

Perancangan Sistem Stabilisasi Rudder Roll pada Kapal Perang Kelas SIGMA dengan Kontrol Logika Fuzzy

Alfany Hardiyanty¹⁾, Aulia S.A¹⁾, dan A. A. Masroeri²⁾
 Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri¹⁾
 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan²⁾
 Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
 Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
 E-mail: auliasa@ep.its.ac.id

Abstrak— Kapal perang membutuhkan *maneuverability* yang baik saat beroperasi di laut. *Maneuverability* dipengaruhi oleh sistem kemudi kapal. Kemudi menggunakan *rudder* berpengaruh terhadap stabilitas *rolling* kapal. Stabilitas *rolling* adalah kemampuan kapal kembali ke keadaan normal dalam merespon gangguan. Gerakan *roll* yang besar dapat menurunkan performansi kapal dan efektivitas awak kapal. *Rudder roll* merupakan konsep *rudder* berfungsi mengendalikan *heading* hingga gerakan *roll* berkurang. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang sistem stabilisasi *rudder roll* pada kapal perang kelas SIGMA dengan kontrol logika fuzzy. Perancangan sistem dilakukan berdasarkan spesifikasi kapal PKR KRI Diponegoro Kelas SIGMA. Perancangan dilakukan secara simulasi menggunakan Simulink Matlab dan kontrol logika fuzzy Sugeno-Takagi. Gangguan yang digunakan adalah gangguan linier gelombang laut *state* satu sampai tujuh. Semakin tinggi tingkatan gangguan, maka semakin lama waktu stabilitas *rolling* mencapai *steady state*. Performansi kestabilan sistem stabilisasi *rudder roll* telah sesuai dengan parameter kestabilan yang ada. Performansi *maneuver* sistem stabilisasi *rudder roll* memiliki jarak *advanced diameter* dan *tactical diameter* yang sama yaitu sebesar 2.48 Lpp dan telah sesuai dengan standar IMO (*International Maritime Organization*).

Kata Kunci— *rudder roll*, stabilitas, fuzzy, gangguan

I. PENDAHULUAN

KAPAL perang membutuhkan *maneuverability* yang baik saat beroperasi. *Maneuverability* mempengaruhi stabilitas kapal perang di lautan. Selain itu, pengendalian *maneuverability* penting dalam navigasi kapal perang untuk menghindari kerugian berupa fisik atau materi. Ketika beroperasi di lautan, *maneuverability* kapal perang dipengaruhi oleh sistem kemudi kapal. Sistem kemudi atau aktuator kapal perang terdiri atas sistem *ballast* dan *rudder*. Sistem *ballast* berfungsi untuk menyesuaikan tingkat kemiringan dan *draft* kapal. Sementara *rudder* berfungsi mengendalikan *heading* sedemikian hingga gerakan *roll* berkurang. Dengan demikian, kemudi menggunakan *rudder* mempengaruhi *rolling* kapal. Stabilitas *rolling* merupakan kemampuan sistem dalam merespon gangguan untuk berusaha kembali ke keadaan normal. Alasan utama dalam menstabilkan sistem *roll* pada armada kapal adalah mencegah kerugian dan meningkatkan efektivitas awak kapal. Amplitudo yang besar dari gerakan *rolling* akan menyebabkan kerugian materi hingga meninggalnya awak kapal [1]. Ketika *rudder* dikemudikan, tingkat kemiringan kapal masih berada dalam *range* tertentu

sedemikian hingga saat *roll* bergerak pada *rudder*. Namun, *coupling* antara *rudder* dan *roll* menjadi masalah menarik dari bahasan stabilisasi *roll* menggunakan *rudder*. Jika gerakan *rudder* dapat berpengaruh secara signifikan terhadap perubahan *roll* sesuai dengan *course deviation*, maka gerakan *roll* dapat direduksi beberapa derajat [2].

