

# PERANCANGAN SISTEM KONTROL LOGIKA FUZZY PADA MANUEVER NONLINIER KAPAL PERANG KELAS SIGMA (EXTENDED)

Dandy Haris Firdianda, Aulia S.A, A. A. Masroeri

Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: auliasa@ep.its.ac.id

**Abstrak**— Ketidakmampuan sistem kontrol PID pada kapal perang kelas SIGMA model induk dalam mengatasi adanya perubahan gelombang secara tiba-tiba berpengaruh terhadap stabilitas manuever kapal ketika berlayar pada perairan bebas. Semakin besar gangguan yang mengenai badan kapal berbanding lurus dengan besarnya *error tracking* yang dihasilkan. Pada pengembangan model terbaru dengan penambahan panjang dan lebar kapal, diperlukan adanya sistem kontrol yang mampu beradaptasi dengan baik terhadap perubahan gangguan tersebut. Tujuan penelitian ini adalah merancang sistem kontrol logika fuzzy pada manuever nonlinier kapal perang kelas SIGMA. Perancangan dilakukan secara simulasi komputer menggunakan sistem kontrol logika fuzzy tipe Takagi Sugeno dengan masukan *error heading* dan *yaw rate* dan keluaran berupa sinyal *rudder*. Performansi manuever dengan kontrol logika fuzzy diperoleh jarak *advance diameter* dan *tactical diameter* sebesar 1,45 Lpp dan 1,72 Lpp dan telah sesuai dengan standar IMO (*International Maritime Organization*)

**Kata Kunci**— *Nonlinier, Linier, Logika Fuzzy, Manuever, Gangguan Gelombang.*

## I. PENDAHULUAN

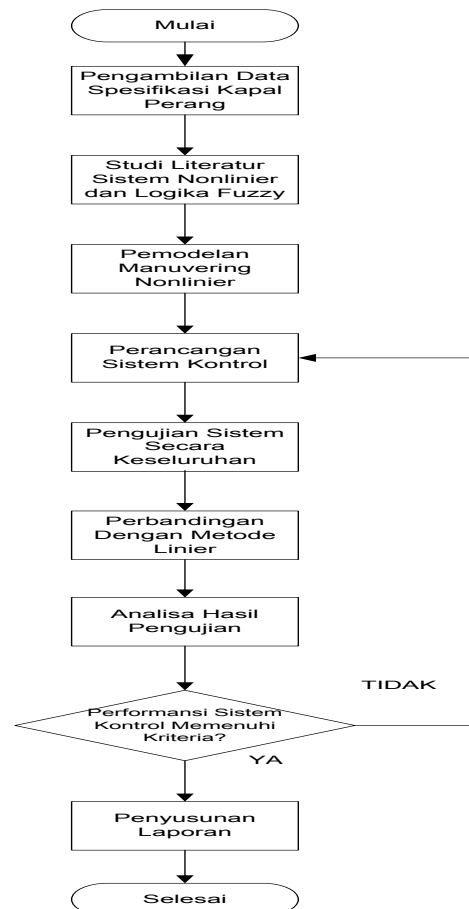
Pengendalian manuever kapal perang kelas SIGMA pada perairan bebas merupakan permasalahan yang kompleks. Terdapat banyak kesulitan yang perlu diatasi dalam menjaga stabilitas manuever kapal tersebut, antara lain berupa gangguan internal dan eksternal. Gangguan internal misalnya berasal dari interaksi kompas dengan medan magnet yang dihasilkan oleh motor. Sedangkan gangguan eksternal dihasilkan dari arus, gelombang air laut dan kecepatan angin.

Permasalahan umum yang sering dihadapi sistem kendali pada kapal perang kelas SIGMA model induk adalah ketidakmampuan sistem kontrol PID dalam mengatasi adanya perubahan gelombang secara tiba-tiba yang mengakibatkan kapal tidak mampu memenuhi lintasan *desire* yang diharapkan [1]. Semakin besar gangguan yang mengenai kapal berbanding lurus dengan besarnya *error tracking* yang dihasilkan. Pada pengembangan model kapal terbaru dengan penambahan panjang dan lebar kapal, diperlukan adanya sistem kontrol yang mampu beradaptasi dengan baik terhadap perubahan gangguan. Beberapa sistem kendali dengan menggunakan metode nonlinier pada *manuever* kapal perang kelas SIGMA dilakukan dengan mengaplikasikan kendali logika *fuzzy*. Kelebihan dari sistem pengendalian ini adalah mampu beradaptasi dengan baik terhadap perubahan gangguan eksternal maupun internal.

