

# LAPORAN HASIL PENELITIAN

## Parameter estimation of Nomoto model of SIGMA Extended War Ship Prototype: Maneuvering Experiment Case



**umsurabaya**  
Morality, Intellectuality, and Entrepreneurship  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURABAYA

Disusun Oleh:

**RIDHO AKBAR, S.ST., MT**

**PONIMAN, ST., MT.**

**AKMAL MUSA**

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURABAYA  
2019**

## PENGESAHAN LAPORAN PENELITIAN

---

1. Judul Penelitian	: Parameter estimation of Nomoto model of SIGMA Extended War Ship Prototype: Maneuvering Experiment Case
---------------------	--

---

2. Jenis Penelitian	: Group
---------------------	---------

---

3. Ketua Penelitian	
a. Nama lengkap dengan gelar	: Ridho Akbar, S.ST., MT
b. NIP dan Golongan	: 0705058906 / III b
c. Pangkat/Jabatan	: -
d. Jurusan/Prodi	: Teknik Industri
e. Fakultas	: Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surabaya.

---

4. Anggota Penelitian	
a. Nama lengkap dengan gelar	: Poniman, S.ST., MT
b. NIP dan Golongan	: 0718038204
c. Pangkat/Jabatan	: -
d. Jurusan/Prodi	: Teknik Industri
e. Fakultas	: Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surabaya.

---

3. Anggota 1 (Mahasiswa)	
a. Nama lengkap	: Akmal Musa
b. NIM	: 20191336010
c. Jurusan	: Teknik Industri

---

4. Jumlah Tim Peneliti	: 2 (dua) orang
------------------------	-----------------

---

5. Lokasi Penelitian	: Surabaya
----------------------	------------

---

6. Jangka Waktu Penelitian	: 6 (Enam) bulan
----------------------------	------------------

---

7. Biaya yang diperlukan	: Rp. 12.500.000 (Dua Belas Juta Lima Ratus Ribu Rupiah)
--------------------------	--

---

Surabaya, 7 Desember 2019

Mengetahui,  
Ketua LPPM UMSurabaya

Kepala Proyek Penelitian



Dr. Dra. Sujinah, M. Pd.

Ridho Akbar, S.ST., MT

## **KATA PENGANTAR**

Segala puji hanya milik Allah, dzat Yang Maha Mengetahui segala sesuatuyang tidak pernah diketahui oleh manusia. Kami harus bersimpuh menghaturkan syukur hanya karena pertolongan dan karunia-Nya laporan hasil penelitian kelompok yang berjudul “Parameter estimation of Nomoto model of SIGMA Extended War Ship Prototype: Maneuvering Experiment Case” dapat diselesaikan dengan baik.

Peneliti menyadari bahwa penyusunan laporan penelitian ini tidak mungkin dapat terselesaikan dengan baik tanpa bantuan berbagai pihak. Untuk itu sudah sepantasnya kami mengucapkan terima kasih dan penghargaan setinggi- tingginya kepada berbagai pihak yang telah membantu terselesaikannya laporan penelitian ini.

Terakhir peneliti menyadari bahwa laporan penelitian ini jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu sumbangsih kritik dan saran dari pembaca selalu kami nantikan demi perbaikan laporan penelitian ini. Meskipun banyak kelemahan, tetapi kami berharap laporan hasil penelitian ini dapat bermanfaat.

Surabaya, 7 Desember 2019

Tim Peneliti

## **ABSTRAK**

### **Parameter estimation of Nomoto model of SIGMA Extended War Ship Prototype: Maneuvering Experiment Case**

**Disusun oleh:**

**Ridho Akbar, S.ST., MT**

**Akmal Musa**

Kapal perang kelas SIGMA extended adalah kapal perang pada tahap desain oleh tim konsorsium KNRT (Kementrian Negara Riset dan Teknologi) 2012. Kapal tersebut dirancang berdasarkan kapal perang pendahulunya yaitu kelas Ship Integrated Geometric Modularity Approach (SIGMA). Penelitian ini difokuskan pada evaluasi kriteria dan memperoleh parameter kapal perang kelas SIGMA extended skala 3 meter berbasis eksperimen. Kapal prototipe ini dilengkapi oleh perangkat seperti pengendali, Global Positioning Sistem (GPS), IMU (Inertial Measurement Unit), wireless Local Area Network (LAN), speed log, pengkondisi sinyal, sistem propulsi propeller dan penggerak rudder. Seluruh komponen instrumen terintegrasi secara serial ke komputer client yang berperan sebagai pengendali utama kapal. komputer client terintegrasi dengan komputer server yang berada di darat melalui sistem komunikasi wireless Virtual Private Network (VPN). Pengendali utama ditanamkan algoritma turning circle dan zigzag sesuai aturan International Maritime Organization (IMO). Performansi pengujian turning circle 35 derajat diperoleh jarak advance, transfer dan tactical diameter sebesar 3,3 Lpp, 1,8 Lpp dan 3,3 Lpp. Performansi pengujian zig-zag 10 derajat diperoleh overshoot pertama dan overshoot kedua sebesar 6,81 derajat dan 6,88 derajat. Performansi pengujian zig-zag 20 derajat diperoleh overshoot pertama sebesar 12,6 derajat. Hasil pengujian telah sesuai dengan standar manuver yang diatur oleh IMO. Parameter model dinamika Nomoto yang dihasilkan antara lain K sebesar 0,014, T1 sebesar 0,052, T2 sebesar 0,56 dan T3 sebesar -14,286.

**Kata kunci :** Kapal perang, SIGMA extended, IMU, GPS, LAN, turning circle, zig-zag

## DAFTAR ISI

<b>PENGESAHAN LAPORAN PENELITIAN .....</b>	<b>ii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>2</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>3</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>6</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>8</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>9</b>
1.1 Latar Belakang .....	9
1.2 Rumusan Masalah .....	11
1.3 Tujuan Penelitian .....	11
1.4 Manfaat Penelitian .....	11
<b>BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....</b>	<b>12</b>
2.1 Kajian Pustaka .....	12
2.2 Ukuran Pokok Kapal .....	13
2.2.1 Ukuran Memanjang / Membujur .....	13
2.2.2 Ukuran Melintang / Melebar .....	13
2.2.3 Ukuran Tegak (Vertikal).....	14
2.3 Variabel Gerak Kapal .....	14
2.4 Model Dinamika Nomoto .....	15
2.5 Rudder .....	17
2.6 Propeller .....	18
2.7.1 Turning Circle .....	20
2.7.2 Zig-Zag .....	21
2.8 Froude Number .....	23

2.9	Formula Vincenty.....	23
2.10	Software Matlab .....	25
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>		<b>28</b>
3.1	Kapal SIGMA Extended Skala 3 Meter.....	29
3.2	Perancangan Perangkat Keras (Hardware).....	30
3.2.1	Sistem Daya .....	31
3.2.2	Sensor dan Aktuator.....	32
3.2.3	Sistem Pengendali.....	37
3.2.4	Sistem Komunikasi.....	38
3.3	Perangkat Lunak (Software).....	39
3.3.1	Software Berbasis Matlab GUI pada Komputer Client .....	39
3.3.2	Software Berbasis Matlab GUI pada Komputer Server .....	40
3.3.3	Algoritma Zig-Zag Otomatis Berbasis Matlab pada Komputer Client .	41
3.3.4	Algoritma Turning Circle Otomatis Berbasis Matlab pada Komputer Client	43
3.3.5	Algoritma Program Mikrokontroler Slave 1 .....	44
3.3.6	Algoritma Program Mikrokontroler Slave 2 .....	45
3.3.7	Algoritma Program Mikrokontroler Slave 3 .....	46
3.3.8	Algoritma Program Mikrokontroler Master .....	47
3.3.9	Algoritma Software GUI Berbasis Matlab pada Komputer Client.....	48
3.3.10	Aplikasi Formula Vincenty Berbasis Matlab GUI .....	49
3.4	Skenario Pengujian Kapal.....	50
3.5	Perhitungan Parameter Dinamika Kapal Perang SIGMA Extended Skala 3 Meter Secara Nomoto .....	52
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>56</b>
4.1	Hasil Eksperimen Pengujian Turning Circle pada Kapal Perang Kelas SIGMA Extended Skala 3 Meter .....	56

4.1.1 Hasil Eksperimen Pengujian Turning Circle 35 Derajat .....	56
4.1.2 Hasil Eksperimen Pengujian Turning Circle 20 Derajat .....	58
4.1.3 Hasil Eksperimen Pengujian Turning Circle 10 Derajat .....	60
4.2 Hasil Eksperimen Pengujian Zig-Zag pada Kapal Perang Kelas SIGMA Extended Skala 3 Meter .....	61
4.2.1 Hasil Eksperimen Pengujian Zig-Zag 10 Derajat .....	62
4.2.2 Hasil Eksperimen Pengujian Zig-Zag 20 Derajat .....	63
4.3 Evaluasi Kriteria Kapal Perang Kelas SIGMA Extended Skala 3 Meter	63
4.3.1 Evaluasi Kriteria Kapal Pada Turning Circle 35 Derajat .....	63
4.3.2 Evaluasi Kriteria Kapal Pada Turning Circle 20 Derajat .....	65
4.3.3 Evaluasi Kriteria Kapal Pada Turning Circle 10 Derajat .....	66
4.3.4 Evaluasi Kriteria Kapal pada Zig-Zag 10 Derajat .....	67
4.3.5 Evaluasi Kriteria Kapal Pada Zig-Zag 20 Derajat .....	68
4.4 Hasil Evaluasi Kriteria Pengujian Manuver Kapal Perang Kelas SIGMA Extended Skala 3 Meter .....	69
4.5 Hasil Perhitungan Parameter Nomoto Kapal Perang Kelas SIGMA Extended Skala 3 Meter .....	70
4.6 Validasi Model Dinamika Kapal Perang Kelas SIGMA secara Open Loop	71
<b>BAB V KESIMPULAN .....</b>	<b>73</b>
5.1 Kesimpulan .....	73
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>74</b>



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1</b>	Standard notasi 6 derajat kebebasan (DOF) pada kapal (SNAME,1950)	15
<b>Gambar 2</b>	Sistem Kemudi Van Amorengen (Fossen, 1994)	18
<b>Gambar 3</b>	Diagram blok kendali rudder (Fossen, 1994)	18
<b>Gambar 4</b>	Prosedur turning circle (Fossen, 2011)	20
<b>Gambar 5</b>	Pengujian zig-zag 20 derajat pada kapal kontainer (Fossen, 2011)	22
<b>Gambar 6</b>	Pengujian zig-zag 10 derajat pada kapal perang (Fossen, 2011)	22
<b>Gambar 7</b>	Sistem koordinat WGS 84 (geographicsystem.blogspot.com)	24
<b>Gambar 8</b>	Software Matlab 2013b ( <a href="http://www.mathworks.com/products/matlab/">http://www.mathworks.com/products/matlab/</a> )	25
<b>Gambar 9</b>	Menu editor Matlab	26
<b>Gambar 10</b>	Diagram alir penelitian	28
<b>Gambar 11</b>	Linesplan Kapal SIGMA extended	29
<b>Gambar 12</b>	Kapal SIGMA extended skala 3 meter	30
<b>Gambar 13</b>	Perancangan hardware instrumentasi	31
<b>Gambar 14</b>	Baterai dan charger	32
<b>Gambar 15</b>	(a) Modul GPS ublox (b) Antena GPS	33
<b>Gambar 16</b>	Sensor IMU (Inertial Measurement Unit)	34
<b>Gambar 17</b>	Pemasangan speed log pada prototipe kapal SIGMA extended	35
<b>Gambar 18</b>	(a) Sensor sonar bagian kiri kapal (b) Sensor sonar bagian depan kapal (c) Sensor sonar bagian kanan kapal	36
<b>Gambar 19</b>	Motor servo sebagai penggerak rudder	36
<b>Gambar 20</b>	Motor brushless sebagai penggerak propeller	37
<b>Gambar 21</b>	Software berbasis matlab GUI pada komputer client	40
<b>Gambar 22</b>	Software berbasis matlab GUI pada komputer server	41
<b>Gambar 23</b>	(a) Alogaritma zig-zag menurut standar IMO (b) Alogaritma zig-zag	42
<b>Gambar 24</b>	(a) Alogaritma turning circle menurut standar IMO (b) Alogaritma turning circle kapal secara otomatis pada software matlab GUI	44
<b>Gambar 25</b>	Algoritma program pada mikrokontroler slave 1	45
<b>Gambar 26</b>	Algoritma program pada mikrokontroler slave 2	46
<b>Gambar 27</b>	Algoritma program pada mikrokontroler slave 3	47
<b>Gambar 28</b>	Algoritma program pada mikrokontroler master	48

<b>Gambar 29</b> Algoritma eksekusi program pada matlab GUI komputer client.....	49
<b>Gambar 30</b> Formula vincenty diaplikasikan pada matlab GUI .....	49
<b>Gambar 31</b> Lokasi pengujian kapal di kolam Graha Institut Teknologi Sepuluh Nopember – Surabaya.....	50
<b>Gambar 32</b> Skenario pengujian kapal.....	51
<b>Gambar 33</b> Kecepatan kapal SIGMA extended asli dan skala model.....	52
<b>Gambar 34</b> Pemilihan data sample heading pada data pengujian turning circle 20 derajat.....	53
<b>Gambar 35</b> Data rudder dan heading pengujian turning circle 35 derajat .....	57
<b>Gambar 36</b> Data koordinat GPS pengujian turning circle 35 derajat.....	58
<b>Gambar 37</b> Data rudder dan heading pengujian turning circle 20 derajat .....	59
<b>Gambar 38</b> Data koordinat GPS pengujian turning circle 20 derajat.....	59
<b>Gambar 39</b> Data rudder dan heading pada pengujian turning circle 10 derajat .....	60
<b>Gambar 40</b> Data koordinat GPS pengujian turning circle 10 derajat.....	61
<b>Gambar 41</b> Data rudder dan heading pengujian zig-zag 10 derajat.....	62
<b>Gambar 42</b> Data rudder dan heading pengujian zig-zag 20 derajat.....	63
<b>Gambar 43</b> Evaluasi kriteria pengujian turning circle 35 derajat .....	64
<b>Gambar 44</b> Evaluasi kriteria pengujian turning circle 20 derajat .....	66
<b>Gambar 45</b> Evaluasi kriteria pengujian turning circle 10 derajat .....	67
<b>Gambar 46</b> Evaluasi kriteria pengujian zig-zag 10 derajat.....	68
<b>Gambar 47</b> Evaluasi kriteria pengujian zig-zag 20 derajat.....	69
<b>Gambar 48</b> Respon heading pada saat pengujian turning circle dengan masukan sudut rudder 20 derajat.....	71
<b>Gambar 49</b> Respon heading pada saat pengujian turning circle dengan masukan sudut rudder -20 derajat.....	72

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1</b> Deskripsi notasi dan derajat kebebasan (Fossen, 2011).....	15
<b>Tabel 2</b> Standar manuverabilitas kapal oleh IMO (Resolusi MSC 137 (76) 2002)...	19
<b>Tabel 3</b> Spesifikasi SIGMA extended dan SIGMA extended skala 3 meter.....	29
<b>Tabel 4</b> Sistem perangkat lunak (software).....	39
<b>Tabel 5</b> Data sample pengujian turning circle 20 derajat .....	53
<b>Tabel 6</b> Kestabilan kapal berdasarkan evaluasi kriteria sea trial IMO .....	69
<b>Tabel 7</b> Kestabilan kapal berdasar nilai parameter model Nomoto .....	70

## **BAB I PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Maneuverability kapal adalah kemampuan kapal untuk berubah arah (berbelok atau berputar) pada perairan terbatas atau terbuka. Kapal dikatakan mempunyai kualitas yang baik apabila bermanuver dengan baik pula. Kapal yang mempunyai kemampuan manuver yang baik akan bisa terhindar dari kecelakaan atau tabrakan dengan benda atau objek yang ada di sekitarnya, sehingga menjamin kelancaran, keselamatan kapal baik dalam pengoperasian maupun pelayarannya, terutama di area terbatas atau di dermaga (Li, 2005).

Kapal dikatakan bermanuver dengan baik apabila memenuhi beberapa kriteria yang telah ditentukan oleh International Maritim Organization (IMO) dengan acuan panjang kapal. IMO telah membuat sebuah aturan mengenai kriteria – kriteria manuver yang wajib dimiliki oleh setiap kapal melalui beberapa macam pengujian. Kriteria - kriteria tersebut diantaranya adalah radius yang dibutuhkan kapal untuk berputar, waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan satu putaran dan kestabilan kapal pada saat melakukan manuver (IMO Resolusi MSC 137 (76), 2002).

Kapal perang kelas SIGMA extended merupakan pengembangan desain oleh tim Konsorsium Kementrian Negara Riset dan Teknologi (KNRT) pada tahun 2012. Kapal tersebut merupakan edisi pengembangan dimensi, keandalan berperang dan kemampuan manuver dari kapal sebelumnya yaitu kapal perang kelas Ship Integrated Geometric Modularity Approach (SIGMA) (KNRT, 2012). Prototipe kapal perang kelas SIGMA extended dengan skala 1 : 35 dari ukuran kapal aslinya telah dirancang oleh LHI (Laboratorium Hidrodinamika Indonesia - Surabaya).

Pemodelan manuever diperlukan baik dalam penelitian keandalan manuever, merancang sistem kontrol, dan handling simulator kapal (Shi, 2006). Inti dari pemodelan kapal yaitu melakukan estimasi parameter dari model manuever kapal tersebut (Shi, 2009), karena banyak parameter tidak bisa diukur secara fisik dengan akurasi yang baik, terutama dalam real time (Blanchard, 2007).

Sistem identifikasi diperlukan dalam meningkatkan akurasi model manuever pada perancangan kapal. Teori identifikasi itu sendiri merupakan seni dan ilmu membangun model matematika dari sistem dinamis berdasarkan data yang diamati pada suatu sistem (Ljung, 1999). Hasil identifikasi dapat meningkatkan dan memvalidasi model yang dilakukan baik secara numerik

maupun berbasis eksperimen. Dengan demikian, peran sistem identifikasi pada maneuver kapal merupakan hal yang penting pada tahap evaluasi desain kapal menurut International Towing Tank Conference (ITTC, 2005).

Dalam kurun terakhir ini terdapat permintaan peningkatan akurasi dan keandalan yang baik dalam pengendali dinamika gerak kapal. Beberapa variable yang dikendalikan berupa kecepatan dan arah gerak kapal (Fossen, 2009). Manuver kapal sangat kompleks terdiri dari 6 Degree of Freedom (DOF) atau gerak kapal terdiri dari gerak translasi (surge, sway, heave) dan gerak rotasi (roll, pitch, yaw) sesuai yang dimuat oleh Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME, 1950). Manuver kapal merupakan dinamika nonlinier. Beberapa model dinamika kapal nonlinier menggunakan dua sampai enam derajat kebebasan tersebut. Nomoto melakukan pendekatan dengan cara linierisasi model Davidson dan Schiff 1946, hasil linierisasi berupa satu derajat kebebasan yaitu sudut yaw. Model dinamika Nomoto menjelaskan hubungan sudut rudder dengan sudut yaw atau heading kapal. Model dinamika Nomoto orde dua terdiri parameter  $K$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  dan  $T_3$  (Nomoto, 1957).

Penelitian ini difokuskan untuk identifikasi atau evaluasi kriteria dan memperoleh parameter model dinamika kapal perang kelas SIGMA extended skala 3-meter secara Nomoto. Kapal prototipe ini dilengkapi oleh perangkat seperti pengendali, Global Positioning Sistem (GPS), Inertial Measurement Unit (IMU), wireless Local Area Network (LAN), speed log, pengkondisi sinyal, sistem penggerak propeller dan penggerak rudder (Im, 2010). Seluruh komponen instrumen terhubung secara serial ke komputer client yang berperan sebagai pengendali utama kapal. komputer client terintegrasi dengan komputer server yang berada di darat melalui sistem komunikasi wireless VPN (Virtual Private Network). Software yang digunakan pada komputer client dan komputer server yaitu matlab R2013b berbasis GUI (Guide User Interface), terdiri dari sistem monitor dan kontrol.

Pengujian yang akan dilakukan yaitu turning circle dengan sudut 35 derajat, sedangkan zig-zag dengan sudut 10 dan 20 derajat. Evaluasi kriteria kapal meliputi jarak advance, transfer dan tactical diameter untuk masing – masing pengujian turning circle, dan sudut overshoot pertama untuk masing – masing pengujian zig-zag dan sudut overshoot kedua hanya untuk pengujian zig-zag 20 derajat (IMO Resolusi MSC 137 (76) 2002). Sistem monitor pada komputer server menampilkan visualisasi posisi, sudut rudder, heading, dan kecepatan kapal. Sistem control terdiri dari kontrol

kecepatan dan arah. Pengendali utama ditanamkan algoritma turning circle dan zig-zag sesuai aturan IMO, sehingga memungkinkan dilakukannya pengujian secara otomatis.

## **1.2 Rumusan Masalah**

1. Bagaimana memperoleh nilai parameter model dinamika secara Nomoto pada prototipe kapal SIGMA extended.
2. Bagaimana mengevaluasi kriteria kapal perang kelas SIGMA extended skala 3 meter melalui pengujian turning circle dan zig-zag secara eksperimen.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi kriteria dan mendapatkan parameter model dinamika secara Nomoto pada kapal perang kelas SIGMA extended skala 3 meter.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian ini adalah hasil evaluasi yang telah dilakukan melalui pengujian secara eksperimen maupun parameter model dapat memberikan informasi apakah kapal perang kelas SIGMA extended skala 3-meter sesuai dengan kriteria standar yang diisyaratkan oleh aturan IMO, hal ini dapat mengindikasikan kemampuan manuver perang kelas SIGMA extended ukuran sesungguhnya.

## BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

### 2.1 Kajian Pustaka

Penelitian berbasis eksperimen pada kapal skala sebelumnya pernah dilakukan oleh N. Im & J.H. Seo (2010). Model kapal berupa skala 1 : 100 dari ukuran kapal sebenarnya. Model kapal tersebut difokuskan pada perancangan sistem instrumentasi seperti personal komputer, aktuator dan sensor antara lain GPS dan IMU. Pengujian kapal tersebut dilakukan untuk mengetahui performa kapal antara lain uji zig-zag dan turning circle. Kapal tersebut menghasilkan performa yang cukup bagus sehingga dapat digunakan pada penelitian selanjutnya yaitu kontrol cerdas pada kapal.

Penelitian yang dilakukan oleh C. Shi, D. Zhao, J. Peng, & C. Shen (2009) menjelaskan tentang cara mengidentifikasi model nonlinier manuver kapal menggunakan Extended Kalman Filter (EKF) pada model nonlinier manuver kapal. Pemodelan gerak horizontal kapal dilakukan dengan penurunan hukum II Newton. Dilakukan penjabaran deret Taylor serta perhitungan parameter kapal  $a_i$ ,  $b_i$ , dan  $c_i$ . Setelah itu dilakukan pengujian kapal tersebut dengan tes turning-cycle dan zig-zag. Hasil error yang diperoleh pada tes turning-cycle untuk advance sebesar 1,9%; transfer sebesar 5%; dan diameter maneuver sebesar - 0,2%. Penelitian yang dilakukan oleh L. Moreira, & C. Guedes Soares (2003) tentang memprediksi model dinamis kapal menggunakan recursive neural network (RNN). Model dinamis kapal diperoleh dari menurunkan gerak kinematik dan dinamis menjadi model nonlinier. Sebagai inputan NN antarlain rudder, speed, sway dan yaw, sedangkan outputan NN yaitu sway dan yaw. Hasil yang diperoleh dari pengujian turning-cycle dari penelitian ini yaitu NN mempunyai akurasi yang cukup baik untuk simulasi maneuver dengan error sebesar 6%.

Penelitian menggunakan least square pada kapal dilakukan oleh Ye Baoyu (2011) yaitu membandingkan hasil estimasi model matematis dengan hasil eksperimen menggunakan least square pada penentuan posisi kapal. Hasil yang diperoleh dari pengujian penentuan posisi menggunakan least square dekat dengan perhitungan.

## **2.2 Ukuran Pokok Kapal**

Ukuran pokok kapal adalah istilah yang sering digunakan untuk menunjukkan besar atau kecil suatu kapal. Ukuran pokok kapal terdiri dari ukuran memanjang atau membujur, ukuran melintang atau melebar dan ukuran tegak atau vertical.