Pada penelitian sebelumnya, perancangan sistem stabilisasi *rudder roll* telah dilakukan oleh J. Van Amerongen, et al^[3] menggunakan ALQG (*Adaptive Linier Quadratic Gaussian*). Variabel yang mempengaruhi stabilitas *rudder roll* dalam penelitian tersebut antara lain sudut *rudder*, nonlinieritas *steering machine*, dan gangguan berupa frekuensi dan amplitudo gelombang laut yang berubah-ubah. Performansi dari *adaptive controller* mendekati performansi secara optimal dalam *manual adjusted controller* yang telah diuji di laut. Akan tetapi, *adaptive controller* tersebut tidak memiliki *adjustment* untuk menjaga kestabilan kapal ketika faktor lingkungan berubah.

Secara matematis, sudut *rudder* merupakan gabungan dari sudut *roll* dan *yaw*. Dalam sistem stabilisasi *rudder roll*, kontroler di desain untuk meningkatkan redaman, mengurangi amplitudo *roll*, dan mengontrol sudut *heading* [4]. Sistem kontrol *rudder roll* berkaitan dengan *steering* dan *rolling*. Variabel yang mempengaruhi *rolling* adalah *sway* dan *yaw*. Penelitian mengenai stabilitas *rolling* pada Kapal PKR KRI Diponegoro menggunakan logika fuzzy telah dilakukan [5]. Metode logika fuzzy yang digunakan adalah Sugeno-Takagi. Perancangan sistem berbasis logika fuzzy Sugeno-Takagi karena berdasarkan penelitian sebelumnya, performansi sistem lebih baik daripada logika fuzzy Mamdani. Sistem kontrol fuzzy yang dirancang telah sesuai dengan spesifikasi kapal. Namun pada penelitian tersebut, aktuator yang digunakan dalam perancangan sistem adalah sistem *ballast* dan dalam keadaan kapal diam sehingga faktor *coupling sway* dan *yaw* Oleh sebab itu perlu dilakukan perancangan sistem kontrol stabilisasi *rudder roll* pada kapal PKR KRI Diponegoro dengan metode logika fuzzy.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Deskripsi Kapal

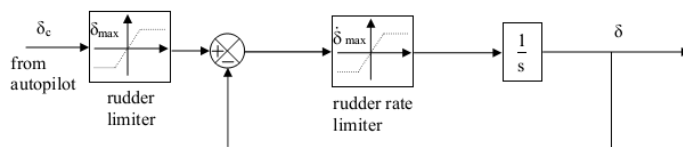
KRI Diponegoro merupakan salah satu dari empat kapal perang kelas SIGMA (*Ship Integrated Geometrical Modularity Approach*) yang dibeli pemerintah Indonesia dari perusahaan galangan kapal *Schelde Naval Shipbuilding* Belanda pada 2004.



Gambar. 1. KRI Diponegoro

Tabel 1.
Notasi pada dinamika kapal [6]

DOF		Force and Moment	Linier and angular vel.	Potition and euler angles
1	Motion in the x-direction (surge)	X	u	x
2	Motion in the y-direction (sway)	Y	v	Y
3	Motion in the z-direction (heave)	Z	w	Z
4	Rotation about the x-axis (roll)	K	p	Φ
5	Rotation about the y-axis (pitch)	M	q	Θ
6	Rotation about the z-axis (yaw)	N	r	Ψ



Gambar. 2. Diagram sederhana loop kontrol rudder [6]

Kapal KRI kelas sigma ini memiliki spesifikasi panjang $\pm 90,71$ meter, lebar $\pm 13,02$ meter, dan tinggi $\pm 8,2$ meter, tiba di Indonesia pada 31 Agustus 2007 dan langsung bergabung di jajaran Komando Armada RI Kawasan Timur (Koarmatim) TNI AL. Kapal yang memiliki kecepatan jelajah 12/14-18/28 knot atau setara dengan 40 kilometer per jam itu, dilengkapi senjata anti serangan udara, anti kapal atas air, anti kapal selam dan perang elektronik. Stabilizer yang digunakan adalah *Passive Roll Stabilization Tank* atau *Active Fin Stabilizer*. Sistem kemudi kapal terdiri atas sistem ballast dan rudder. Rudder yang digunakan pada kapal perang KRI Diponegoro adalah tipe *ROLL ROYCE*.