Pada penelitian sebelumnya, sistem kontrol dirancang dengan menggunakan metode linier. Namun, metode ini memiliki beberapa kelemahan antara lain *error tracking* yang dihasilkan masih besar [2]. Pada penelitian yang lain juga ditemukan adanya penyimpangan lintasan dan *error manuever ability* pada saat simulasi respon menghindari halangan [3]. Pada penelitian ini akan digunakan metode nonlinier dengan menggunakan sistem kontrol logika *fuzzy* dalam menjaga stabilitas manuever kapal perang kelas SIGMA dan meminimalisir besarnya *error tracking*.

## II. METODOLOGI PENELITIAN

Gambar 1 merupakan tahapan penelitian yang dapat dijabarkan dalam bentuk flowchart sebagai berikut



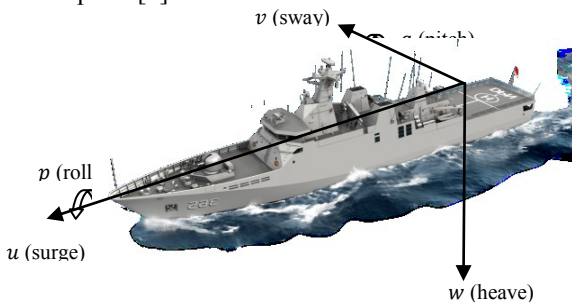
Gambar 1. Flowchart penelitian Tugas Akhir

**A. Kapal Perang Kelas SIGMA**

Kapal perang kelas SIGMA dalam penelitian ini merupakan pengembangan dari kapal perang model lama dimana dilakukan modifikasi untuk meningkatkan kemampuan stabilitas dan *seakeeping* yang lebih baik. Model Induk masih menggunakan spesifikasi lama dengan panjang 90,71 meter, lebar 13,02 meter, kedalaman 3,6 meter dan *displacement* sebesar 16,92 ton. Spesifikasi kapal perang kelas SIGMA terbaru dirancang dengan panjang 106 meter, lebar 14 meter, kedalaman 3,7 meter, koefisien blok 0,44, kecepatan 14,4 pusat gravitasi 2,22, *displacement* 2423 ton, dan rudder area 3,856 [1].

**B. Model Dinamika Kapal**

Gambar 2 merupakan gerak kapal atau *ship motion* yang terbagi menjadi dua macam antara lain gerak translasi terdiri dari surge, sway dan heave. Dan gerak rotasi terdiri dari yaw, roll dan pitch [4].



Gambar 2. Enam derajat kebebasan pada kapal yang terdiri dari gerak surge, sway, heave, yaw, roll dan pitch [1].

Hamamoto, Kim dan Hamamoto et al. mengusulkan persamaan nonlinier yang mengacu kepada persamaan *steering* dan *rolling* Christensen dan Blanke dalam bentuk enam derajat kebebasan sebagai berikut[5,6] :

$$\text{Surge : } m(\dot{u} - v\dot{\psi}) = (m_y - X_v\dot{\psi})v\dot{\psi} - m_x\dot{u} - m_zw\dot{\theta} + X_{FK} + X_{RF} + T(1 - t_p) - R \tag{1}$$

$$\text{Sway : } m(\dot{v} - u\dot{\psi}) = -m_x u\dot{\psi} - m_y\dot{v} - Y_v v - Y_{\dot{\psi}}\dot{\psi} + Y_{\dot{\psi}}\dot{\psi} + Y_{|v|}v|v| + Y_{|\dot{\psi}|}|\dot{\psi}|\dot{\psi} + Y_{|\dot{\psi}|}|\dot{\psi}|\dot{\psi} + Y_{FK} + Y_{DF} + Y_{RF} \tag{2}$$

$$\text{Heave : } m\dot{w} = -m_z\dot{w} - Z_w w - Z_{\dot{\theta}}\dot{\theta} - Z_{\dot{\theta}}\dot{\theta} - Z_{\theta}\theta + Z_{FK} + Z_{DF} + mg \tag{3}$$

$$\text{Roll : } I_{xx}\ddot{\theta} - I_{xx}\dot{\theta}\dot{\psi} = J_{xx}\dot{\theta}\dot{\psi} - J_{xx}\ddot{\theta} - K_{\theta}\dot{\theta} + (Y_v v - Y_{\dot{\psi}}\dot{\psi})Z_G + K'_{FK} + K_{DK} + K_{RF} \tag{4}$$

$$\text{Pitch : } I_{yy}\ddot{\theta} - I_{xx}\dot{\theta}\dot{\psi} = -J_{xx}\dot{\theta}\dot{\psi} - J_{yy}\ddot{\theta} - M_{\dot{\theta}}\dot{\theta} - M_{\theta}\theta - M_{\dot{w}}\dot{w} - M_w w + M_{DF} \tag{5}$$

