana masing-masing bentuk domain mempengaruhi penilaian risiko tabrakan dalam berbagai skenario yang telah diujikan. Untuk domain yang berbeda memiliki karakteristik unik dalam hal distribusi risiko dan jarak terdekat antar kapal. Tujuan dari perbandingan hasil perhitungan, sebagai berikut:

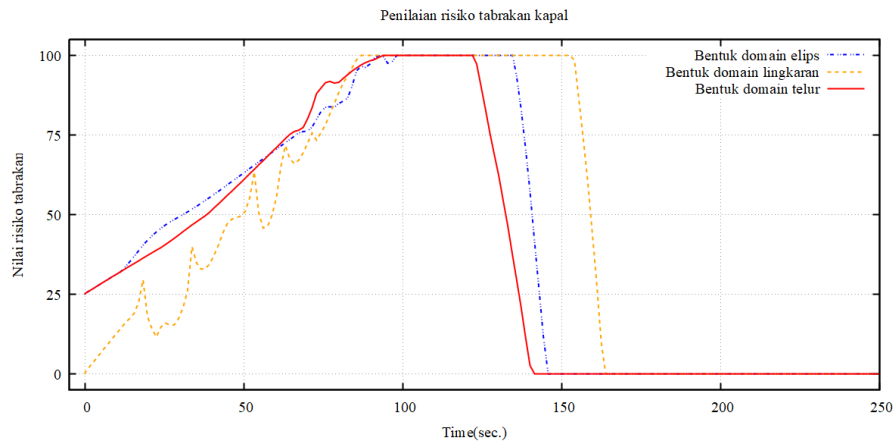
1. Pengaruh bentuk domain terhadap penilaian risiko tabrakan



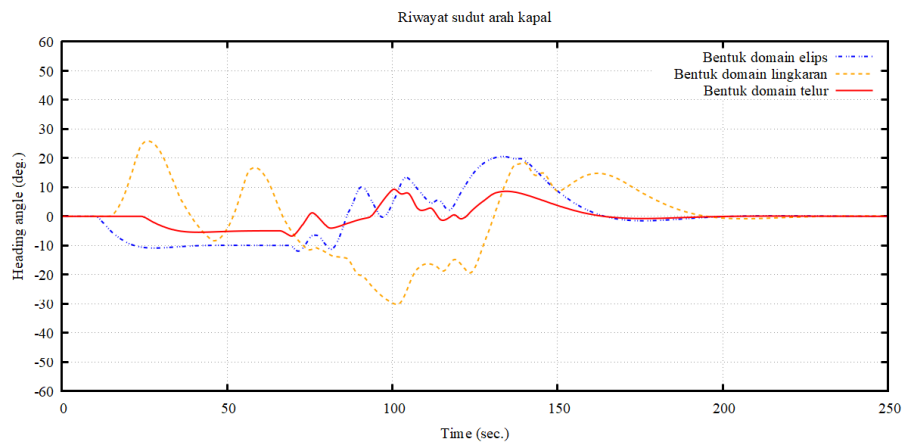
Gambar 5.99 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B4 selama perhitungan berlangsung



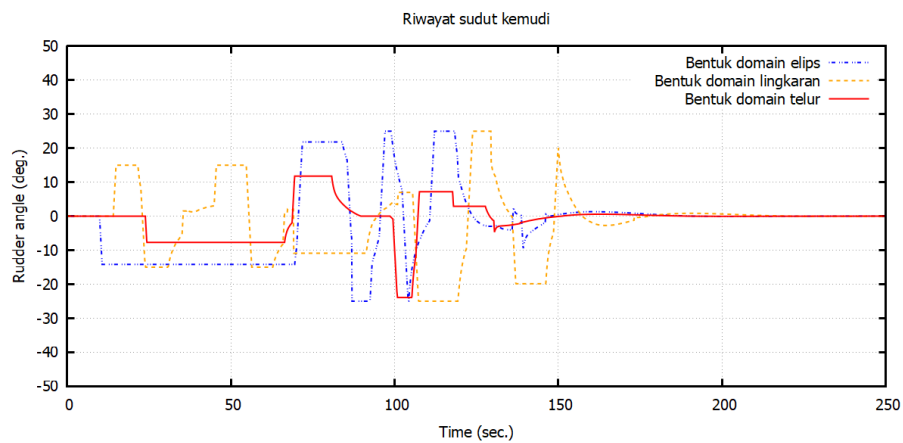
Gambar 5.100 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario B4 selama perhitungan berlangsung



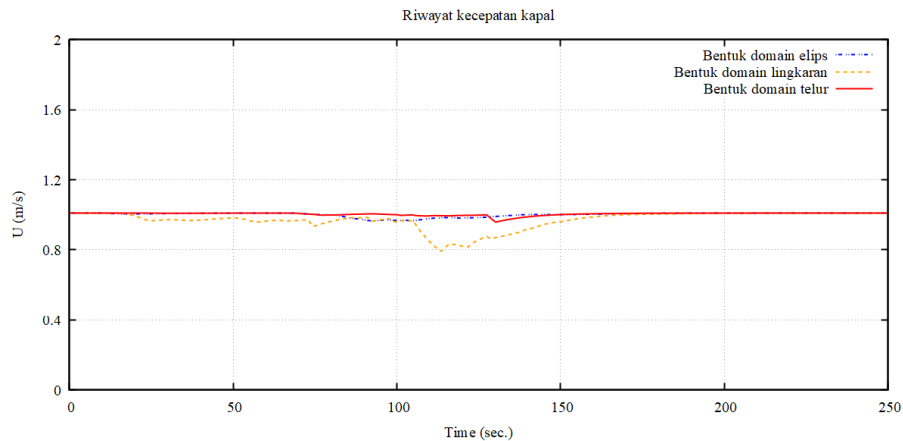
Gambar 5.101 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B4



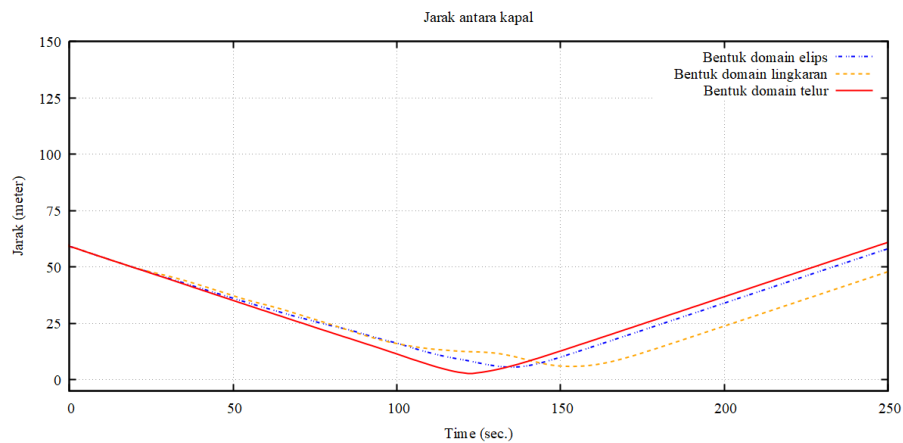
Gambar 5.102 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B4 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.103 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario B4 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.104 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario B4 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.105 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario B4 selama perhitungan berlangsung

Tabel 5.19 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario B4 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Luas Area
1	Elips	135,8	10424,940
2	Lingkaran	88,2	11020,25
3	Telur	137,2	9534,25

Berdasarkan Tabel 5.19 yang merupakan hasil perhitungan dari Gambar 5.101, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Bentuk domain elips memiliki waktu penilaian risiko tabrakan sedang dengan luas area yang besar, menunjukkan kapal berada dalam kondisi siaga cukup lama dengan risiko tabrakan tinggi.

2. Bentuk domain lingkaran memiliki waktu penilaian risiko tabrakan terpendek dan luas area terbesar, menunjukkan kapal berada dalam kondisi siaga paling singkat dengan risiko tabrakan tinggi.
3. Bentuk domain telur memiliki waktu penilaian risiko tabrakan paling lama dengan luas area terkecil, menunjukkan kapal berada dalam kondisi siaga paling lama dengan risiko tabrakan terendah.

Tabel 5.20 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario B4 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Jarak terdekat antar dua kapal (meter)
1	Elips	134,40	5,58
2	Lingkaran	154	5,90
3	Telur	121,80	2,91

Selain melihat dari hasil penilain risiko tabrakan kapal perlu melihat juga pengaruh lainnya. Pada Tabel 5.18 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario B3 terhadap bentuk domain kapal ditampilkan jarak terdekat antara kedua kapal, melalui tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa:

1. Bentuk domain elips memiliki jarak terdekat yang cukup besar menunjukkan bahwa manuver penghindaran cukup efektif, meskipun kapal berada dalam kondisi siaga selama 135,8 detik. Ini menunjukkan bahwa meskipun ada risiko tabrakan yang signifikan, manuver yang dilakukan cukup efektif untuk menjaga jarak aman antar kapal pada waktu tersebut.
2. Bentuk domain lingkaran memiliki jarak terdekat yang lebih besar menunjukkan bahwa manuver penghindaran sangat efektif, dan kapal mampu menjaga jarak aman dengan baik pada waktu 88,2 detik.
3. Bentuk domain telur memiliki jarak terdekat yang lebih kecil menunjukkan bahwa meskipun kapal berada dalam kondisi siaga selama 137,2 detik, risiko tabrakan tetap tinggi. Bentuk domain telur memperlihatkan manuver penghindaran yang kurang efektif dalam menjaga jarak aman dibandingkan bentuk domain lingkaran dan elips pada waktu tersebut.

Berdasarkan hasil analisis ini, domain elips memiliki jarak terdekat tengah - tengah yang menunjukkan manuver penghindaran yang sangat efektif, luas area yang besar menunjukkan kondisi siaga yang lebih lama. Bentuk domain lingkaran

dan telur masing-masing menunjukkan kelebihan dan kekurangan dalam menjaga jarak aman dan waktu kondisi siaga.

Berdasarkan grafik riwayat sudut arah kapal dan riwayat sudut kemudi kapal yang ditampilkan pada Gambar 5.102 dan Gambar 5.103, dapat dilihat perbedaan respon penghindaran tabrakan dari masing-masing bentuk domain. Pada setiap bentuk domain kapal, ketika melakukan penghindaran terlihat pada sudut arahnya kapal sendiri berusaha untuk menstabilkan posisinya, dikarenakan aksi penghindaran yang diambil adalah penghindaran darurat. Dengan begitu, hal tersebut mempengaruhi perubahan sudut kemudi kapalnya.

5.4 Simulasi Tabrakan Skenario C

Simulasi berikut dilakukan dengan model kapal subjek yang memiliki panjang berbeda namun dengan kecepatan yang sama. Kedua kapal memiliki perbandingan Froude number yang sama, yaitu 0,93, yang menunjukkan bahwa keduanya bergerak dengan kecepatan yang proporsional terhadap panjang kapal masing-masing. Simulasi dilakukan dengan beberapa variasi panjang kapal, variasi kecepatan, dan variasi sudut datang kapal sasaran. Hasil simulasi akan menunjukkan pergerakan rute kapal (perubahan posisi kapal), nilai risiko tabrakan, nilai DCPA, dan TCPA selama simulasi tabrakan. Pada simulasi pengambilan keputusan, akan ditambahkan hasil pergerakan kemudi kapal, kecepatan kapal, sudut arah kapal, dan jarak antar kapal.

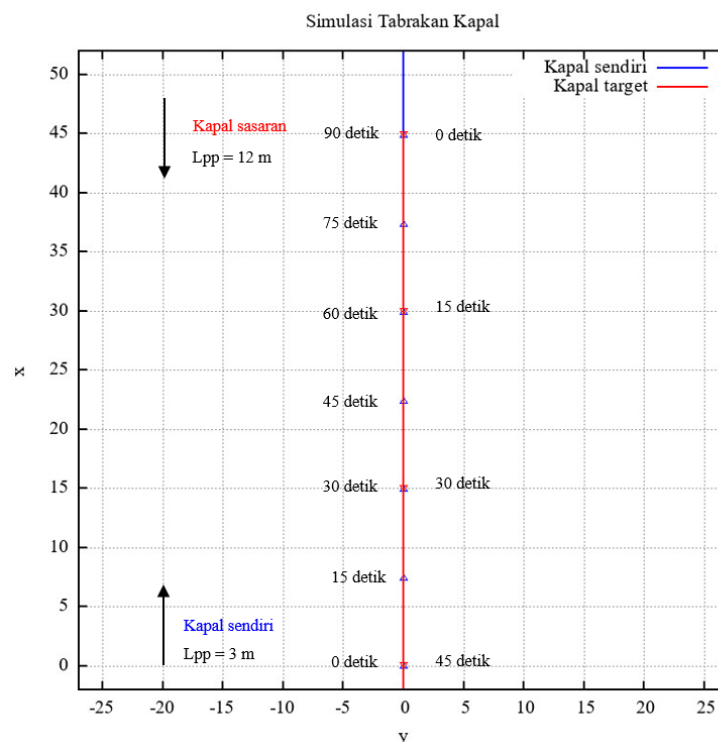
5.4.1 Simulasi Tabrakan Skenario 1

Simulasi tabrakan pada skenario C1 menggambarkan situasi pertemuan antara dua kapal yang tidak mengambil tindakan penghindaran. Pada Gambar 5.107, DCPA terlihat sebesar 0,0 meter karena kedua kapal berada di satu garis lurus pada posisi awal. Namun, nilai risiko tabrakan sebesar 67,78 (Gambar 5.109) disebabkan oleh nilai TCPA yang kecil (Gambar 5.108). Setelah dilakukan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.106, kedua kapal berjalan lurus sepanjang rute dan saling bertabrakan pada waktu 29,40 detik. Hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.107 hingga Gambar 5.110 menunjukkan bahwa nilai TCPA menurun sedangkan DCPA tetap 0,0 meter. Sebagai hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ pertama kali terjadi pada 0 detik (TCPA = 78,46 detik) karena

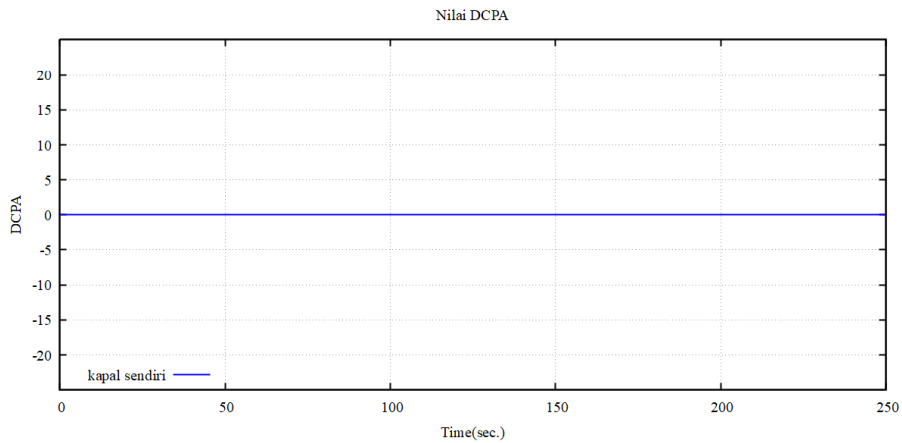
perbedaan ukuran panjang kapal. Selama perhitungan, nilai risiko tabrakan mencapai 100 untuk pertama kali pada waktu 16,8 detik. Pada waktu 16,8 detik, jarak antara kedua kapal adalah 26,51 meter, sementara panjang domain kapal bagian depan adalah 18,72 meter, sehingga kapal sasaran belum masuk ke dalam domain kapal sendiri.