B. Pemodelan Dinamika Kapal

Secara umum gerakan yang dialami sebuah kapal ketika melaju di lautan ada dua macam, yaitu gerak rotasi dan translasi. Gerak translasi adalah *heave, surge dan sway*. Sedangkan gerak rotasi adalah *yaw, roll, dan pitch*.

Model *plant* dari dinamika maneuvering kapal didapatkan dari pendekatan yang dilakukan oleh Nomoto (1957) sebagai bentuk matematis orde 1 dan 2 [6]. Notasi pada dinamika kapal diberikan pada Tabel 1. Berikut ini adalah fungsi transfer dari model Nomoto:

$$\frac{r}{\delta_R}(s) = \frac{K_R(1 + T_3s)}{s(1 + T_1s)(1 + T_2s)} \tag{1}$$

Parameter – parameter dari fungsi transfer diatas diperoleh dari :

$$T_1T_2 = \frac{\det(M)}{\det(N)} \tag{2}$$

$$T_1 + T_2 = \frac{n_{11}m_{22} + n_{22}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{21}m_{12}}{\det(N)} \tag{3}$$

$$K_R = \frac{n_{21}b_1 - n_{11}b_2}{\det(N)} \tag{4}$$

$$K_RT_3 = \frac{m_{21}b_1 - m_{11}b_2}{\det(N)} \tag{5}$$

Dimana elemen m_{ij} , n_{ij} dan b_i ($i = 1,2$ dan $j = 1,2$) didapatkan dari matriks berikut:

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_v & mx_G - Y_r \\ mx_G - N_v & I_z - N_r \end{bmatrix}; N(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r \\ -N_v & mx_G u_0 - N_r \end{bmatrix};$$

$$b = \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix} \tag{6}$$

C. Pemodelan Dinamika Rudder

Aktuator yang digunakan pada kapal adalah *rudder* dengan kemampuan dalam menjaga arah sesuai dengan perintah. Salah satu tipe daun kemudi yang banyak digunakan adalah tipe Van Amorengen dengan spesifikasi antara -35° sampai dengan 35° dan laju kerja *rudder* $2,3^\circ - 7^\circ/s$. Syarat untuk minimum laju rata-rata *rudder* ditentukan oleh klasifikasi perhimpunan. Hal tersebut disyaratkan bahwa *rudder* dapat digerakkan 35° dari *port* menuju 35° ke *starboard* dalam waktu tidak lebih dari 30 detik [6]. Diagram sederhana loop kontrol *rudder* diberikan pada Gambar 2.

D. Pemodelan Coupling Steering dan Rolling

Sistem stabilisasi *roll* modern seperti *fins, anti-roll tanks* dan *high frequency rudder action* digunakan secara individual atau kombinasi pada sebagian besar angkutan laut. Pada beberapa sistem, gerakan *low frequency rudder* digunakan secara khusus untuk mengendalikan *heading*. Sementara *anti-roll tanks* mahal dan sangat membutuhkan ruang tertentu, maka perpaduan *fins* dan *rudder* menjadi alternatif menarik untuk *roll damping*. Meskipun, gerakan *fin* yang sama dengan gerakan *high frequency rudder* mengganggu sistem kontrol *heading*. Untuk mengurangi interaksi tersebut, Van Amerongen dan Van Cappel telah mengemukakan pemodelan linier eksplisit yang mendeskripsikan *coupling* antara *fin* dan sudut rudder menjadi persamaan kecepatan linier dan angular dalam gerakan *sway* dan *yaw* [6]. Untuk menyederhanakan, dibuat asumsi bahwa kedua *fin* dan dikontrolkan secara independen, sehingga pemodelan dapat dituliskan dengan

$$M\dot{v} + Nv + G\eta = Bu \tag{7}$$

Dimana $v = [v, p, r]^T$ dan $\eta = [y, \phi, \psi]^T$ adalah keadaan dan $u = [\alpha, \delta]^T$ adalah vektor kontrol. Persamaan matrik terkait persamaan tersebut antara lain^[6]:

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -mz_G - Y_{\dot{p}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ -mz_G - K_{\dot{v}} & I_x - K_{\dot{p}} & mx_G - K_{\dot{r}} \\ mx_G - N_{\dot{v}} & mx_G - N_{\dot{p}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$N = \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & mu_o - Y_r \\ -K_v & -K_p & -mz_G u_o - K_r \\ -N_v & -N_p & mx_G u_o - N_r \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & WGM_T & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B = \begin{bmatrix} Y_{\alpha} & Y_{\delta} \\ K_{\alpha} & K_{\delta} \\ N_{\alpha} & N_{\delta} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Dengan menggunakan Transformasi Laplace, diperoleh fungsi transfer sebagai berikut:

$$\phi(s) = \omega_n^2 \frac{K_{\delta}\delta(s) + K_{\alpha}\alpha(s) - K_r r(s)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (12)$$

ζ dan ω_n adalah rasio redaman relatif dan frekuensi natural dalam *roll*. Pemodelan tersebut sangat dianjurkan dalam sistem kontrol yang dapat dirancang sebagai kontrol *heading* dan *roll damping* [6].

E. Pemodelan Dinamika Gangguan Gelombang

Terdapat beberapa gangguan yang mempengaruhi pelayaran kapal di lautan. Gangguan yang mempengaruhi pelayaran kapal pada perancangan pengendali ini adalah gelombang. Model gelombang dapat dijelaskan sebagai berikut :

$$y(s) = h(s)w(s) \quad (13)$$

dengan $w(s)$ adalah *zero-mean Gaussian white noise process* [6]. Fungsi transfer orde dua digunakan untuk model gelombang yaitu:

$$h(s) = \frac{K\omega s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (14)$$

dimana ω_0 adalah frekuensi gelombang (modal frekuensi), ζ adalah *damping coefficient* dan $K\omega_0$ adalah *gain constant*. *Gain constant* didefinisikan sebagai $K\omega = 2\zeta\omega_0\sigma_m$ dimana σ_m adalah konstanta yang menjelaskan intensitas gelombang [6]. Modal frekuensi untuk spektrum Pierson-Moscowitz adalah:

$$\omega_0 = 0,4\sqrt{\frac{g}{H}} \quad (15)$$

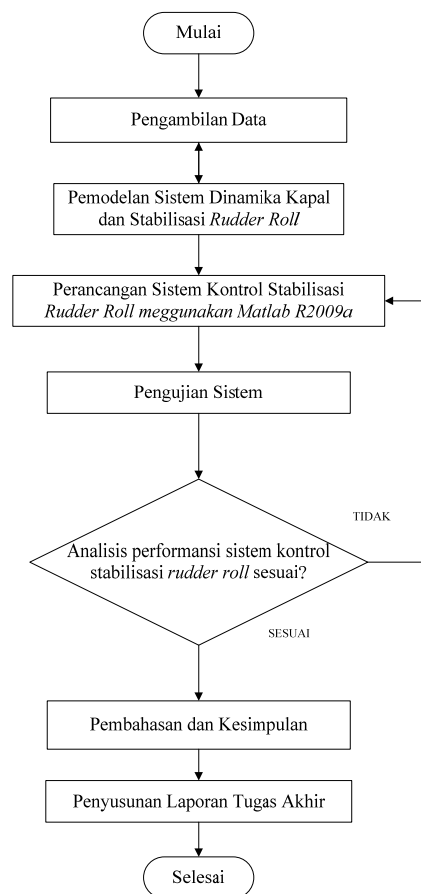
$$K_{\omega} = 2\zeta\omega_0\sigma_{\omega} \quad (16)$$

III. METODOLOGI PENELITIAN

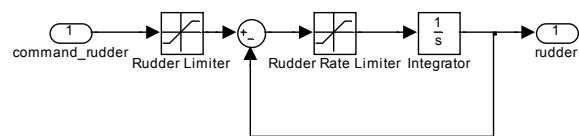
Berikut adalah tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini, lihat Gambar 3.