$$\text{Yaw : } I_{zz}\ddot{\psi} - I_{xx}\dot{\theta}\dot{\psi} = J_{xx}\dot{\theta}\dot{\psi} - J_{zz}\ddot{\psi} - N_v\dot{v} - N_{\dot{\psi}}\dot{\psi} + N_{|\dot{\psi}|}|\dot{\psi}|\dot{\psi} + Y_{vv}\dot{v}^2\dot{\psi} + Y_{v\dot{\psi}}v\dot{\psi}^2 + N_{\dot{\theta}}\dot{\theta} + N_{|\dot{\theta}|}|\dot{\theta}|\dot{\theta} + N_{|\dot{\psi}|}|\dot{\psi}|\dot{\psi} + (-Y_v v + Y_{\dot{\psi}}\dot{\psi} + Y_{|v|}v|v| + Y_{|\dot{\psi}|}|\dot{\psi}|\dot{\psi})X_G + N_{FK} + N_{DF} + N_{RF} \tag{6}$$

Berdasarkan persamaan tersebut, Healey, Lienard dan Fossen mengusulkan persamaan state space sebagai hasil dari linierisasi persamaan (2) dan (6), sehingga persamaan tersebut menjadi berikut [7]:

$$(m + m_y)\dot{v} + Y_{\dot{\psi}}\dot{r} = -Y_v v + Y_{\dot{\psi}}r + Y_{\delta}\delta \tag{7}$$

$$N_{\dot{v}}\dot{v} + (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} = (-N_v - Y_v X_G)v + (-N_{\dot{\psi}} - Y_{\dot{\psi}} X_G)r + N_{\delta}\delta \tag{8}$$

$$\dot{\psi} = r \tag{9}$$

Dari persamaan (7) sampai dengan (9) disubstitusi ke dalam persamaan state space sebagai berikut:

$$\dot{X} = Ax + Bu \tag{10}$$

$$\begin{bmatrix} m + m_y & y_{\dot{\psi}} & 0 \\ N_{\dot{v}} & I_{zz} + J_{zz} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Y_v V & Y_{\dot{\psi}} & 0 \\ (-N_v - Y_v X_G) & (-N_{\dot{\psi}} + Y_{\dot{\psi}} X_G) & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{\delta} \\ N_{\delta} \\ 0 \end{bmatrix} \delta \tag{11}$$

Kemudian variabel pada persamaan (11) dihitung dengan memasukkan koefisien hidrodinamika yang merupakan bentuk non dimensi sebagai turunan dari Prime I :

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,00010233 & -0,00001989 & 0 \\ 2,93 & 0,930 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,31872709 \\ 4206,98 \\ 0 \end{bmatrix} \delta \tag{12}$$

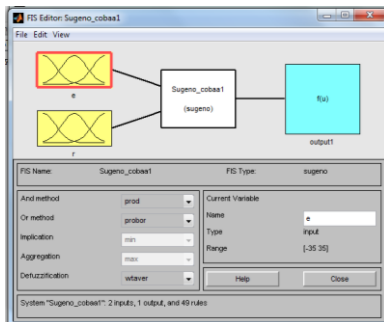
**C. Pemodelan Gelombang Sebagai Gangguan**

Gangguan pada penelitian ini berupa gelombang air laut. Model gangguan gelombang untuk perairan internasional mengacu pada data-data sebagai berikut :  $\omega$  adalah 3.16,  $\omega^2$  adalah 10,  $\xi$  adalah 0.1, ketinggian gelombang (H) adalah 6 meter, g adalah 9.8 m/s<sup>2</sup> dan kecepatan angin 16.837 m/s. Sehingga didapatkan nilai  $\omega_0$  adalah 0,51221

$$h(s) = \frac{0.3230784s}{s^2 + 0.10224s + 0.26133} \tag{13}$$

**D. Fuzzifikasi**

Pada tahap ini, terdiri dari tiga macam antara lain variabel masukan, fungsi keanggotaan dan variabel keluaran. Pada gambar 3 merupakan fuzzy interface system dimana variabel masukan terdiri dari error heading dan yaw rate. Pada variabel keluaran, merupakan sudut rudder yang akan diumpangkan menjadi sinyal rudder yang akan menggerakkan sudut rudder (*heading*) sesuai dengan yang diharapkan. Fungsi keanggotaan untuk *error heading* dan *yaw rate* masing-masing menggunakan 7 fungsi keanggotaan yaitu NB (*Negatif Big*), NM (*Negatif Medium*), NS (*Negatif Small*), ZE (*Zero Error*), PS (*Positif Small*), PM (*Positif Medium*), PB (*Positif Big*).