### **2.2.1 Ukuran Memanjang / Membujur**

#### **1. Panjang seluruhnya (Length Over All = LOA)**

Panjang seluruhnya ialah jarak membujur sebuah kapal dari titik terdepan lenggi haluan kapal sampai ke titik terbelakang buritan kapal, diukur sejajar lunas. Jarak ini merupakan jarak terpanjang dari sebuah kapal yang gunanya sangat penting untuk memperkirakan panjang dermaga yang digunakan sewaktu kapal sandar.

#### **2. Panjang antara garis tegak (Length Between Perpendiculars = LBP)**

Panjang antara garis tegak ialah panjang kapal dihitung dari garis tegak depan sampai ke garis tegak belakang. Garis tegak depan (Forward perpendicular) ialah sebuah garis khayalan yang memotong tegak lurus garis muat perancang kapal dengan linggi depan. Garis tegak belakang (After perpendicular) ialah sebuah garis khayalan yang biasanya terletak pada tengah cagak kemudi atau bagian belakang dari poros kemudi. Panjang antara garis tegak diukur sejajar lunas dan merupakan panjang lambung bebas (freeboard length).

#### **3. Panjang sepanjang garis air/muat (Length on the Load Water Line = LLWL)**

Panjang sepanjang garis air/muat ialah panjang kapal yang diukur dari perpotongan garis air dengan linggi haluan sampai ke titik potong garis air dengan tinggi belakang diukur sejajar lunas.

#### **4. Panjang terdaftar (Registered length)**

Panjang seperti yang tertera dalam sertifikat kapal itu, yaitu dihitung dari ujung terdepan geladak jalan terus teratas sampai garis tegak belakang diukur sejajar lunas.

### **2.2.2 Ukuran Melintang / Melebar**

#### **1. Lebar terbesar atau lebar ekstrim (Extreme breadth)**

Merupakan jarak melintang dari suatu titik terjauh di sebelah kiri sampai ke titik terjauh di sebelah kanan badan kapal diukur pada lebar terlebar (tepi pelat kulit sebelah luar badan kapal).

#### **2. Lebar dalam (Moulded breadth)**



Lebar / jarak melintang kapal dihitung dari tepi dalam pelat kulit kanan sampai tepi dalam pelat kulit kiri, diukur pada bagian kapal yang terlebar.

### 3. Lebar terdaftar (Registered breadth)

Lebar seperti yang tertera di dalam sertifikat kapal itu. Panjangnya sama dengan lebar dalam (Moulded breadth).

## 2.2.3 Ukuran Tegak (Vertikal)

### 1. Sarat kapal

Jarak tegak yang diukur dari titik terendah badan kapal / Lunas kapal sampai garis air.

### 2. Lambung bebas (Free board)

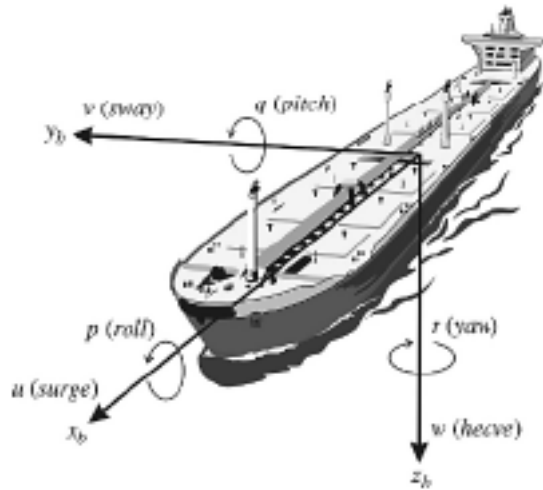
Jarak tegak dari garis air sampai geladak lambung bebas atau garis deck (free board deck or deck line).

### 3. Dalam (depth)

Jarak tegak yang diukur dari titik terendah badan kapal / lunas kapal sampai ke titik di geladak lambung bebas tersebut. Jadi dalam (depth) itu jumlah sarat kapal dalam lambung bebas.

## 2.3 Variabel Gerak Kapal

Model dinamik kapal dirumuskan sebagai suatu rigid-body dengan 6 derajat kebebasan. Kapal ini terdiri dari 3 derajat kebebasan terhadap sumbu x,y,z dan 3 derajat kebebasan lainnya mengacu kepada arah rotasi dan orientasi dari kapal. Keenam derajat kebebasan dari kapal biasa disebut sebagai : Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw. Derajat kebebasan ini juga biasa disebut sebagai komponen gerak. Deskripsi singkat mengenai surge merupakan gerak maju mundur, sway merupakan gerak ke samping kiri kanan, heave merupakan gerak ke arah atas bawah. Sudut yaw merupakan gerak memutar ke samping kiri kanan, roll gerak sisi kiri kanan dan pitch merupakan gerak mengangguk.



**Gambar 1** Standard notasi 6 derajat kebebasan (DOF) pada kapal (SNAME, 1950)

Tabel 1 menunjukkan deskripsi setiap derajat kebebasan dan nomenklatur yang sesuai digunakan untuk menjelaskan forces dan moments kapal. Berikut ini adalah notasi standar yang direkomendasikan dalam SNAME (1950).

**Tabel 1** Deskripsi notasi dan derajat kebebasan (Fossen, 2011)

DOF	Translation	Forces	Linear Velocity	Position
1	surge	X	u	x
2	sway	Y	v	y
3	heave	Z	w	z
DOF	Rotations	Moments	Angular Velocity	Angles
4	roll	K	p	$\phi$
5	pitch	M	q	$\theta$
6	yaw	N	r	$\psi$

## 2.4 Model Dinamika Nomoto

Persamaan (2.1) merupakan formulasi koordinat kapal body fixed  $O_b$  (Gambar 1).

$$M\dot{v} + N(u_0)v = \tau_\delta \quad (2.1)$$

Dimana  $v = [v \ r]^T$  merupakan vektor kecepatan,  $\tau_\delta$  merupakan gaya hidrodinamika yang ditimbulkan oleh sistem propulsi. Vektor gaya eksternal ditimbulkan oleh sistem propulsi, angin dan gelombang. Pengujian secara eksperimen dilakukan di air yang tenang, hanya terdapat gaya eksternal yang ditimbulkan dari sistem propulsi. Matrix yang menyusun persamaan (2.1) didefinisikan seperti dibawah ini. Total massa matrix M tersusun oleh rigid body dan ditambahkan massa :

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_v & mx_G - Y_r \\ mx_G & I_z - N_r \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Dimana derivatif hidrodinamika sesuai notasi SNAME (SNAME, 1950). Pada matrix  $N(u_0)$  terdiri dari linier damping, coriolis dan centripetal.

$$N(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r \\ N_v & mx_G u_0 - N_r \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Sesuai model state space yaitu :

$$\dot{x} = Ax + b_1 \delta \quad (2.4)$$

Menjadi  $x = v = [v \ r]^T$  dan matrix :

$$A = -M^{-1}N, b_1 = M^{-1}b \quad (2.5)$$

Dimana elemen  $m_{ij}, n_{ij}$  dan  $b_i$  ( $i=1,2$  and  $j=1,2$ ) didefinisikan persamaan (2.2) dan (2.3).

Dua representasi alternatif dari model sebelumnya (Davidson, 1946), yang diusulkan oleh Nomoto (1957). Model ini diperoleh dengan mengeliminasi kecepatan sway  $v$  dari persamaan (2.1) untuk mendapatkan transfer function Nomoto, antara sudut heading  $\psi$  dan sudut rudder  $\delta$ , yaitu :

$$\frac{\psi}{\delta}(s) = \frac{K(1+T_3s)}{s(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad (2.6)$$

Parameter dari transfer function (2.6) dengan derivatif hidrodinamik :

$$\begin{aligned}
T_1 T_2 &= \frac{\det(M)}{\det(N)} \\
T_1 + T_2 &= \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{\det(N)} \\
K &= \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det(N)} \\
KT_3 &= \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b_2}{\det(N)}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

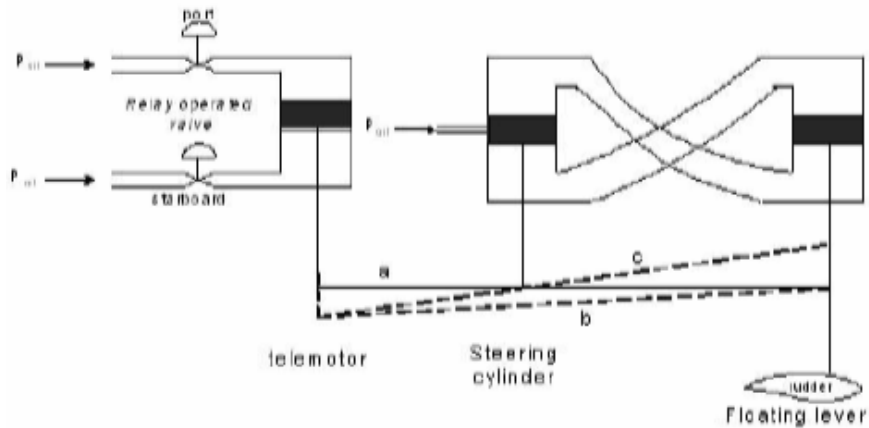
Model tersebut pada umumnya digunakan untuk menganalisis kestabilan kapal dan desain kontrol sudut yaw (heading). Usul lainnya (Nomoto, 1957) adalah pendekatan orde satu dengan konstanta waktu  $T = T_1 + T_2 + T_3$ :

$$\frac{\psi}{\delta}(s) = \frac{K}{(1+Ts)} \tag{2.8}$$

## 2.5 Rudder

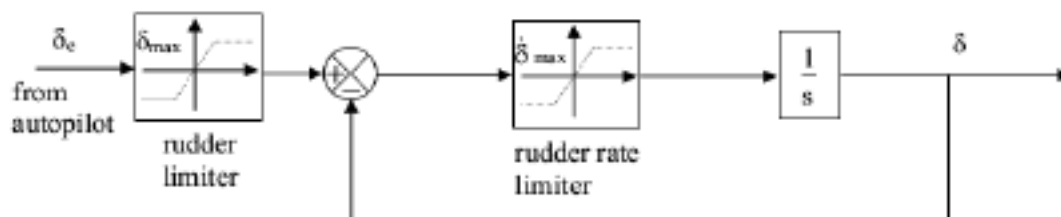
Rudder merupakan sebuah aktuator pada kapal dimana dalam pengoperasiannya bekerja berdasarkan perintah dari sinyal kontrol. Rudder tersebut berfungsi menjaga arah sesuai dengan perintah yang diinginkan. Salah satu rudder yang digunakan pada kapal perang kelas SIGMA extended adalah rudder dengan jenis Van Amorengen dengan spesifikasi kemampuan kerja antara  $-35^\circ$  sampai dengan  $35^\circ$  dan laju kerja rudder  $2,3^\circ - 7^\circ/s$ .

Pada Gambar 2.2 dapat dijelaskan mengenai pengoperasian dari rudder Van Amorengen. Dapat dijelaskan pada posisi (a) akan memberikan pengaruh pada port (b) Hal ini dikarenakan adanya perubahan tekanan pada port yang lebih tinggi sehingga memungkinkan terjadinya bukaan valve pada port (b), dengan terjadinya bukaan valve maka valve silinder kemudi terbuka dan rudder berada pada posisi (c) seperti pada Gambar 2 dan berakibat bukaan valve pada starboard akan terbuka dan sebaliknya (Fossen, 1994).



**Gambar 2** Sistem Kemudi Van Amorengen (Fossen, 1994)

Pada tahun 1982, simulasi yang dilakukan oleh Van Amorengen mengusulkan dalam penggunaan representasi sederhana dari diagram blok pada Gambar 3 umumnya, sudut rudder dan laju limiter rudder berada pada rentang  $\delta_{\max} = 35^\circ$  dan  $2,3^\circ/s \leq \dot{\delta}_{\max} < 7^\circ/s$  untuk kebanyakan kapal komersial.



**Gambar 3** Diagram blok kendali rudder (Fossen, 1994)

## 2.6 Propeller

Dalam teori dasar hambatan dan propulsi, baling-baling kapal diibaratkan sekrup pendorong, semakin besar ulir atau pitchnya semakin cepat pula kapal bergerak maju. Dengan berputarnya baling-baling maka karenanya akan memukul air dan akibatnya kapal akan bergerak maju atau mundur. Jumlah baling-baling kapal itu bermacam-macam antara lain:

1. Baling-baling tunggal dikapal kebanyakan menggunakan baling-baling putar kanan, artinya jika mesin/baling-baling maju maka baling-baling akan berputar searah dengan jarum jam, begitu sebaliknya jika kapal/mesin mundur.
2. Pada umumnya adalah baling-baling ganda putar luar (out turning propeller) maksudnya adalah baling-baling kanan putar kanan dan baling-baling kiri putar kiri.

3. Kedudukan tiga baling-baling itu terletak/susunan satu pada masing – masing sisinya (sisi kanan putar kanan dan sisi kiri putar kiri) dan satu lagi tepat di belakang kemudi (ditengah-tengah) baling-baling putar kanan.

4. Pada baling-baling empat ini sistim putarnya adalah sistim luar artinya dua baling-baling sebelah kanan putar kanan dan dua baling-baling kiri putar kiri.

Propeller yang digunakan pada kapal perang kelas SIGMA skala 3 meter adalah jenis propeller ganda, dimana kedua propeller bersamaan berputar. Propeller kiri bergerak ke arah kiri dan propeller kanan bergerak ke arah kanan.

## 2.7 Standard Manuver Kapal

Dalam bermanuver dari sebuah kapal, prosedur yang digunakan sebagai acuan berdasarkan standar kemampuan kapal yang telah direkomendasikan oleh International Maritime Organization (IMO) yakni pada resolusi MSC.137(76) mengenai standar kemampuan manuver kapal. Mengacu pada penjabaran dari resolusi tersebut sesuai yang direkomendasikan dari IMO bahwa aturan standar yang dimaksud berdasarkan atas pengertian bahwa kemampuan manuver kapal dapat dievaluasi berdasarkan karakteristik dari pengujian manuver kapal. IMO telah merekomendasikan beberapa kriteria standar untuk manuverabilitas kapal seperti pada Tabel 2.

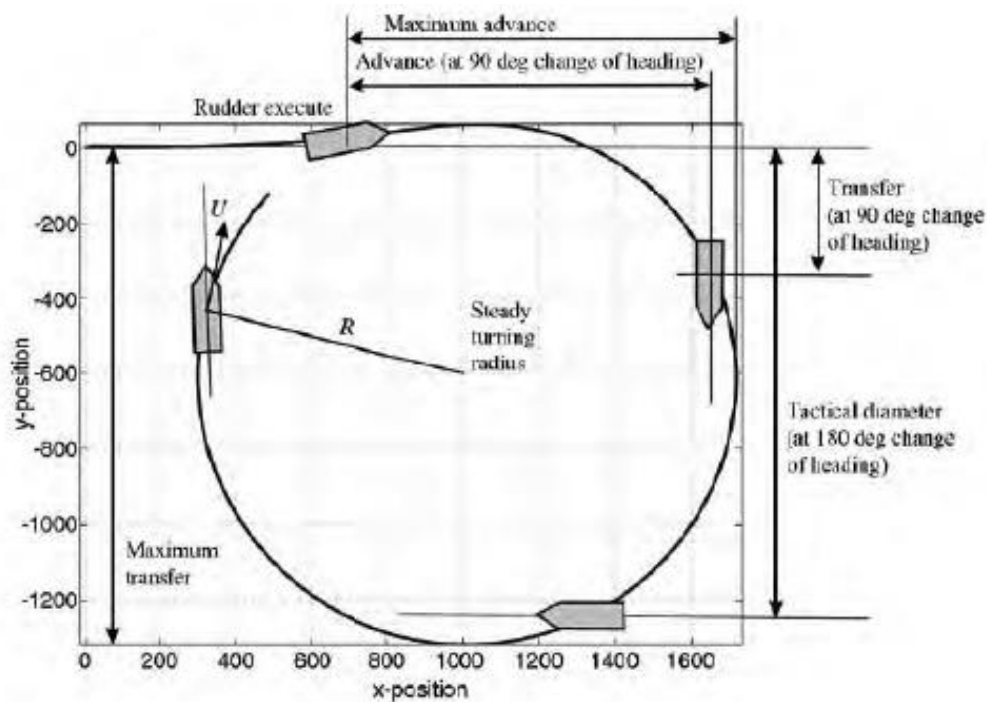
**Tabel 2** Standar manuverabilitas kapal oleh IMO (Resolusi MSC 137 (76) 2002)

<i>Ability</i>	<i>Test</i>	<i>Criteria</i>
<i>Turning ability</i>	<i>Turning test with max. Rudder Angle (35 deg.)</i>	<i>Advance &lt; 4,5 L</i> <i>Tactical Diameter &lt; 5,0 L</i>
	<i>10° / 10° Z-test</i>	<i>Distance ship run before 2<sup>nd</sup> rudder execution &lt; 2,5 L</i>
<i>Stopping ability</i>	<i>Stopping test with full astern</i>	<i>Track reach &lt; 15 L</i>
<i>Course-keeping and yaw-checking ability</i>	<i>10° / 10° Z-test</i>	<i>1<sup>st</sup> Overshoot</i> <i>&lt; 10° (L/U &lt; 10)</i> <i>&lt; (5+0,5 (L/U))° (10s &lt; L/U &lt; 30s)</i> <i>&lt; 20° (30s &lt; L/U)</i>
		<i>2<sup>nd</sup> Overshoot</i> <i>&lt; 25° (L/U &lt; 10s)</i> <i>&lt; (17,5+0,75(L/U))° (10s &lt; L/U &lt; 30s)</i> <i>&lt; 40° (30s &lt; L/U)</i>
	<i>20° / 20° Z-test</i>	<i>1<sup>st</sup> Overshoot</i> <i>&lt; 10° (L/U &lt; 10)</i>

Dimana manuver yang dipergunakan dalam percobaan mengikuti rekomendasi dari maneuvering trial code ITTC (1975) dan IMO (Resolusi MSC 137 (76) 2002).

### 2.7.1 Turning Circle

Uji turning circle, dimulai dari pergerakan lurus dengan laju konstan, rudder dihidupkan dengan sudut rudder maksimum ke  $\delta$  maksimum (sudut kemudi maksimum) dan ditahan pada sudut tersebut sampai kapal telah melakukan uji circle paling sedikit sebesar  $54^\circ$ . Pengujian dilakukan untuk bagian portside dan starboard. Informasi yang diperoleh dari manuver ini umumnya menggunakan GPS atau alat penghitung posisi.



**Gambar 4** Prosedur turning circle (Fossen, 2011)

Berdasarkan parameter yang digunakan untuk mendefinisikan kinerja kapal pada saat berputar adalah :

- a. Drift Angel adalah sudut antara haluan kapal dan arah gerakan. Sudut tersebut bervariasi sepanjang kapal.
- b. Advanced, merupakan jarak dari pelaksanaan awal ke sumbu x pada kapal ketika telah berbelok  $90^\circ$

c. The Tactical Diameter, adalah merupakan jarak dari jalur awal ke sumbu x pada kapal ketika telah berbelok  $180^\circ$

d. The Diameter of The Steady Turning circle, adalah diameter dari lingkaran yang terus menerus berputar. Kondisi tetap biasanya dihubungkan pada beberapa titik antara perubahan  $90^\circ$  dan  $180^\circ$  dari perubahan posisi.

Turning cycle manuver harus dilakukan pada kedua bagian sisi kapal dengan  $30^\circ$  atau sudut maksimum kemudi yang diperbolehkan pada uji kecepatan. Informasi penting yang akan diperoleh dari manuver ini adalah tactical diameter, advance, and transfer sesuai pada Gambar 4.

### **2.7.2 Zig-Zag**

Pengujian zig-zag diusulkan oleh Kempf (1932). Uji zig-zag manuver ini telah ditetapkan menjadi standar pengujian manuver kapal oleh International Towing Tank Conference (ITTC) pada tahun 1963. Uji zig-zag dilakukan untuk kedua bagian yakni starboard dan portside dengan menentukan sudut kemudi. Dimana terdapat dua jenis zig-zag untuk tes standar, yaitu dengan menggunakan sudut heading sebesar  $10^\circ/10^\circ$  dan  $20^\circ/20^\circ$

1. Manuver zig-zag dengan sudut kemudi 10 derajat dilaksanakan dengan prosedur sebagai berikut:

a. Setelah mencapai steady approach dengan percepatan yawing sebesar nol, maka kontrol dibelokkan sebesar 10 derajat ke arah starboard atau portside untuk eksekusi pertama.

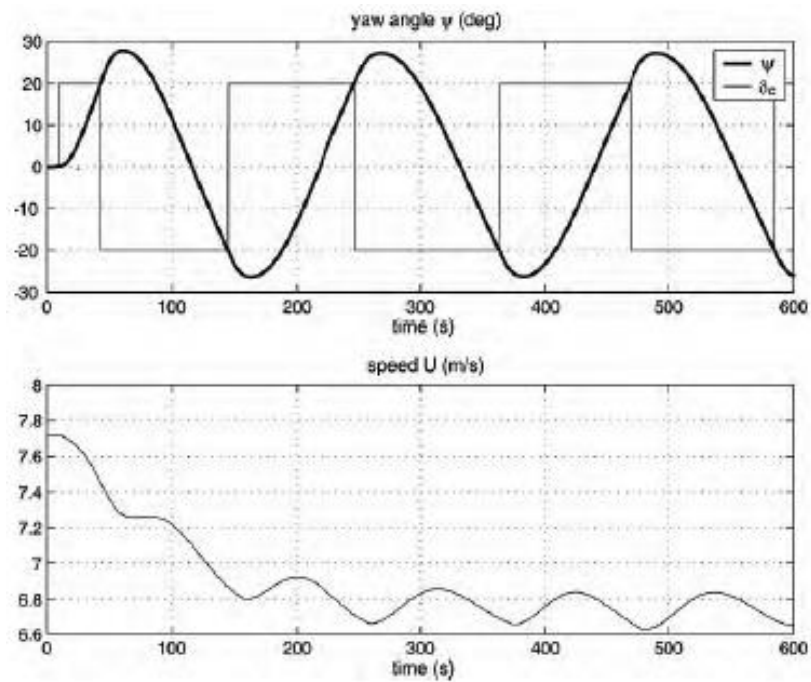
b. Pada saat sudut heading berubah 10 derajat dari sudut heading semula, maka kemudi dibelokkan berlawanan untuk eksekusi kedua.

c. Setelah kemudi dibelokkan maka kapal akan terus berbelok ke arah semula dengan mengalami penurunan kecepatan belok. Untuk mengetahui respon kapal terhadap kontrol maka selanjutnya kapal harus berbelok ke arah berlawanan. Ketika kapal sudah mencapai sudut heading 10 derajat ke arah awal maka selanjutnya kemudi dilawan sebaliknya ke arah 10 derajat sebaliknya untuk eksekusi ketiga.

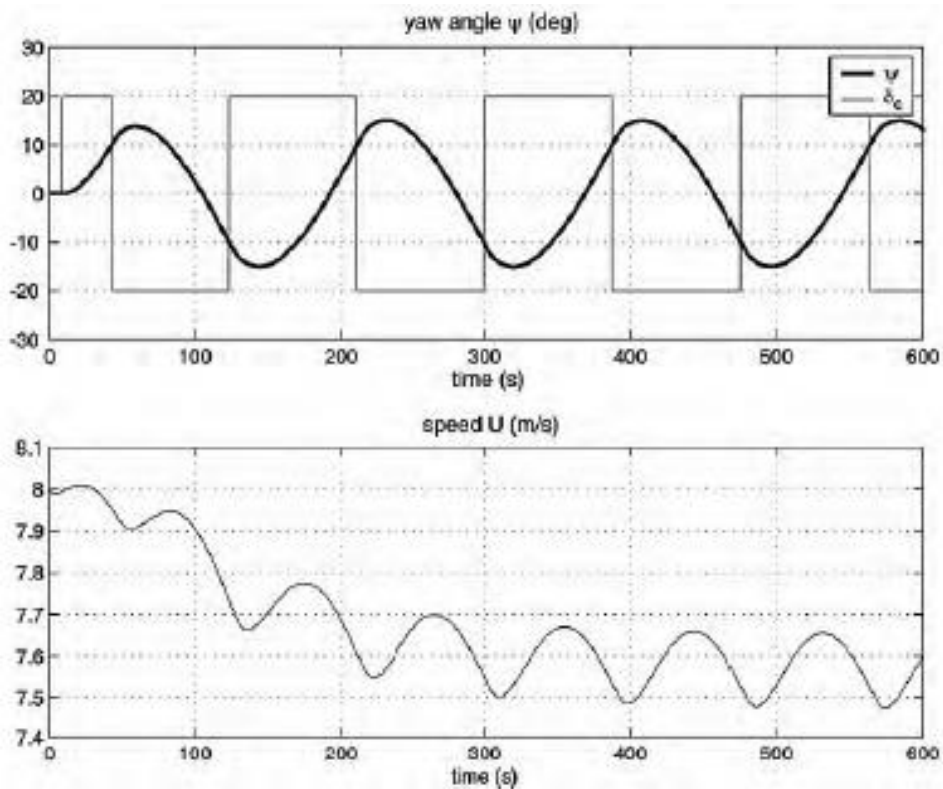
2. Sudut overshoot pertama adalah penambahan dari deviasi sudut heading pada zig-zag manuver di eksekusi kedua.