A. Data Spesifikasi Kapal

Pengumpulan data terdiri atas spesifikasi Kapal Perang KRI Diponegoro dan gangguan gelombang yang akan digunakan untuk merancang sistem stabilisasi *rudder roll* dengan KLF. Data masukan yang digunakan untuk menyusun simulasi pengendalian pada kapal perang KRI-Diponegoro berupa spesifikasi koefisien hidrodinamika dari spesifikasi fisik yang dimiliki oleh kapal yaitu: panjang (L) = 90.71 m, lebar (B) = 13,02 m, kedalaman (T) = 3,75 m, koefisien blok (CB) = 0,41, kecepatan 14,4 m/s, pusat gravitasi (XG) = 2.25 m, dan *displacement* (m) = 1818 ton.



Gambar. 3. Alur pengerjaan penelitian.



Gambar. 4. Diagram blok *rudder*

B. Pemodelan Sistem Dinamika Kapal dan Rudder Roll

Pemodelan sistem dinamika kapal dan *rudder roll* dilakukan untuk memperoleh fungsi transfer komponen sistem kontrol yang terdiri atas pemodelan dinamika kapal, *rudder*, *roll damper*, dan gangguan berupa gelombang laut.

• Pemodelan dinamika kapal

Pemodelan plant sistem dinamika kapal telah dilakukan sesuai dengan persamaan (1), sehingga diperoleh fungsi transfer sebagai berikut

$$\frac{\psi(s)}{\delta_R(s)} = \frac{1060.369s + 403.378}{14.539s^3 + 5.907s^2 + s} \quad (17)$$

• Pemodelan dinamika rudder

Pemodelan dinamika *rudder* berdasarkan Van Amerongen dengan sudut *rudder* dan laju *limiter rudder* berada pada *range* $\delta_{max} = 35^\circ$ dan $2,3^\circ/s \leq \dot{\delta}_{max} < 7^\circ/s$. Lihat Gambar 4 untuk diagram blok.

• Pemodelan roll damper

Pemodelan *roll damper* mendeskripsikan *coupling* antara *fin* dan sudut *rudder* menjadi persamaan kecepatan linier dan angular dalam gerakan *sway* dan *yaw*. Berdasarkan persamaan (12), diperoleh fungsi transfer sebagai berikut

$$\phi(s) = \frac{-0.07\delta(s)+0.003\alpha(s)-0.8r(s)}{0.001s^2-0.00006s+2.94} \quad (18)$$

C. *Pemodelan Dinamika Gangguan Gelombang Laut*

ada tugas akhir, sistem kontrol diberikan gangguan sesuai dengan spesifikasi kapal. Sesuai dengan persamaan (14), diperoleh fungsi transfer gangguan gelombang untuk state 1 sampai 6.

1. Gangguan gelombang *sea state 1, calm water* (0-0,1m) dan gangguan gelombang *sea state 2, smooth water* (0,1-0,5m)

$$h(s) = \frac{1,8086s}{s^2+0,5024s+6,31} \quad (19)$$

2. Gangguan gelombang *sea state 3, slight water* (0,5-1,25m) dan gangguan gelombang *sea state 4, moderate water* (1,25 - 2,5m)