Gambar 3. Fuzzy interface system editor tipe Takagi Sugeno dengan masukan error heading dan yaw rate dan keluaran berupa command rudder.

**E. Basis Aturan**

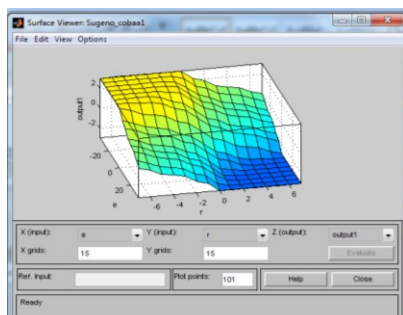
Prinsip dasar dalam perancangan basis aturan kontrol logika fuzzy sesuai dengan tabel 1 adalah sebagai berikut, jika variabel proses heading telah mencapai nilai yang diinginkan, perubahan error bernilai nol, kapal berada dalam kondisi aman dan pengendali logika fuzzy dipertahankan konstan. Namun apabila sebaliknya, nilai variabel proses belum sesuai dengan yang diinginkan, dan kapal berada dekat dengan halangan dalam artian kapal dalam kondisi bahaya maka keluaran sinyal kendali berubah sesuai dengan besarnya nilai error dan yaw rate yang dihasilkan.

Tabel 1. Basis Aturan Kontrol Logika Fuzzy

r \ e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZE
NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZE	NS
NS	PB	PB	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PS	PM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB
PM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB	NB
PB	ZE	NS	NM	NB	NB	NB	NB

**F. Metode Pengambil Keputusan**

Pada gambar 4 merupakan teknik pengambil keputusan menggunakan metode Takagi Sugeno. Berikut ini merupakan *surface* tiga dimensi antara *error heading* dan *yaw rate* :



Gambar 4. Tampilan tiga dimensi rule KLF e dan r dengan menggunakan 49 basis aturan Takagi Sugeno

**G. Strategi Defuzzifikasi**

Pada tahapan ini, digunakan untuk mendapatkan kembali data *crisp* atau bisa disebut juga dengan nilai sebenarnya. Pada strategi defuzzifikasi ini digunakan metode *centroid* dengan

nilai *crisp* keluarannya diperoleh berdasarkan titik berat dari kurva hasil pengambil keputusan.

**H. Perbandingan Dengan Model Linier Nomoto**

Perbandingan dengan menggunakan metode linier dilakukan untuk mengetahui pola *tracking* yang dihasilkan oleh metode nonlinier, apakah mampu mendekati atau lebih baik daripada metode linier. Berikut ini merupakan fungsi transfer dari model linier :

$$\frac{\phi}{\delta_R} = \frac{470,0550964 + 1415,054003s}{s + 7,978324993s^2 + 25,43578644s^3} \quad (14)$$

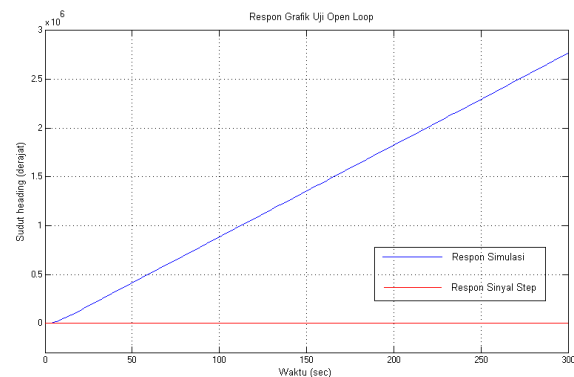
**I. Rudder Pada Kapal**

Rudder yang digunakan pada kapal perang kelas SIGMA merupakan tipe rudder Rolls-Royce dengan spesifikasi kemampuan kerja antara -35° sampai dengan 35° dan laju kerja 2,33° sampai dengan 7° per detik [8].

**III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

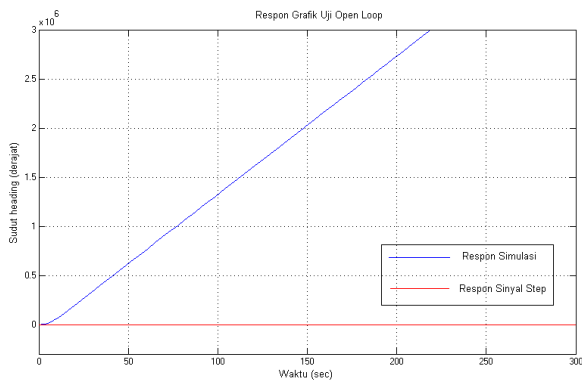
**A. Pengujian Open Loop Turning Step 20° dan 30°**

Pengujian dinamika kapal perang kelas SIGMA dilakukan secara *open loop* tanpa adanya sistem pengendali. Respon yang didapat berdasarkan data masukan dan data keluaran. Sesuai dengan standard yang telah ditetapkan IMO (*International Maritime Organization*) bahwa uji kendali *turning* dilakukan dengan menggunakan sudut 20° dan 30°. Berikut ini merupakan grafik respon dari uji kendali *turning* masing-masing dengan menggunakan sudut 20° dan 30°.