Melalui perhitungan *fuzzy inference*, pada waktu 16,8 detik, nilai TCPA adalah 12,20, yang mengakibatkan domain bahaya pada himpunan fuzzy dari TCPA. Karena nilai DCPA adalah 0, ini menjadikan kondisi "IF DCPA Bahaya AND TCPA Bahaya THEN risiko tabrakan CR5", di mana CR5 = 100. Nilai risiko sebesar 100 ini terjaga hingga kedua kapal bertemu satu sama lain pada waktu 29,4 detik.

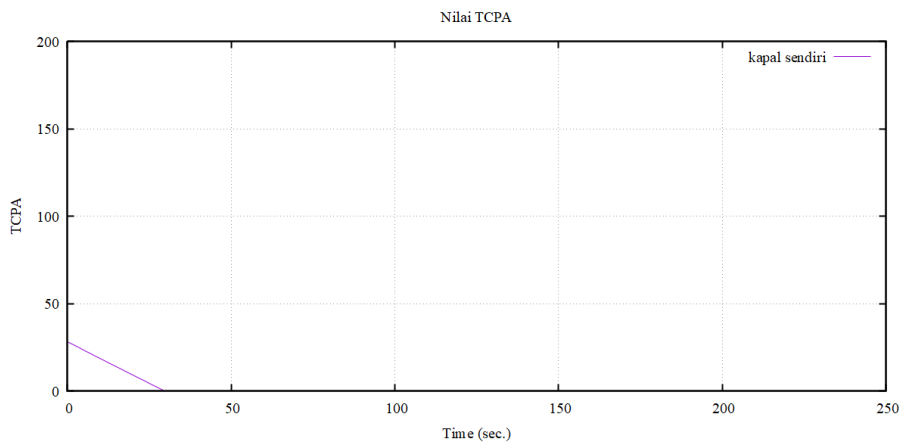
Pada waktu 16,8 detik, dengan nilai TCPA sebesar 12,20, sistem *fuzzy inference* mengidentifikasi situasi sebagai berbahaya. TCPA yang relatif rendah mengindikasikan bahwa waktu hingga potensi tabrakan terjadi cukup singkat. DCPA bernilai 0,0 meter berarti tidak ada jarak aman yang tersisa antara kedua kapal, menandakan risiko tabrakan yang sangat tinggi.



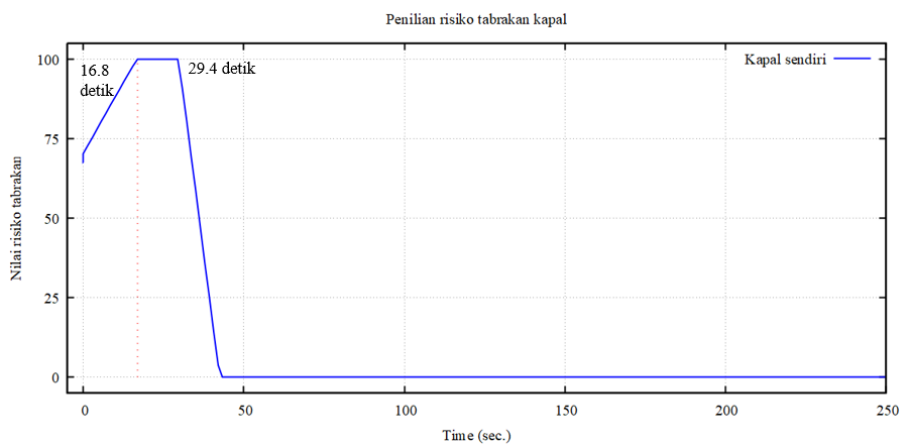
Gambar 5.106 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario C1 tanpa resolusi konflik



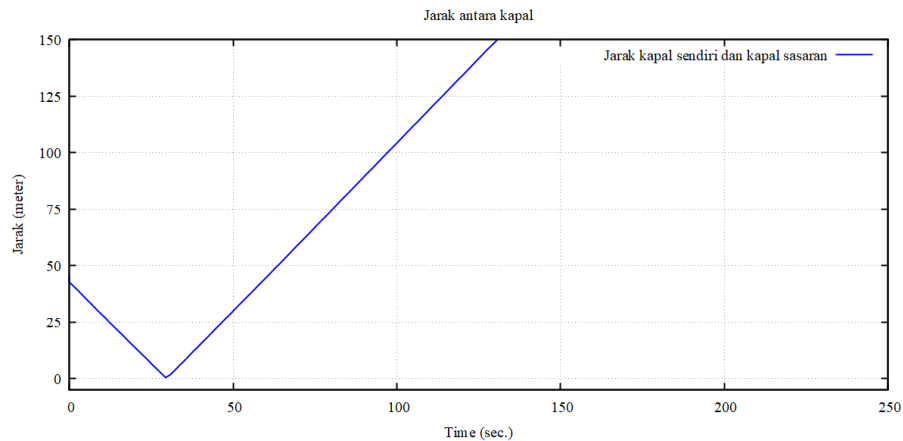
Gambar 5.107 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario C1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.108 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario C1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.109 Riwayat waktu penilain risiko tabrakan kapal skenario C1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.110 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario C1

Untuk mengetahui pengaruh bentuk domain kapal terhadap penilaian risiko tabrakan, maka perlu dilakukan perhitungan resolusi konflik dan untuk mengetahui hasil pengaruh bentuk domain terhadap pengambilan keputusan.

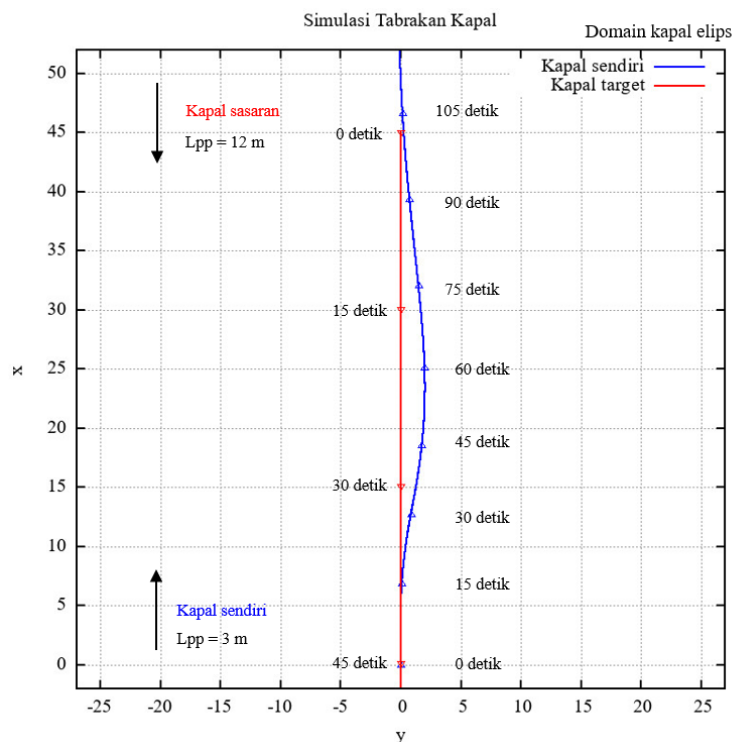
5.4.1.1 Bentuk Domain Kapal Elips

Domain kapal berbentuk elips memiliki panjang pada bagian sumbu utama (M_j) = 17,70 meter, serta pada bagian sisi (M_i) = 12,30 meter untuk kapal sendiri dan kapal sasaran $M_j = 70,8$ meter dan $M_i = 49,2$ meter. Setelah melakukan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.111, Diakarenakan ini adalah simulasi dengan perbedaan panjang maka penilaian yang dihasilkan berbeda dengan perhitungannya sebelumnya. Pada waktu 0 detik nilai risiko tabrakan > 50 ditunjukkan pada Gambar 5.114 hingga Gambar 5.120. Ketika kapal sasaran terdeteksi maka keputusan penghindaran harus dibuat berdasarkan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *starboard*.

Meskipun kapal sendiri melakukan manuver penghindaran dan kapal sasaran tidak, hal ini tidak cukup untuk menaikkan nilai DCPA kapal sendiri. Sementara itu, nilai TCPA terus menurun, sehingga nilai risiko meningkat seiring berjalannya waktu. Pada waktu 1,4 detik, nilai risiko tabrakan adalah 100, sehingga mengharuskan kapal sendiri mengambil keputusan untuk mengalah dalam kondisi penghindaran darurat. Diakarenakan adanya perbedaan panjang antara kedua kapal, menyebabkan penilaian risiko tabrakan kapal sendiri tidak stabil. Hal ini

dikarenakan pertambahan jarak kapal sasaran lebih besar dari kapal sendiri. Oleh karena itu penilaian harus menggunakan data kapal sasarannya, jika menggunakan data kapal sendiri maka akan terjadinya tabrakan.

Ditunjukkan pada Gambar 5.111, kedua kapal memiliki jarak terdekat pada waktu 30,8 detik, yaitu sekitar 1,17 meter. Ini menunjukkan bahwa dalam kondisi seperti ini, dengan adanya perbedaan panjang kapal seperti ini terlihat bahwa kapal sendiri telat untuk melakukan penghindaran yang baik, walaupun sudah menggunakan data kapal sasaran sebagai pengambilan keputusan.



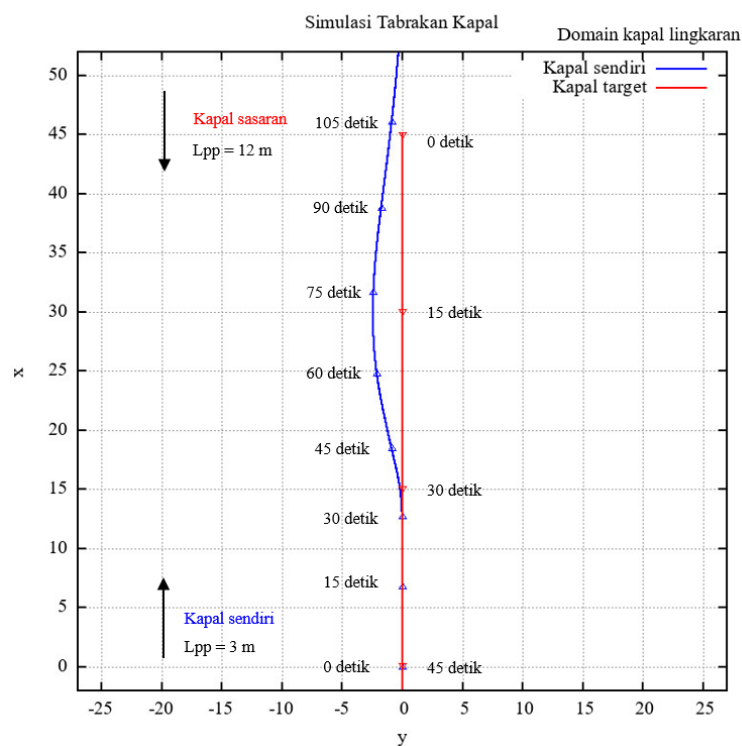
Gambar 5.111 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario C1 dengan bentuk domain kapal elips

5.4.1.2 Bentuk Domain Kapal Lingkaran

Domain kapal berbentuk lingkaran memiliki jari – jari $Rho = 29,75$ meter untuk kedua kapal. Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.112, kedua kapal berjalan lurus sepanjang jalur dan saling berhadapan satu sama lain. Hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.114 hingga Gambar 5.120 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada waktu 0 detik ketika kedua kapal di posisi awalnya, nilai TCPA = 29,70 detik dan nilai DCPA =

0,0 meter menggunakan *fuzzy inference* dihasilkan nilai risiko tabrakan = 100 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdasarakan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *portside*.

Ketika 30 detik, nilai risiko tabrakan turun dari 100 ke 96, dan jarak terdekat kapal pada waktu 30,8. Nilainya adalah 0,71, akan tetapi megindikasi adanya terjadi tabrakan. Walaupun perhitungan terlihat menghindar, tapi telat dalam mengambil keputusan.

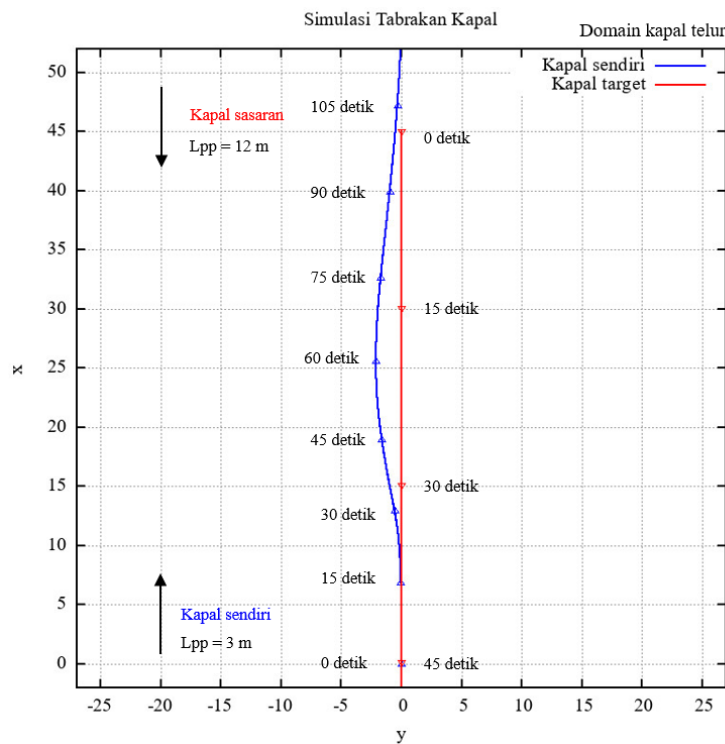


Gambar 5.112 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario C1 dengan bentuk domain kapal lingkaran

5.4.1.3 Bentuk Domain Kapal Telur

Domain kapal berbentuk telur memiliki panjang $R_{bf} = 16,54$ meter, $R_{ba} = 9,77$ meter, dan $S_b = 2,42$ meter untuk kapal sendiri. Sedangkan domain kapal sasaran memiliki panjang $R_{bf} = 291,97$ meter, $R_{ba} = 151,98$ meter, dan $S_b = 13,27$ meter. Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.113, kedua kapal berjalan lurus sepanjang jalur dan saling berhadapan satu sama lain. Hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.114 hingga Gambar 5.120 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana

hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada waktu 0 detik ketika kedua kapal di posisi awalnya, nilai TCPA = 44,55 detik dan nilai DCPA = 0,0 meter menggunakan *fuzzy inference* dihasilkan nilai risiko tabrakan = 95,06 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdsarakan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *portside* pada 0 detik dengan perubahan sudut kemudi yang kecil. Ketika 5,6 detik, nilai risiko tabrakan naik menjadi 100, dan jarak kedua kapal adalah 34,56 meter. Walaupun sudah mengambil keputusan dengan cepat, kapal sendiri kurang cepat dalam mengambil penghindaran karena adanya perbedaan ukuran. Ketika menghindara, jarak terdekat antara kedua kapal adalah 0,80 meter.