$$h(s) = \frac{0,6105s}{s^2+0,1932s+0,933} \quad (20)$$

3. Gangguan gelombang *sea state 5, rough water* (2,5 - 4m)

$$h(s) = \frac{0,4664s}{s^2+0,1476s+0,544} \quad (21)$$

4. Gangguan gelombang *sea state 6, very rough water* (4-6m) dan gangguan gelombang *sea state 7, high water* (6-9m)

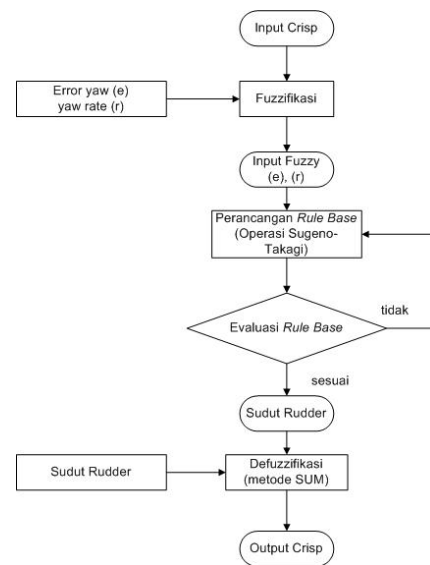
$$h(s) = \frac{0,3779s}{s^2+0,1196s+0,346} \quad (22)$$

D. *Perancangan Sistem Stabilisasi Rudder Roll*

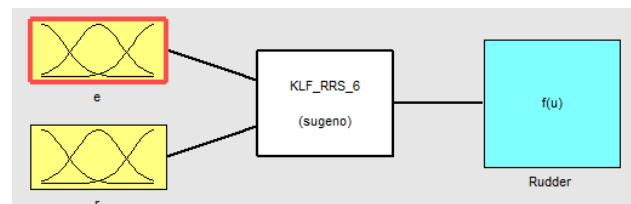
Pada penelitian ini, kontrol yang digunakan adalah kontrol logika fuzzy (KLF). Gambar 5 adalah *flowchart* dari KLF, Masukan yang digunakan adalah *error yaw* (e) dan *yaw rate* (r). Keluaran dari KLF ini adalah sudut *rudder* yang kemudian menjadi masukan *rudder* untuk menggerakkan kapal sesuai dengan masukan sudut heading pada sistem. Terdapat dua input yang digunakan dalam KLF Sugeno-Takagi yaitu *error yaw* (e) dan *yaw rate* (r). Masing-masing input tersebut dirancang dengan tujuh fungsi keanggotaan segitiga. Fungsi keanggotaan segitiga bersifat lebih fleksibel terhadap perubahan yang terjadi pada sistem. Pada fungsi keanggotaan NB dan PB digunakan fungsi keanggotaan trapesium untuk menghasilkan range input yang lebih lebar dan output yang lebih stabil.

Input *error yaw* (e) memiliki rentang nilai -35° sampai 35° yang terdiri atas tujuh fungsi keanggotaan antara lain *Negatif Big* (NB), *Negatif Medium* (NM), *Negatif Small* (NS), *Zero* (Z), *Positif Small* (PS), *Positif Medium* (PM), dan *Positif Big* (PB). Input *yaw rate* (r) memiliki rentang nilai $-7^\circ/s$ sampai $7^\circ/s$ yang terdiri atas tujuh fungsi keanggotaan antara lain *Negatif Big* (NB), *Negatif Medium*(NM), *Negatif Small* (NS), *Zero*(Z), *Positif Small* (PS), *Positif Medium* (PM), dan *Positif Big* (PB). Output KLF pada penelitian ini adalah sudut *rudder* dengan range -35° sampai dengan 35° . Output yang digunakan berbasis logika *fuzzy* Sugeno-Takagi dengan tujuh fungsi keanggotaan yang terdiri atas *Negatif Big* (NB), *Negatif Medium* (NM), *Negatif Small* (NS), *Zero* (Z), *Positif Small* (PS), *Positif Medium* (PM), dan *Positif Big* (PB).

Penentuan kaidah atur dibuat sesuai dengan jumlah fungsi keanggotaan input dan output. Penentuan basis aturan menggunakan *If...Then rule* dengan operator logika And. Terdapat 49 basis aturan KLF dalam tugas akhir ini.