Gambar 4.1 Respon heading pada saat turning step 20°

Pada gambar 4.1 saat uji simulasi menggunakan sinyal *step* sebesar 20° terlihat respon bergerak menanjak sebanding dengan bertambahnya waktu. Didapatkan bahwa uji *step* sudut *manuver* kapal sebesar 20° diperoleh kondisi sesuai dengan *set point* pada waktu 0,001 detik. Dengan semakin bertambahnya waktu, respon *heading* tidak mampu menyesuaikan dengan *set point*, hal ini dikarenakan masih belum adanya sistem pengendali agar performansi dari *heading* kapal dengan *set point* yang diberikan. Pada gambar 4.2 merupakan respon *heading* pada saat dilakukan uji *turning step* 30°. Berdasarkan grafik yang diperoleh ketika simulasi selesai dilakukan dapat diketahui bahwa respon pengujian dengan menggunakan sinyal uji *step* sebesar 30° lebih cepat dibandingkan dengan pengujian sinyal *step* sebesar 20°.

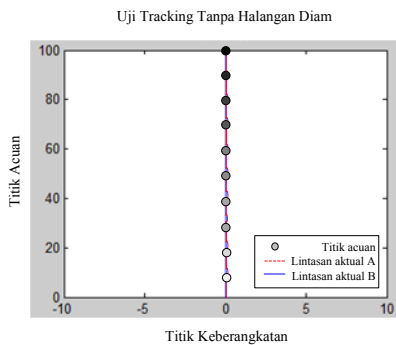


Gambar 4.2 Respon heading pada saat turning step 30°

Dapat dianalisa bahwa respon cenderung menanjak dan menuju tak hingga sehingga tidak sesuai dengan set point yang diberikan. Hal ini dikarenakan tidak adanya sistem pengendali dan momen gaya yang diakibatkan oleh rudder lebih besar sehingga uji turning step 30° lebih cepat daripada uji turning step 20°.

**B. Pengujian Close Loop Tanpa Halangan Diam**

Gambar 5 akan dijelaskan simulasi uji closed loop pada tracking mengikuti garis lurus pada koordinat (0, 0) dan berakhir pada koordinat tujuan akhir pada (0, 100). Kecepatan yang digunakan pada simulasi ini ditetapkan konstan sebesar 0,01



Gambar 5. Hasil respon uji tracking garis lurus tanpa gangguan (lintasan aktual B) dan dengan menggunakan gangguan berupa gelombang (lintasan aktual A)

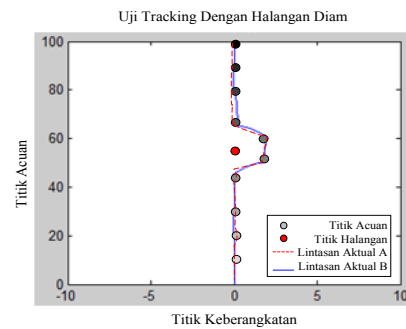
Tabel 2.

Error posisi pada lintasan aktual uji nonlinier tanpa halangan diam				
Waktu (detik)	x desire (m)	y desire (m)	Tanpa Gangguan (m)	Dengan Gangguan (m)
0	0	0	0,0001	0,0001
200	0	10	0,0001	0,002633
400	0	20	0,000101	0,005088
600	0	30	0,000396	0,006609
800	0	40	0,001917	0,007901
1000	0	50	0,003603	0,009235
1200	0	60	0,005471	0,010638
1400	0	70	0,007541	0,012169
1600	0	80	0,009834	0,013828
1800	0	90	0,012374	0,015637
2000,4	0	100	0,016059	0,003264

Gambar 5 menunjukkan bahwa tracking garis lurus dalam memenuhi titik acuan atau lintasan desire dengan menggunakan metode nonlinier berhasil dirancang dengan parameter keberhasilan adalah kapal mampu mencapai titik acuan terakhir dengan error seminimalisir mungkin. Adanya gangguan berupa gelombang mempengaruhi kapal ketika melintasi titik acuan seperti yang ditunjukkan pada lintasan berwarna merah. Terlihat bahwa kapal mengalami error tracking sehingga tidak mampu melintasi titik acuan dengan tepat. Ketidakmampuan kapal dalam melintasi titik acuan berupa garis lurus dengan baik dipengaruhi oleh ketidakakuratan basis aturan yang dirancang sehingga data masukan yang diperoleh dari error heading dan yaw rate menyebabkan command rudder yang tidak sesuai.