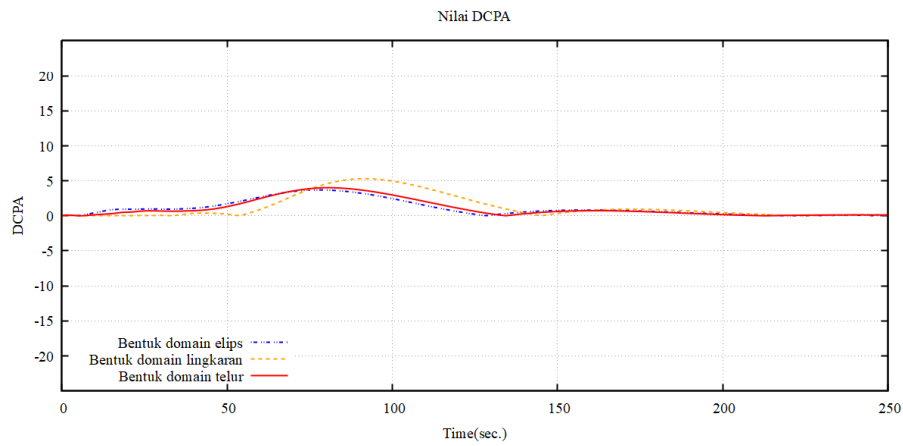


Gambar 5.113 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario C1 dengan bentuk domain kapal telur

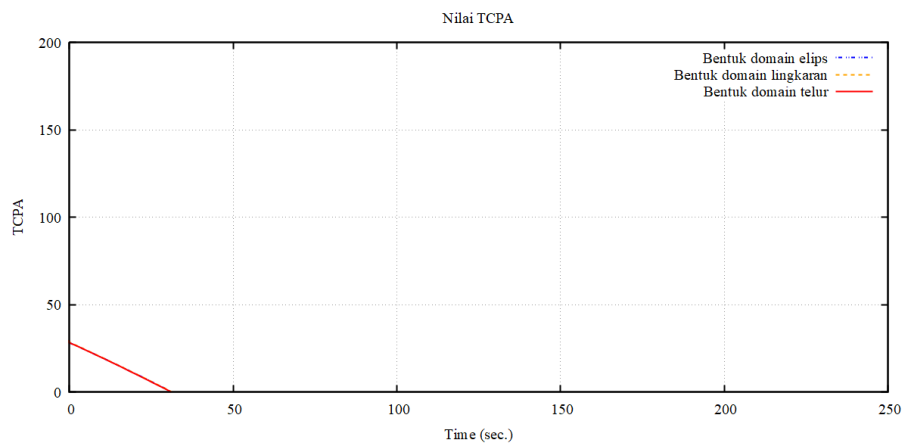
5.4.1.4 Perbandingan Hasil Perhitungan

Melalui hasil perhitungan yang telah dilakukan yang ditunjukkan pada Gambar 5.114 - Gambar 5.120, ada indikasi terjadinya tabrakan. Hal ini disebabkan karena jarak terdekat kapal sampai 0. Walaupun begitu akan tetap diberikan penilaian mana bentuk domain yang cocok untuk digunakan karena tujuan dari perbandingan hasil perhitungan, sebagai berikut:

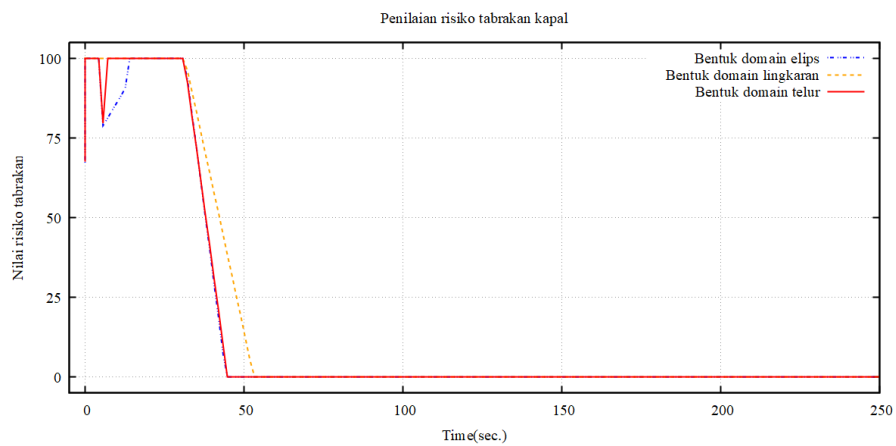
1. Pengaruh bentuk domain terhadap penilaian risiko tabrakan



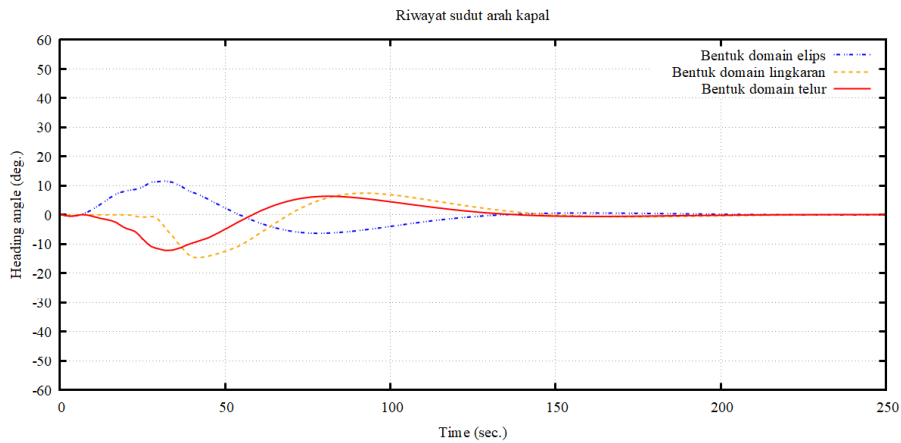
Gambar 5.114 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario C1 selama perhitungan berlangsung



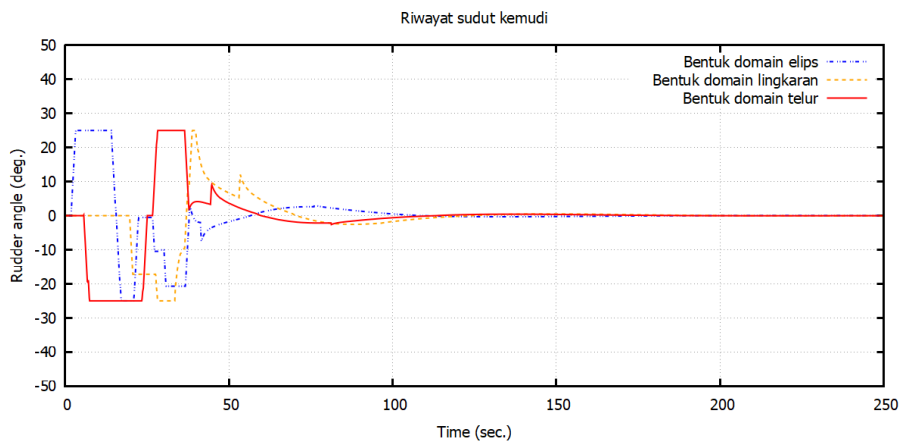
Gambar 5.115 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario C1 selama perhitungan berlangsung



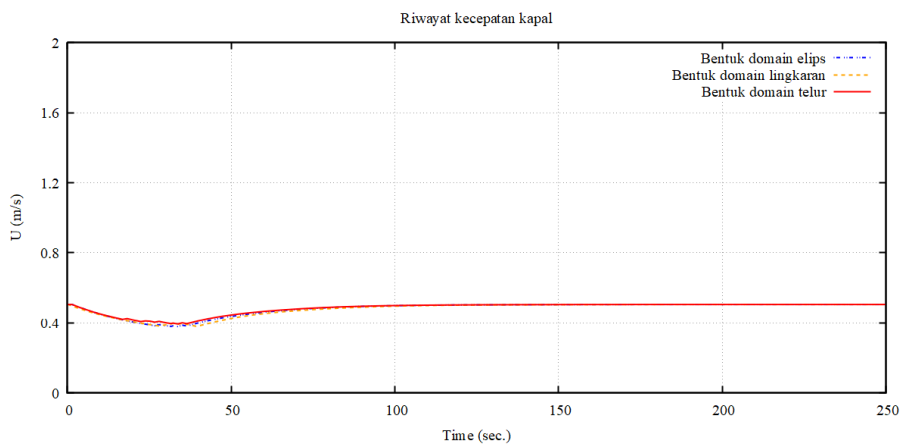
Gambar 5.116 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung



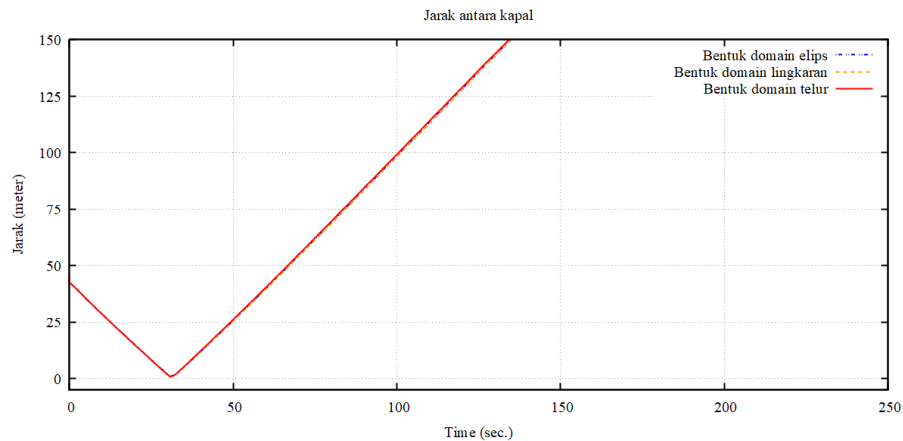
Gambar 5.117 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario C1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.118 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario C1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.119 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario C1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.120 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario C1 selama perhitungan berlangsung

Tabel 5.21 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario C1 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Luas Area
1	Elips	43,4	3658,64
2	Lingkaran	51,8	4222,59
3	Telur	43,4	3768,36

Berdasarkan Tabel 5.21 yang merupakan hasil perhitungan dari Gambar 5.116 dan Tabel 5.22, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Bentuk domain elips:
 Jarak terdekat yang cukup kecil (1,17 meter) menunjukkan bahwa kedua kapal bertemu pada waktu 30,80 detik. Luas area yang kecil menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi siaga untuk waktu yang singkat, namun jarak yang dekat menunjukkan bahwa manuver penghindaran kurang efektif dalam menjaga jarak aman.
2. Bentuk domain lingkaran:
 Jarak terdekat yang lebih kecil (0,71 meter) menunjukkan bahwa kedua kapal bertemu pada waktu 30,80 detik. Luas area yang lebih besar menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi siaga lebih lama, dan jarak yang sangat dekat menunjukkan bahwa manuver penghindaran sangat kurang efektif dalam menjaga jarak aman.
3. Bentuk domain telur:

Jarak terdekat yang sangat kecil (0,80 meter) menunjukkan bahwa kedua kapal bertemu pada waktu 30,80 detik. Luas area yang lebih kecil dari bentuk domain lingkaran, namun lebih besar dari elips, menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi siaga untuk waktu yang relatif singkat, tetapi tetap menunjukkan manuver penghindaran yang kurang efektif dalam menjaga jarak aman.

Tabel 5.22 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario C1 terhadap bentuk domain kapal

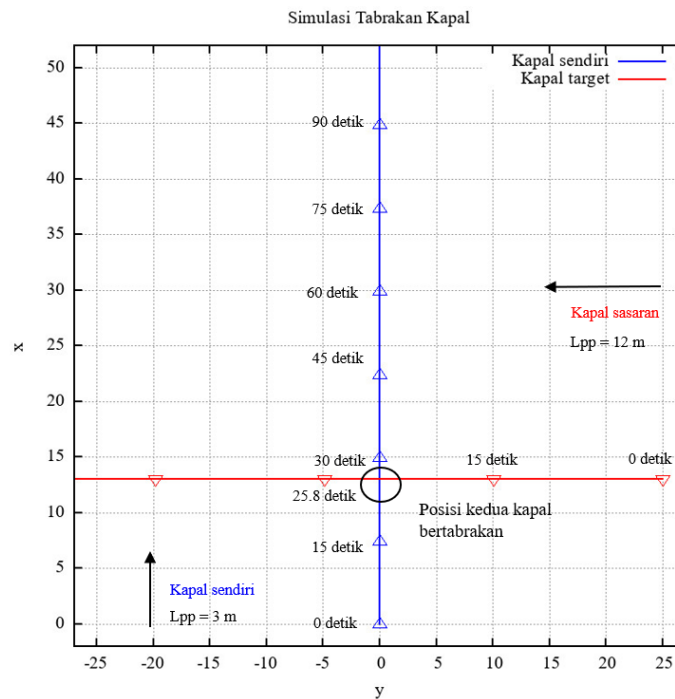
No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Jarak terdekat antar dua kapal (meter)
1	Elips	30,80	1,17
2	Lingkaran	30,80	0,71
3	Telur	30,80	0,80

Berdasarkan hasil analisis terhadap simulasi yang telah dilakukan maka dapat dibuat kesimpulan yang terjadi pada skenario C1 sebagai berikut:

1. Bentuk domain elips:
Menunjukkan performa yang kurang efektif dalam menjaga jarak aman, dengan jarak terdekat 1,17 meter pada waktu 30,80 detik. Meskipun luas area kecil menunjukkan waktu siaga singkat, risiko tabrakan tetap tinggi.
2. Bentuk domain lingkaran:
Memiliki performa paling buruk dalam hal menjaga jarak aman, dengan jarak terdekat 0,71 meter pada waktu 30,80 detik. Luas area yang besar menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi siaga lebih lama.
3. Bentuk domain telur:
Memperlihatkan performa yang tidak jauh berbeda dengan bentuk domain lingkaran, dengan jarak terdekat 0,80 meter pada waktu 30,80 detik. Luas area yang relatif kecil menunjukkan waktu siaga yang singkat, tetapi tetap menunjukkan risiko tabrakan yang tinggi.

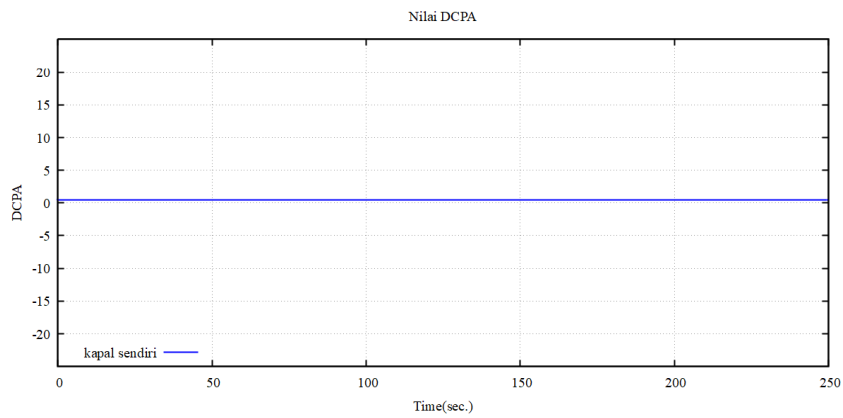
Berdasarkan hasil analisis ini, ketiga bentuk domain menunjukkan performa yang kurang efektif dalam menjaga jarak aman antara kedua kapal, dengan risiko tabrakan yang tinggi pada waktu 30,80 detik. Bentuk domain elips memiliki sedikit keunggulan dalam hal luas area, namun tetap tidak efektif dalam menjaga jarak aman.