Gambar. 5. Alur pengerjaan kontrol logika *fuzzy*



Gambar. 6. KLF Sugeno-Takagi

Tabel 2. Basis aturan KLF

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

Nilai masukan yang terdiri atas *error yaw* dan *yaw rate* diolah untuk diperoleh nilai keluaran berupa sudut *rudder*. Penentuan nilai keluaran sesuai dengan jenis logika *fuzzy* yang digunakan. Pada tugas akhir ini, teknik pengambilan keputusan yang digunakan adalah metode Sugeno-Takagi. Pada metode tersebut, proses pengambilan keputusan menggunakan operasi SUM. Metode defuzzikasi yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah metode *centroid*. Metode ini membagi dua momen pertama fungsi keanggotaan dan nilai *crisp* keluaran diperoleh berdasarkan titik berat kurva hasil proses pengambilan keputusan.

IV. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. *Analisa Uji Stabilitas Rolling Kapal*

Rudder roll berfungsi untuk mengendalikan heading sedemikian hingga gerakan roll berkurang. Dalam tugas akhir ini, masukan sistem adalah sudut heading sebesar 20° dan 30°

sesuai dengan aturan IMO. Stabilitas *rolling* merupakan kemampuan kapal dalam merespon gangguan untuk kembali ke keadaan normal. Analisa uji stabilitas *rudder roll* dengan gangguan gelombang laut *state* satu sampai tujuh diberikan pada Tabel 3.

Stabilitas rolling dengan masukan *heading* 20° memiliki performansi baik yang ditunjukkan oleh Tabel 4. Berdasarkan tabel tersebut, nilai *maximum overshoot* yang dihasilkan tidak signifikan. Hal tersebut menunjukkan bahwa kapal perang mampu menahan gangguan gelombang *state* tujuh dengan sudut *roll* maksimum sebesar 2.233°.

Stabilitas rolling dengan masukan *heading* 30° juga memiliki performansi baik yang ditunjukkan oleh Tabel 5. Berdasarkan tabel tersebut, *maximum overshoot* yang dihasilkan tidak signifikan. Kapal perang mampu menahan gangguan gelombang *state* tujuh dengan sudut *roll* maksimum sebesar 3.95°. Kedua tabel menunjukkan bahwa semakin tinggi tingkatan gelombang, maka semakin lama waktu yang dibutuhkan oleh *roll* merespon gangguan hingga mencapai *steady state*, lihat Tabel 4.

B. Analisa Uji Sistem Close Loop tanpa Gangguan

Simulasi sistem *close loop* yang telah dirancang terdiri atas kendali logika *fuzzy*, *rudder*, pemodelan dinamika kapal, *roll damper*, dan *gyrocompass* sebagai transmitter. Kendali logika *fuzzy* tersebut digunakan untuk mengendalikan sudut kerja *rudder* sebagai aktuator kapal. Keluaran dari sistem ini adalah stabilitas kapal. Parameter stabilitas sistem pengendalian yang diamati dalam sistem *close loop* ini adalah *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state*.

Berdasarkan Gambar 7, respon uji sistem diperoleh dengan *maximum overshoot* 21.71°, *rise time* sebesar 11.354 s, *settling time* sebesar 50 s, dan *error steady state* sebesar 7.18×10^{-8} . Berdasarkan Gambar 8, respon uji sistem diperoleh dengan *maximum overshoot* sebesar 36.68°, *rise time* sebesar 8.117s, *settling time* sebesar 60 s, dan *error steady state* sebesar -3.23×10^{-7} .

C. Analisa Uji Sistem Close Loop dengan Gangguan

Untuk mengetahui tingkat stabilitas *rudder roll* yang telah dirancang, sistem diberikan gangguan gelombang laut *state* satu sampai tujuh, lihat Tabel 5.

Tabel 5 menunjukkan nilai parameter kestabilan dari respon uji dengan masukan *heading* 20°. Berdasarkan tabel tersebut, semakin tinggi level gangguan yang diberikan, maka semakin besar *maximum overshoot* yang dihasilkan.