**C. Pengujian Close Loop Dengan Halangan Diam**

Dari gambar 6 dapat diketahui bahwa pengujian kapal dengan halangan diam baik tanpa dan menggunakan gangguan mampu dirancang dengan baik. Pada pengujian tanpa gangguan dapat ditunjukkan pada lintasan aktual B yang berwarna biru dimana kapal mampu melakukan manuver untuk menghindari halangan diam yang ditempatkan pada titik koordinat (0,55).



Gambar 6. Hasil respon dengan halangan diam tanpa gangguan (lintasan aktual B) dan dengan menggunakan gangguan berupa gelombang (lintasan aktual A)

Tabel 3.

Error posisi pada lintasan aktual uji nonlinier dengan halangan diam				
Waktu (detik)	x desire (m)	y desire (m)	Tanpa Gangguan (m)	Dengan Gangguan (m)
0	0	0	0,0001	0,0001
201,6	0	10	0,009456	0,028981
403,2	0	20	0,058409	0,054357
604,8	0	30	0,095612	0,092944
806,8	0	45	21,71839	21,70109
1008	2	50	0,354658	0,363797
1209,6	2	60	0,024499	0,016699
1411,2	0	65	23,15134	23,1937
1612,8	0	80	0,040912	0,026426
1814,4	0	90	0,007061	0,019037
2016,4	0	100	0,001103	0,009967

Parameter lain yang menunjukkan perancangan sistem kontrol logika fuzzy berjalan dengan baik adalah kemampuan kapal melintasi tiap titik acuan yang ditetapkan sampai pada lintasan akhir. Beberapa error tracking yang terjadi lebih

diakibatkan oleh ketidakmampuan kontrol logika *fuzzy* dalam mengatur *command rudder* yang diinginkan. Ketidaksesuaian basis aturan yang dirancang berdasarkan masukan *error heading* dan *yaw rate* mengakibatkan *command rudder* yang tidak sesuai.

Pada pengujian dengan gangguan seperti yang ditunjukkan oleh lintasan aktual A yang berwarna merah dapat diketahui bahwa kontrol logika *fuzzy* yang dirancang mampu memberikan stabilitas dan kekokohan yang lebih baik terhadap gangguan dari luar sistem dalam hal ini adalah gelombang. Kesesuaian basis aturan berdasarkan masukan *error heading* dan *yaw rate* mampu menghasilkan *command rudder* yang lebih baik sehingga *error tracking* dapat diminimalisir sekecil mungkin. Pada tabel 3 dapat diketahui *error* terbesar terjadi pada pengujian dengan gangguan sebesar 23,19137 meter pada waktu 1411,2 detik.

**D. Uji Turning Circle**

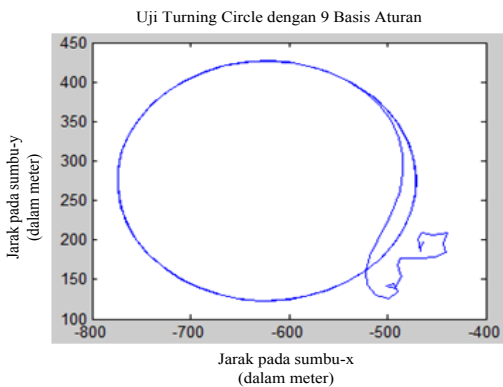
Salah satu proses validasi pada *manuver* kapal perang kelas SIGMA berdasarkan *International Maritime Organization* (IMO) adalah melakukan uji *turning circle*. Pada tugas akhir ini akan dirancang dengan menggunakan sistem kontrol logika *fuzzy* dengan basis aturan sebanyak 9 dan 49 data. Pada uji *turning circle* pertama dilakukan dengan 9 basis aturan sebagai berikut :

Tabel 4

Basis aturan kontrol pada logika *fuzzy* pada uji *turning circle* sebanyak 9 data

e \ r	NR	ZR	PR
NE	PB	PB	ZE
ZE	PB	ZE	NB
PE	ZE	NB	NB

Berdasarkan basis aturan yang telah dirancang dilakukan simulasi dengan uji sinyal *step* dengan *rudder* ditahan pada sudut maksimum 35° dengan kecepatan konstan 14,4 m/s dan waktu simulasi 225 detik.