3. Sudut overshoot kedua adalah penambahan deviasi sudut heading pada zig-zag manuver di eksekusi ketiga.



**Gambar 5** Pengujian zig-zag 20 derajat pada kapal kontainer (Fossen, 2011)



**Gambar 6** Pengujian zig-zag 10 derajat pada kapal perang (Fossen, 2011)

Dalam menganalisa performansi manuver kapal maka pengujian manuver baik ke arah portside maupun starboard harus dilakukan dengan kondisi sebagai berikut

1. Pengujian dilakukan pada perairan dalam atau perairan tak terbatas.
2. Kondisi perairan atau lingkungan yang tenang.
3. Kondisi sarat penuh (sesuai dengan garis air pada musim panas).
4. Steady approach pada saat speed test.

## 2.8 Froude Number

Froude Number adalah sebuah bilangan tak bersatuan yang digunakan untuk mengukur resistensi dari sebuah benda yang bergerak melalui air, dan membandingkan benda dengan ukuran yang berbeda. Untuk menyatakan besarnya kecepatan model dapat menggunakan Froude's Number ( $F_n$ ), dimana  $F_n$  dipengaruhi oleh kecepatan ( $v$ ), gaya gravitasi ( $g$ ) dan panjang kapal ( $L$ ). Formula  $F_n$  dinyatakan pada persamaan berikut :

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (2.9)$$

Dari penjelasan diatas maka dengan diketahui  $F_n$  kapal skala penuh, maka dapat diketahui juga besarnya  $F_n$  skala model.

$$\frac{v_{\text{kapal skala penuh}}}{\sqrt{g \cdot L_{\text{kapal skala penuh}}}} = \frac{v_{\text{kapal prototipe}}}{\sqrt{g \cdot L_{\text{kapal prototipe}}}} \quad (2.10)$$

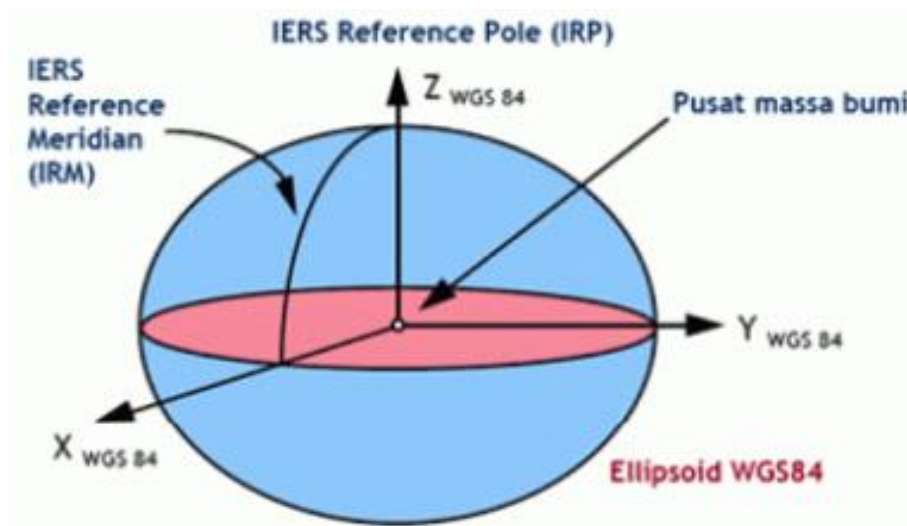
Atau dengan kata lain penjelasan diatas dengan diketahui kecepatan kapal skala penuh, panjang kapal penuh, gaya gravitasi dan panjang kapal skala model, maka kecepatan kapal skala model dapat diketahui.

## 2.9 Formula Vincenty

GPS adalah singkatan dari Global Positioning System yang merupakan sistem untuk menentukan posisi dan navigasi secara global dengan menggunakan satelit. Pada dasarnya penentuan posisi dengan GPS adalah pengukuran jarak secara bersama ke beberapa satelit (yang koordinatnya telah diketahui) sekaligus. Untuk menentukan

suatu titik di bumi, receiver setidaknya membutuhkan 4 satelit yang dapat ditangkap sinyalnya dengan baik. Secara default posisi atau koordinat yang diperoleh bereferensi ke global datum yaitu World Geodetic System (WGS). Berikut merupakan jenis-jenis sistem referensi yang biasa dipakai dalam pendeskripsian posisi :

1. CIS (Conventional Inertial System) ialah referensi koordinat yang biasa digunakan untuk pendeskripsian posisi dan pergerakan satelit. Sifatnya geosentrik dan terikat langit.
2. CTS (Conventional Terrestrial System) ialah sistem referensi koordinat yang biasa digunakan untuk menyatakan posisi di permukaan bumi. Sifatnya geosentrik dan terikat bumi.



**Gambar 7** Sistem koordinat WGS 84 (geographicsystem.blogspot.com)

Salah satu realisasi dari CTS adalah WGS 84 (World Geodetic System 84). WGS 84 adalah sistem yang saat ini digunakan oleh sistem navigasi GPS. WGS 84 pada prinsipnya adalah sistem koordinat CTS yang didefinisikan, direalisasikan dan dipantau oleh NIMA (National Imagery and Mapping) Amerika Serikat.

Pendefinisian sistem koordinatnya mengikuti kriteria yang ditetapkan oleh IERS pada Gambar 7 ( International Earth Rotation Service ) yaitu sebagai berikut :

1. Titik Nol koordinat terdapat pada pusat massa bumi ( Geosentrik ). Dimana massa bumi mencakup lautan dan juga atmosfer.
2. Skalanya adalah kerangka bumi lokal dalam terminologi relativitas dari gravitasi.

3. Orientasi awal dari sumbu – sumbu koordinatnya adalah didefinisikan oleh orientasi Bureau International de l'Heure ( BIH ) epok 1984.
4. Sumbu Z mengarah ke IERS reference pole. Sumbu X nya berada dibidang ekuator dan pada bidang IERS Reference Meridian ( IRM ). Sumbu Y tegak lurus terhadap sumbu X dan sumbu Z, dan membentuk sistem koordinat tangan kanan ( Right-Handed System ).
5. Evolusi waktu dari orientasinya tidak mempunyai residu pada rotasi global terhadap kerak bumi.

WGS 84 direalisasikan dengan menggunakan koordinat dan sistem penjejak (Tracking Stations) yang didistribusikan secara global serta memiliki ketelitian absolut sekitar 2 meter. Dengan memanfaatkan teknologi GPS dalam melakukan penentuan posisi, maka secara tidak langsung posisi titik-titik yang ditentukan nilainya tersebut akan berada pada satu sistem referensi WGS 84. Formula vincenty menggunakan referensi WGS 84 dalam aplikasinya.

## 2.10 Software Matlab

Matlab adalah salah satu bahasa pemrograman bahasa tingkat tinggi untuk komputansi teknik interaktif yang mengintegrasikan komputansi dan visualisasi. Matlab dikembangkan oleh MathWorks, yang pada awalnya dibuat untuk memberikan kemudahan mengakses data matrik pada proyek LINPACK dan EISPACK. Saat ini Matlab memiliki ratusan fungsi yang dapat digunakan sebagai problem solver mulai dari sederhana hingga masalah yang kompleks dari berbagai disiplin ilmu.



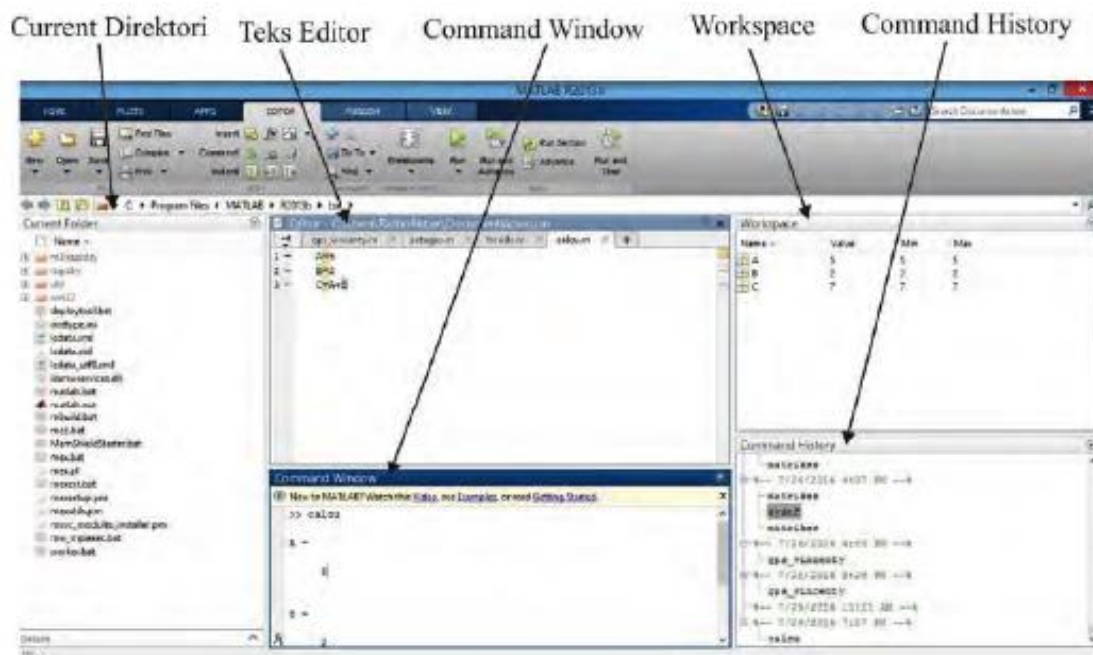
**Gambar 8** Software Matlab 2013b (<http://www.mathworks.com/products/matlab/>)

Secara umum, Matlab digunakan dalam hal :

- Matematika dan komputansi
- Pengembangan algoritma
- Akuisisi data
- Pemodelan, simulasi dan pembuatan prototipe
- Analisa data, eksplorasi dan visualisasi
- Grafik keilmuan dan bidang rekayasa
- Pengembangan aplikasi, termasuk pembuatan GUI (Guide User Interface)

Inti dari Matlab adalah operasi matriks yang merupakan sekumpulan fungsi-fungsi yang dapat dipanggil dan dieksekusi. Fungsi - fungsi Matlab (mfile) tersebut dibagi berdasarkan kegunaan yang dikelompokkan di dalam toolbox pada Matlab. Oleh karena itu, terlebih dahulu perlu pemahaman matematis terutama pada operasi vektor dan matriks.

Pada saat membuka program Matlab, maka akan muncul dekstop Matlab terdiri dari GUI untuk mengelola file, variabel dan aplikasi lainnya yang berhubungan dengan Matlab. Gambar 9 dibawah ini menunjukkan tampilan desktop default Matlab, pengaturan alat dan dokumen dapat disesuaikan dengan keperluan.



**Gambar 9** Menu editor Matlab

Beberapa tool yang terdapat pada dekstop Matlab antara lain :

- Current Folder

Window ini menampilkan isi dari direktori kerja saat menggunakan matlab. Kita dapat mengganti direktori ini sesuai dengan tempat direktori kerja yang diinginkan. Default dari alamat direktori berada dalam folder "C:\Program Files\MATLAB\R2013b\bin".

- Command Window

Window ini adalah window utama dari Matlab. Disini adalah tempat untuk menjalankan fungsi, mendeklarasikan variable, menjalankan proses-proses , serta melihat isi variable. Perintah dapat diubah sesuai dengan kebutuhan untuk menjalankannya, eksekusi program dapat dilakukan dengan menekan tombol enter.

- Workspace

Workspace berfungsi untuk menampilkan seluruh variabel-variabel yang sedang aktif pada saat pemakaian Matlab. Apabila variabel berupa data matriks berukuran besar maka user dapat melihat isi dari seluruh data dengan melakukan double klik pada variabel tersebut. Matlab secara otomatis akan menampilkan window "array editor" yang berisikan data pada setiap variabel yang dipilih user.

- Teks Editor

Teks editor digunakan untuk membuat dan menjalankan m-file.

- Command History

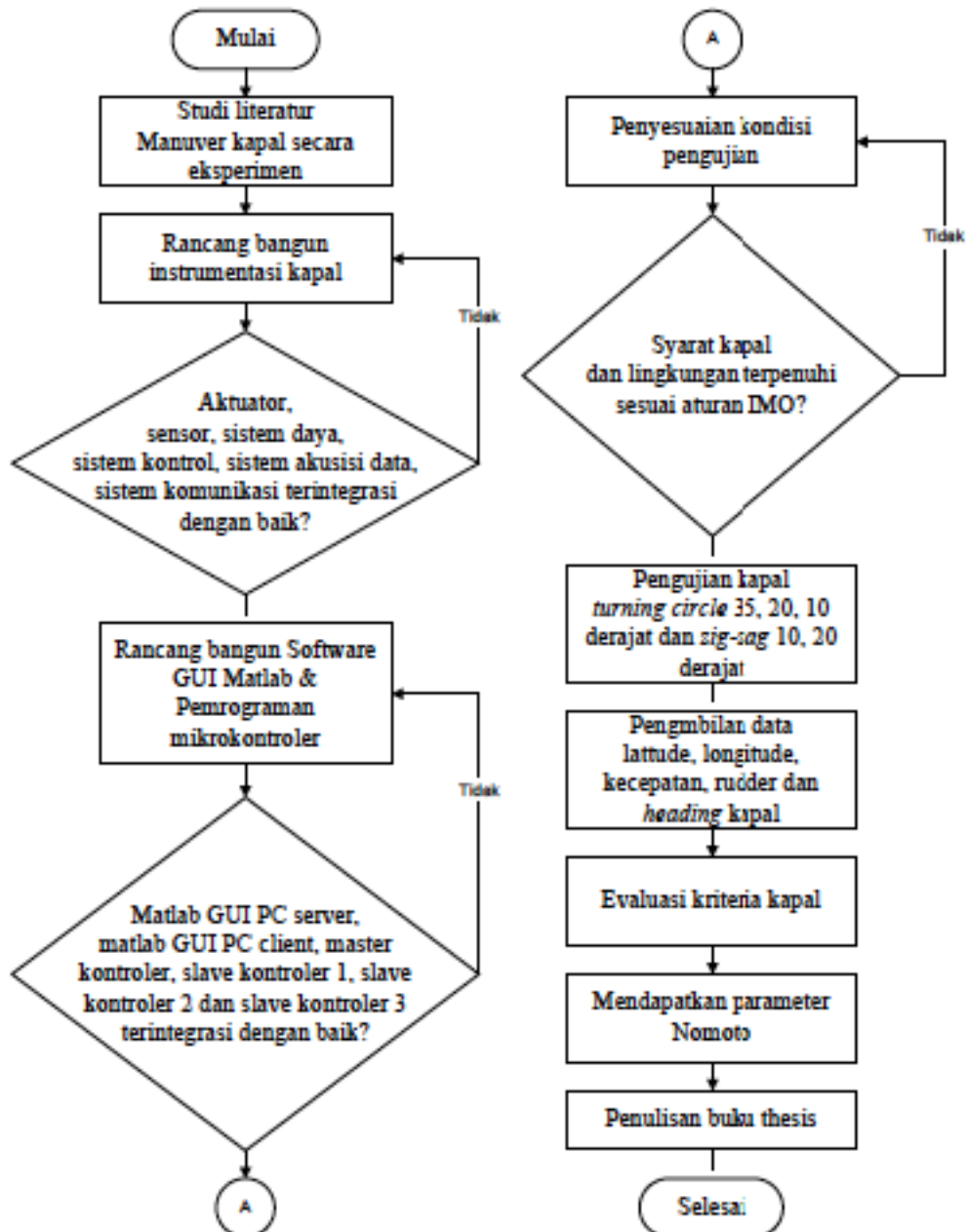
Window ini berfungsi untuk menyimpan perintah-perintah apa saja yang sebelumnya dilakukan oleh pengguna terhadap matlab, sehingga perintah yang telah dijalankan dapat dilihat, dicari serta menyalin dan mengeksekusi perintah yang dipilih, termasuk m-file.

- Tombol Start dan Launch Pad

Tombol start memudahkan akses ke tool, demo dan dokumentasi. Untuk melihat pilihan cukup dengan menekan tombol start yang ada.

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan tahapan pengerjaan tesis, antara lain perancangan perangkat keras (hardware), perangkat lunak (software), pengujian kapal, skenario pengambilan data, evaluasi kriteria dan perhitungan parameter kapal yang ditunjukkan pada diagram alir Gambar 10 berikut ini.



Gambar 10 Diagram alir penelitian

### 3.1 Kapal SIGMA Extended Skala 3 Meter

Kapal korvert kelas SIGMA merupakan salah satu jenis kapal perang yang menjadi kekuatan TNI AL. Kapal korvert kelas SIGMA mempunyai fungsi dasar dari kapal ini adalah Patroli maritim Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE), Penggetar, Pencarian dan penyelamatan (SAR) dan anti kapal selam. Kapal ini dirancang untuk menerima sistem modul di berbagai area, menyebabkan kapal ini mempunyai banyak keunggulan dibanding kapal perang dari jenis korvet lainnya. Oleh karena itu tim konsorsium KNRT mengembangkan dimensi, kemampuan berperang dan keandalan manuver. Desain kapal perang kelas SIGMA extended yang dirancang oleh konsorsium KNRT seperti pada Gambar 3.2.



**Gambar 11** Linesplan Kapal SIGMA extended

LHI mentransformasikan desain SIGMA extended Gambar 11 ke dalam sebuah prototipe dengan perbandingan skala 1 : 35. Gambaran informasi spesifikasi SIGMA extended dan SIGMA extended skala 3 meter seperti pada Tabel 3.

**Tabel 3** Spesifikasi SIGMA extended dan SIGMA extended skala 3 meter

	<b>SIGMA extended</b>	<b>SIGMA extended skala 3 meter</b>
Perbandingan skala	1	35
Desain kecepatan	30 (knot)	2,6 (m/s)
LLWL	101,07 (meter)	2,86 (meter)
LOA	106 (meter)	3,03 (meter)
B	14 (meter)	0,4 (meter)
Depth	8,75 (meter)	0,25 (meter)



---

Draft	3,7 (meter)	0,11 (meter)
-------	-------------	--------------

---

Prototipe kapal perang kelas SIGMA extended skala 3 meter yang dibuat oleh LHI ditunjukkan pada Gambar 12. Kapal ini didesain menggunakan mesin penggerak ganda untuk memutar propeller. Propeler kiri berputar berlawanan jarum jam, sedangkan propeller kanan berputar searah jarum jam. Dilengkapi dengan rudder ganda, masing – masing dapat bergerak dengan sudut maksimal 35 dan -35 derajat.

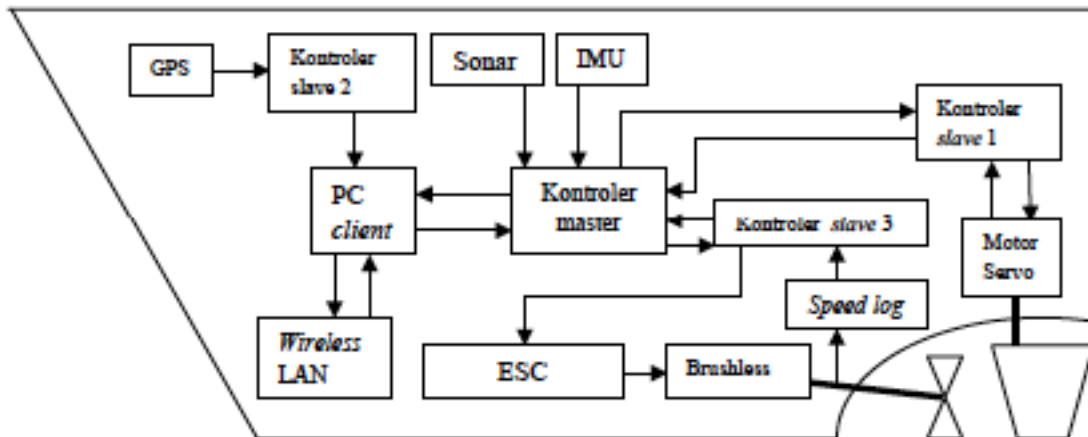


**Gambar 12** Kapal SIGMA extended skala 3 meter

### **3.2 Perancangan Perangkat Keras (Hardware)**

Rancang bangun kapal perang kelas SIGMA extended terbagi menjadi dua sub bab yaitu perancangan perangkat keras atau hardware dan perangkat lunak atau software. Pada sub bab ini membahas perangkat keras yang terdiri dari sensor actuator, pengendali dan komponen pendukung lainnya. Sensor yang digunakan antara lain GPS untuk mengetahui posisi berupa lintang dan bujur, sonar untuk mengetahui jarak kapal dengan halangan yang berada disekitarnya, IMU merupakan sebuah sensor untuk mengetahui derajat kebebasan pada kapal umumnya surge, sway, yaw, pitch, roll dan heave, speed log untuk mengetahui rpm propeller dan sensor rudder untuk mengetahui pergerakan sudut rudder. Aktuator terdiri dari penggerak propeller dan penggerak rudder. Sebagai pengendali terdiri dari Mikrokontroler slave 1, slave 2, slave 3 dan Mikrokontroler master. Komputer client berperan sebagai kontrol utama kapal dan computer server berperan sebagai remote. Komponen pendukung lainnya diantaranya baterai sebagai catu daya sistem instrumentasi dan sistem komunikasi

sebagai media transmisi atau pertukaran data. Perancangan perangkat keras kapal perang kelas SIGMA extended skala 3 meter dapat dilihat pada Gambar 13.



**Gambar 13** Perancangan hardware instrumentasi

### 3.2.1 Sistem Daya

Kapal perang kelas SIGMA extended skala 3 meter dirancang menggunakan sistem instrumentasi dan penggerak yang berenergi listrik. Hal ini mempunyai arti bahwa kapasitas penyimpanan daya listrik yang digunakan harus mencukupi untuk kebutuhan berlayar. Untuk itu pemilihan penyimpanan daya listrik perlu diperhitungkan. Kapal model ini menggunakan baterai tipe litium polymer atau dikenal sebagai baterai LiPo, biasanya kapasitas penyimpanan baterai dalam satuan mah (mili volt ampere). Baterai LiPo tidak menggunakan cairan sebagai elektrolit melainkan menggunakan elektrolit polimer kering yang berbentuk seperti lapisan plastik film tipis. Lapisan film ini disusun berlapislapis diantara anoda dan katoda yang mengakibatkan pertukaran ion. Dengan metode ini baterai LiPo dapat dibuat dalam berbagai bentuk dan ukuran. Selain itu baterai LiPo memiliki kapasitas penyimpanan energi listrik yang besar dibanding baterai jenis NiCad atau NiMH. Diluar dari kelebihan arsitektur baterai LiPo, terdapat juga kekurangan yaitu lemahnya aliran pertukaran ion yang terjadi melalui elektrolit polimer kering. Hal ini menyebabkan penurunan pada charging dan discharging rate.

Kapal model ini menggunakan baterai LiPo dengan 3 kapasitas yang berbeda yaitu 7,4 volt kapasitas 2200 mah digunakan untuk sistem sensor dan pengendali, 11,1 volt 5000 mah digunakan sebagai supply pada motor servo untuk rudder dan pompa

pendingin motor dan 22,2 volt 12.000 mah digunakan untuk penggerak utama dua baling-baling propeller. Baterai 22,2 volt 12.000 mah yang terinstalasi pada kapal seperti pada Gambar 14.