5.4.2 Simulasi Tabrakan Skenario 2

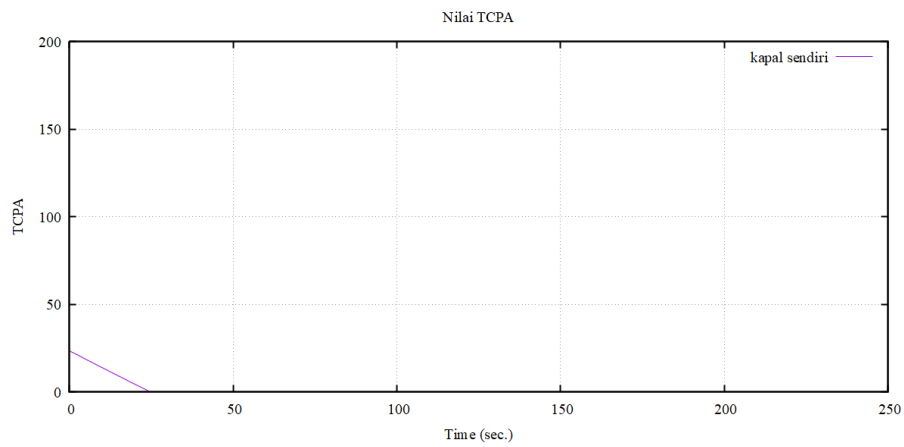


Gambar 5.121 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario C2 tanpa resolusi konflik

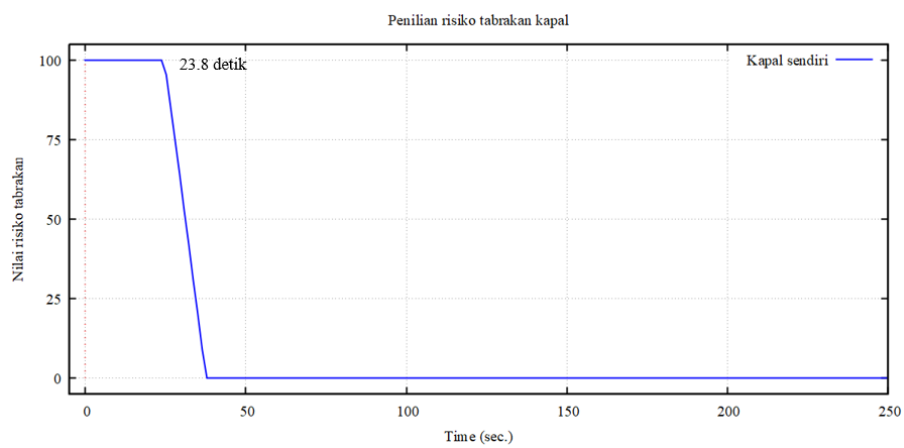
Simulasi tabrakan pada skenario C2 menggambarkan situasi pertemuan antara dua kapal yang tidak mengambil tindakan penghindaran dan skenarionya adalah bersebrangan. Pada Gambar 5.122, DCPA terlihat sebesar 0,0 meter karena kedua kapal akan bertemu satu sama lain pada satu titik tertentu dan nilai risiko tabrakan sudah 100 (Gambar 5.124) disebabkan oleh nilai TCPA yang kecil (Gambar 5.123) dan jarak antara kedua kapal yang dekat sebesar 28,17 meter. Selain faktor tersebut, ditambah juga kapal sasaran memiliki ukuran yang lebih besar dari kapal sendiri, menyebabkan pergerakan kapal sasaran lebih panjang dari kapal sendiri. Setelah dilakukan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.121, kedua kapal akan bertabrakan pada 25,20 detik. Hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.122 hingga Gambar 5.124 menunjukkan bahwa nilai TCPA menurun sedangkan DCPA tetap 0,0 meter. Sebagai hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ pertama kali terjadi pada 0 detik (TCPA = 24,95 detik) karena perbedaan ukuran panjang kapal. Selama perhitungan, nilai risiko tabrakan mulai dari 100 hingga pada waktu 23,8 detik. Selanjutnya pada 25,2 detik kedua kapal bertabrakan satu sama lain.



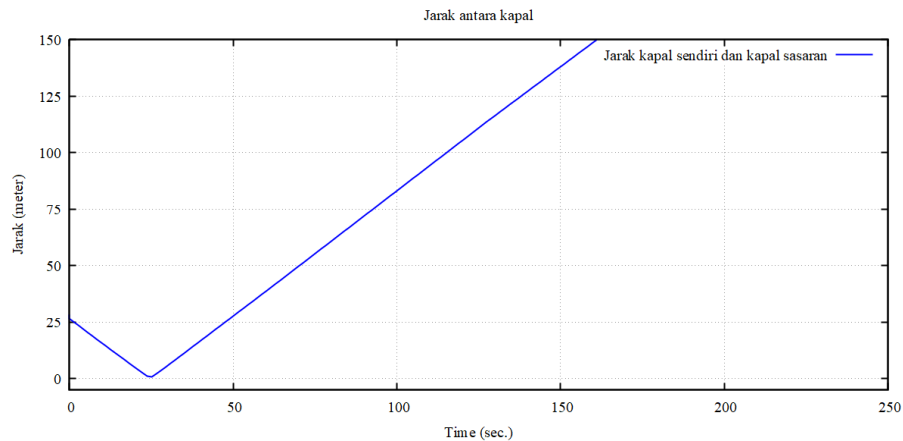
Gambar 5.122 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario C2 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.123 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario C2 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.124 Riwayat waktu penilain risiko tabrakan kapal skenario C2 selama perhitungan berlangsung



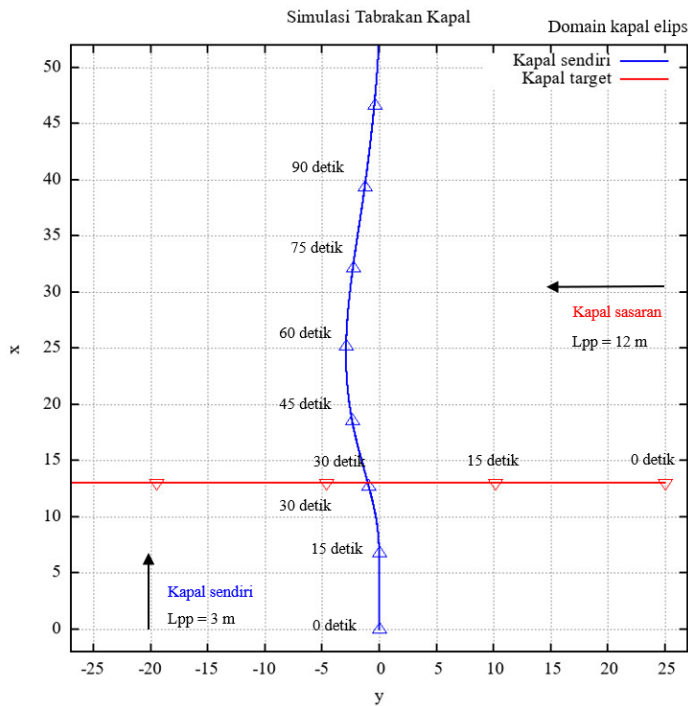
Gambar 5.125 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario C2

Untuk mengetahui pengaruh bentuk domain kapal terhadap penilaian risiko tabrakan, maka perlu dilakukan perhitungan resolusi konflik dan untuk mengetahui hasil pengaruh bentuk domain terhadap pengambilan keputusan.

5.4.2.1 Bentuk Domain Kapal Elips

Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.126, kedua kapal berjalan lurus sepanjang jalur dan saling berhadapan satu sama lain. Hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.129 hingga Gambar 5.135 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada waktu 0 detik ketika kedua kapal di posisi awalnya, nilai TCPA = 24,95 detik dan nilai DCPA = 0 menggunakan *fuzzy inference* dihasilkan nilai risiko tabrakan = 100 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdsarakan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *portside*, dan karena nilai risiko tabrakan sudah menyentuh 100 sehingga pada 0 detik sudah dilakukan penghindaran dengan merubah sudut kemudi secara perlahan.

Jadi kapal sendiri dalam kondisi siaga selama 25,2 detik, dari 0 detik. Penyebabnya telah dijelaskan sebelumnya pada sub-bab 5.4.2, intinya karena kurang stabil program dalam memberikan penilaian untuk perbedaan ukuran kapal. Jarak terdekat antara kedua kapal adalah 2,0 meter pada 25,2 detik. Setelah itu kedua kapal menjauhi satu sama lainnya.



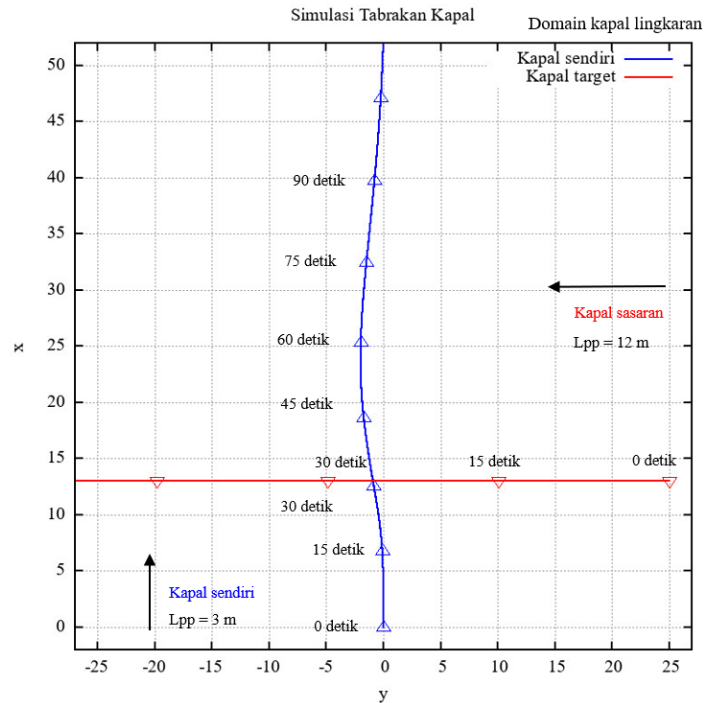
Gambar 5.126 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario C2 dengan bentuk domain kapal elips

5.4.2.2 Bentuk Domain Kapal Lingkaran

Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.127, kedua kapal berjalan lurus sepanjang jalur dan saling berhadapan satu sama lain. Hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.129 hingga Gambar 5.135 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan > 0,0 untuk pertama kali terjadi pada waktu 0 detik ketika kedua kapal di posisi awalnya, nilai TCPA = 24,95 detik dan nilai DCPA = 0,0 meter menggunakan *fuzzy inference* dihasilkan nilai risiko tabrakan = 100 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdsarakan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *portside* dan karena nilai risiko tabrakan sudah menyentuh 100 sehingga pada 0 detik sudah dilakukan penghindaran dengan merubah sudut kemudi secara perlahan..

Jadi kapal sendiri dalam kondisi siaga selama 25,2 detik, dari 0 detik. Penyebabnya telah dijelaskan sebelumnya pada sub-bab 5.4.2, intinya karena kurang stabil program dalam memberikan penilaian untuk perbedaan ukuran kapal.

Jarak terdekat antara kedua kapal adalah 1,91 meter pada 25,2 detik. Setelah itu kedua kapal menjauhi satu sama lainnya.



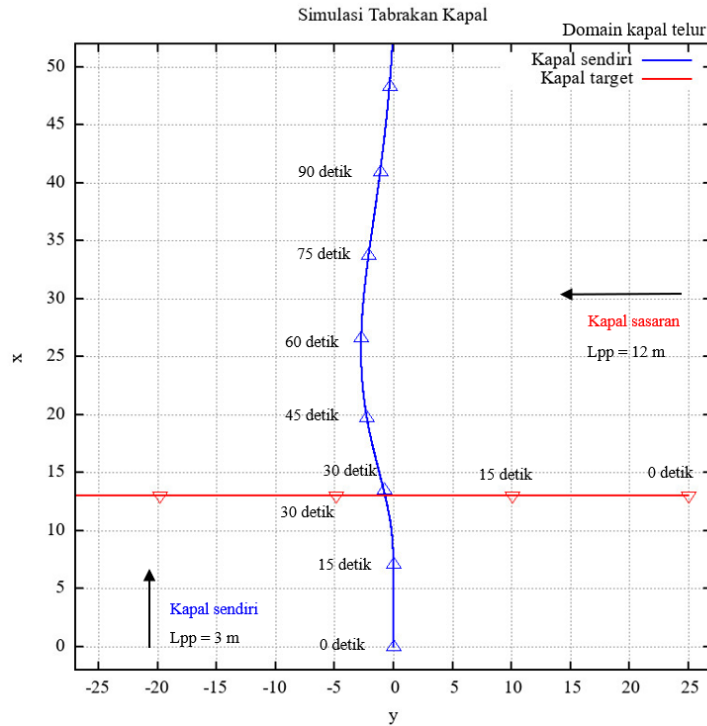
Gambar 5.127 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario C2 dengan bentuk domain kapal lingkaran

5.4.2.3 Bentuk Domain Kapal Telur

Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.128, kedua kapal berjalan lurus sepanjang jalur dan saling berhadapan satu sama lain. Hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.129 hingga Gambar 5.135 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada waktu 0 detik ketika kedua kapal di posisi awalnya, nilai TCPA = 24,95 detik dan nilai DCPA = 0,0 meter menggunakan *fuzzy inference* dihasilkan nilai risiko tabrakan = 100 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdasarakan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *portside* dan karena nilai risiko tabrakan sudah menyentuh 100 sehingga pada 0 detik sudah dilakukan penghindaran dengan merubah sudut kemudi secara perlahan.

Jadi kapal sendiri dalam kondisi siaga selama 25,2 detik, dari 0 detik. Penyebabnya telah dijelaskan sebelumnya pada sub-bab 5.4.2, intinya karena

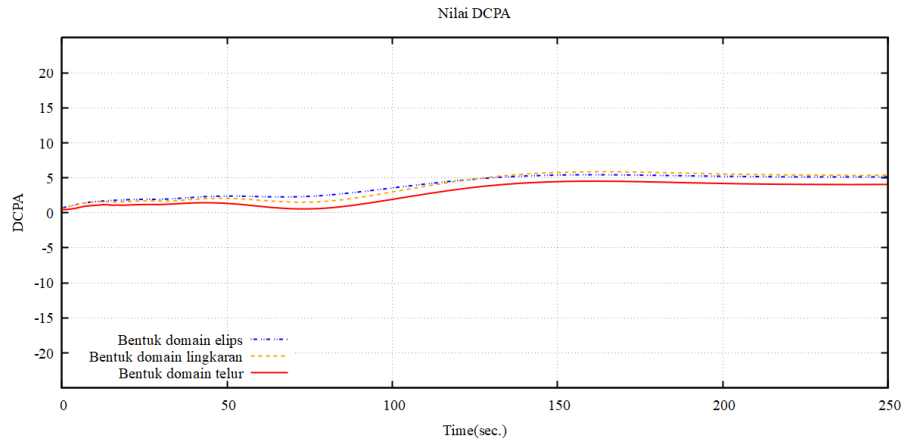
kurang stabil program dalam memberikan penilaian untuk perbedaan ukuran kapal. Jarak terdekat antara kedua kapal adalah 1,20 meter pada 25,2 detik. Setelah itu kedua kapal menjauhi satu sama lainnya.