Gambar 7. Uji *turning circle* 35° dengan 9 basis aturan dengan kecepatan konstan 14,4 m/s

Berdasarkan uji *turning circle* pada gambar 7 diperoleh *error tracking* pada awal lintasan dimana kapal tidak mampu memenuhi lintasan garis lurus sampai memenuhi lintasan berupa satu lingkaran penuh. Adanya *error* ini disebabkan oleh ketidakmampuan kontrol logika *fuzzy* yang berkaitan

dengan basis aturan yang telah dirancang berdasarkan data masukan berupa *error heading* dan *yaw rate*. Ketidaksesuaian tersebut mengakibatkan *command rudder* yang diumpankan ke *rudder Rolls-Royce* tidak mampu mengubah arah gerak kapal sesuai dengan lintasan yang diharapkan.

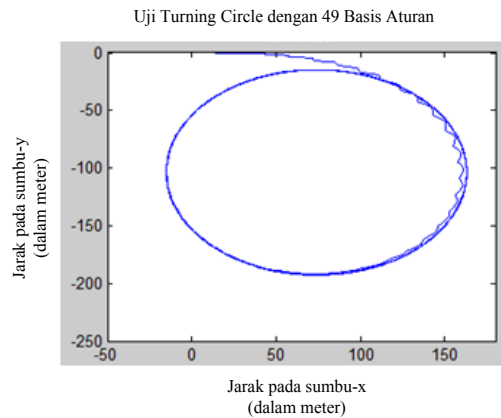
Pada pengujian selanjutnya akan dilakukan perancangan sistem kontrol dengan menggunakan basis aturan sebanyak 49 data. Pada tabel 5 merupakan tabel perancangan sistem kontrol logika *fuzzy* 49 basis aturan dengan perbaikan berdasarkan basis aturan sebelumnya agar didapatkan *command rudder* yang sesuai sehingga *error tracking* dapat diminimalisir sekecil mungkin.

Tabel 5

Basis aturan kontrol pada logika *fuzzy* pada uji *turning circle* sebanyak 49 data

e \ r	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZE
NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZE	NS
NS	PB	PB	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PB	PB	PS	ZE	NS	NM	NB
PS	PM	PM	ZE	NS	NM	NB	NB
PM	PS	PS	NS	NM	NB	NB	NB
PB	ZE	ZE	NM	NB	NB	NB	NB

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, dengan kecepatan konstan sebesar 14,4 m/s dan sudut kemudi maksimum yaitu 35° dapat diperoleh bahwa gerak simulasi masih kasar pada awal lintasan. Hal ini ditunjukkan dengan gambar 8 dimana kapal mampu memenuhi lintasan melingkar secara halus setelah mencapai setengah lingkaran sebagai berikut :



Gambar 8 Uji *turning circle* 35° dengan 49 basis aturan dengan kecepatan konstan 14,4 m/s

Hasil respon uji *turning circle* 35° dengan kecepatan konstan 14.4 m/s diperoleh hasil *advance diameter* sebesar 154,33 meter atau sebesar 1,45  $L_{pp}$  dari 4,5  $L_{pp}$  yang menjadi standard IMO. Sedangkan untuk jarak *tactical diameter* diperoleh sebesar 182,8 meter atau 1,72  $L_{pp}$  dari 5 $L_{pp}$  yang menjadi standard dari IMO. Pada gambar 9 menunjukkan hasil respon uji *turning circle* 35° dengan kecepatan konstan 14.4 m/s diperoleh hasil *advance diameter* sebesar 326,7

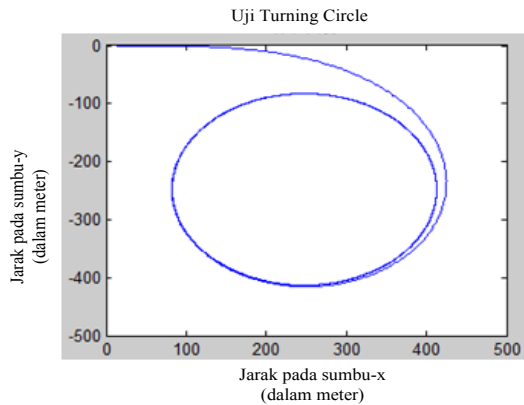
meter atau sebesar  $3,08 L_{pp}$  dari  $4,5 L_{pp}$  yang menjadi standard IMO. Sedangkan untuk jarak *tactical diameter* diperoleh sebesar 407,1 meter atau  $3,83 L_{pp}$  dari  $5L_{pp}$  yang menjadi standard dari IMO.

Tabel 6

Basis aturan kontrol pada logika *fuzzy* pada uji *turning circle* sebanyak 49 data sesuai standard LHI

e \ r	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	ZE	NS	NM	NB	NB	NB	NB
NM	PS	ZE	NM	PM	NB	NB	NB
NS	PM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB
ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PS	PB	PB	PM	PS	ZE	NS	NM
PM	PB	PB	PB	PM	PS	ZE	NS
PB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZE

Uji *turning circle* sesuai standard Laboratorium Hidrodinamika Indonesia ditunjukkan pada tabel 6 dimana sistem kontrol logika *fuzzy* menggunakan 49 basis aturan.