**Gambar 14** Baterai dan charger

### **3.2.2 Sensor dan Aktuator**

Pada subbab ini akan dijelaskan lebih detail deskripsi sensor dan aktuator yang digunakan pada rancang bangun kapal perang kelas SIGMA extended skala 3 meter antara lain :

- GPS (Global Position System)

GPS pada penelitian ini adalah sistem untuk menentukan letak atau posisi kapal ketika pengujian berlangsung dengan bantuan penyelarasan (synchronization) sinyal satelit. GPS yang digunakan merupakan produk Ublox LEA-6H. Sistem ini menggunakan 24 satelit yang mengirimkan sinyal gelombang mikro. Sinyal ini diterima oleh antena GPS yang terletak dibagian tertinggi pada kapal. Informasi yang dapat diambil dari GPS ini digunakan antara lain dari posisi, kecepatan, ketinggian, waktu, tanggal, dan lain lain. Baris kode yang digunakan dalam pengambilan informasi \$GPRMC di-decode-kan dengan cara sebagai berikut :

\$GP First code for Global Positioning

RMC Recommended Minimum sentence C

123519 Fix taken at 12:35:19 UTC

A Status A=active or V=Void.

4807.038,N Latitude 48 deg 07.038' N

01131.000,E Longitude 11 deg 31.000' E  
022.4 Speed over the ground in knots  
084.4 Track angle in degrees True  
230394 Date - 23rd of March 1994  
003.1,W Magnetic Variation  
\*6A The checksum data, always begins  
with \*

Data-data tersebut dipisah kan oleh tanda koma "," yang akan kita jadi kan sebagai pembatas tiap-tiap data. Data-data yang telah selesai di-decode kan kemudian akan diuraikan menjadi paket informasi. Koneksi dari Modul Receiver ke Mikrokontroler yang digunakan yaitu komunikasi serial dengan Baudrate 38400). Dari kalibrasi yang dilakukan GPS yang digunakan pada penelitian ini mempunyai ketelitian 2.2 meter. GPS yang terpasang pada kapal prototipe ditunjukkan pada Gambar 15 (a), sedangkan antenna GPS ditunjukkan pada Gambar 15 (b).

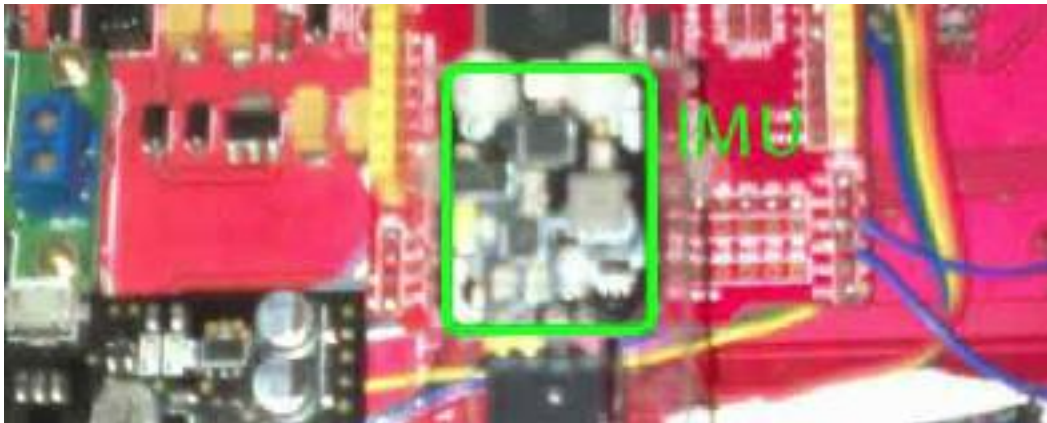


**Gambar 15** (a) Modul GPS ublox (b) Antena GPS

- IMU (Inertial Measurement Unit)

IMU digunakan sebagai alat pengukuran gaya inersia atau variable dinamika yang terjadi pada kapal perang kelas SIGMA extended skala 3 meter. IMU yang digunakan terdiri dari sensor akselerometer ADXL345 3 aksis, sensor gyroskop ITG 3200 3 aksis, sensor magnetometer HMC5883L 3 aksis dan sensor barometer BMP085. Pada

Sensor IMU diinstalasi di titik berat kapal supaya memperoleh hasil pembacaan gaya inersia kapal yang baik. Pemasangan sensor IMU pada kapal perang kelas SIGMA extended skala 3 meter ditunjukkan oleh Gambar 16.



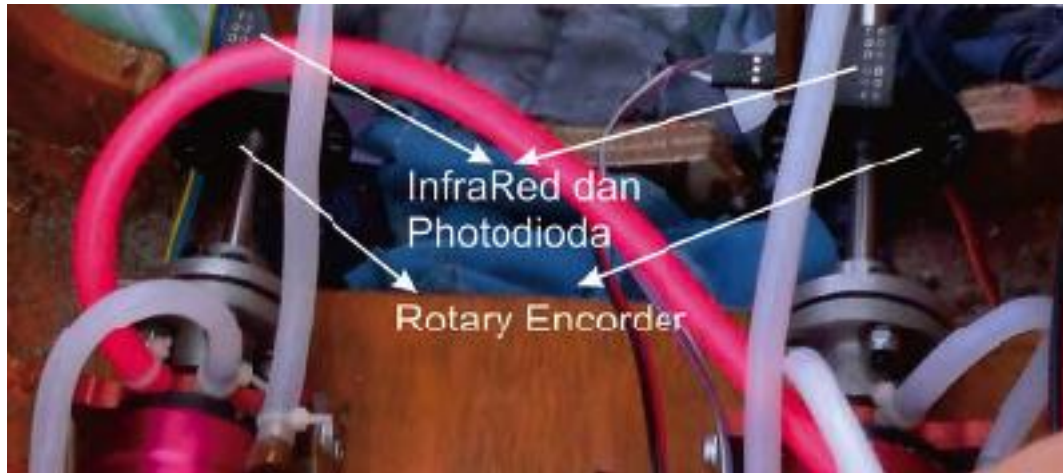
**Gambar 16** Sensor IMU (Inertial Measurement Unit)

#### - Speed Log

Speed log pada kapal merupakan alat untuk mengetahui informasi rpm, kecepatan maupun informasi lainnya yang berkaitan dengan kecepatan kapal. Speed log yang dimaksud pada penelitian ini merupakan rotary encoder yang sengaja diletakkan pada shaft propeller, berguna mengetahui rpm propeller kapal. Rotary encoder adalah device elektromekanik yang dapat memonitor Gerakan dan posisi. Rotary encoder umumnya menggunakan sensor optik untuk menghasilkan serial pulsa yang dapat diartikan menjadi gerakan, posisi, dan arah. Sehingga posisi sudut suatu poros benda berputar dapat diolah menjadi informasi berupa kode digital oleh rotary encoder untuk diteruskan oleh rangkaian kendali. Rotary encoder tersusun dari suatu piringan tipis yang memiliki lubang-lubang pada bagian lingkaran piringan.

LED infra merah ditempatkan pada salah satu sisi piringan sehingga cahaya akan menuju ke piringan. Di sisi yang lain suatu photodiode diletakkan sehingga photodiode ini dapat mendeteksi cahaya dari LED infra merah yang berseberangan. Piringan tipis tadi dikopel dengan poros motor, atau device berputar lainnya yang ingin kita ketahui posisinya, sehingga ketika motor berputar piringan juga akan ikut berputar. Apabila posisi piringan mengakibatkan cahaya dari LED infra merah dapat mencapai photodiode melalui lubang-lubang yang ada, maka photodiode akan mengalami

saturasi dan akan menghasilkan suatu pulsa gelombang persegi. Gambar 17 menunjukkan penyusun rotary encoder. Semakin banyak deretan pulsa yang dihasilkan pada satu putaran menentukan akurasi rotary encoder tersebut.



**Gambar 17** Pemasangan speed log pada prototipe kapal SIGMA extended

Dengan rumus pembacaan rpm dari jumlah pulsa yang dihasilkan yaitu :

$$rpm = n \cdot \frac{60}{k} \quad (3.1)$$

Notasi n merupakan jumlah pulsa yang dihasilkan, k adalah jumlah lubang rotary encoder. Rotary encoder yang digunakan pada kapal model mempunyai satu jumlah lubang. Hal ini dikarenakan sensitifitas LED infra merah dan photodiode yang digunakan tidak begitu baik.

#### - Sonar

Sonar merupakan sensor yang dapat mengetahui jarak antara sensor dengan halangan didepannya. Terdapat 3 sensor sonar pada kapal ini yang terletak di sebelah kiri, depan dan kanan sisi kapal. Sensor tersebut berfungsi membaca jarak kapal prototipe dengan halangan disekitarnya, mampu mendeteksi halangan hingga 1000 cm. Mempunyai kepresisian pembacaan 1 cm. Pemasangan sensor sonar ini mempunyai tujuan kapal prototipe dapat menghindari tabrakan dan dapat bersandar di pelabuhan secara otomatis pada penelitian selanjutnya.



**Gambar 18** (a) Sensor sonar bagian kiri kapal (b) Sensor sonar bagian depan kapal (c) Sensor sonar bagian kanan kapal

#### - Motor Servo

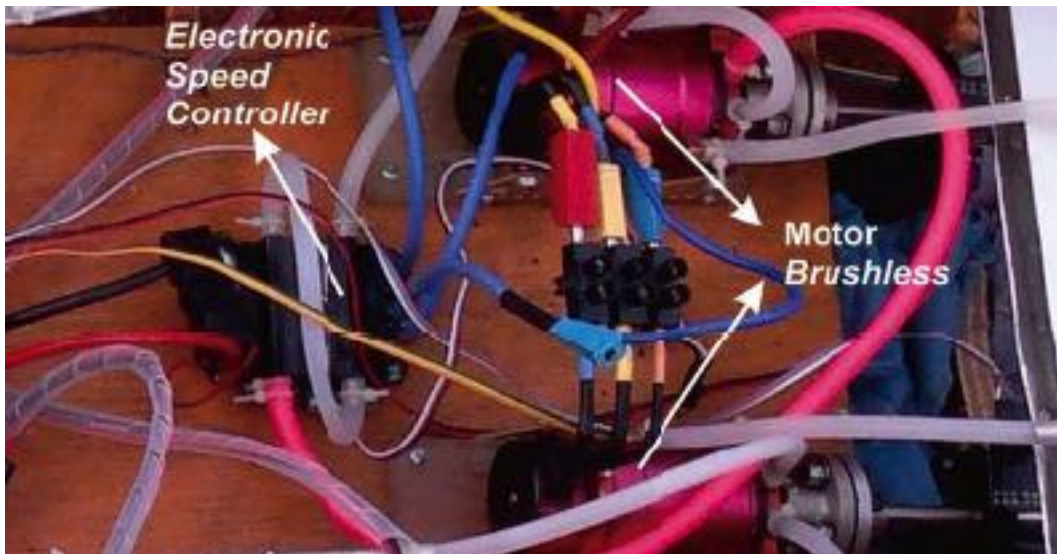
Motor servo adalah sebuah motor dengan sistem closed feedback di mana posisi dari motor akan diinformasikan kembali ke rangkaian kontrol yang ada di dalam motor servo. Motor servo yang digunakan sebagai penggerak rudder kapal prototipe yaitu HS-805MG, mempunyai torsi 24,7 kg-cm dan catu daya 6 volt. Penggunaan motor servo sebagai penggerak rudder sangat sesuai, karena pada prinsipnya motor ini bergerak berdasarkan besaran sudut melalui pengaturan PWM yang diberikan oleh pengendali. Mikrokontroler slave 1 mengatur besarnya PWM yang diberikan, sehingga kecepatan gerak dan sudut motor servo ini dapat diatur. Motor servo sebagai penggerak rudder pada kapal prototipe ini diatur sesuai dengan aturan Van Amoegan yaitu dapat bergerak 7 derajat per detik. Motor servo yang terpasang pada poros rudder ditunjukkan pada Gambar 19.



**Gambar 19** Motor servo sebagai penggerak rudder

#### - ESC dan Motor Brushless

Perancangan kapal prototipe ini dilengkapi dengan sistem propulsi sebagai pengendali kecepatan kapal. Sistem propulsi kapal prototipe terdiri dari dua buah motor brushless yang dilengkapi propeller sebagai pendorongnya. Motor brushless tidak memiliki sikat pada bagian rotornya. Selain itu motor brushless memiliki torsi yang cukup besar dibandingkan dengan motor biasa. Motor brushless yang digunakan sebagai penggerak propeller mempunyai kapasitas 1600kv.



**Gambar 20** Motor brushless sebagai penggerak propeller

Motor brushless memiliki sebuah ESC (Elektronik Speed Control) yang berfungsi sebagai pengatur kecepatan motor, selain itu juga berfungsi untuk menaikkan jumlah arus yang diperlukan oleh motor. Kecepatan untuk motor yang keluar dari ESC diatur melalui PWM dari mikrokontroler slave 3. ESC yang digunakan pada kapal prototipe mempunyai kapasitas 180A.

### **3.2.3 Sistem Pengendali**

Untuk mengintegrasikan seluruh sistem dan menjalankan algoritma baik mode manual maupun mode otomatis pengujian kapal, kapal perang kelas SIGMA extended skala 3 meter dilengkapi oleh pengendali, terdiri dari:

- Komputer

Komputer client mengontrol seluruh sistem yang berada pada model kapal, mengirim maupun membaca sinyal tiap sistem. Dalam hal ini computer client bertugas sebagai



pengendali utama seluruh sistem. Komputer server bertindak sebagai remote dan sistem monitor.

- Mikrokontroler

Model kapal ini menggunakan 4 buah mikrokontroler terdiri dari master, slave 1, slave 2 dan slave 3. Empat pengendali tersebut mempunyai fungsi yang berbeda.

- Mikrokontroler master

Mikrokontroler master berfungsi memproses masukan dari sensor IMU, sonar, slave 1 dan slave 3. Meneruskannya berupa paket sekumpulan data berisikan informasi kondisi instrumen kapal.

- Mikrokontroler slave 1

Mikrokontroler slave 1 bertugas mengubah sinyal kontrol yang diberikan oleh pengendali utama untuk dikonversi ke PWM. Motor servo merespon PWM tersebut dan merubahnya ke dalam besaran sudut defleksi rudder.

- Mikrokontroler slave 2

Mikrokontroler slave 2 bertugas menerjemahkan informasi latitude dan longitude yang diterjemahkan dari protokol NMEA.

- Mikrokontroler slave 3

Mikrokontroler slave 3 bertugas menerjemahkan informasi jumlah lubang encorder dalam satu putaran propeller ke besaran rpm yang berasal dari speed log dan meneruskannya pada pengendali master.

### **3.2.4 Sistem Komunikasi**

Sistem komunikasi pada model kapal terbagi menjadi tiga tipe yaitu digital-analog, TCP/IP dan UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter).

- Digital Dan Analog Sinyal

Pada sistem yang menggunakan analog to digital (ADC) ini yaitu sensor sonar. Sensor sonar ini dapat membaca halangan didepan sonar dari jarak 30 sampai dengan 30 - 1000 cm. Oleh sensor sonar pembacaan jarak tersebut dikonversikan data digital ke analog DAC 0 – 5v. Mikrokontroler master menerjemahkannya dari analog ke digital ADC.

- TCP/IP-VPN

Komunikasi ini terintegrasi antara komputer client pada kapal dengan komputer server yang berada di darat melalui sebuah router ASUS RT-14UDN yang menjangkau lokasi pengujian dengan radius 150 meter.

- UART serial

Hampir seluruh sensor, pengendali dan komputer terintegrasi dan bertukar informasi melalui protokol komunikasi ini.

### 3.3 Perangkat Lunak (Software)

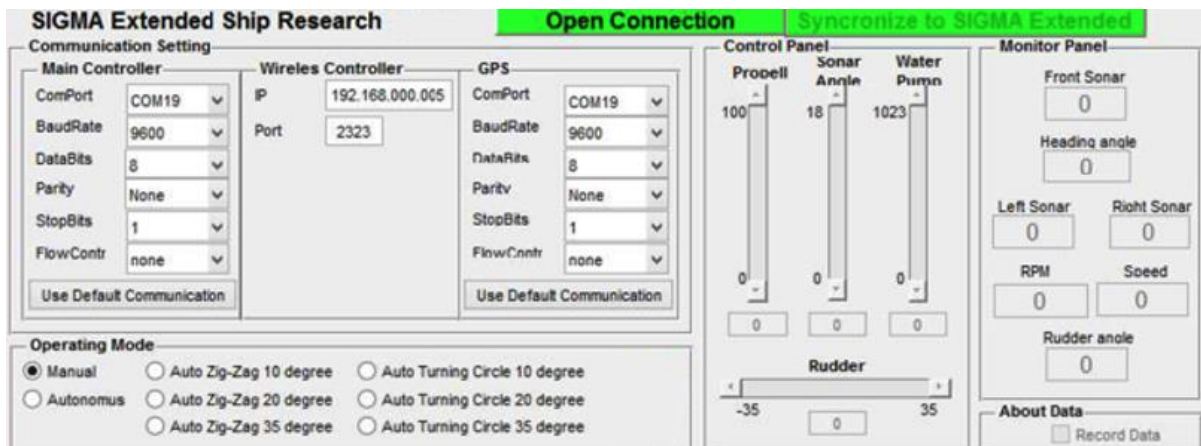
Sistem perangkat lunak (software) yang terinstalasi pada komputer client dapat dilihat di Tabel 4. Sistem operasi komputer yang digunakan adalah windows versi 8. Bahasa pemrograman baik pembuatan software berbasis GUI dan simulasi adalah Matlab versi R2013b. Bahasa pemrograman mikrokontroler yang digunakan adalah bahasa C. Sedangkan komunikasi serial to usb, usb to serial menggunakan driver produk FTDI 232RL

**Tabel 4** Sistem perangkat lunak (software)

Sistem operasi komputer	Windows 8
Bahasa pemrograman komputer	Matlab R2013b
Bahasa pemrograman Mikrokontroler	Bahasa C
Driver converter USB-Serial UART	FTDI 232RL

#### 3.3.1 Software Berbasis Matlab GUI pada Komputer Client

Interface sebuah software yang digunakan sebagai sistem kontrol dan monitor secara terpusat terdapat di komputer client dapat ditunjukkan pada Gambar 21. Terdiri dari panel pengaturan komunikasi serial dengan master pengendali, GPS, dan IP komputer client serta port yang digunakan untuk koneksi melalui wireless LAN. Panel kontrol terdiri dari kontrol kecepatan dan arah. Panel monitor menampilkan informasi jarak sonar depan, kiri, kanan, heading, rpm, kecepatan, dan sudut defleksi rudder.



**Gambar 21** Software berbasis matlab GUI pada komputer client

Panel mode operasi terdiri dari beberapa pilihan mode antara lain manual, pengujian zig-zag 10 derajat otomatis, pengujian zig-zag 20 derajat otomatis, pengujian zig-zag 35 derajat otomatis, pengujian turning circle 10 derajat otomatis, pengujian turning circle 20 derajat otomatis, dan pengujian turning circle 35 derajat otomatis. Mode manual memungkinkan kapal dapat dikontrol melalui panel kontrol dapat diakses melalui komputer client maupun komputer server. Pengujian zig-zag dan turning circle secara otomatis memungkinkan algoritma zig-zag dan turning circle diimplementasikan dengan alat bantu instrumentasi berupa pengendali dimana sensor magneto meter menjadi menginformasikan arah heading kapal, GPS menginformasikan posisi latitude dan longitude, sebagai aktuator motor dc dapat mengatur kecepatan propeller dan motor servo dapat mengatur arah rudder.

### 3.3.2 Software Berbasis Matlab GUI pada Komputer Server

Interface yang digunakan sebagai sistem kontrol dan monitor secara remote terdapat di komputer server dapat ditunjukkan pada Gambar 22. Terdiri dari panel pengaturan komunikasi serial dengan master pengendali, GPS, dan IP komputer client serta port yang digunakan untuk koneksi melalui wireless LAN. Panel kontrol terdiri dari kontrol kecepatan dan arah.



**Gambar 22** Software berbasis matlab GUI pada komputer server

Panel monitor menampilkan informasi jarak sonar depan, kiri, kanan, heading, rpm, kecepatan, dan sudut defleksi rudder. Panel mode operasi terdiri dari beberapa pilihan mode antara lain manual, pengujian zig-zag 10 derajat otomatis, pengujian zig-zag 20 derajat otomatis, pengujian zig-zag 35 derajat otomatis, pengujian turning circle 10 derajat otomatis, pengujian turning circle 20 derajat otomatis, dan pengujian turning circle 35 derajat otomatis. Berbeda dengan interface yang berada di komputer client, Interface pada komputer server didesain lebih aplikatif, respon sudut rudder terhadap heading kapal ditampilkan ke dalam grafik pada panel monitor dan tidak ditanamkan algoritma pengujian turning circle dan zig-zag yang kompleks.

### 3.3.3 Algoritma Zig-Zag Otomatis Berbasis Matlab pada Komputer Client

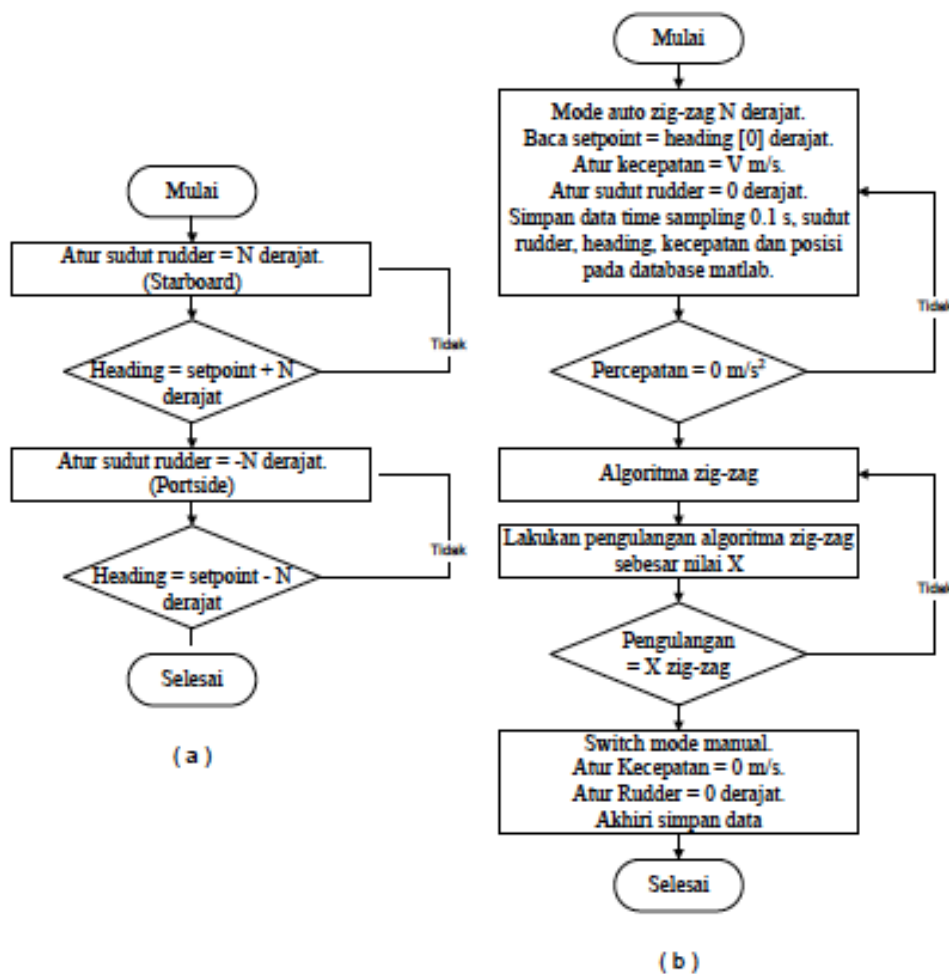
Gerak zig-zag pada kapal yang telah diatur oleh IMO kemudian direpresentasikan ke dalam program Matlab berupa suatu fungsi yang dapat dipanggil ketika diperlukan.

Representasi fungsi algoritma zig-zag tersebut digambarkan pada Gambar 23.

Algoritma zig-zag ditunjukkan pada Gambar 23 (a). IMO mengisaratkan bahwa pengujian zig-zag dilakukan dengan sudut 10 dan 20 derajat guna menghemat waktu pengujian. Mekanisme gerak zig-zag pada kapal dimulai dengan memberi masukan besarnya sudut zig-zag. Memberi kasukan kendali rudder sebesar sudut tertentu, kemudian menunggu heading kapal berubah samapai sebesar sudut rudder yang

diberikan tersebut. Apabila heading telah tercapai, kemudian rudder dikontrol berlawanan arah dengan besar sudut yang sama, setelah itu menunggu hingga heading kapal bergerak sebesar sudut rudder yang diberikan tersebut.