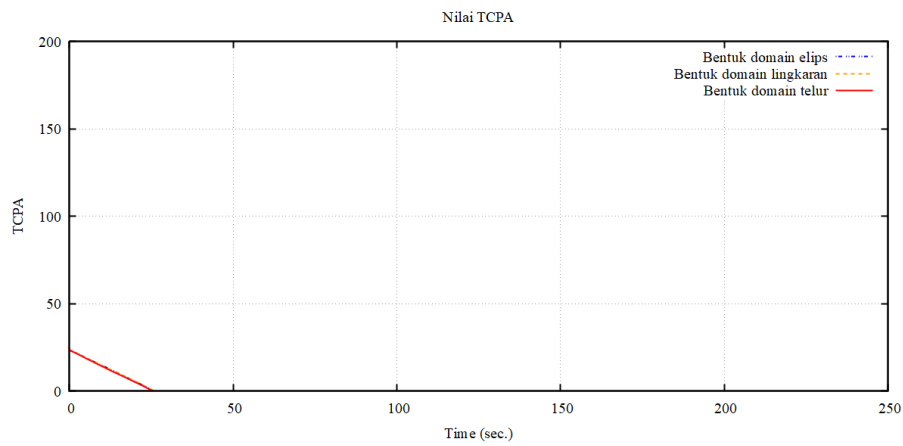
Gambar 5.128 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario C2 dengan bentuk domain kapal telur

5.4.2.4 Perbandingan Hasil Perhitungan

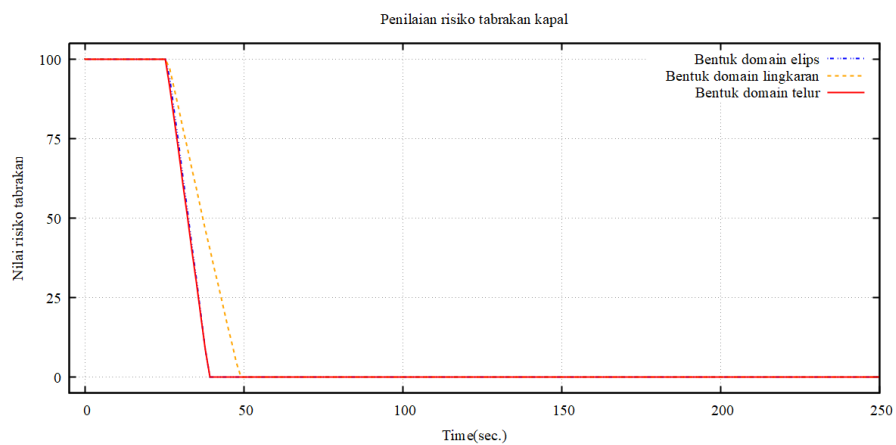
Gambar 5.129 - Gambar 5.135 menunjukkan hasil perhitungan yang mengindikasikan adanya potensi tabrakan. Indikasi ini ditandai dengan jarak terdekat kapal yang mencapai 0, yang menandakan bahwa kapal-kapal tersebut berada pada jalur kolisi. Walaupun hasil perhitungan ini menunjukkan potensi tabrakan, penilaian lebih lanjut tetap akan diberikan untuk menentukan bentuk domain yang paling sesuai digunakan. Tujuan dari perbandingan hasil perhitungan ini adalah untuk menilai pengaruh bentuk domain terhadap penilaian risiko tabrakan. Dengan demikian, meskipun terdapat indikasi tabrakan, analisis mendalam tetap diperlukan untuk mengevaluasi sejauh mana bentuk domain mempengaruhi hasil penilaian risiko tersebut. Analisis ini akan membantu dalam menentukan strategi yang paling efektif untuk meminimalkan risiko tabrakan di masa depan.



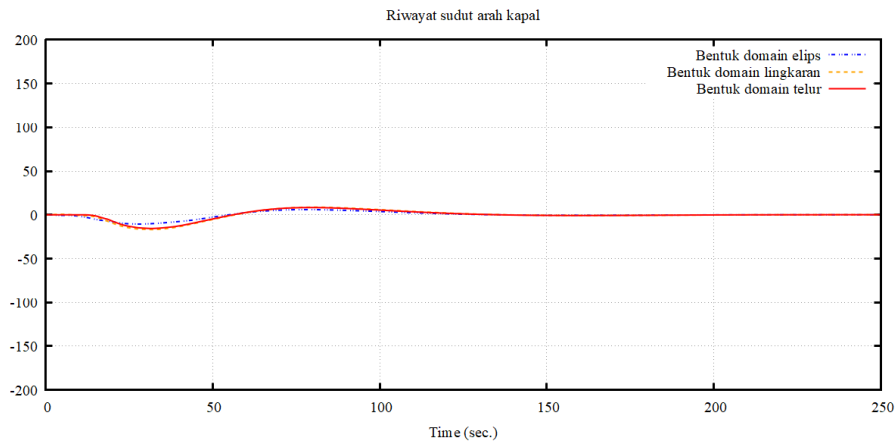
Gambar 5.129 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung



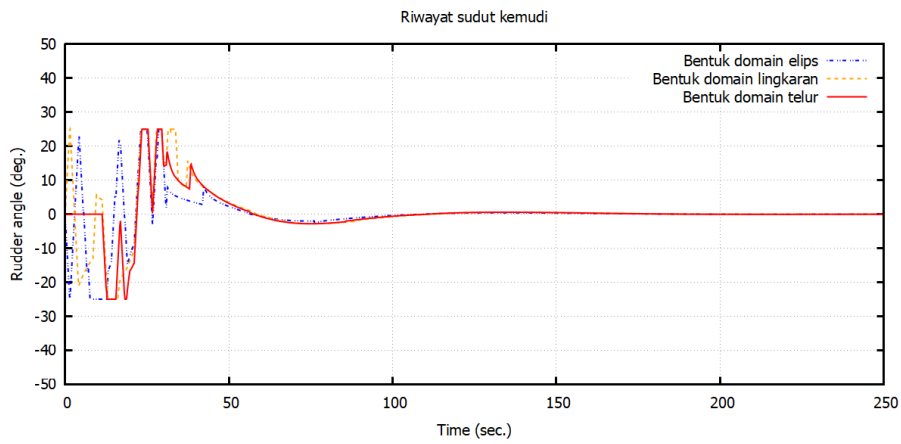
Gambar 5.130 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung



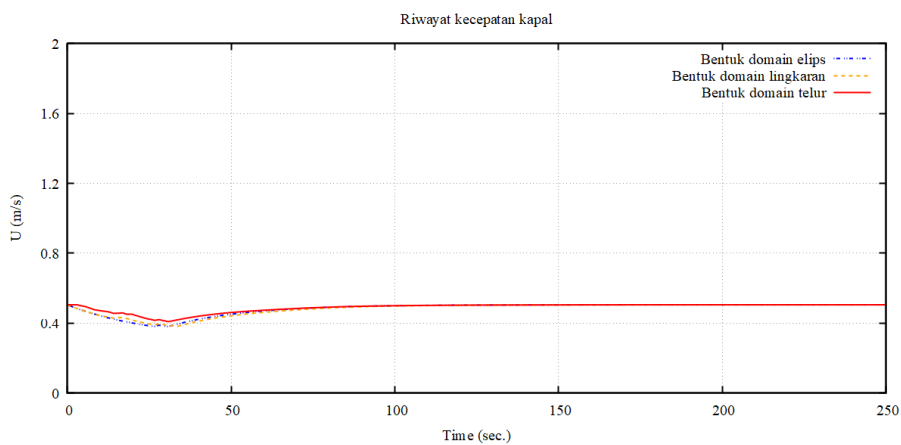
Gambar 5.131 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung



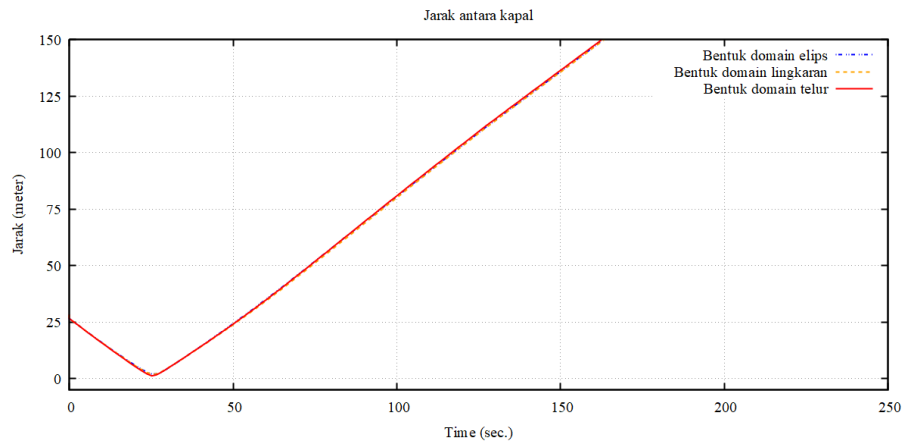
Gambar 5.132 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.133 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.134 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.135 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario C2 selama perhitungan berlangsung

Tabel 5.23 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario C2 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Luas Area
1	Elips	37,8	3243,73
2	Lingkaran	47,6	3715,15
3	Telur	37,8	3222,33

Berdasarkan Tabel 5.23 yang merupakan hasil perhitungan dari Gambar 5.131 dan pada Tabel 5.24 adalah jarak terdekat antara kedua kapal, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Bentuk domain elips:

Jarak terdekat antara dua kapal adalah 2,00 meter, ditunjukkan bahwa kedua kapal bertemu pada waktu 25,20 detik. Luas area yang kecil menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi siaga untuk waktu yang singkat. Ini menunjukkan manuver penghindaran yang cukup efektif dalam menjaga jarak aman antar kapal.
- Bentuk domain lingkaran:

Jarak terdekat antara dua kapal adalah 1,91 meter, ditunjukkan bahwa kedua kapal bertemu pada waktu 25,20 detik. Luas area yang lebih besar menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi siaga lebih lama, namun tetap cukup efektif dalam menjaga jarak aman.
- Bentuk domain telur:

Jarak terdekat antara dua kapal adalah 1,20 meter, ditunjukkan bahwa kedua kapal bertemu pada waktu 25,20 detik. Luas area yang kecil menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi siaga untuk waktu yang singkat, namun jarak yang lebih dekat menunjukkan bahwa manuver penghindaran kurang efektif dalam menjaga jarak aman.

Tabel 5.24 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario C2 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Jarak terdekat antar dua kapal (meter)
1	Elips	25,20	2,00
2	Lingkaran	25,20	1,91
3	Telur	25,20	1,20

Berdasarkan hasil analisis terhadap simulasi yang telah dilakukan maka dapat dibuat kesimpulan yang terjadi pada skenario C2 sebagai berikut:

1. Bentuk domain elips:

Menunjukkan performa yang paling efektif dalam menjaga jarak aman, dengan jarak terdekat 2,00 meter pada waktu 25,20 detik. Luas area kecil menunjukkan waktu siaga yang singkat dan manuver penghindaran yang cukup efektif.

2. Bentuk domain lingkaran:

Memiliki performa yang sedikit kurang efektif dibandingkan dengan elips, dengan jarak terdekat 1,91 meter pada waktu 25,20 detik. Luas area yang lebih besar menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi siaga lebih lama, namun tetap cukup efektif dalam menjaga jarak aman.

3. Bentuk domain telur:

Menunjukkan performa yang kurang efektif dalam menjaga jarak aman, dengan jarak terdekat 1,20 meter pada waktu 25,20 detik. Luas area kecil menunjukkan waktu siaga yang singkat, namun jarak yang lebih dekat menunjukkan risiko tabrakan yang lebih tinggi dan manuver penghindaran yang kurang efektif.

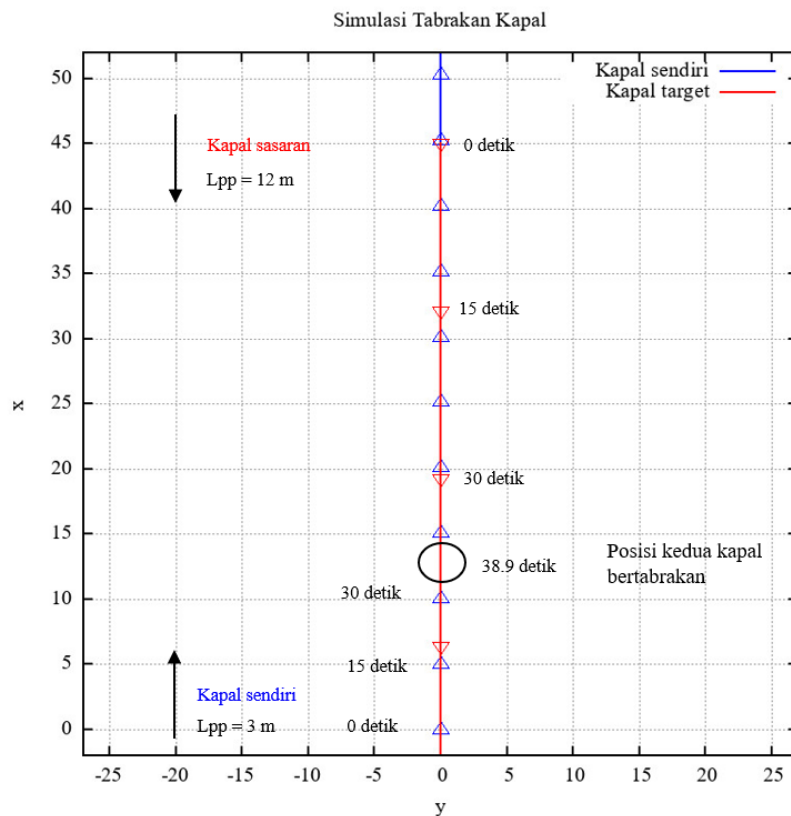
Berdasarkan hasil analisis ini, Bentuk Domain Elips menunjukkan performa terbaik dalam menjaga jarak aman antara kedua kapal dengan risiko tabrakan yang lebih rendah dan waktu siaga yang singkat. Bentuk Domain Lingkaran juga efektif namun memiliki waktu siaga yang lebih lama. Bentuk

Domain Telur menunjukkan performa yang paling kurang efektif dalam menjaga jarak aman antar kapal.

5.5 Simulasi Tabrakan Skenario D

Selanjutnya adalah simulasi yang dilakukan dengan model kapal subjek memiliki panjang yang berbeda dengan kecepatan kapal subjek yang berbeda. Simulasi dilakukan dengan beberapa variasi panjang kapal, variasi kecepatan, dan beberapa variasi sudut datang kapal sasaran. Akan ditunjukkan hasil pergerakan rute kapal (perubahan posisi kapal), nilai dari risiko tabrakan, nilai DCPA dan TCPA ini ketika simulasi tabrakan. Pada simulasi pengambilan keputusan, akan ditambahkan hasil pergerakan kemudi kapal, kecepatan kapal, sudut arah kapal, dan jarak antar kapal.