Gambar 9. Uji *turning circle* 35° dengan 49 basis aturan berdasarkan standard Laboratorium Hidrodinamika Indonesia

Dari pengujian dengan menggunakan 2 macam variasi basis aturan didapatkan bahwa pengujian dengan menggunakan basis aturan sebanyak 49 data diperoleh hasil terbaik dengan *error tracking* dari awal lintasan sampai memenuhi satu lingkaran penuh lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan 9 basis aturan. Uji *turning circle* dengan 49 basis aturan telah mendekati standard *uji turning circle* yang telah ditetapkan oleh Laboratorium Hidrodinamika Indonesia.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa pada pengujian *open loop*, respon yang dihasilkan masih belum stabil dan menanjak menuju tak hingga baik pada saat uji *turning step* 20° dan 30°. Hal ini dikarenakan sistem *open loop* merupakan persamaan orde tinggi sehingga respon sistem sangat cepat dan tidak terkendali. Pada pengujian *close loop* dengan *turning step* 20° tanpa gangguan diperoleh *maksimum overshoot* sebesar 5,3°, *settling time* 100 detik, *rise time* sebesar 11 detik dan *peak*

*time* sebesar 25,3 detik. Pada uji *turning step* 30° diperoleh *maksimum overshoot* sebesar 6,4°, *settling time* 104,5 detik, *rise time* sebesar 7,3 detik dan *peak time* sebesar 30 detik. Pada pengujian *close loop* dengan *turning step* 20° dengan gangguan diperoleh *maksimum overshoot* sebesar 5,16°, *settling time* 90,3 detik, *rise time* sebesar 10,35 detik dan *peak time* sebesar 26,2 detik. Pada uji *turning step* 30° diperoleh *maksimum overshoot* sebesar 6,7°, *settling time* 98,3 detik, *rise time* sebesar 13,2 detik dan *peak time* sebesar 68,4 detik. *Error tracking* pada pengujian *close loop* tanpa halangan diam sebesar 0,016 meter tanpa gangguan dan 0,0156 meter dengan gangguan. Sedangkan *error tracking* dengan halangan diam sebesar 23,15 meter tanpa gangguan dan 23,19 meter dengan gangguan. Performansi *manuver* telah sesuai dengan standard IMO dengan *advance diameter* sebesar 154,33 meter atau sebesar  $1,45 L_{pp}$  dan *jarak tactical diameter* sebesar 182,8 meter atau sebesar  $1,72 L_{pp}$ . Untuk penelitian berikutnya, dapat dilakukan perancangan dengan menggunakan mode kontrol yang lebih kompleks antara lain *fuzzy sliding mode* kontrol dengan halangan dan gangguan yang bervariasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aisjah, A.S. 2012. "System autopilot Kapal Perang Kelas Sigma". Teknik Fisika-FTI-ITS Surabaya.
- [2] Robby, Handito. 2012. Tugas Akhir : "Perancangan Sistem Guidance Untuk Membangun Autopilot Kapal PKR KRI Kelas Sigma", Teknik Fisika-FTI-ITS Surabaya.
- [3] Juniarko, Prananda. 2012. Tugas Akhir : "Perancangan Sistem Kendali Cerdas Kapal Perang Kawal Rudal - KRI Diponegoro Kelas Sigma Untuk Meningkatkan Manuver Ability Menggunakan Metode Fuzzy", Teknik Fisika-FTI-ITS Surabaya.
- [4] Anitasari, Ruri., 2010. Tugas Akhir : "Perancangan Sistem Kendali Manuver Untuk Menghindari Tabrakan pada Kapal Tangki Berbasis Logika *Fuzzy*", Teknik Fisika-FTI-ITS Surabaya
- [5] Hamamoto, M., Kim, Y.S., 1993. A New Coordinate System and Equations Describing Maneuvering Motion of a Ship in Waves (in Japanese). Journal of The Society of Naval Architects of Japan 173, 69-78
- [6] Ming-Chung Fang dan Jih-Hong Luo. 2005. "The Nonlinear Hydrodynamics Model for Simulating a Ship Steering in Waves with Autopilot System". Ocean Engineering 32 1486-1502.
- [7] Healey, A.J., Lienard, D., 1993. Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles. IEEE Journal of Oceanic Engineering 18 (3), 327-339.
- [8] Fossen, T.I. 1994. "Guidance and Control of Ocean Vehicles". John Wiley and Sons. New York.