Alogaritma fungsi zig-zag pada program Matlab ditunjukkan pada Gambar 23 (b). Sebelum memanggil fungsi ditentukan terlebih dahulu besarnya sudut pengujian sebesar N derajat. Seluruh pengujian zig-zag ini dilakukan secara otomatis oleh software GUI Matlab dengan menjalankan algoritma yang telah dirancang sebelumnya, termasuk memberi masukan kontrol sudut rudder sebesar 0 derajat, arah heading mula dianggap sebagai set point dan kapal dijalankan dengan kecepatan V m/s. Kemudian mulai dilakukan penyimpanan data eksperimen pengujian zig-zag setiap 0,1 detik sekali ke dalam database. Data pengujian yang disimpan diantaranya heading, sudut pergerakan rudder, kecepatan dan posisi (lintang dan bujur).



**Gambar 23** (a) Alogaritma zig-zag menurut standar IMO (b) Alogaritma zig-zag

Setelah kapal mencapai kecepatan konstan atau percepatan  $0 \text{ m/s}^2$ , fungsi algoritma pengujian zig-zag pada Gambar 23 (a) akan dijalankan sebanyak  $X$  kali. Banyaknya perulangan algoritma pengujian zig-zag yang dilakukan sesuai dengan nilai  $X$  yang diberikan. Setelah algoritma zig-zag terpenuhi sesuai perulangan sebanyak nilai  $X$ , maka pengujian telah selesai. Memberi masukan kontrol kecepatan sebesar  $0 \text{ m/s}$ , memberi masukan kontrol rudder sebesar  $0$  derajat dan mengakhiri proses penyimpanan data eksperimen pengujian zig-zag. Setelah itu mode zig-zag otomatis kembali ke mode manual.

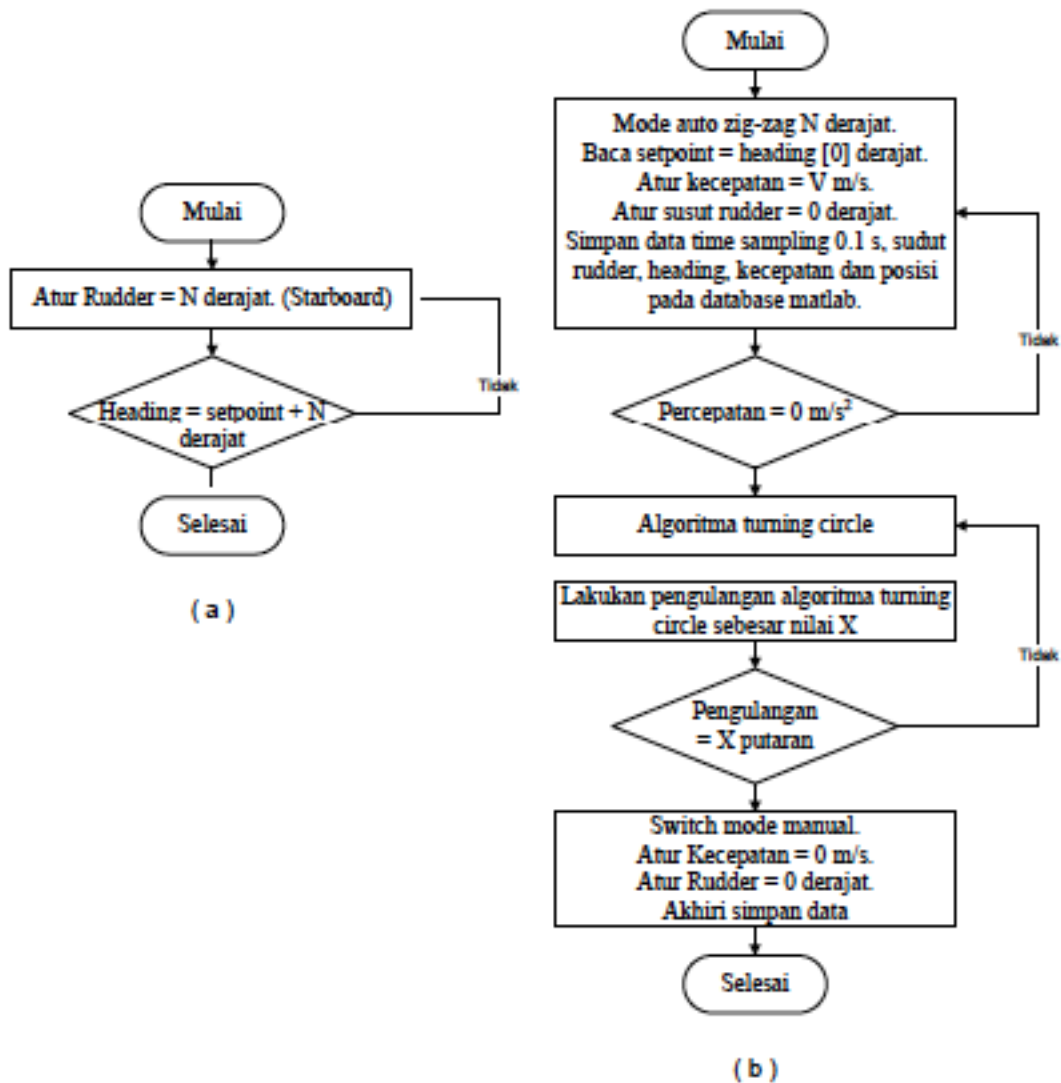
### **3.3.4 Algoritma Turning Circle Otomatis Berbasis Matlab pada Komputer Client**

Gerak turning circle pada kapal yang telah diatur oleh IMO kemudian direpresentasikan ke dalam program Matlab berupa suatu fungsi yang dapat dipanggil ketika diperlukan. Representasi fungsi algoritma turning circle tersebut digambarkan pada Gambar 24.

Alogaritma turning circle pada Gambar 24 (a). Pada umumnya besarnya sudut pengujian turning circle antara lain  $10$ ,  $20$  dan  $35$  derajat. IMO mengisaratkan bahwa pengujian turning circle dilakukan dengan sudut  $35$  derajat (sudut maksimum rudder) guna menghemat waktu pengujian. Mekanisme gerak turning circle pada kapal dimulai dengan memberi masukan besarnya sudut turning circle. Memberi masukan kendali rudder sebesar sudut  $N$  derajat, kemudian heading kapal berubah samapai membentuk lintasan melingkar.

Alogaritma fungsi turning circle pada program Matlab ditunjukkan pada Gambar 24 (b). Sebelum memanggil fungsi ditentukan terlebih dahulu besarnya sudut pengujian sebesar  $N$  derajat. Seluruh pengujian turning circle ini dilakukan secara otomatis oleh software GUI Matlab dengan menjalankan algoritma yang telah dirancang sebelumnya, termasuk memberi masukan kontrol sudut rudder sebesar  $0$  derajat, arah heading mula dianggap sebagai set point dan kapal dijalankan dengan kecepatan  $V \text{ m/s}$ . Kemudian mulai dilakukan penyimpanan data eksperimen pengujian turning circle setiap  $0,1$  detik sekali ke dalam database. Data pengujian yang disimpan diantaranya heading, sudut pergerakan rudder, kecepatan dan posisi (lintang dan bujur). Setelah kapal mencapai kecepatan konstan atau percepatan  $0 \text{ m/s}^2$ , fungsi algoritma pengujian turning circle seperti pada Gambar 24 (a) akan dijalankan

sebanyak X kali. Banyaknya perulangan algoritma pegujian turning circle yang dilakukan sesuai dengan nilai X yang diberikan. Setelah algoritma turning circle terpenuhi sesuai perulangan sebanyak nilai X, maka pengujian telah selesai. Memberi masukan kendali kecepatan sebesar 0 m/s, memberi masukan kontrol rudder sebesar 0 derajat dan mengakhiri proses penyimpanan data eksperimen pegujian turning circle. Setelah itu mode turning circle otomatis kembali ke mode manual.

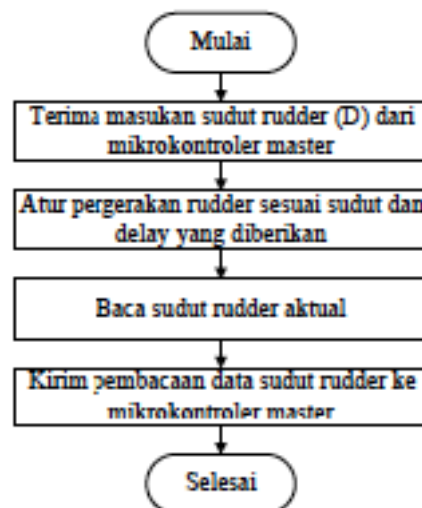


**Gambar 24** (a) Alogaritma turning circle menurut standar IMO (b) Alogaritma turning circle kapal secara otomatis pada software matlab GUI

### 3.3.5 Algoritma Program Mikrokontroler Slave 1

Mikrokontroler slave 1 berfungsi mengendalikan pergerakan rudder. Gambar 25 adalah algoritma program pada mikrokontroler slave 1. Mikrokontroler slave 1 dalam

keadaan siaga untuk membaca masukan melalui port serial. Port serial mikrokontroler slave 1 terhubung dengan mikrokontroler master, sehingga dapat saling berkomunikasi. Sewaktu port serial slave 1 membaca data sebesar D (nilai D dapat berubah nilainya), maka D merupakan nilai kontrol masukan sudut rudder. Selanjutnya mikrokontroler slave 1 mengatur keluaran sinyal PWM yang diperlukan untuk mengatur besarnya sudut putaran motor servo sesuai besarnya nilai D. Sudut pergerakan rudder akan sama dengan pergerakan sudut putar motor servo. Disamping itu mikrokontroler slave 1 akan terus – menerus membaca sudut aktual pergerakan rudder dan mengirmkannya ke Mikrokontroler master. Alogaritma yang terdapat pada mikrokontroler slave 1 selalu dikerjakan secara berulang selama sistem minimum mikrokontroler slave 1 terhubung dengan catu daya.



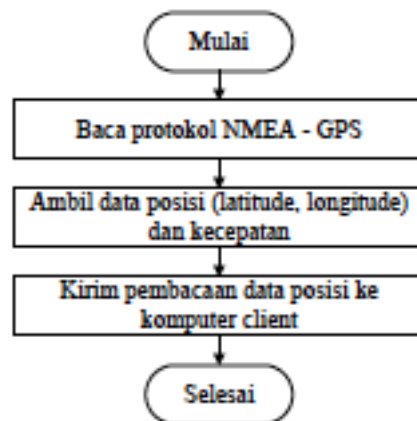
**Gambar 25** Algoritma program pada mikrokontroler slave 1

### 3.3.6 Algoritma Program Mikrokontroler Slave 2

Mikrokontroler slave 2 berfungsi membaca informasi koordinat posisi melalui GPS. Algoritma program pada mikrokontroler slave 2 ditunjukkan pada Gambar 26. Mikrokontroler slave 2 dalam keadaan siaga untuk membaca masukan melalui port serial. Port serial mikrokontroler slave 2 terhubung dengan modul GPS, sehingga dapat saling berkomunikasi. Port serial slave 2 membaca data yang dikirim oleh GPS berupa paket data informasi posisi, kecepatan, waktu dan lain - lain. Paket data tersebut terkemas dalam protokol NMEA, sehingga tidak langsung dapat dikodekan. Untuk mengkodekan informasi yang termuat, maka dilakukan parsing string sesuai



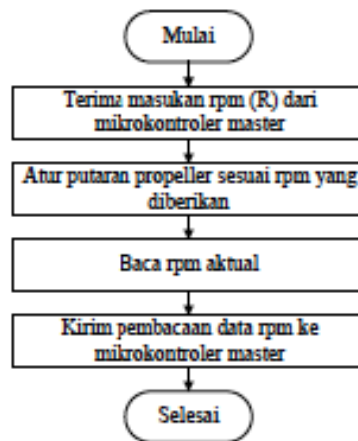
dengan format protokol NMEA. Dari paket data tersebut data yang diambil berupa posisi (latitude dan longitude) dan kecepatan. Kemudian data posisi dan kecepatan dikirimkan pada computer client secara serial melalui serial to usb converter. Alogaritma yang terdapat pada Mikrokontroler slave 2 selalu dikerjakan secara berulang selama sistem minimum Mikrokontroler slave 2 terhubung dengan catu daya.



**Gambar 26** Algoritma program pada mikrokontroler slave 2

### 3.3.7 Algoritma Program Mikrokontroler Slave 3

Mikrokontroler slave 3 berfungsi mengatur kecepatan putar propeller dan melakukan monitor kecepatan putar propeller. Algoritma program mikrokontroler slave 3 ditunjukkan pada Gambar 27. Mikrokontroler slave 3 dalam keadaan siaga untuk membaca masukan melalui port serial. Port serial Mikrokontroler slave 3 terhubung dengan mikrokontroler master, sehingga dapat saling berkomunikasi. Sewaktu port serial slave 3 membaca data sebesar R (nilai R dapat berubah nilainya), maka R merupakan nilai kontrol masukan ESC. Selanjutnya mikrokontroler slave 3 mengatur keluaran sinyal PWM yang diperlukan untuk mengatur putaran motor brushless sesuai besarnya nilai R. Motor brushless terkopel dengan shaft dan propeller. Pada saat itu juga mikrokontroler slave 3 membaca besarnya pulsa melalui pembacaan sensor optocoupler terhadap rotary encoder. Besarnya pulsa yang terbaca dikonversikan ke dalam rpm. Kemudian nilai rpm aktual dikirimkan ke mikrokontroler master melalui port serial. Alogaritma yang terdapat pada mikrokontroler slave 3 selalu dikerjakan secara berulang selama sistem minimum mikrokontroler slave 3 terhubung dengan catu daya.

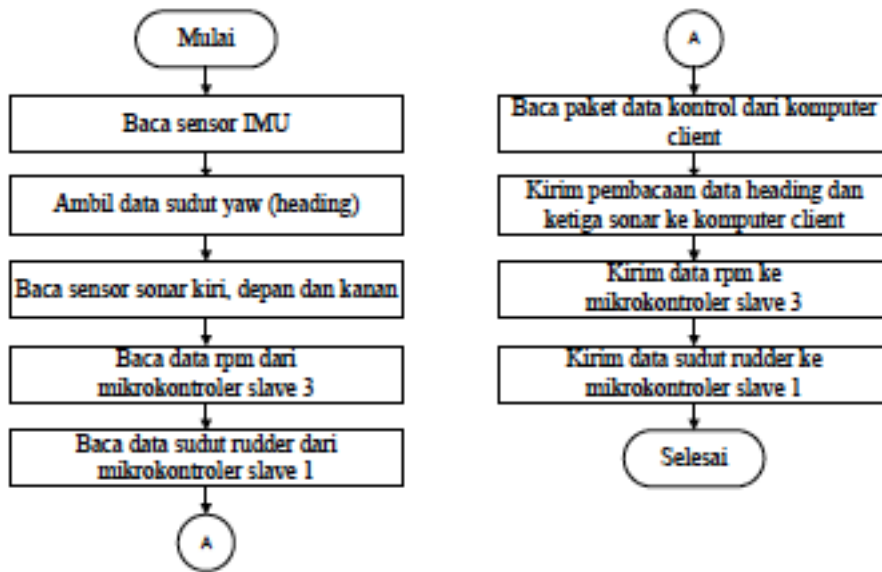


**Gambar 27** Algoritma program pada mikrokontroler slave 3

### 3.3.8 Algoritma Program Mikrokontroler Master

Mikrokontroler master berfungsi memproses masukan dari sensor IMU, sonar, slave 1 dan slave 3. Meneruskannya berupa paket sekumpulan data berisikan informasi kondisi instrumen kapal. Algoritma program mikrokontroler master ditunjukkan pada Gambar 28. Mikrokontroler master dalam keadaan siaga untuk membaca masukan melalui port serial.

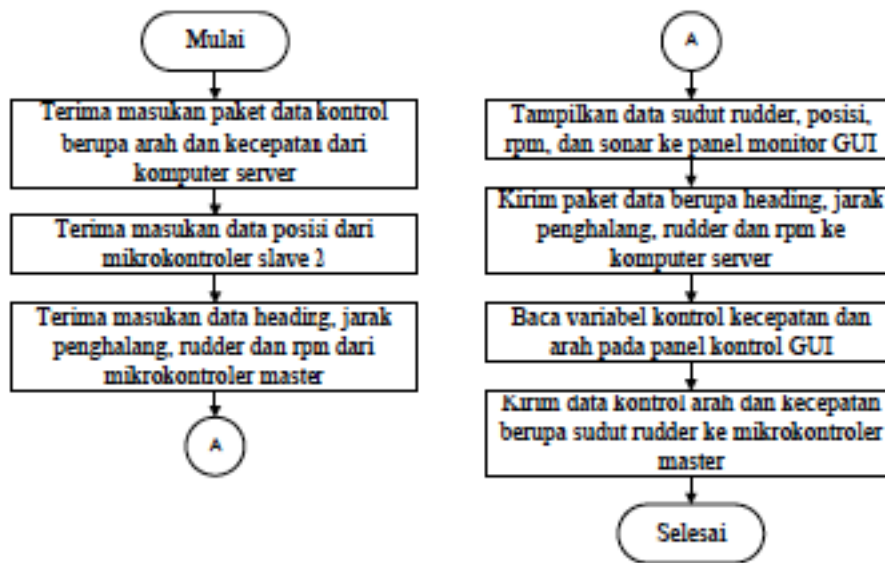
Port serial mikrokontroler master terhubung dengan beberapa modul antara lain sensor IMU, sensor sonar (kiri, kanan dan depan), mikrokontroler slave 1, mikrokontroler slave 3 dan komputer client, sehingga dapat saling berkomunikasi. Mikrokontroler master membaca data heading dari sensor magnetometer IMU melalui koneksi serial I2C. Membaca data masing – masing jarak sensor sonar kanan, kiri dan depan melalui pin analog to digital converter (ADC). Membaca data rpm yang dikirim oleh mikrokontroler slave 3 melalui koneksi serial. Membaca sudut rudder yang dikirim oleh mikrokontroler slave 1 melalui koneksi serial. Membaca paket data kontrol berupa kontrol kecepatan dan arah yang dikirim oleh computer client melalui koneksi usb to serial converter. Selanjutnya data jarak kapal terhadap penghalang sebelah kiri, kanan, depan, heading, rpm, dan pergerakan rudder dikirimkan ke komputer client. Data control kecepatan dikirimkan ke mikrokontroler slave 3. Data kontrol arah dikirimkan ke mikrokontroler slave 1. Algoritma yang terdapat pada mikrokontroler master selalu dikerjakan secara berulang selama sistem minimum mikrokontroler master terhubung dengan catu daya.



**Gambar 28** Algoritma program pada mikrokontroler master

### 3.3.9 Algoritma Software GUI Berbasis Matlab pada Komputer Client

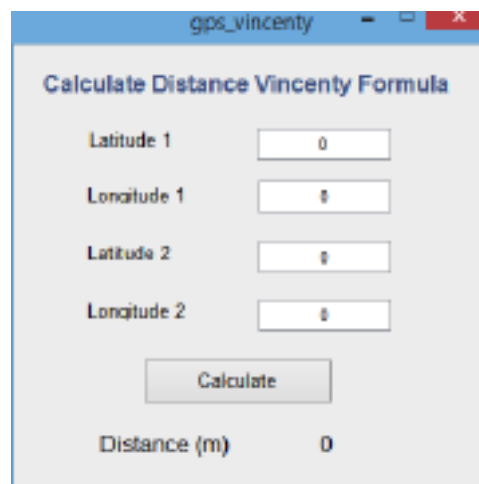
Program matlab GUI komputer client berfungsi untuk melakukan monitor sudut rudder kapal, perancangan GUI komputer client dapat dilihat pada Gambar 29. Komputer client dalam keadaan siaga untuk membaca masukan melalui port usb. Port usb komputer client terhubung dengan mikrokontroler master, mikrokontroler slave 2 dan komputer server, sehingga dapat saling berkomunikasi. Komputer client menerima informasi dari komputer server berupa masukan kontrol arah dan kecepatan, menerima informasi data posisi kapal dari mikrokontroler slave 2 dan menerima informasi berupa heading, rpm dan jarak kapal terhadap halangan dari mikrokontroler master. Kemudian informasi data yang berasal dari mikrokontroler ditampilkan kedalam panel monitor pada GUI komputer client dan diteruskan ke komputer server melalui komunikasi wireless. Informasi data yang berasal dari komputer server akan langsung diteruskan ke mikrokontroler sesuai dengan tugas masing – masing sebagai pengendalian arah dan kecepatan kapal.



**Gambar 29** Algoritma eksekusi program pada matlab GUI komputer client

### 3.3.10 Aplikasi Formula Vincenty Berbasis Matlab GUI

Formula vincenty adalah sebuah metode yang digunakan untuk memperoleh jarak antara 2 titik koordinat posisi yang sudah diketahui. Aplikasi formula vincenty ditunjukkan pada Gambar 30.



**Gambar 30** Formula vincenty diaplikasikan pada matlab GUI

Interface tersebut dirancang menggunakan Matlab GUI. Untuk menggunakan software tersebut cukup mudah, yaitu dengan memasukkan nilai koordinat pertama dan nilai koordinat kedua. Nilai lintang koordinat pertama dimasukkan ke kolom masukan latitude 1, nilai bujur koordinat pertama dimasukkan ke kolom masukan

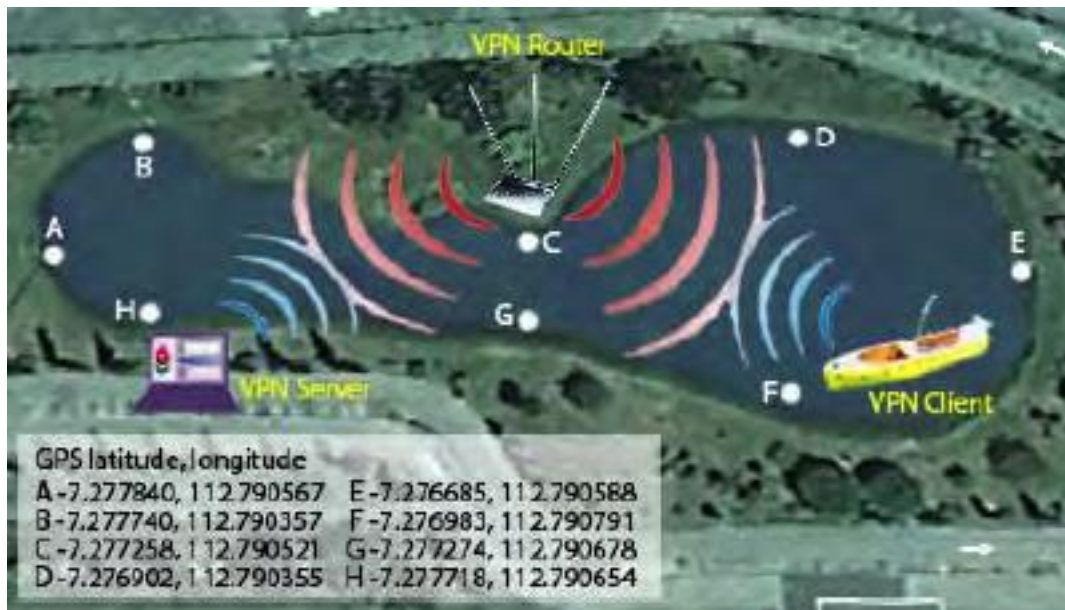
longitude 1, nilai lintang koordinat kedua dimasukkan ke kolom masukan latitude 2 dan nilai bujur koordinat kedua dimasukkan ke kolom masukan longitude 2. Semua kolom dipastikan mempunyai nilai, kemudian tekan tombol calculate untuk menampilkan hasil perhitungan jarak dalam satuan meter.

### 3.4 Skenario Pengujian Kapal

Penentuan lokasi pengujian merupakan hal yang penting dalam memenuhi kriteria pengujian kapal. Menurut standar IMO pengujian kapal dilakukan ditempat yang luas dengan kondisi air yang tenang, tidak dipengaruhi oleh gaya eksternal seperti angin, gelombang dan arus, kecuali gaya yang ditimbulkan oleh sistem propulsi. Penelitian berbasis eksperimen yang dilakukan oleh (Im,2010) menggunakan kapal skala 3 meter. Pengujian kapal dilakukan di laut terbuka, penelitian tersebut juga serupa oleh penelitian yang dilakukan oleh (David Moreno,2013). Karena keterbatasan lokasi indoor (tertutup) yang sesuai dengan kriteria tersebut, maka penelitian ini dilakukan di ruang terbuka. Pengujian kapalprototipe ini dilakukan di kolam Graha-ITS, dikarenakan area kolam yang cukup untuk dilakukan uji turning circle dan zig-zag. Waktu yang dipilih untuk pengujian antara pukul 07.00 – 10.00 atau 15.00 – 17.00, dikarenakan angin yang berhembus cukup tenang sehingga hampir tidak terjadi gelombang (Gambar 31).