5.5.1 Simulasi Tabrakan Skenario 1

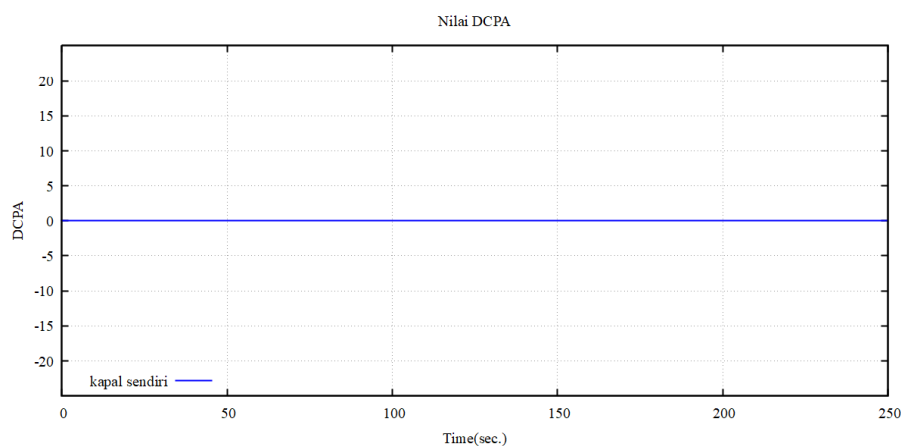


Gambar 5.136 Perhitungan penghindaran tabrakan skenario D1 tanpa resolusi konflik

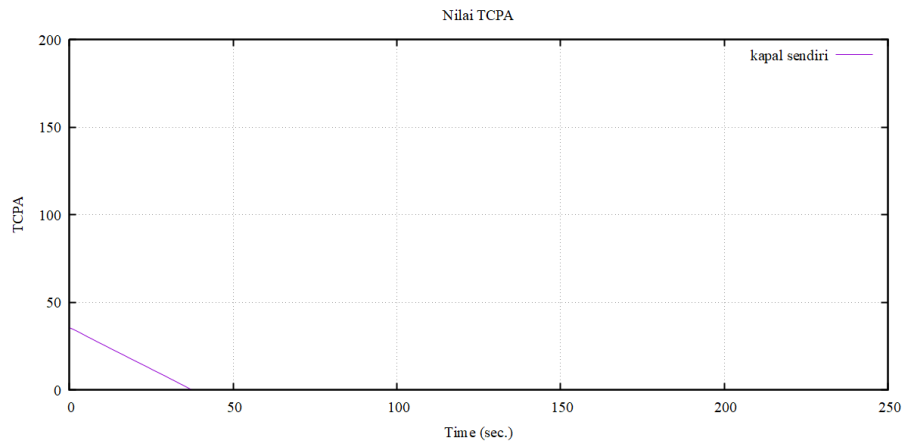
Simulasi tabrakan pada skenario D1 menggambarkan situasi pertemuan antara dua kapal yang tidak mengambil tindakan penghindaran. Pada Gambar

5.137, DCPA terlihat sebesar 0,0 meter karena kedua kapal berada di satu garis lurus pada posisi awal. Namun, nilai risiko tabrakan sebesar 54,07 (Gambar 5.138) disebabkan oleh nilai TCPA yang kecil (Gambar 5.139), seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab 5.4.2, karena adanya perbedaan ukuran membuat program menjadi kurang stabil. Setelah dilakukan perhitungan yang ditunjukkan pada Gambar 5.136, kedua kapal berjalan lurus sepanjang rute dan bertabrakan pada 37,80 detik.

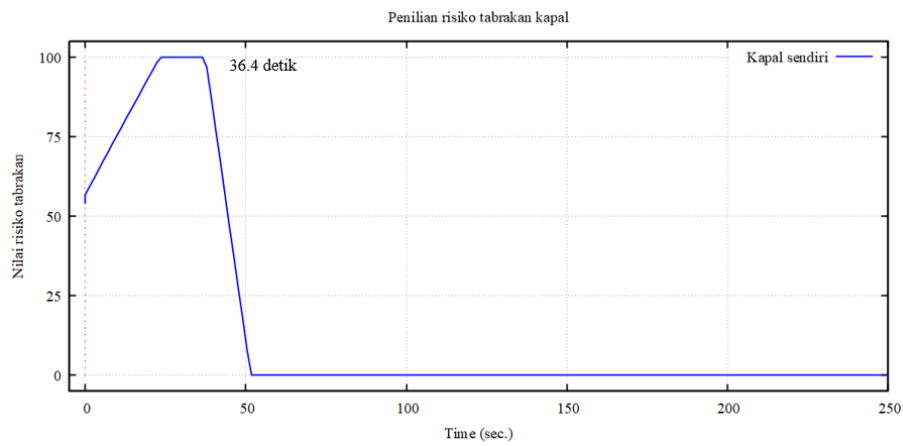
Hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.137 hingga Gambar 5.140 menunjukkan bahwa nilai TCPA menurun sedangkan DCPA tetap 0,0 meter. Sebagai hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ pertama kali terjadi pada 0 detik (TCPA = 37,1 detik) karena perbedaan ukuran panjang kapal. Selama perhitungan, nilai risiko tabrakan mencapai 100 untuk pertama kali pada waktu 23,8 detik. Pada waktu 23,8 detik, jarak antara kedua kapal adalah 15,84 meter, sementara panjang domain kapal bagian depan adalah 18,72 meter, sehingga kapal sasaran sudah masuk ke dalam domain kapal sendiri. Sehingga menyebabkan nilai risiko tabrakan 100, selain itu respon *fuzzy inference* juga menunjukkan nilai yang sama, "IF DCPA Bahaya AND TCPA Bahaya THEN risiko tabrakan CR5". Kapal sendiri akan berada dalam kondisi siaga selama 37,8 detik, karena pada 0 detik nilai dari risiko tabrakan sebesar 54,07. Setelah itu kedua kapal akan bertabrakan satu sama lainnya karena tidak ada penghindaran yang dilakukan.



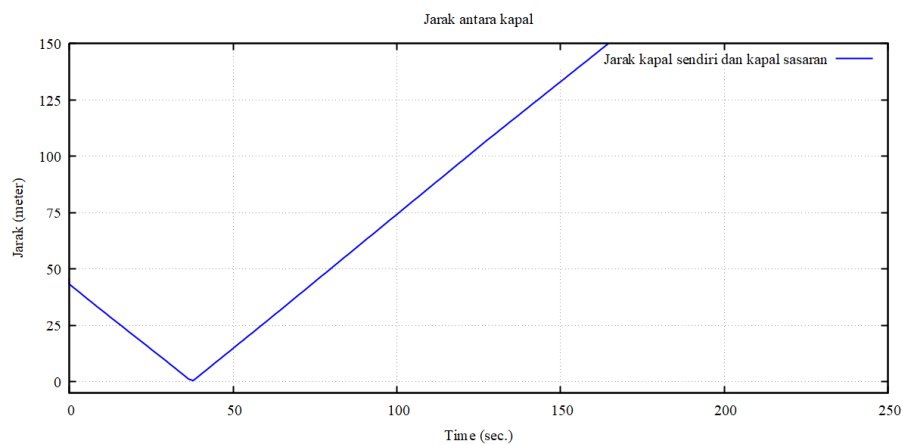
Gambar 5.137 Riwayat perubahan nilai DCPA skenario D1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.138 Riwayat perubahan nilai TCPA skenario D1 selama perhitungan berlangsung



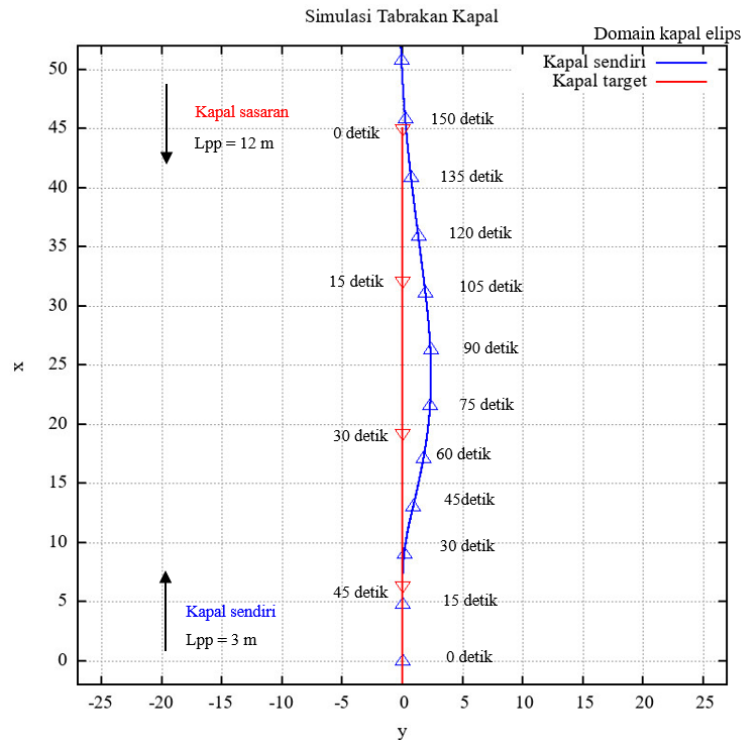
Gambar 5.139 Riwayat waktu penilain risiko tabrakan kapal skenario D1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.140 Riwayat jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran selama perhitungan berlangsung untuk skenario D1

Untuk mengetahui pengaruh bentuk domain kapal terhadap penilaian risiko tabrakan, maka perlu dilakukan perhitungan resolusi konflik dan untuk mengetahui hasil pengaruh bentuk domain terhadap pengambilan keputusan.

5.5.1.1 Bentuk Domain Kapal Elips



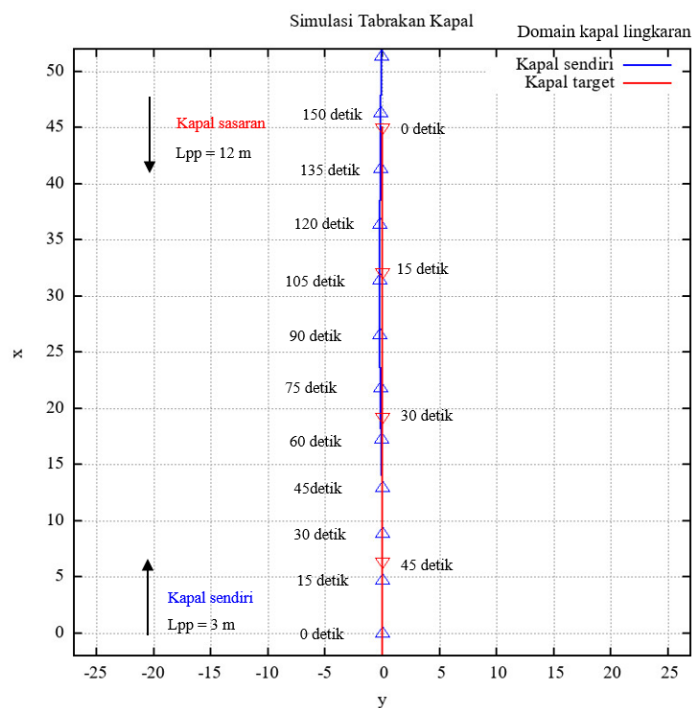
Gambar 5.141 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario D1 dengan bentuk domain kapal elips

Domain kapal berbentuk elips memiliki panjang pada bagian sumbu utama (M_j) = 17,70 meter, serta pada bagian sisi (M_i) = 12,30 meter untuk kapal sendiri dan kapal sasaran M_j = 53,1 meter dan M_i = 36,9 meter. Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.141, kedua kapal berjalan lurus sepanjang jalur dan saling berhadapan satu sama lain. Hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.144 hingga Gambar 5.150 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada waktu 0 detik ketika kedua kapal di posisi awalnya, nilai TCPA = 37,19 detik dan nilai DCPA = 0,0 meter menggunakan *fuzzy inference* dihasilkan nilai risiko tabrakan = 100 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdasarkan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *starboard* dan karena nilai risiko

tabrakan sudah menyentuh 100 sehingga pada 0 detik sudah dilakukan penghindaran dengan merubah sudut kemudi secara perlahan.

Jadi kapal sendiri dalam kondisi siaga selama 37,8 detik, dari 0 detik. Penyebabnya telah dijelaskan sebelumnya pada sub-bab 5.4.2, intinya karena kurang stabil program dalam memberikan penilaian untuk perbedaan ukuran kapal. Jarak terdekat antara kedua kapal adalah 0,69 meter pada 39,2 detik. Setelah itu kedua kapal menjauhi satu sama lainnya.

5.5.1.2 Bentuk Domain Kapal Lingkaran

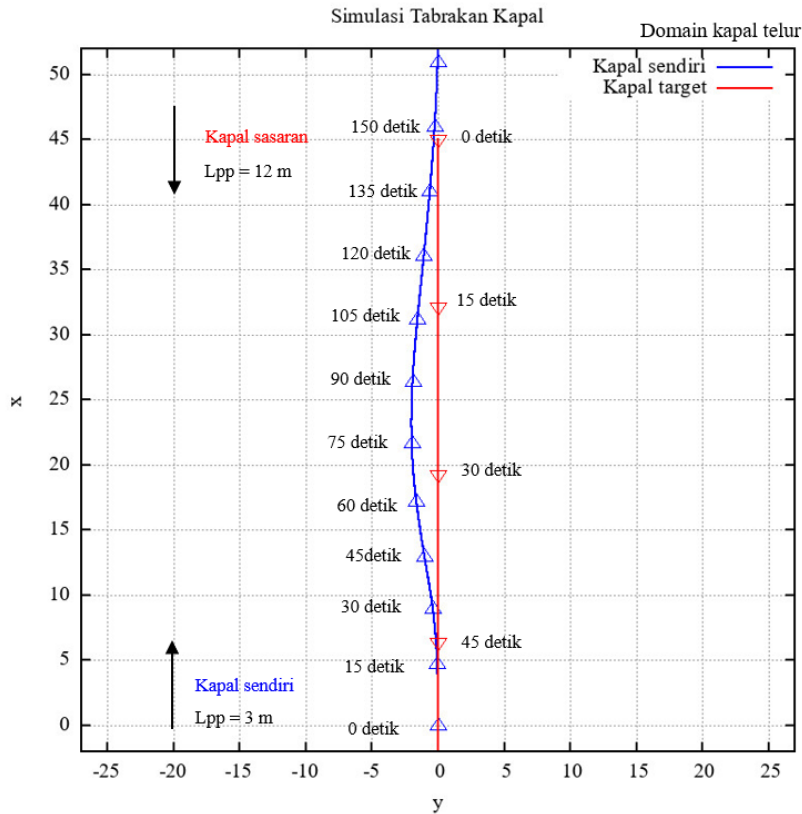


Gambar 5.142 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario D1 dengan bentuk domain kapal lingkaran

Domain kapal berbentuk lingkaran memiliki jari – jari $Rho = 23,8$ meter untuk kedua kapal. Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.142, kedua kapal berjalan lurus sepanjang jalur dan saling berhadapan satu sama lain. Hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.144 hingga Gambar 5.150 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, penghindaran yang dilakukan dinilai kurang efektif. Penyebabnya telah dijelaskan sebelumnya pada sub-bab 5.4.2, intinya karena kurang stabil program dalam memberikan penilaian untuk perbedaan ukuran kapal. Selain itu domain

lingkaran memperhitungkan rata – rata panjang kapal yang saling bersangkutan. Sehingga tidak peduli berapa perbedaan ukurannya maka nilai domian untuk kedua kapal memiliki ukuran yang sama. Sehingga dalam pengambilan keputusan dari awal penghindaran hingga perubahan arah kapal tidak baik.