**Gambar 31** Lokasi pengujian kapal di kolam Graha Institut Teknologi Sepuluh Nopember – Surabaya.

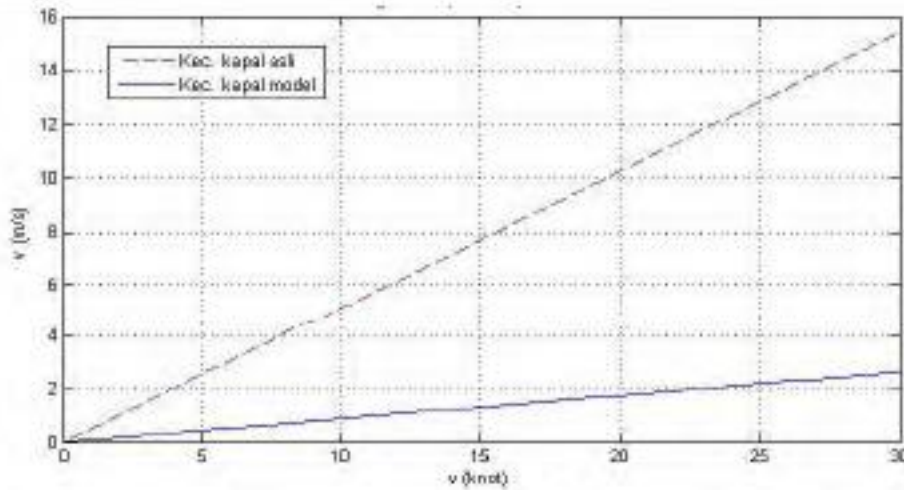


**Gambar 32** Skenario pengujian kapal

Luas kolam dapat diketahui melalui perhitungan jarak antar kedua titik koordinat GPS yaitu latitude dan longitude. Dari titik yang sudah diketahui pada Gambar 32 maka jarak titik A ke E 127.755 meter, jarak titik D ke F 48.973 meter, jarak titik C ke G 17.427 meter dan jarak titik B ke H 32.887 meter. Untuk pengujian turning circle dilakukan lintasan memanjang kolam, sedangkan pengujian zig-zag dilakukan pada kolam yang mempunyai diameter paling lebar. Pengujian turning circle yang dilakukan dengan 3 variasi yaitu dengan menggerakkan sudut rudder sebesar 10, 20 dan 35 derajat. Sedangkan pengujian zig-zag dilakukan dengan 2 variasi yaitu 20 dan 30 derajat, karena melakukan zig-zag 35 derajat tidak mencukupi untuk dilakukan di kolam ini.

Kecepatan operasional prototipe dihitung dengan menggunakan Froude number. Bilangan froude adalah sebuah bilangan tak bersatuan yang digunakan untuk mengukur resistensi dari sebuah benda yang bergerak melalui air, dan membandingkan benda-bendadengan ukuran yang berbeda-beda. Rumus Froude number dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.2 berikut ini :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (3.2)$$



**Gambar 33** Kecepatan kapal SIGMA extended asli dan skala model

Dengan  $Fr$  sebagai bilangan froude,  $v$  adalah kecepatan kapal asli (m/s),  $g$  merupakan gaya gravitasi ( $m/s^2$ ) dan  $L$  adalah panjang kapal. Sehingga kecepatan kapal SIGMA extended dan kapal prototipe dapat direpresentasikan pada Gambar 33.

### 3.5 Perhitungan Parameter Dinamika Kapal Perang SIGMA Extended Skala 3 Meter Secara Nomoto

Pemodelan dinamika kapal menggunakan struktur model dinamika Nomoto. Model menggunakan satu variable gerak yaitu sudut yaw atau heading, sehingga model dinamika Nomoto sesuai untuk digunakan dalam rangka memperoleh model dinamika linier. Dari serangkaian pengujian, data yang digunakan dalam pemodelan yaitu turning circle 20 derajat yang telah melalui proses filter. Filter yang digunakan adalah moving average. Diketahui model dinamika Nomoto diketahui sebagai berikut :

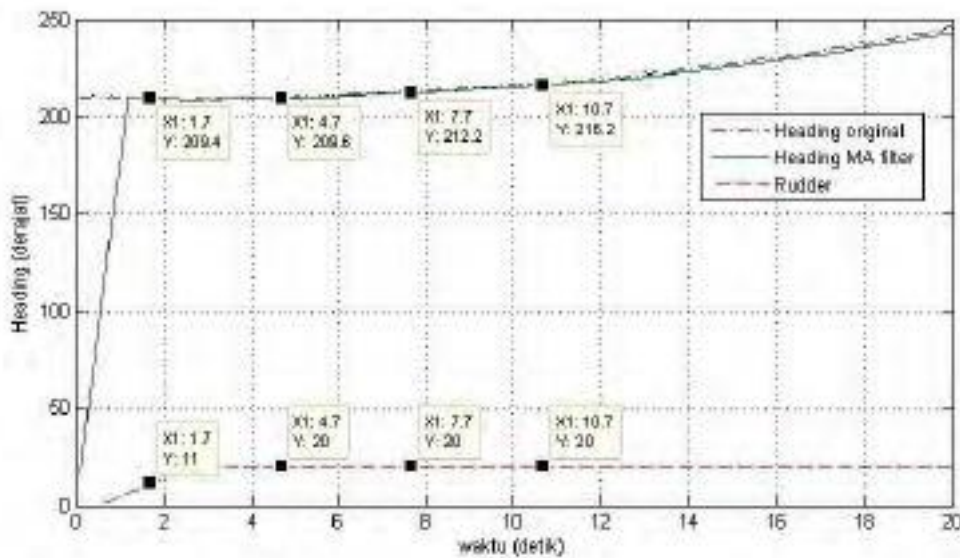
$$\frac{\psi}{\delta} = \frac{K(1+T_3s)}{s(1+T_1s)(1+T_2s)} \quad (3.2)$$

$$(1 + T_1s)(1 + T_2s)s\psi = K(1 + T_3s)\delta$$

Untuk memperoleh parameter  $K$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ , dan  $T_3$  dilakukan dengan cara menurunkan persamaan 3.2, sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
s\psi + s^2\psi(T_1 + T_2) + s^3\psi(T_1 \cdot T_2) &= \delta K + s\delta K T_3 \\
\Delta\psi + \Delta^2\psi(T_1 + T_2) + \Delta^3\psi(T_1 \cdot T_2) &= \delta K + \Delta\delta K T_3 \\
\Delta^2\psi(T_1 + T_2) + \Delta^3\psi(T_1 \cdot T_2) - \delta K - \Delta\delta K T_3 &= -\Delta\psi \\
\delta K + \Delta\delta K T_3 - \Delta^2\psi(T_1 + T_2) - \Delta^3\psi(T_1 \cdot T_2) &= \Delta\psi
\end{aligned}
\tag{3.3}$$

Dari persamaan 3.3 diperlukan lima data dalam menentukan nilai K, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, dan T<sub>3</sub>. Data yang diperlukan diantaranya δ (rudder), Δδ (selisih δ(t) dan δ(t-1)), Δψ (selisih ψ(t) dan ψ(t-1)), Δ<sup>2</sup>ψ (selisih ψ(t) dan ψ(t-2)), dan Δ<sup>3</sup>ψ (selisih ψ(t) dan ψ(t-3)). Data yang diperoleh dari pengujian turning circle 20 derajat yaitu δ (rudder) dan ψ (heading). Sedangkan nilai Δδ, Δψ, Δ<sup>2</sup>ψ dan Δ<sup>3</sup>ψ diperoleh melalui perhitungan. Data yang digunakan yaitu data rudder pada saat mengalami transisi hingga mencapai kondisi stabil 20 derajat. Empat sampel data heading pada database turning circle 20 derajat dapat dilihat pada gambar 34, dimana garis berwarna hijau adalah sudut heading dan garis berwarna biru adalah sudut rudder.



**Gambar 34** Pemilihan data sample heading pada data pengujian turning circle 20 derajat

**Tabel 5** Data sample pengujian turning circle 20 derajat

Data	Time sampling (detik)	δ Rudder (derajat)	Δδ	ψ Heading (derajat)	Δψ	Δ <sup>2</sup> ψ	Δ <sup>3</sup> ψ
1	1.7	11	1	209.42	0.04	0.06	0.04



2	4.7	20	0	209.58	0.02	0.18	0.13
3	7.7	20	0	212.25	0.17	0.19	0.29
4	10.7	20	0	216.36	0.10	0.31	0.58

Tabel 5 merupakan data sudut rudder ( $\delta$ ), selisih sudut rudder ( $\Delta\delta$ ), sudut heading ( $\psi$ ), selisih heading ( $\Delta\psi$ ), selisih kuadrat heading ( $\Delta^2\psi$ ) dan selisih pangkat tiga heading ( $\Delta^3\psi$ ) yang terdapat pada 4 titik yaitu titik 1, titik 2, titik 3, dan titik 4. Dari data yang tersaji pada tabel 3.3, maka dapat dihitung nilai K, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, dan T<sub>3</sub> dengan cara sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_1 \\ b_1 \\ b_1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} 20 & 1 & -0,59 & -0,042 \\ 20 & 0 & -0,179 & -0,125 \\ 20 & 0 & -0,189 & -0,29 \\ 20 & 0 & -0,308 & -0,576 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K \\ KT_3 \\ (T_1 + T_2) \\ (T_1 \cdot T_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,04 \\ 0,179 \\ 0,169 \\ 0,1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} K \\ KT_3 \\ (T_1 + T_2) \\ (T_1 \cdot T_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20 & 1 & -0,59 & -0,042 \\ 20 & 0 & -0,179 & -0,125 \\ 20 & 0 & -0,189 & -0,29 \\ 20 & 0 & -0,308 & -0,576 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0,04 \\ 0,179 \\ 0,169 \\ 0,1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} K \\ KT_3 \\ (T_1 + T_2) \\ (T_1 \cdot T_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,014 \\ -0,2 \\ 0,508 \\ 0,029 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Dari perhitungan persamaan 3.6 diatas didapatkan persamaan 3.7 didapatkan nilai K sebesar 0,014 sehingga dapat dihitung nilai T<sub>3</sub> sebesar -14,286. Selanjutnya nilai T<sub>1</sub> dan T<sub>2</sub> dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$\begin{aligned} T_1 + T_2 &= 0,508 \\ T_1 &= 0,508 - T_2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$T_1 T_2 = 0,029 \quad (3.9)$$

$$T_1 T_2 = 0,029 \quad (3.10)$$

Besar  $T_1$  dan  $T_2$  dicari menggunakan persamaan 3.11.

$$T_1, T_2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.11)$$

$$T_1, T_2 = \frac{-0,508 \pm \sqrt{0,258 + 0,116}}{-2}$$

$$T_1, T_2 = \frac{-0,508 \pm 0,612}{-2}$$

$$T_1 = \frac{-0,508 + 0,612}{-2}; T_2 = \frac{-0,508 - 0,612}{-2}$$

$$T_1 = 0,052 \quad (3.12)$$

$$T_2 = 0,56$$

Dari eksperimen pengujian turning circle sudut rudder 20 derajat ini diperoleh parameter Nomoto dengan nilai  $K$  sebesar 0,014,  $T_1$  sebesar 0,052,  $T_2$  sebesar 0,56 dan  $T_3$  adalah -14,286.

## **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini mendeskripsikan hasil dan pembahasan dari perancangan yang telah dilakukan berdasarkan hasil eksperimen. Software yang digunakan untuk eksperimen dan simulasi pada penelitian ini menggunakan Matlab R2013b berbasis m-file dan GUI. Analisa awal disajikan performansi pengujian kapal meliputi uji turning circle dan zig-zag. Hasil evaluasi kriteria kapal menggunakan standar yang telah ditetapkan IMO. Hasil perhitungan parameter model dinamika kapal secara Nomoto. Kemudian yang terakhir yaitu analisa step respon open loop melalui uji validasi model.

### **4.1 Hasil Eksperimen Pengujian Turning Circle pada Kapal Perang Kelas SIGMA Extended Skala 3 Meter**

Pengujian kapal prototipe dilakukan di kolam Graha-ITS. Pengujian dilakukan pada pukul 15.00 sampai dengan 17.00. Keseluruhan percobaan ini menggunakan satu variasi kecepatan rata – rata 1 sampai 1,2 m/s. Tahap persiapan awal pengujian ini adalah dengan mengintegrasikan seluruh komponen instrumen yang terpasang dan memastikan kapasitas baterai dalam keadaan penuh.

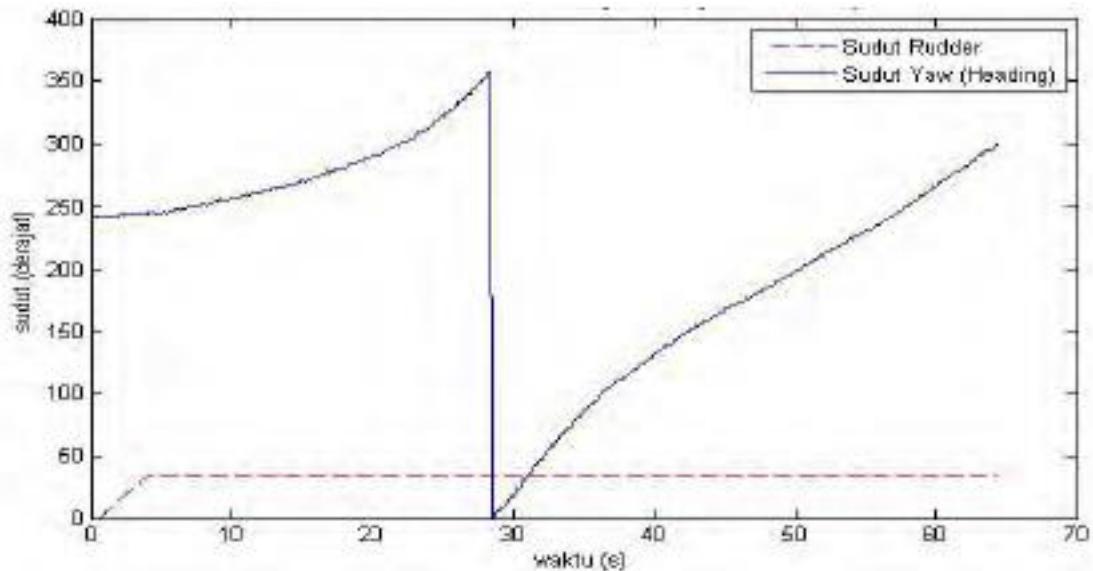
Tahap kedua adalah menjalankan software matlab GUI pada computer client kemudian melakukan pengaturan komunikasi port serial dan IP-port wireless VPN, pada komputer server hanya dilakukan pengaturan IP-port wireless VPN. Untuk memastikan sistem instrumen berjalan dengan baik, maka masing - masing diberi masukan sinyal kontrol. Pengecekan apakah masukan yang diberikan sesuai dengan respon aktuator dan apakah informasi sensor yang ditampilkan sesuai dengan kondisi kapal.

Setelah tahap persiapan selesai, selanjutnya adalah pengujian utama turning circle dengan menetapkan set point heading kapal. Menentukan set point heading kapal pada turning circle ini penting guna memberi masukan pada software berapa kali jumlah putaran yang diinginkan. Pengujian yang dilakukan yaitu turning circle variasi 10, 20 dan 35 derajat. GUI Matlab sudah ditanamkan algoritma turning circle sebelumnya sehingga pengujian ini berjalan secara otomatis.

#### **4.1.1 Hasil Eksperimen Pengujian Turning Circle 35 Derajat**

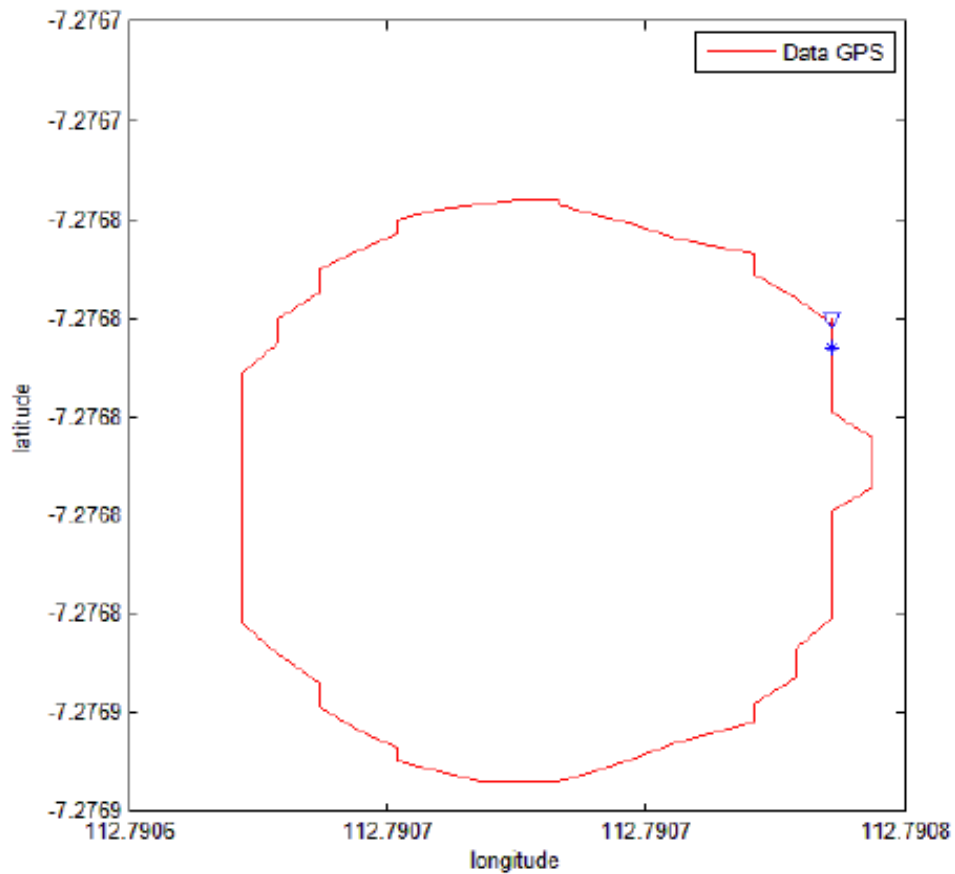
Pengujian pertama yaitu turning circle 35 derajat Gambar 4.1. Pada pengujian turning circle 35 derajat data eksperimen disampling dengan waktu 0,1 detik. Kecepatan

tertinggi 0,7 m/s. Set point heading kapal awalnya menunjukkan heading 241 derajat, kemudian kapal mulai bergerak melingkar. Pada Gambar 35 waktu tempuh satu putaran yaitu ketika heading kapal menunjukkan arah 241 derajat selanjutnya yaitu pada waktu 56,6 detik.



**Gambar 35** Data rudder dan heading pengujian turning circle 35 derajat

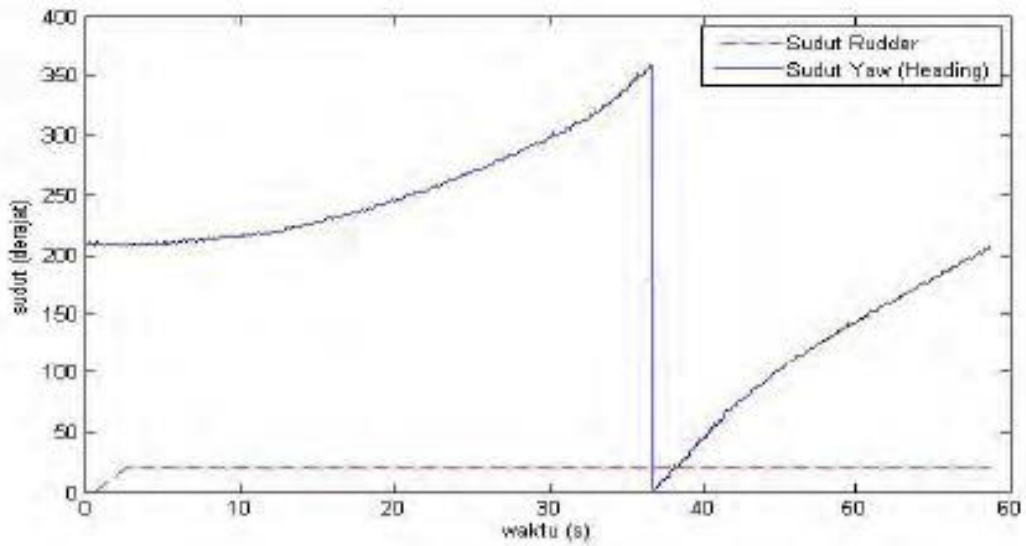
Untuk memperoleh lintasan kapal selama pengujian turning circle 35 derajat, dilakukan dengan mengambil informasi koordinat posisi berupa latitude dan longitude selama proses pengujian berlangsung. Ketelitian GPS yang digunakan mencapai 2,2 meter dengan pembacaan 4 satelit. Pengambilan informasi posisi dilakukan setiap 0,1 detik sekali. Lintasan kapal yang diperoleh melalui hasil eksperimen turning circle 35 derajat ditunjukkan seperti pada Gambar 36. Terlihat bahwa lintasan turning circle 35 derajat tidak melingkar secara sempurna dikarenakan ketelitian GPS yang digunakan mencapai 2,2 meter. Mulanya kapal berada pada tanda segitiga, bergerak melingkar dengan pemberian sudut rudder 35 derajat. Kapal telah menempuh lintasan satu putaran ditunjukkan pada tanda bintang.



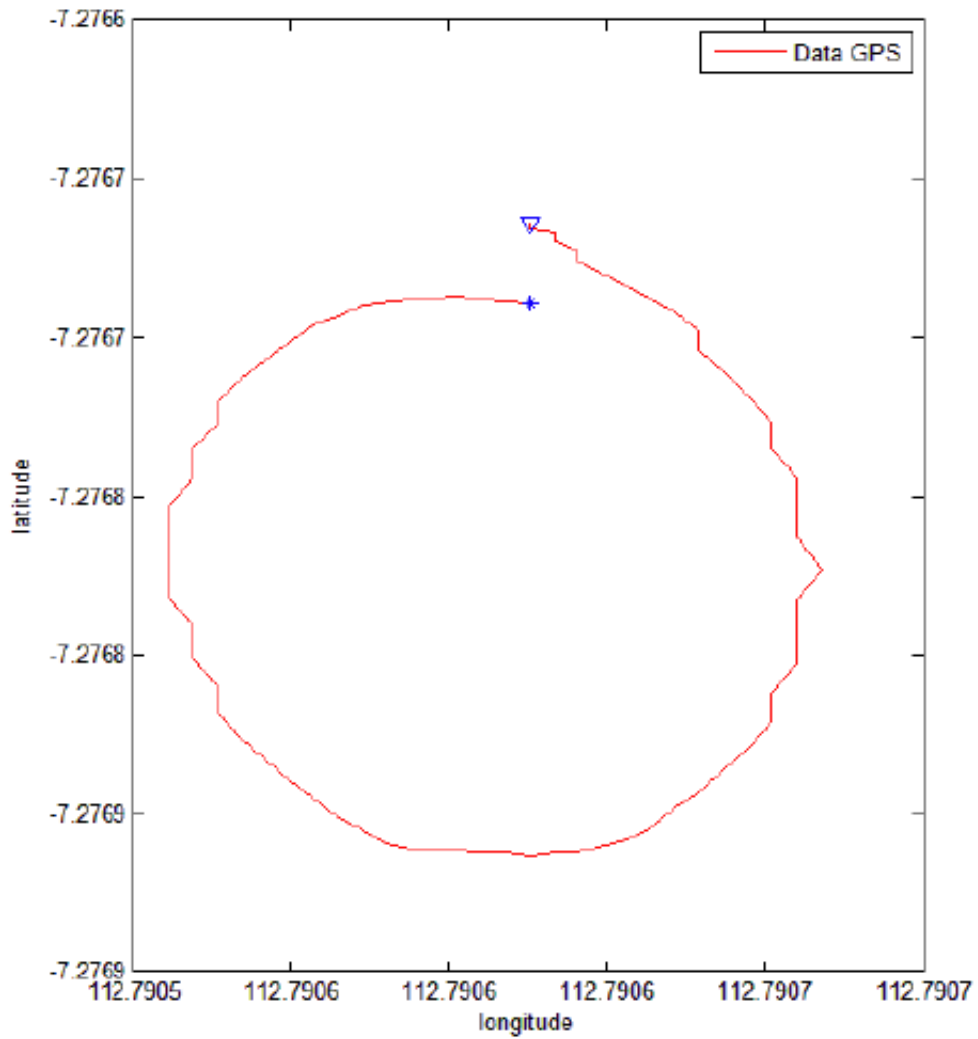
**Gambar 36** Data koordinat GPS pengujian turning circle 35 derajat

#### 4.1.2 Hasil Eksperimen Pengujian Turning Circle 20 Derajat

Pengujian kedua yaitu turning circle 20 derajat Gambar 37. Pengujian turning circle 20 derajat data eksperimen disampling dengan waktu 0,1 detik. Kecepatan tertinggi 1 m/s. Set point heading kapal awalnya menunjukkan 210 derajat, kemudian kapal mulai bergerak melingkar. Pada Gambar 37 waktu tempuh satu putaran ketika kapal berada di 210 derajat, yaitu pada waktu mencapai 58,7 detik.



**Gambar 37** Data rudder dan heading pengujian turning circle 20 derajat

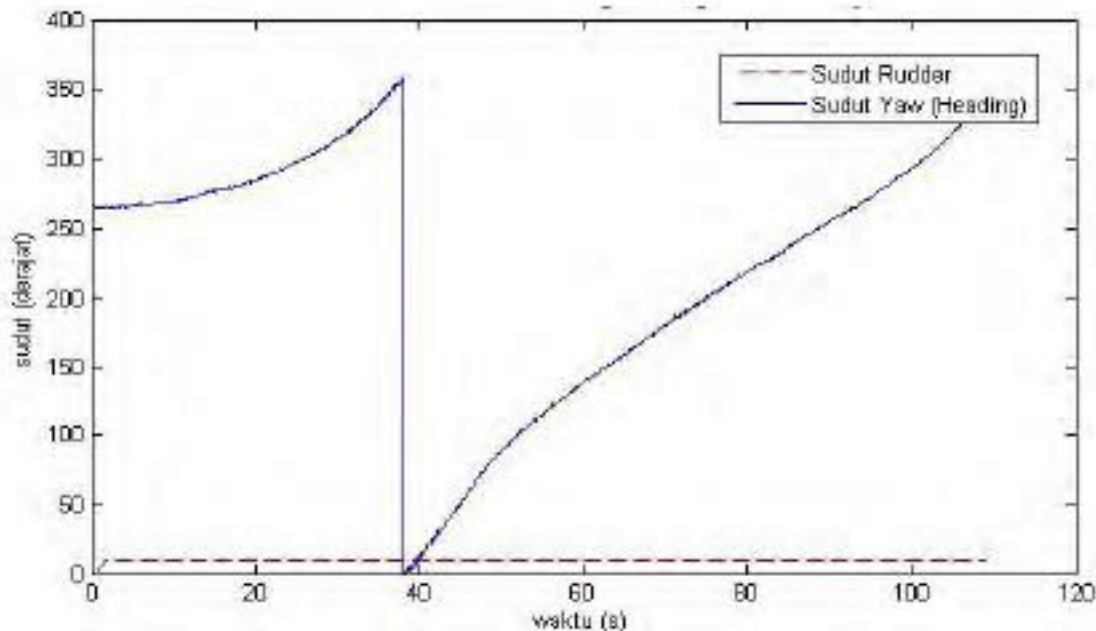


**Gambar 38** Data koordinat GPS pengujian turning circle 20 derajat

Untuk memperoleh lintasan kapal selama pengujian turning circle 20 derajat, dilakukan dengan mengambil informasi koordinat posisi berupa latitude dan longitude selama proses pengujian berlangsung. Ketelitian GPS yang digunakan mencapai 2,2 meter dengan pembacaan 4 satelit. Pengambilan informasi posisi dilakukan setiap 0,1 detik sekali. Lintasan kapal yang diperoleh melalui hasil eksperimen turning circle 20 derajat ditunjukkan seperti pada Gambar 38. Terlihat bahwa lintasan turning circle 20 derajat melingkar hamper sempurna. Mulanya kapal berada pada tanda segitiga, bergerak melingkar dengan pemberian sudut rudder 20 derajat. Kapal telah menempuh lintasan satu putaran ditunjukkan pada tanda bintang.

#### 4.1.3 Hasil Eksperimen Pengujian Turning Circle 10 Derajat

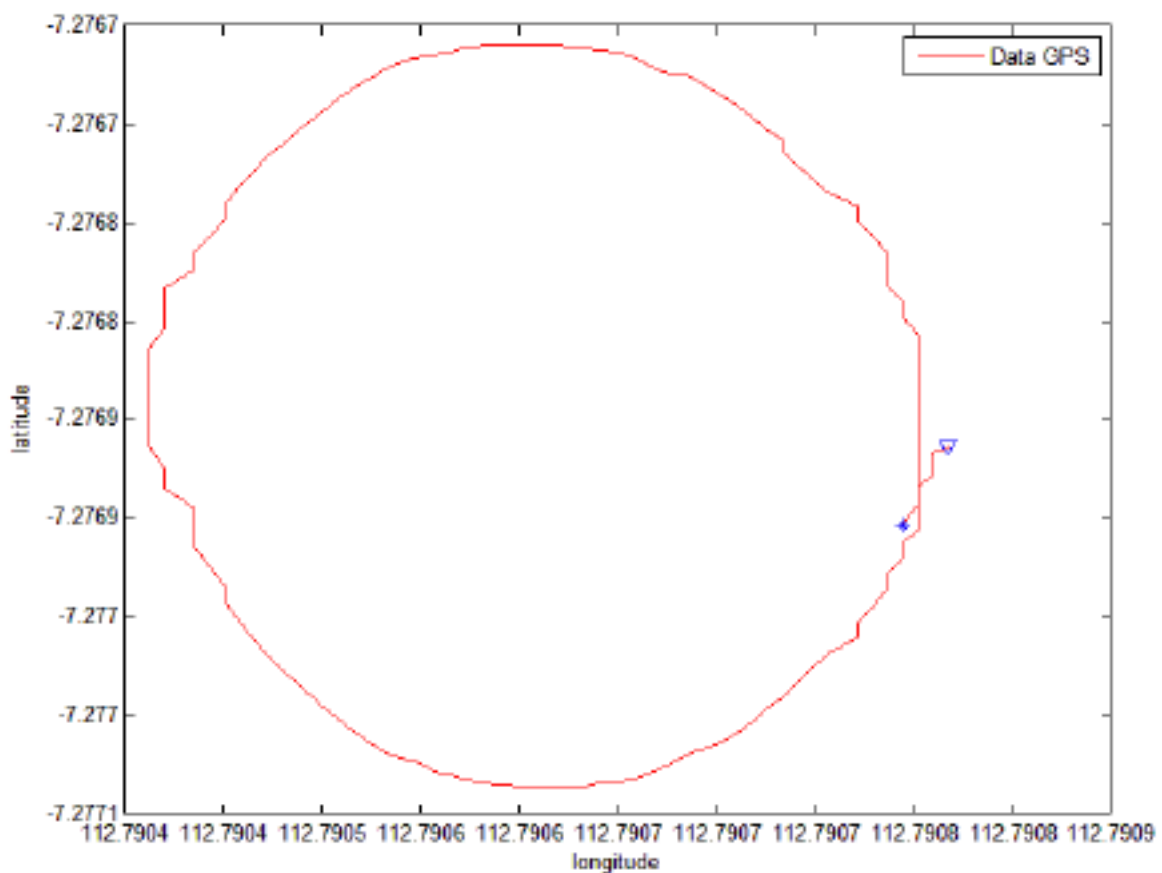
Pengujian ketiga yaitu turning circle 10 derajat Gambar 39. Pengujian turning circle 10 derajat data eksperimen disampling dengan waktu 0,1 detik. Kecepatan tertinggi 1,1 m/s. Set point heading kapal awalnya menunjukkan 265 derajat, kemudian kapal mulai bergerak melingkar. Pada Gambar 39 waktu tempuh satu putaran ketika kapal berada di 265 derajat, yaitu pada waktu mencapai 93,2 detik.



**Gambar 39** Data rudder dan heading pada pengujian turning circle 10 derajat

Untuk memperoleh lintasan kapal selama pengujian turning circle 10 derajat, dilakukan dengan mengambil informasi koordinat posisi berupa latitude dan longitude

selama proses pengujian berlangsung. Ketelitian GPS yang digunakan mencapai 2,2 meter dengan pembacaan 4 satelit. Pengambilan informasi posisi dilakukan setiap 0,1 detik sekali. Lintasan kapal yang diperoleh melalui hasil eksperimen turning circle 10 derajat ditunjukkan seperti pada Gambar 40. Terlihat bahwa lintasan turning circle 10 derajat melingkar secara sempurna dikarenakan ketelitian GPS yang digunakan cukup kecil nilainya dari diameter lingkaran lintasan. Mulanya kapal berada pada tanda segitiga, bergerak melingkar dengan pemberian sudut rudder 10 derajat. Kapal telah menempuh lintasan satu putaran ditunjukkan pada tanda bintang.



**Gambar 40** Data koordinat GPS pengujian turning circle 10 derajat

#### **4.2 Hasil Eksperimen Pengujian Zig-Zag pada Kapal Perang Kelas SIGMA Extended Skala 3 Meter**

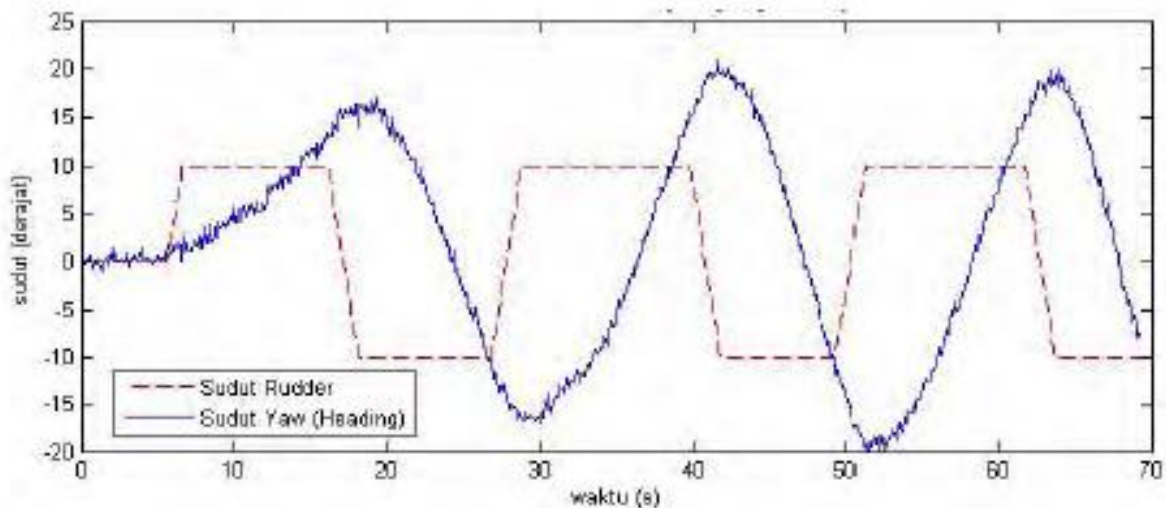
Pengujian kapal prototipe dilakukan di kolam Graha-ITS Pengujian dilakukan pada pukul 15.00 sampai dengan 17.00. Keseluruhan percobaan ini menggunakan satu variasi kecepatan rata – rata 1 sampai 1,2 m/s. Tahap persiapan awal dari pengujian ini adalah dengan mengintegrasikan seluruh komponen instrumen yang terpasang



dan memastikan kapasitas baterai dalam keadaan lebih dari 80%. Tahap kedua adalah menjalankan software matlab GUI pada komputer client kemudian melakukan pengaturan komunikasi port serial dan IP-port wireless VPN, pada komputer server hanya dilakukan pengaturan IP-port wireless VPN. Untuk memastikan sistem instrument berjalan dengan baik, maka masing - masing diberi masukan sinyal kontrol. apakah masukan yang diberikan sesuai dengan respon aktuator dan apakah informasi sensor yang ditampilkan sesuai dengan kondisi kapal. Setelah tahap persiapan selesai selanjutnya adalah pengujian utama zig-zag dengan menetapkan set point heading kapal. Menentukan set point heading kapal pada zig-zag ini penting guna member inputan pada software berapa kali jumlah putaran yang diinginkan. Pada Gambar 3.6 merupakan visualisasi GUI matlab yang terdapat pengujian zig-zag variasi 10 dan 20 derajat. Software GUI matlab sudah ditanamkan alogaritma zig-zag sebelumnya sehingga pengujian ini berjalan otomatis.

#### 4.2.1 Hasil Eksperimen Pengujian Zig-Zag 10 Derajat

Tidak hanya dilakukan pengujian turning circle 35, 20, dan 10 derajat, kapal perang kelas SIGMA ini juga dilakukan uji zig-zag dengan sudut rudder sebesar 10 derajat.



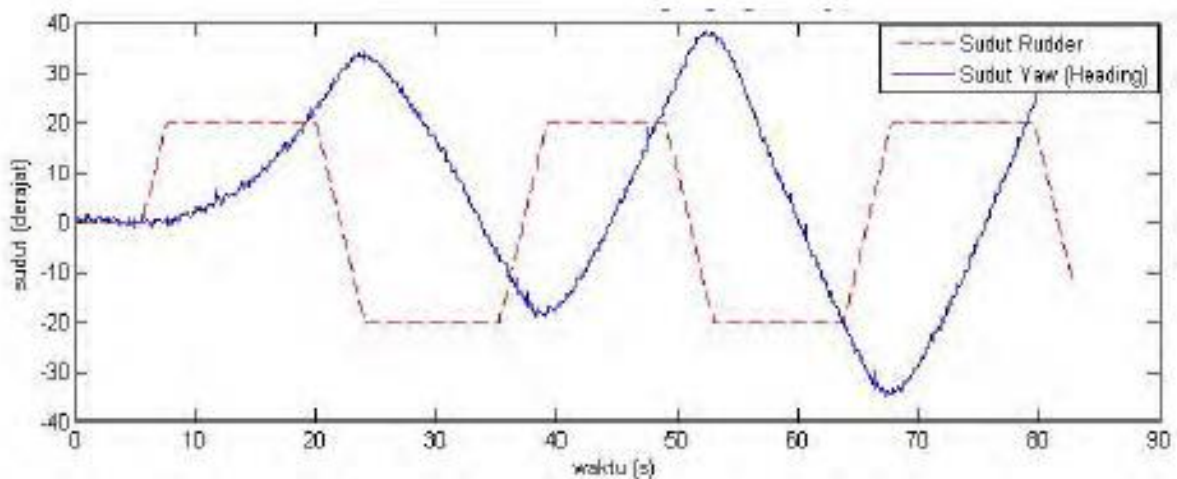
**Gambar 41** Data rudder dan heading pengujian zig-zag 10 derajat

Gambar 41 menunjukkan hubungan sudut pada data rudder dan heading pada saat pengujian zig-zag 10 derajat. Dari data eksperimen pengujian zig-zag 10 derajat

diketahui belokan pertama nilai heading sebesar 16,81 yaitu pada detik ke 19. Sedangkan pada belokan kedua nilai heading sebesar -16,88 yaitu pada detik ke 29,6.

#### 4.2.2 Hasil Eksperimen Pengujian Zig-Zag 20 Derajat

Selain pengujian zig-zag dengan sudut rudder sebesar 10 derajat, juga dilakukan uji zig-zag dengan sudut rudder yang berbeda yaitu 20 derajat. Gambar 42 menunjukkan hubungan antara sudut rudder dan sudut heading pada saat uji zig-zag dengan sudut rudder 20 derajat. Dari data eksperimen pengujian zig-zag 10 derajat diketahui belokan pertama nilai heading sebesar 32,64 yaitu pada detik ke 24. Sedangkan pada belokan kedua nilai heading sebesar -19,16 yaitu pada detik ke 39,9. Dari data yang diketahui, belokan ke-dua mengindikasikan kegagalan manuver dan mulai menyesuaikan kondisi pada belokan ke tiga.

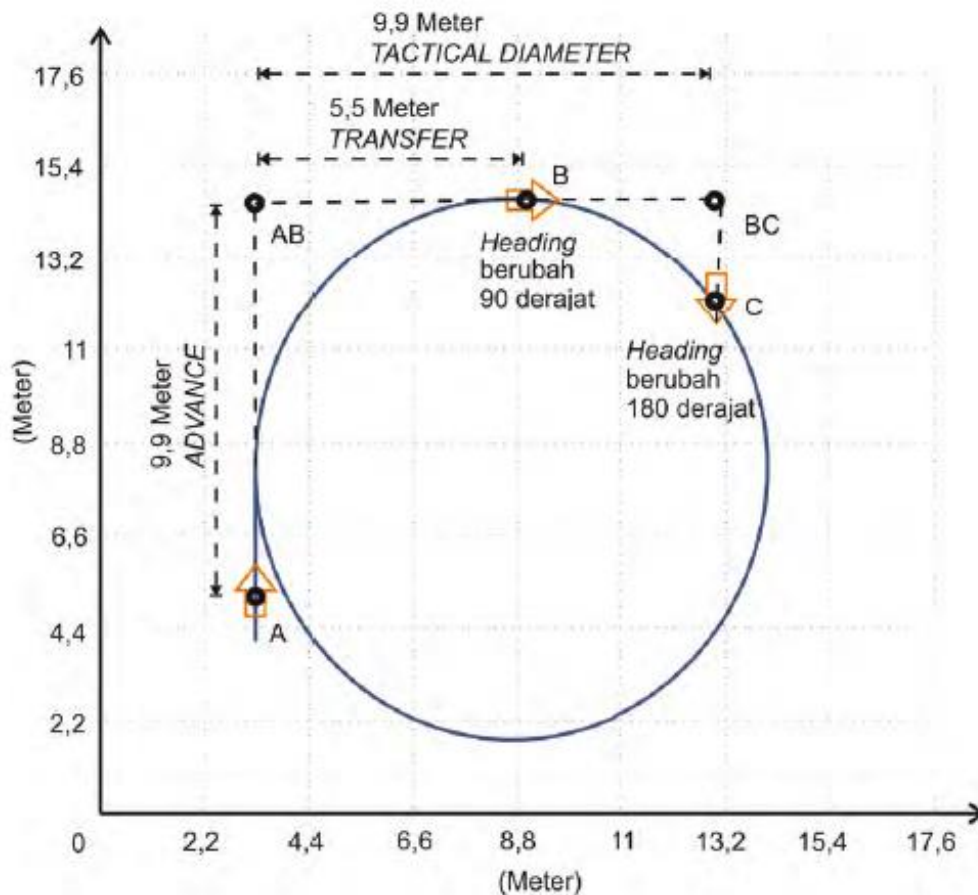


**Gambar 42** Data rudder dan heading pengujian zig-zag 20 derajat

#### 4.3 Evaluasi Kriteria Kapal Perang Kelas SIGMA Extended Skala 3 Meter

Evaluasi kriteria kapal mengindikasikan bahwa seberapa baik kemudi dan performansi kontrol penggerak rudder selama proses manuver turning circle dan zig-zag. Evaluasi kriteria kapal ini telah ditetapkan oleh IMO.

##### 4.3.1 Evaluasi Kriteria Kapal Pada Turning Circle 35 Derajat



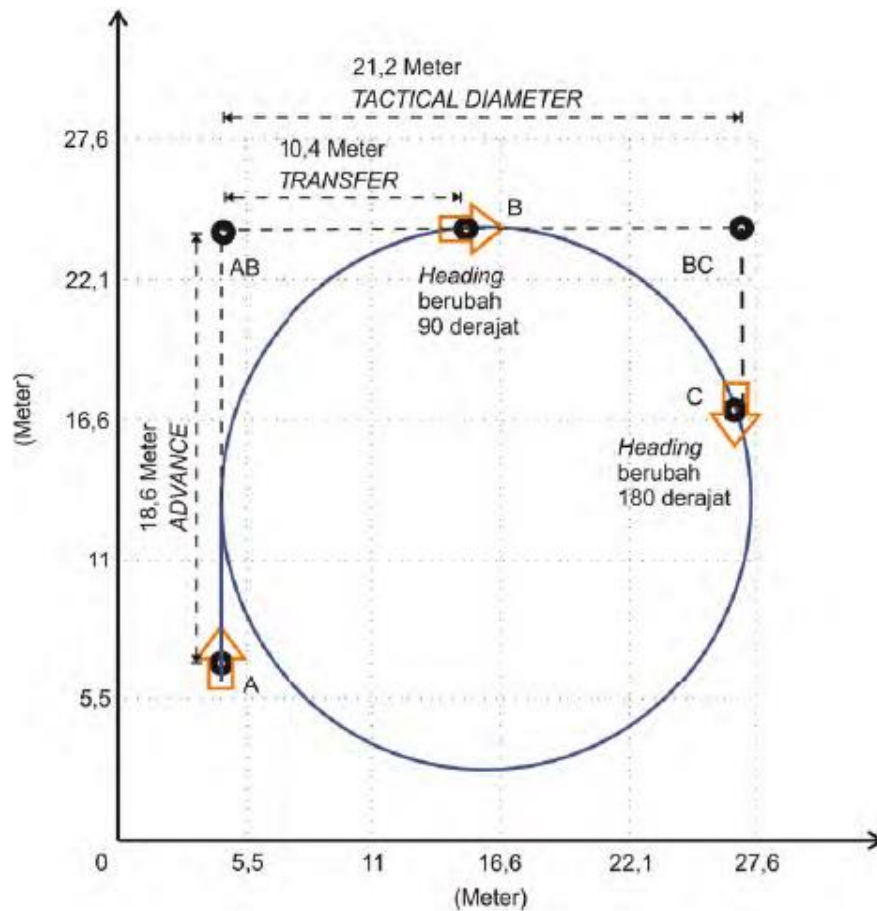
**Gambar 43** Evaluasi kriteria pengujian turning circle 35 derajat

Dari data eksperimen, diketahui titik A merupakan awal kapal bergerak yaitu berada di koordinat (lintang -7,276781 dan bujur 112,790786) bergerak 241 derajat arah heading kapal. Titik B merupakan posisi kapal ketika bergerak 90 derajat dari titik A, berada di koordinat (lintang -7,276872 dan bujur 112,79074) bergerak 333 derajat arah heading kapal. Titik C merupakan posisi kapal Ketika bergerak 180 derajat dari titik A, berada di koordinat (lintang -7,276864 dan bujur 112,790695) bergerak 63 derajat arah heading kapal. Titik AB merupakan proyeksi siku dari awal kapal bergerak dan telah mencapai 90 derajat arah heading kapal, berada di koordinat (lintang -7,27687 dan bujur 112,79079). Titik BC merupakan proyeksi siku kapal telah mencapai 90 derajat dan 180 derajat arah heading kapal, berada di koordinat (lintang -7,27687 dan bujur 112,7907). Jarak advance adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 90 derajat sumbu y, pada Gambar 43 pada titik A ke AB sebesar 9,953 meter. Jarak transfer adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 90 derajat sumbu x, pada Gambar 43 pada titik AB ke B sebesar 5,521 meter. Jarak tactical diameter adalah jarak pelaksanaan awal

kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 180 derajat sumbu x, pada Gambar 43 pada titik AB ke BC sebesar 9,939 meter.