5.5.1.3 Bentuk Domain Kapal Telur



Gambar 5.143 Perhitungan penghindaran tabrakan kapal skenario D1 dengan bentuk domain kapal telur

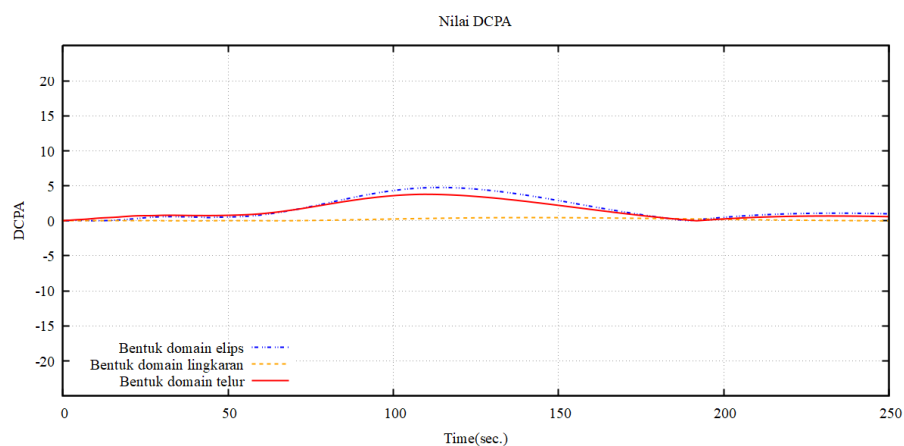
Domain kapal berbentuk telur memiliki panjang $R_{bf} = 16,54$ meter, $R_{ba} = 9,77$ meter, dan $S_b = 2,42$ meter untuk kapal sendiri. Sedangkan domain kapal sasaran memiliki panjang $R_{bf} = 182,93$ meter, $R_{ba} = 95,96$ meter, dan $S_b = 11,27$ meter. Setelah melakukan perhitungan, yang ditunjukkan pada Gambar 5.143, kedua kapal berjalan lurus sepanjang jalur dan saling berhadapan satu sama lain. Hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.144 hingga Gambar 5.150 menunjukkan nilai dari TCPA menurun sedangkan DCPA = 0,0 meter. Sebagaimana hasilnya, nilai risiko tabrakan $> 0,0$ untuk pertama kali terjadi pada waktu 0 detik ketika kedua kapal di posisi awalnya, nilai TCPA = 37,1 detik dan nilai DCPA =

0,0 meter menggunakan *fuzzy inference* dihasilkan nilai risiko tabrakan = 100 dan keputusan penghindaran harus dibuat berdasarakan kondisi penghindaran normal, dan kapal sendiri memulai manuver penghindaran dengan berbelok ke arah *portside* dan karena nilai risiko tabrakan sudah menyentuh 100 sehingga pada 0 detik sudah dilakukan penghindaran dengan merubah sudut kemudi secara perlahan..

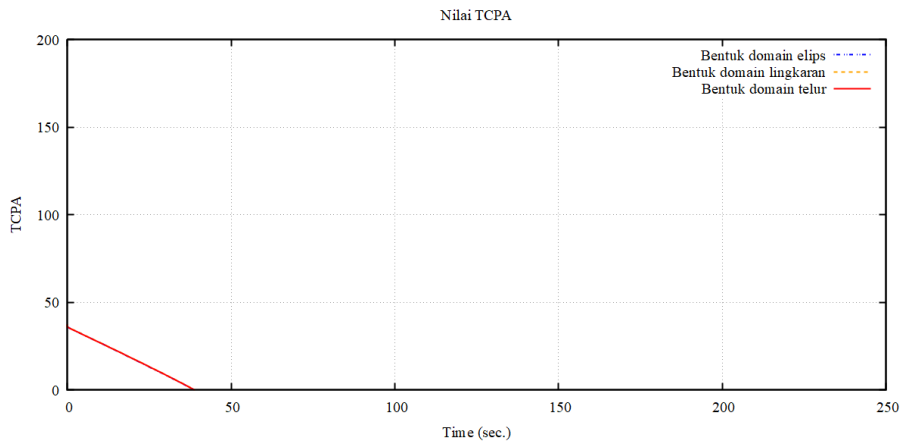
Jadi kapal sendiri dalam kondisi siaga selama 37,8 detik, dari 0 detik. Penyebabnya telah dijelaskan sebelumnya pada sub-bab 5.4.2, intinya karena kurang stabil program dalam memberikan penilaian untuk perbedaan ukuran kapal. Jarak terdekat antara kedua kapal adalah 0,84 meter pada 39,2 detik. Setelah itu kedua kapal menjauhi satu sama lainnya.

5.5.1.4 Perbandingan Hasil Perhitungan

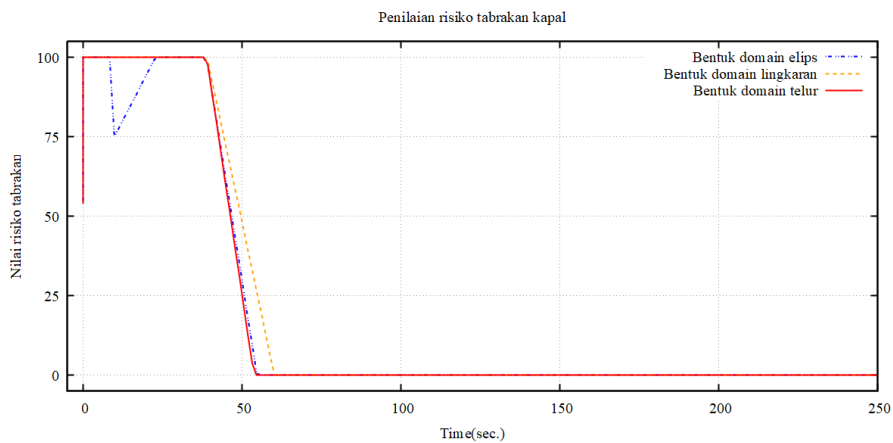
Melalui hasil perhitungan yang telah dilakukan yang ditunjukkan pada Gambar 5.144 hingga Gambar 5.150, ada indikasi terjadinya tabrakan. Hal ini disebabkan karena jarak terdekat kapal sampai 0. Meskipun demikian, penilaian tetap dilakukan untuk menentukan bentuk domain yang paling cocok digunakan. Tujuan dari perbandingan hasil perhitungan ini adalah untuk mengidentifikasi bentuk domain yang paling efektif dalam mencegah tabrakan, menilai kinerja masing-masing bentuk domain. Dari hasil ini, diharapkan dapat diperoleh rekomendasi yang solid untuk penerapan bentuk domain yang paling efektif dalam sistem penghindaran tabrakan kapal.



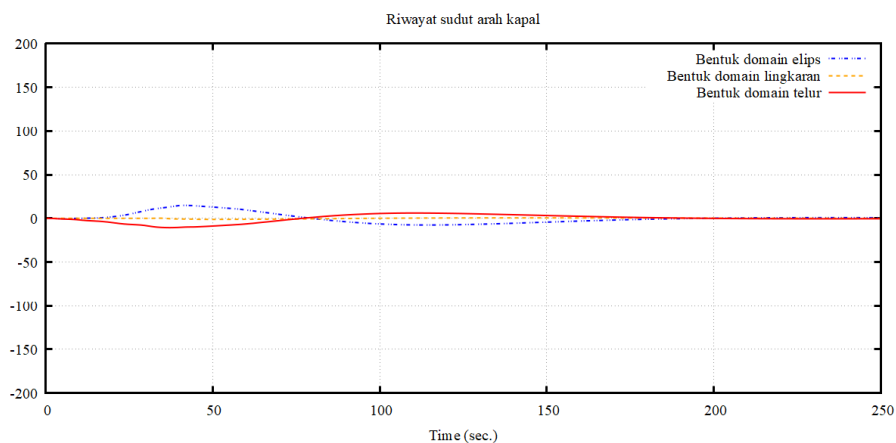
Gambar 5.144 Perbandingan riwayat perubahan nilai DCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario D1 selama perhitungan berlangsung



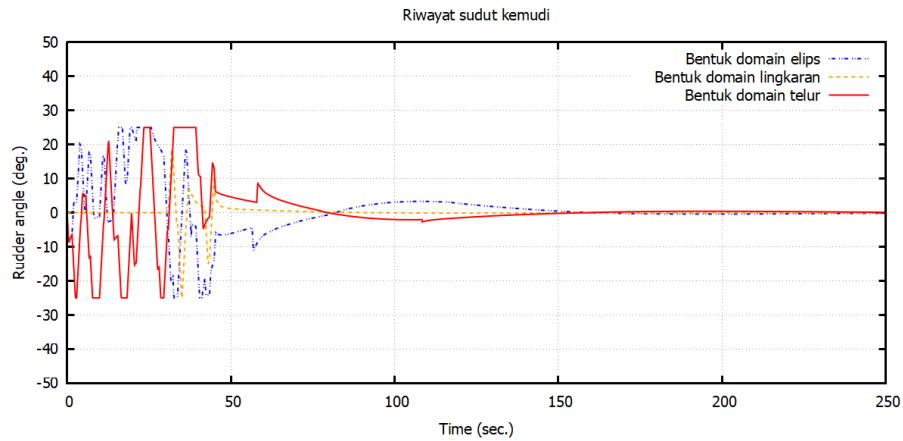
Gambar 5.145 Perbandingan riwayat perubahan nilai TCPA untuk ketiga bentuk domain pada skenario D1 selama perhitungan berlangsung



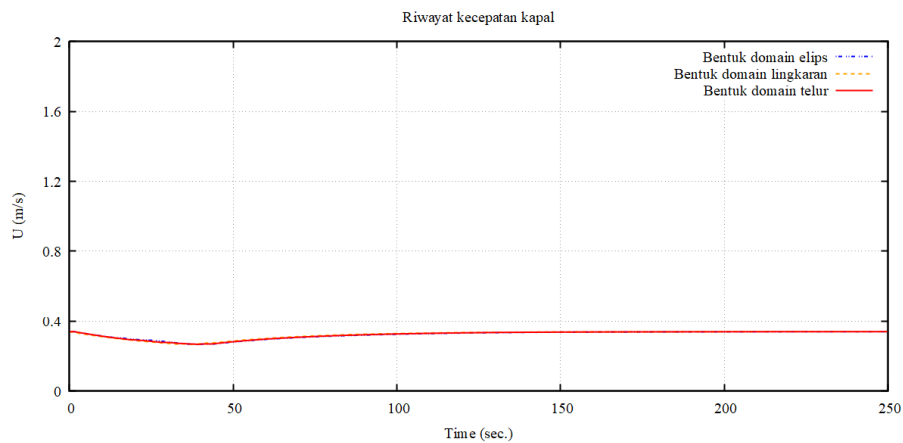
Gambar 5.146 Perbandingan riwayat perubahan nilai risiko tabrakan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario D1



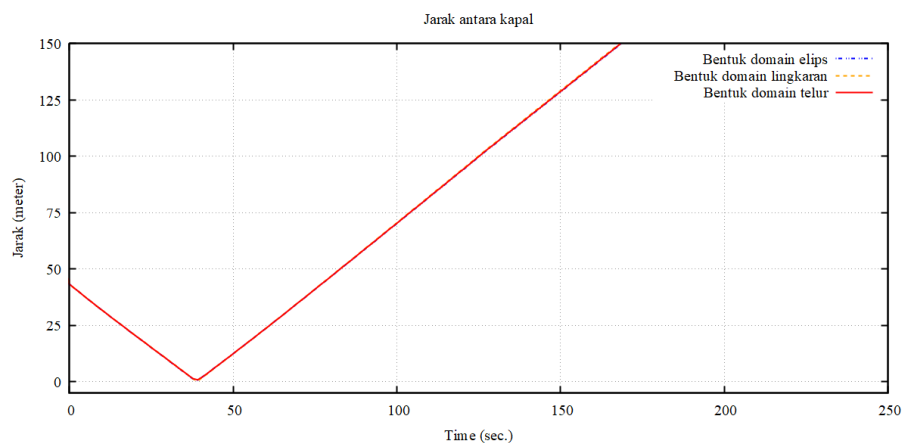
Gambar 5.147 Perbandingan riwayat perubahan sudut arah kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario D1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.148 Perbandingan riwayat perubahan sudut kemudi untuk ketiga bentuk domain pada skenario D1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.149 Perbandingan riwayat perubahan kecepatan kapal untuk ketiga bentuk domain pada skenario D1 selama perhitungan berlangsung



Gambar 5.150 Perbandingan riwayat perubahan jarak kapal sendiri terhadap kapal sasaran untuk ketiga bentuk domain pada skenario D1 selama perhitungan berlangsung

Tabel 5.25 Penilaian pengaruh nilai risiko tabrakan skenario D1 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Luas Area
1	Elips	54,6	4496,69
2	Lingkaran	58,8	4957,97
3	Telur	53,2	4632,31

Berdasarkan Tabel 5.25 yang merupakan hasil perhitungan dari Gambar 5.11 dan pada Tabel 5.26 adalah jarak terdekat antara kedua kapal, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Bentuk domain elips:

Jarak terdekat 0,69 meter, ditunjukkan bahwa kedua kapal bertemu pada waktu 39,20 detik. Luas area yang cukup besar menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi siaga untuk waktu yang cukup lama, meskipun manuver penghindaran yang dilakukan masih relatif efektif dibandingkan dengan domain lingkaran.

2. Bentuk domain lingkaran:

Jarak terdekat 0,26 meter, ditunjukkan bahwa kedua kapal bertemu pada waktu 39,20 detik. Luas area yang paling besar menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi siaga lebih lama, dan manuver penghindaran yang dilakukan kurang efektif dalam menjaga jarak aman.

3. Bentuk domain telur:

Jarak terdekat 0,84 meter, ditunjukkan bahwa kedua kapal bertemu pada waktu 39,20 detik. Luas area yang cukup besar menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi siaga untuk waktu yang cukup lama, namun manuver penghindaran yang dilakukan lebih efektif dibandingkan dengan domain lingkaran.

Tabel 5.26 Jarak terdekat antara kedua kapal skenario D1 terhadap bentuk domain kapal

No.	Bentuk domain	Waktu (detik)	Jarak terdekat antar dua kapal (meter)
1	Elips	39,20	0,69
2	Lingkaran	39,20	0,26
3	Telur	39,20	0,84

Berdasarkan hasil analisis terhadap simulasi yang telah dilakukan maka dapat dibuat kesimpulan yang terjadi pada skenario D1 sebagai berikut:

1. Bentuk domain elips:

Menunjukkan performa yang lebih baik dalam menjaga jarak aman dibandingkan dengan lingkaran, dengan jarak terdekat 0,69 meter pada waktu 39,20 detik. Luas area yang cukup besar menunjukkan waktu siaga yang cukup lama, namun manuver penghindaran masih relatif efektif.

2. Bentuk domain lingkaran:

Memiliki performa yang paling buruk dalam menjaga jarak aman, dengan jarak terdekat 0,26 meter pada waktu 39,20 detik. Luas area yang paling besar menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi siaga lebih lama, dan manuver penghindaran yang dilakukan kurang efektif.

3. Bentuk domain telur:

Menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan elips dan lingkaran, dengan jarak terdekat 0,84 meter pada waktu 39,20 detik. Luas area yang cukup besar menunjukkan waktu siaga yang cukup lama, namun manuver penghindaran yang dilakukan lebih efektif dalam menjaga jarak aman antar kapal.

Berdasarkan hasil analisis ini, Bentuk Domain Telur menunjukkan performa terbaik dalam menjaga jarak aman antara kedua kapal dengan risiko tabrakan yang lebih rendah dan manuver penghindaran yang lebih efektif. Bentuk Domain Elips juga efektif namun memiliki waktu siaga yang cukup lama. Bentuk Domain Lingkaran menunjukkan performa yang paling buruk dalam menjaga jarak aman antar kapal.