#### **4.3.2 Evaluasi Kriteria Kapal Pada Turning Circle 20 Derajat**

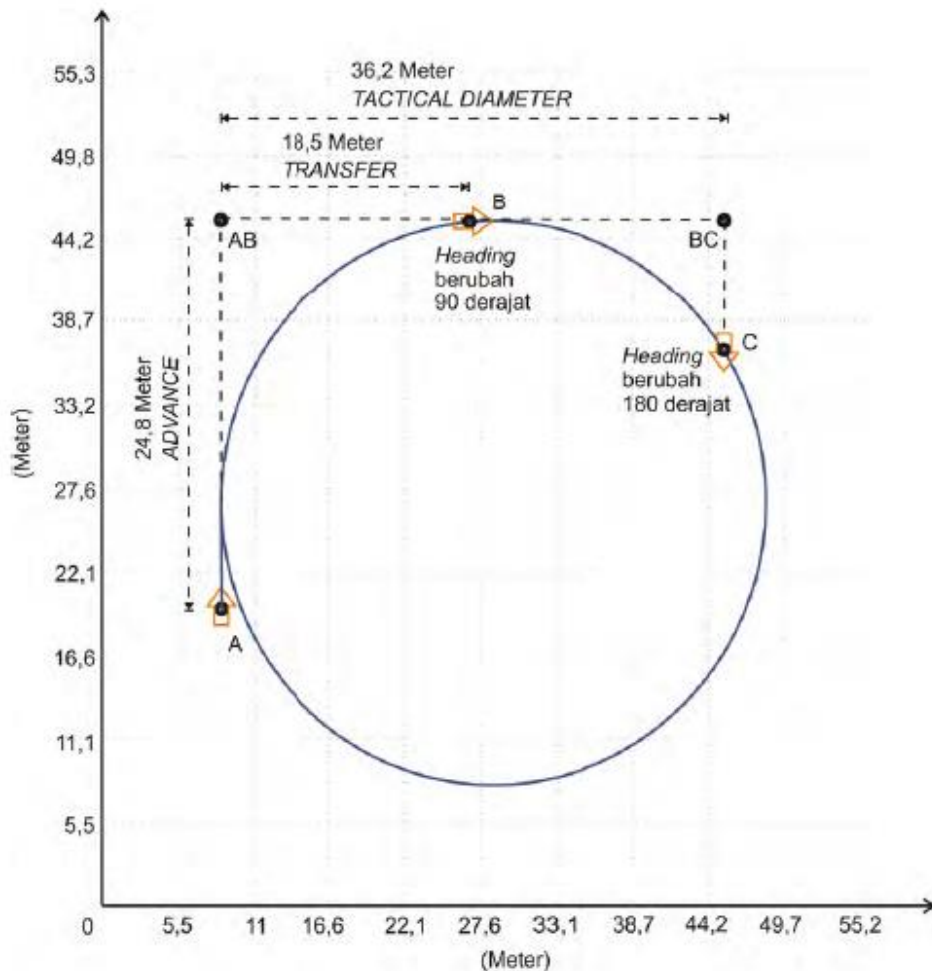
Dari hasil pengujian turning circle sudut rudder 20 derajat pada subbab 4.1.2, didapatkan evaluasi kriteria kapal pada Gambar 44. Gambar tersebut adalah visualisasi dalam satuan meter dari gambar 4.4. Dari data eksperimen, diketahui titik A merupakan awal kapal bergerak yaitu berada di koordinat (lintang -7,276715 dan bujur 112,790626) bergerak 209 derajat arah heading kapal. Titik B merupakan posisi kapal ketika bergerak 90 derajat dari titik A, berada di koordinat (lintang -7,276886 dan bujur 112,790687) bergerak 299 derajat arah heading kapal. Titik C merupakan posisi kapal ketika bergerak 180 derajat dari titik A, berada di koordinat (lintang -7,276909 dan bujur 112,79058) bergerak 29 derajat arah heading kapal. Titik AB merupakan proyeksi siku dari awal kapal bergerak dan telah mencapai 90 derajat arah heading kapal, berada di koordinat (lintang -7,276822 dan bujur 112,790756). Titik BC merupakan proyeksi siku kapal telah mencapai 90 derajat dan 180 derajat arah heading kapal, berada di koordinat (lintang -7,276956 dan bujur 112,790619). Jarak advance adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 90 derajat sumbu y, pada Gambar 44 pada titik A ke AB sebesar 18,604 meter. Jarak transfer adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 90 derajat sumbu x, pada Gambar 44 pada titik AB ke B sebesar 10,4 meter. Jarak tactical diameter adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 180 derajat sumbu x, pada Gambar 44 pada titik AB ke BC sebesar 21,178 meter.



**Gambar 44** Evaluasi kriteria pengujian turning circle 20 derajat

#### 4.3.3 Evaluasi Kriteria Kapal Pada Turning Circle 10 Derajat

Dari hasil pengujian turning circle sudut rudder 10 derajat pada subbab 4.1.3, didapatkan evaluasi kriteria kapal. Dari data eksperimen, diketahui titik A merupakan awal kapal bergerak yaitu berada di koordinat (lintang -7,276914 dan bujur 112,790817) bergerak 265 derajat arah heading kapal. Titik B merupakan posisi kapal ketika bergerak 90 derajat dari titik A, berada di koordinat (lintang -7,277085 dan bujur 112,790588) bergerak 355 derajat arah heading kapal. Titik C merupakan posisi kapal ketika bergerak 180 derajat dari titik A, berada di koordinat (lintang -7,276994 dan bujur 112,790451) bergerak 85 derajat arah heading kapal. Titik AB merupakan proyeksi siku dari awal kapal bergerak dan telah mencapai 90 derajat arah heading kapal, berada di koordinat (lintang -7,277153 dan bujur 112,790708). Titik BC merupakan proyeksi siku kapal telah mencapai 90 derajat dan 180 derajat arah heading kapal, berada di koordinat (lintang -7,277031 dan bujur 112,790431).



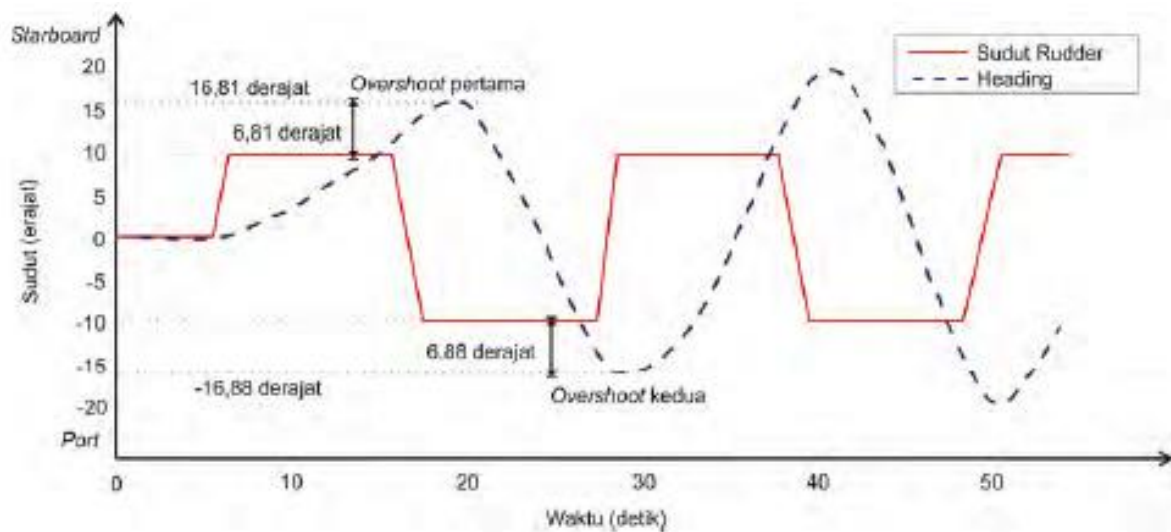
**Gambar 45** Evaluasi kriteria pengujian turning circle 10 derajat

Jarak advance adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 90 derajat sumbu y, pada Gambar 45 pada titik A ke AB sebesar 24,79 meter. Jarak transfer adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 90 derajat sumbu x, pada Gambar 45 pada titik AB ke B sebesar 18,511 meter. Jarak tactical diameter adalah jarak pelaksanaan awal kapal bergerak hingga kapal bergerak arah 180 derajat sumbu x, pada Gambar 45 pada titik AB ke BC sebesar 36,218 meter.

#### 4.3.4 Evaluasi Kriteria Kapal pada Zig-Zag 10 Derajat

Evaluasi kriteria kapal tidak hanya dilakukan pada uji turning circle dengan sudut rudder sebesar 35, 20, dan 10 derajat, tetapi juga dilakukan pada uji zig zag dengan sudut rudder yang sama seperti uji turning circle yaitu sebesar 35, 20, dan 10 derajat. Dari hasil uji zig zag sudut rudder 10 derajat pada subsubbab 4.2.1. Dari data

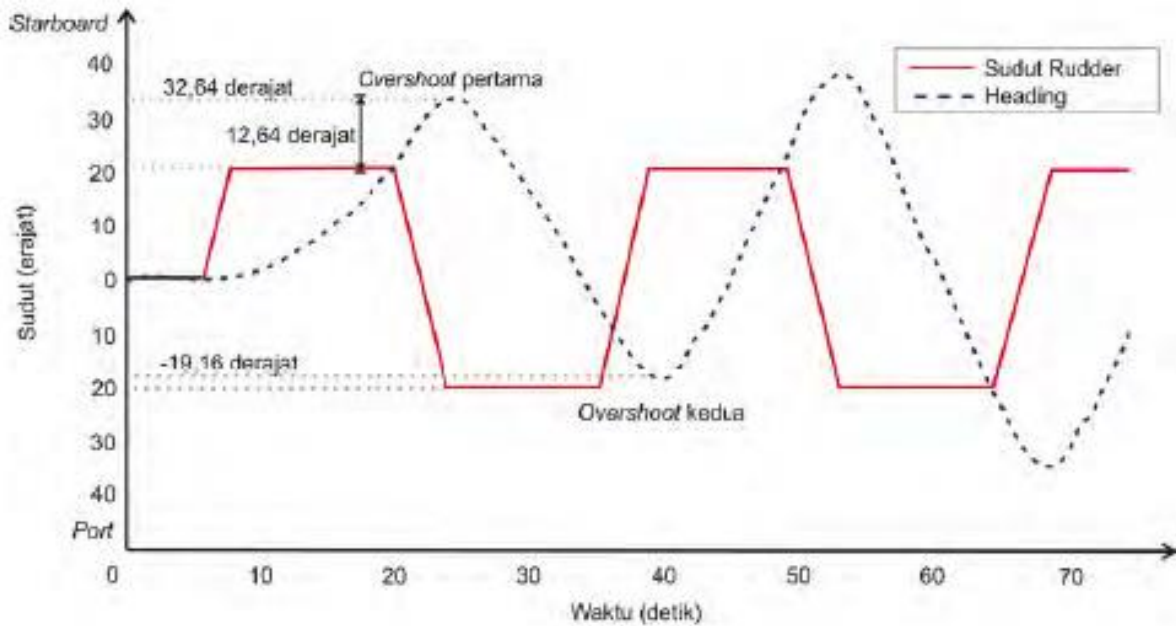
eksperimen pengujian zig-zag 10 derajat diketahui belokan pertama nilai heading sebesar 16,81 yaitu pada detik ke 19. Sedangkan pada belokan kedua nilai heading sebesar -16,88 yaitu pada detik ke 29,6. Sudut overshoot pertama yang dihasilkan pada belokan pertama sebesar 6,81 derajat. Sudut overshoot kedua yang dihasilkan pada belokan pertama sebesar 6,88 derajat. IMO memberi standar pengujian zig-zag 10 derajat bahwa sudut overshoot pertama tidak lebih dari 10 derajat dan sudut overshoot kedua tidak lebih dari 10 derajat. Dari hasil evaluasi tersebut, maka kapal perng kelas SIGMA extended memenuhi kriteria standar pengujian zig-zag 10 derajat oleh IMO.



**Gambar 46** Evaluasi kriteria pengujian zig-zag 10 derajat

#### 4.3.5 Evaluasi Kriteria Kapal Pada Zig-Zag 20 Derajat

Evaluasi kriteria kapal pada uji zig-zag dengan sudut rudder sebesar 20 derajat berdasarkan subbab 4.2.2. Dari data eksperimen pengujian zig-zag 20 derajat diketahui belokan pertama nilai heading sebesar 32,64 yaitu pada detik ke 24. Sedangkan pada belokan kedua nilai heading sebesar -19,16 yaitu pada detik ke 39,9. Sudut overshoot pertama yang dihasilkan pada belokan pertama sebesar 12,64 derajat. IMO hanya memberi standar untuk pengujian zig-zag 20 derajat bahwa sudut overshoot pertama tidak lebih dari 20 derajat. Dari hasil evaluasi tersebut, maka kapal perng kelas SIGMA extended memenuhi kriteria standar pengujian zig-zag 20 derajat oleh IMO.



**Gambar 47** Evaluasi kriteria pengujian zig-zag 20 derajat

#### 4.4 Hasil Evaluasi Kriteria Pengujian Manuver Kapal Perang Kelas SIGMA Extended Skala 3 Meter

Dari pengujian turning circle dengan sudut rudder 35 derajat dan zig-zag dengan sudut rudder sebesar 10 dan 20 derajat, diperoleh data koordinat posisi lintang dan bujur melalui sensor GPS. Data koordinat posisi tersebut dilakukan pemetaan, sehingga membentuk lintasan, baik turning circle maupun zig-zag. Kemudian lintasan dalam satuan koordinat tersebut, dikonversikan ke dalam meter. Sehingga kriteria kapal dapat diketahui seperti pada Tabel 6. Pada Tabel 6 diketahui bahwa manuver kapal perang kelas SIGMA extended skala 3 meter telah memenuhi standar yang ditetapkan oleh IMO (IMO Resolusi MSC 137 (76), 2002).

**Tabel 6** Kestabilan kapal berdasarkan evaluasi kriteria sea trial IMO

Pengujian	Kriteria	Hasil eksperimen	Standar IMO	Keterangan
Turning circle 35 derajat	Advance	3,3 Lpp	< 5 Lpp	Memenuhi Standar
	Tactical	3,3 Lpp	< 4,5 Lpp	Memenuhi Standar
Zig-zag 10 derajat	Overshoot pertama	6,81 derajat	10 derajat	Memenuhi Standar



	Overshoot kedua	6,88 derajat	10 derajat	Memenuhi Standar
Zig-zag 10 derajat	Overshoot pertama	12,64 derajat	25 derajat	Memenuhi Standar

#### 4.5 Hasil Perhitungan Parameter Nomoto Kapal Perang Kelas SIGMA Extended Skala 3 Meter

Pemodelan dinamika kapal menggunakan struktur model dinamika Nomoto. Data yang digunakan dalam pemodelan Nomoto adalah turning circle 20 derajat yang telah mengalami proses filter. Dari hasil perhitungan subbab 3.7 didapatkan nilai K sebesar 0,014,  $T_1$  sebesar 0,052,  $T_2$  sebesar 0,56, dan  $T_3$  sebesar -14,29. menurut standart Nomoto kemampuan maneuver kapal yang baik ditunjukkan dengan nilai K lebih besar dari 0 (Nomoto, 1957). Sehingga dapat disimpulkan kapal perang kelas SIGMA extended skala 3 meter memiliki kemampuan maneuver yang baik karena memiliki nilai K sebesar 0,014.

Tabel 7 menunjukkan kestabilan kapal berdasarkan besar K yang dimiliki, dapat dilihat kapal perang kelas SIGMA extended skala 3 meter, dan kapal mariner kelas cargo memiliki nilai K lebih besar dari 0, sehingga kapal tersebut tergolong stabil, sedangkan kapal tanker memiliki nilai K sebesar -0,019 atau kurang dari 0, sehingga dapat dikatakan kapal dalam kondisi tidak stabil.

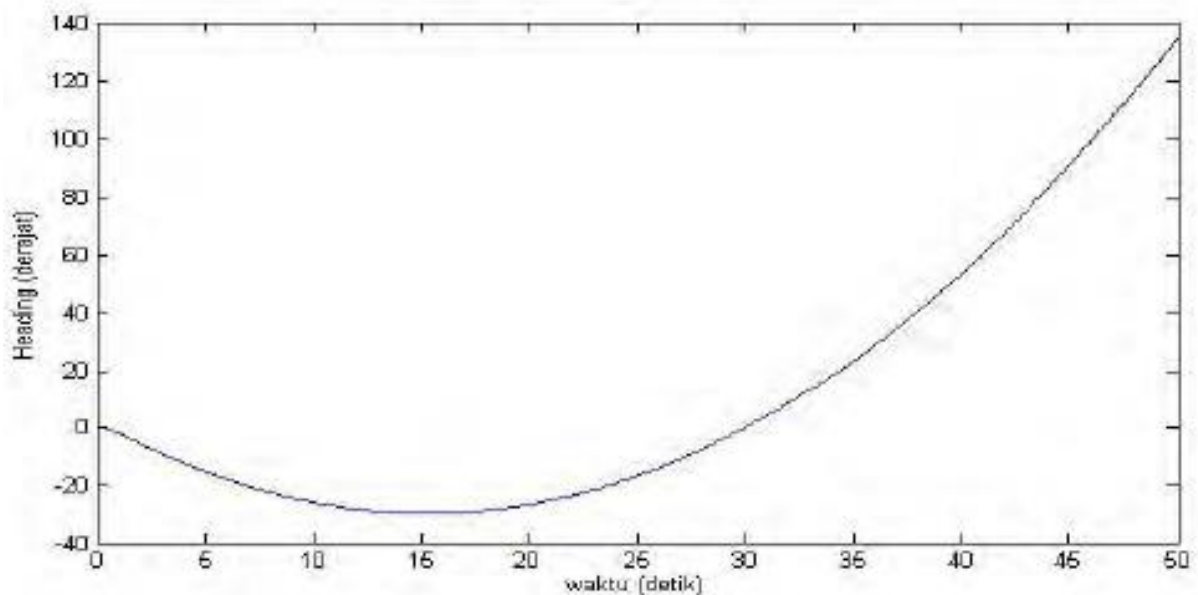
**Tabel 7** Kestabilan kapal berdasar nilai parameter model Nomoto

Kapal	K	$T_1$	$T_2$	$T_3$	Keterangan
SIGMA skala 3 m	0,014	0,052	0,56	-14,29	kapal stabil
Mariner kelas cargo*	0,185	118	7,8	18,5	kapal stabil
Tanker*	-0,019	-24,1	16,4	46	kapal tidak stabil

\* (Nomoto, 1957)

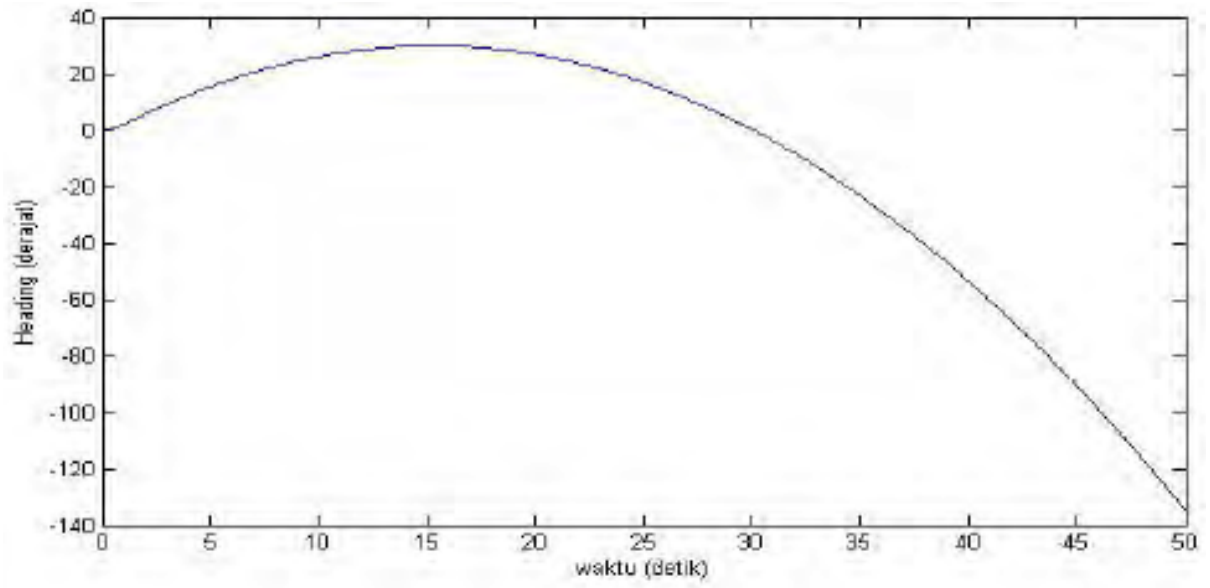
#### 4.6 Validasi Model Dinamika Kapal Perang Kelas SIGMA secara Open Loop

Simulasi open loop digunakan untuk mengetahui respon heading apabila diberi masukan berupa sinyal step dengan sudut rudder sebesar 20 derajat dan -20 derajat berdasarkan standar IMO. Hal ini bertujuan untuk mengetahui hasil respon dinamika kapal. Gambar 48 merupakan respon heading saat uji simulasi menggunakan sinyal step sebesar 20° terlihat respon bergerak memutar dari arah kiri ke kanan. Dimana heading bergerak ke arah kiri selama 15 detik, setelah itu heading akan memutar ke arah kanan dengan sudut heading semakin besar.



**Gambar 48** Respon heading pada saat pengujian turning circle dengan masukan sudut rudder 20 derajat

Gambar 49 merupakan uji simulasi turning circle menggunakan sinyal step dengan sudut rudder sebesar -20°. Berbeda dengan turning circle sinyal step dengan sudut rudder sebesar 20°, apabila turning circle sinyal step dengan sudut rudder sebesar -20°, heading memutar dari arah kanan ke kiri. Sehingga Ketika pengujian dimulai, heading akan bergerak ke arah kanan terlebih dahulu selama 15 detik, setelah itu heading akan memutar ke arah yang berlawanan seiring bertambahnya waktu maka semakin besar sudut heading yang terjadi. Sehingga dapat dikatakan bahwa pada saat turning step 20° maka heading akan bergerak memutar dari kiri ke kanan, sedangkan pada turning step -20°, heading akan bergerak memutar dari kanan ke kiri.



**Gambar 49** Respon heading pada saat pengujian turning circle dengan masukan sudut rudder -20 derajat

## BAB V KESIMPULAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa yang telah dilakukan pada bab IV, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Pengujian turning circle 35 derajat menghasilkan jarak advance sebesar 3,3 Lpp, jarak transfer sebesar 1,8 Lpp dan jarak tactical diameter sebesar 3,3 Lpp.
2. Pengujian turning circle 20 derajat menghasilkan jarak advance sebesar 6,2 Lpp, jarak transfer sebesar 3,4 Lpp dan jarak tactical diameter sebesar 7 Lpp.
3. Pengujian turning circle 10 derajat menghasilkan jarak advance sebesar 8,2 Lpp, jarak transfer sebesar 6,1 Lpp dan jarak tactical diameter sebesar 12 Lpp.
4. Pengujian zig-zag 10 derajat diperoleh sudut overshoot pertama sebesar 6,81 derajat dan sudut overhoot kedua sebesar 6,88 derajat.
5. Pengujian zig-zag 20 derajat menghasilkan sudut overshoot pertama sebesar 12.64 derajat.
6. Hasil pengujian manuver memenuhi standar IMO.
7. Nilai parameter kapal secara model Nomoto adalah K sebesar 0,014,  $T_1$  sebesar 0,052,  $T_2$  sebesar 0,56 dan  $T_3$  sebesar -14,286.

## DAFTAR PUSTAKA

- Li, Y., Landsburg, A., Barr, R., & Calisal, S. (2005). Improving ship maneuverability standards as a means for increasing ship controllability and safety. *OCEANS* , 1972 - 1981 Vol. 3.
- Thor I. Fossen and Tristan Perez “Kalman Filtering for Positioning and Sudut heading Control of Ships and Offshore Rigs”, *Control System Magazine* (2009).PP.32-46.
- K. S. M. Davidson and L. I. Schiff, “Turning and course keeping qualities,” in *transactions of SNAME*, vol. 54, 1946.
- SNAME, “Nomenclature for treating the motion of submerged body through a fluid,” *The Society of Naval Architects and Marine ngeiners, Technical and Research bulletin* 1-5, 1950.
- K. Nomoto, T. Taguchi, T. Honda, and S. Hirano, “On the steering qualities of ships,” *International Shipbuilding Progress, Tech. Rep.*, 1957.
- Fossen, Thor I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Marine Vehicles*. John Wiley and Sons Ltd. New York.
- Fossen, T. (2002). *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics.
- SNAME (1950). *Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. Technical Report Bulletin 1-5*. Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, USA.
- C. Shi, D. Zhao, J. Peng, & C. Shen. (2009). Identification of Ship Maneuvering Model Using Extended Kalman Filters. *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 105-110.
- Chang-Zhong Pan, Xu-Zhi Lai, Simon X. Yang, & Min Wu. (2013). An efficient neural network approach to tracking control of an autonomous surface vehicle with unknown dynamics. *Expert Systems with Applications*, 1629-1635.
- L. Moreira, & C. Guedes Soares. (2003). Dynamic model of manoeuvrability using recursive neural networks. *Ocean Engineering*, 1669–1697.
- Anna Witkowska, & Roman Śmierzchalski. (t.thn.). Identifying Ship Parameters with the Aid of Genetic Algorithm. *article*, 8.
- Suleiman, B. M. (2000). *Identification of Finite-Degree-of-Freedom Models for Ship Motions*. Dissertation, 167.

Tristan Pérez, & Mogens Blanke. (1998). Mathematical Ship Modeling for Control Applications. Technical Report, 22.

Ljung, L. (1999). Theory for the user. System Identification, sweden.

Ljung, L. (2009). Perspectives on System Identification. 13.