5.6 Hasil Simulasi

Hasil simulasi dalam penelitian ini menunjukkan ilustrasi kapal yang melakukan manuver penghindaran dalam berbagai kondisi pertemuan, termasuk *head-on*, *overtaking*, dan *crossing*. Simulasi dilakukan dengan berbagai variasi ukuran dan kecepatan kapal, yaitu:

1. Kedua kapal memiliki ukuran dan kecepatan yang sama,

2. Kedua kapal memiliki ukuran yang sama tetapi kecepatan berbeda,

3. Kedua kapal memiliki ukuran berbeda tetapi kecepatan sama,
4. Kedua kapal memiliki ukuran dan kecepatan yang berbeda.

Setelah dilakukan simulasi berdasarkan empat skenario yang telah ditetapkan, ditemukan bahwa perbedaan ukuran dan kecepatan kapal mempengaruhi hasil penilaian CR dan pergerakan penghindaran dari kapal sendiri. Jika kapal sasaran lebih kecil dari kapal sendiri, maka kapal sendiri yang dominan dalam melakukan proses penghindaran tabrakan. Sebaliknya, jika kapal sasaran lebih besar, kapal sasaran yang lebih dominan dalam penghindaran. Hal ini disebabkan ukuran kapal yang lebih kecil mengakibatkan proses penghindaran menjadi terlambat, karena ketiga bentuk domain terikat dengan ukuran kapal. Oleh karena itu dalam perhitungan yang dilakukan akan diambil dengan ukuran terbesar jika kapal sendiri dan kapal sasaran memiliki ukuran yang berbeda. Setelah dilakukan simulasi untuk perbedaan ukuran, program simulasi yang dibuat kurang efektif dalam memberikan penilaian ketika kedua kapal memiliki ukuran yang berbeda dapat dilihat pada skenario C dan D. Walaupun begitu, simulasi penghindaran masih dapat dilakukan.

Kecepatan kapal berpengaruh lebih besar pada bentuk domain telur. Meskipun ada pengaruh pada bentuk domain elips dan lingkaran, pengaruhnya tidak terlalu signifikan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada perbedaan kecepatan, domain telur memberikan penilaian CR dan penghindaran yang lebih baik dibandingkan kedua bentuk domain lainnya. Selain itu, simulasi juga menekankan pentingnya mempertimbangkan ukuran dan kecepatan kapal dalam model penghindaran tabrakan untuk meningkatkan efektivitas dan akurasi sistem.

Dari hasil simulasi tersebut, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam beberapa aspek berikut:

1. Meningkatkan Keselamatan Pelayaran

Simulasi ini memungkinkan prediksi pergerakan manuver kapal dalam berbagai skenario pertemuan, sehingga dapat membantu dalam merencanakan tindakan penghindaran yang tepat untuk mengurangi risiko tabrakan.

2. Memberikan Rekomendasi Penghindaran atau Tindakan Darurat

Hasil simulasi dapat digunakan untuk memberikan rekomendasi praktis mengenai langkah-langkah penghindaran atau respons darurat dalam situasi yang

berpotensi menyebabkan tabrakan. Hal ini penting untuk meningkatkan kesiapsiagaan dan respons kru kapal dalam kondisi darurat.

3. Pengembangan Kapal Otonomi (Autonomous Ship):

Penelitian ini juga berkontribusi pada pengembangan teknologi kapal otonomi dengan menyediakan data dan model yang dapat digunakan untuk meningkatkan algoritma penghindaran tabrakan pada kapal otonom. Dengan demikian, kapal otonom dapat lebih efektif dalam mendeteksi dan menghindari risiko tabrakan di laut.

Dengan hasil dan kontribusi ini, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang mendalam dan aplikasi praktis dalam meningkatkan keselamatan pelayaran, memberikan rekomendasi dalam kondisi darurat, serta mendukung pengembangan teknologi kapal otonom yang lebih aman dan efisien.

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil menjawab empat perumusan masalah yang telah diberikan terkait dengan pengembangan algoritma sistem peringatan dini tabrakan kapal dengan metode penilai indeks risiko tabrakan kapal. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Program simulasi penghindaran dini tabrakan kapal dapat dikembangkan dengan memperhitungkan nilai *collision risk* (CR) yang menggunakan parameter perhitungan jarak (DCPA), waktu (TCPA), dan domain kapal (virtualisasi zona aman) saat kapal bertemu dengan kapal lainnya. Simulasi yang dilakukan menunjukkan nilai CR kapal yang dapat dijadikan referensi untuk melakukan penghindaran tabrakan.
2. Algoritma penghindaran tabrakan dapat dibuat menggunakan metode *fuzzy inference* dengan parameter jarak (DCPA) dan waktu (TCPA) relatif terhadap kecepatan kapal yang dikombinasikan dengan variasi domain kapal yang terdiri dari tiga bentuk domain, yaitu elips, lingkaran, dan telur. Dari simulasi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa algoritma perhitungan penghindaran tabrakan kapal berbasis pada nilai CR yang paling baik didominasi oleh bentuk domain telur. Namun, bentuk domain elips lebih unggul ketika kedua kapal memiliki ukuran yang berbeda.
3. Pengaruh perubahan sudut kemudi terhadap tingkatan nilai CR. Jika $CR = 0$ maka kemudi tidak akan melakukan perubahan. Jika $0 < CR < 75$ akan penghindaran normal. Dalam penghindaran normal, kemudi kapal mengalami perubahan yang relatif kecil untuk menjaga stabilitas dan menghindari osilasi yang berlebihan. Jika $75 \leq CR \leq 100$, akan ada penghindaran darurat. Dalam penghindaran darurat, kemudi mengalami perubahan yang lebih besar dan lebih sering untuk segera menghindari bahaya. Sehingga kemudi sering mengalami perubahan yang signifikan.

4. Hasil simulasi penghindaran dini tabrakan kapal dapat divisualisasikan dengan perubahan posisi atau *trajectory* kapal, nilai CRI, DCPA, dan TCPA yang merepresentasikan kondisi situasi (aman/bahaya) kapal. Hasil visualisasi simulasi dapat memberikan gambaran situasi kapal saat berada pada posisi pertemuan dengan kapal lainnya.

6.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan sebagai upaya peningkatan untuk algoritma peringatan dini tabrakan kapal dengan metode collision risk index assessment, sebagai berikut:

1. Menambahkan faktor gaya eksternal pada perhitungan prediksi gerak kapal.
2. Meningkatkan keakurasian perhitungan penilaian risiko tabrakan kapal dengan menambahkan variasi kecepatan dan *multi-ship encounter*.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahn, J. H., Rhee, K. P., & You, Y. J. (2012). A study on the collision avoidance of a ship using neural networks and fuzzy logic. *Applied Ocean Research*, 37, 162–173.
- Chin, H. C., & Debnath, A. K. (2009). Modeling perceived collision risk in port water navigation. *Safety Science*, 47(10), 1410–1416.
- Choe, B., & Furukawa, Y. (2018). Development of Track Keeping Algorithm using Fuzzy Inference. *International Ocean and Polar Engineering Conference*.
- Choe, B., & Furukawa, Y. (2019). Automatic track keeping to realize the realistic operation of a ship. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 19(3), 172–182. <https://doi.org/10.5391/IJFIS.2019.19.3.172>
- Coldwell, T. G. (1983). *Marine Traffic Behaviour in Restricted Waters*.
- Fujii, Y., & Tanaka, K. (1971). *NO. 4 Studies in Marine Traffic Engineering*.
- Gan, L., Ye, B., Huang, Z., Xu, Y., Chen, Q., & Shu, Y. (2023). Knowledge graph construction based on ship collision accident reports to improve maritime traffic safety. *Ocean and Coastal Management*, 240.
- Goodwin, E. M. (1975). *A Statistical Study of Ship Domains*.
- Hasegawa, K., Fukuto, J., Miyake, R., & Yamazaki, M. (2012). An Intelligent Ship Handling Simulator With Automatic Collision Avoidance Function of Target Ships.
- He, Y., Jin, Y., Huang, L., Xiong, Y., Chen, P., & Mou, J. (2017). Quantitative analysis of COLREG rules and seamanship for autonomous collision avoidance at open sea. *Ocean Engineering*, 140, 281–291.
- Hermawan, Y. A., Pratama, F. W., Yulianto, T., & Purwanto, D. B. (2023). A Modest Numerical Simulation for Automatic Ship Collision Avoidance System to Support Green and Autonomous Shipping Concept. *International Journal of Offshore and Coastal Engineering*, 7(1), 36–43.
- Huang, D., Liang, T., Hu, S., Loughney, S., & Wang, J. (2023). Characteristics analysis of intercontinental sea accidents using weighted association rule mining: Evidence from the Mediterranean Sea and Black Sea. *Ocean Engineering*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115839>

- Huang, Y., Chen, L., Chen, P., Negenborn, R. R., & van Gelder, P. H. A. J. M. (2020). Ship collision avoidance methods: State-of-the-art. *Safety Science*, *121*, 451–473. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.09.018>
- Kijima, K., & Furukawa, Y. (2003). Automatic Collision Avoidance System Using the Concept of Blocking Area.
- Kobayashi, H., & Endoh, M. (1976). Analysis of Collision Avoiding Action of Ship From Viewpoint of Man Machine System Analysis.
- Lee, H. J., Furukawa, Y., & Park, D. J. (2021). Seafarers' awareness-based domain modelling in restricted areas. *Journal of Navigation*, *74*(5), 1172–1188. <https://doi.org/10.1017/S0373463321000394>
- Li, B., & Pang, F. W. (2013). An approach of vessel collision risk assessment based on the D-S evidence theory. *Ocean Engineering*, *74*, 16–21.
- Lisowski, J. (2002). Game Control of Moving Objects.
- Liu, Z., Zhang, B., Zhang, M., Wang, H., & Fu, X. (2023). A quantitative method for the analysis of ship collision risk using AIS data. *Ocean Engineering*, *272*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113906>
- Marino, M., Cavallaro, L., Castro, E., Musumeci, R. E., Martignoni, M., Roman, F., & Foti, E. (2023). New Frontiers in the Risk Assessment of Ship Collision. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113999>
- Motora, S., Fujino, M., Sugiura, M., & Sugita, M. (1969). Equivalent Added Mass of Ships in Collisions.
- Ota, D., Masuyama, T., Furukawa, Y., & Ibaragi, H. (2016). Development of Automatic Collision Avoidance System for Ships Using Reinforcement Learning.
- Park, J., & Kim, J. (2017). Predictive Evaluation of Ship Collision Risk Using the Concept of Probability Flow. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, *42*(4), 836–845. <https://doi.org/10.1109/JOE.2016.2614870>
- Pedersen, T. A., Glomsrud, J. A., & Haugen, O. I. (2019). Towards Simulation-based Verification of Autonomous Navigation Systems. *International Seminar on Safety and Security of Autonomous Vessels* (Vol. 17).
- Perera, L. P., Carvalho, J. P., & Guedes Soares, C. (2012). Intelligent ocean navigation and fuzzy-Bayesian decision/action formulation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, *37*(2), 204–219. <https://doi.org/10.1109/JOE.2012.2184949>

- Perera, L. P., & Guedes Soares, C. (2015). Collision risk detection and quantification in ship navigation with integrated bridge systems. *Ocean Engineering*, *109*, 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.016>
- Pyo Rhee, K., & Lee, H.-J. (2001). Development of collision avoidance system by using expert system and search algorithm. Dalam *Korea Int. Shipbuild. Progr* (Vol. 48, Nomor 3). <https://www.researchgate.net/publication/266296182>
- Ren, Y., Mou, J., Yan, Q., & Zhang, F. (2011). Study on Assessing Dynamic Risk of Ship Collision.
- Retno Andani, S. (2013). Fuzzy Mamdani Dalam Menentukantingkatkeberhasilan Dosen Mengajar.
- Saputra, A. D. (2021). Studi Kecelakaan Kapal di Indonesia dari Tahun 2003 - 2019 Berdasarkan Data Investigasi Komite Nasional Keselamatan Transportasi.
- Sawada, R., Sato, K., & Minami, M. (2024). Framework of safety evaluation and scenarios for automatic collision avoidance algorithm. *Ocean Engineering*, *300*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117506>
- Shah, B. C., Švec, P., Bertaska, I. R., Sinisterra, A. J., Klinger, W., von Ellenrieder, K., Dhanak, M., & Gupta, S. K. (2016). Resolution-adaptive risk-aware trajectory planning for surface vehicles operating in congested civilian traffic. *Autonomous Robots*, *40*(7), 1139–1163. <https://doi.org/10.1007/s10514-015-9529-x>
- Shi, J., Liu, Z., Feng, Y., Wang, X., Zhu, H., Yang, Z., Wang, J., & Wang, H. (2024). Evolutionary model and risk analysis of ship collision accidents based on complex networks and DEMATEL. *Ocean Engineering*, *305*.
- Shi, K., Weng, J., Fan, S., Yang, Z., & Ding, H. (2023). Exploring seafarers' emotional responses to emergencies: An empirical study using a shiphandling simulator. *Ocean and Coastal Management*, *243*.
- Song, J., Kayano, J., & Shoji, R. (2023). Modeling human's collision avoidance direction in an encounter situation using an ensemble classifier. *Ocean Engineering*, *271*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113738>
- Sun, X., Wang, G., Fan, Y., & Mu, D. (2023). Collision avoidance control for unmanned surface vehicle with COLREGs compliance. *Ocean Engineering*, *267*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113263>

- Szlapczynski, R., & Szlapczynska, J. (2017). Review of ship safety domains: Models and applications. *Ocean Engineering*, *145*, 277–289.
- Tzafestas, S. G. (2014). Mobile Robot Control IV. *Introduction to Mobile Robot Control* (hlm. 269–317). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-417049-0.00008-0>
- Weng, J., Du, J., Shi, K., & Liao, S. (2023). Effects of ship domain shapes on ship collision risk estimates considering collision frequency and severity. *Ocean Engineering*, *283*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115070>
- Woerner, K. L., Benjaminl, M. R., Novitzky, M., & Leonard, J. J. (2016). *OCEANS 2016 MTS IEEE Monterey*. IEEE.
- Yasukawa, H., & Yoshimura, Y. (2015). Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *Journal of Marine Science and Technology (Japan)*, *20*(1), 37–52. <https://doi.org/10.1007/s00773-014-0293-y>
- Zhang, K., Huang, L., He, Y., Wang, B., Chen, J., Tian, Y., & Zhao, X. (2023). A real-time multi-ship collision avoidance decision-making system for autonomous ships considering ship motion uncertainty. *Ocean Engineering*, *278*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114205>

BIODATA PENULIS



Fernanda Wahyu Pratama, itulah nama lengkap penulis. Dilahirkan di Trenggalek pada 10 Januari 1999 silam, Penulis merupakan anak pertama dalam keluarga. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar pada TK Aisyah, kemudian melanjutkan ke SD Muhammadiyah 4 Surabaya, SMPN 1 Surabaya dan SMAN 5 Surabaya. Setelah lulus SMA, penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS dan melanjutkan pendidikan program magister Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2022 silam.

Di Departemen Teknik Perkapalan Penulis mengambil Bidang Studi Teknologi Kapal Digital. Selama masa studi di ITS, selain kuliah Penulis juga pernah menjadi Kepala Divisi Biro Media dan Informasi Himatekpal 2019/2020 serta Kepala Departemen UKM Kendo ITS 2019/2020. Pada Pendidikan magister penulis berkesempatan untuk menjadi asisten dosen dalam beberapa mata kuliah dan mengikuti penelitian tesis megister dan beberapa penelitian yang dikerjakan oleh dosen Teknik Perkapalan ITS

Email: 6018221001@student.its.ac.id/fernanda.wahyu.p@gmail.com