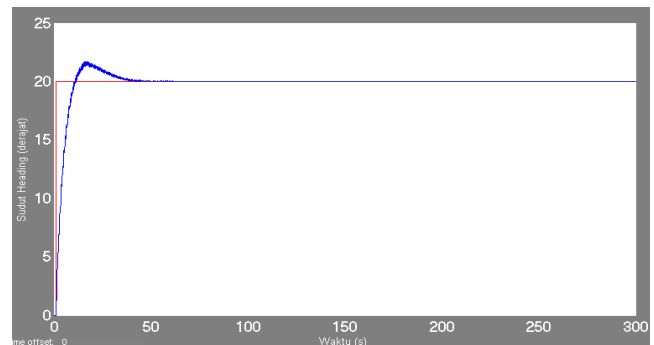
Tabel 6 menunjukkan nilai parameter kestabilan dari respon uji dengan masukan *heading* 30°. Respon uji gangguan gelombang *state* lima dan enam memiliki nilai *rise time* lebih lama dibandingkan gangguan gelombang lainnya. Gangguan gelombang *state* lima dan enam bersifat *rough* dan *very rough*. Kedua jenis gangguan gelombang tersebut memiliki range ketinggian gelombang laut yang lebih lebar daripada yang lain. Oleh sebab itu semakin banyak osilasi yang dihasilkan.

Tabel 3. Data uji stabilitas *rolling* kapal dengan masukan *heading* 20°

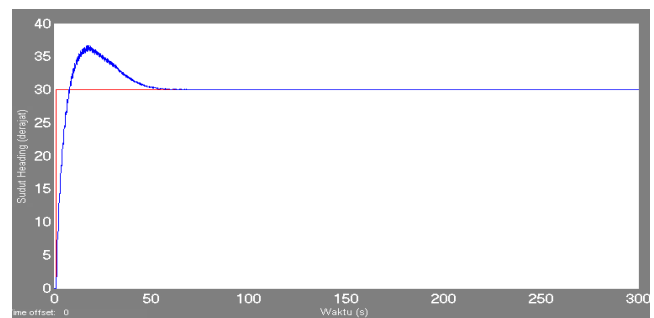
Gangguan Gelombang	Mp (°)	t _r (s)	t _s (s)	e _{ss} (%)
Sea state 1	2.355	1.4	100	6.731
Sea state 2	2.356	1.358	230	8.3x10 ⁻³
Sea state 3	2.343	1.36	200	0.0162
Sea state 4	2.318	1.36	245	0.0204
Sea state 5	2.294	1.359	270	0.0273
Sea state 6	2.318	1.36	245	0.0204
Sea state 7	2.233	1.359	270	1.03

Tabel 4. Data uji stabilitas *rolling* kapal dengan masukan *heading* 30°

Gangguan Gelombang	Mp (°)	t _r (s)	t _s (s)	e _{ss} (%)
Sea state 1	4.066	1.46	230	0.0123
Sea state 2	4.067	1.46	240	0.0234
Sea state 3	4.05	1.46	248	9.3x10 ⁻⁴
Sea state 4	4.03	1.46	250	6.4x10 ⁻³
Sea state 5	4.695	1.46	440	0.404
Sea state 6	4	8.9	160	0.01
Sea state 7	3.95	1,46	280	0.0232



Gambar. 7. Respon uji sistem *close loop* tanpa gangguan dengan masukan *heading* 20°.



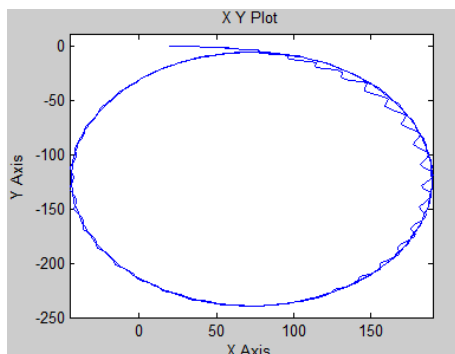
Gambar. 8. Respon uji sistem *close loop* tanpa gangguan dengan masukan *heading* 30°.

Tabel 5.

Data analisa uji simulasi dengan gangguan gelombang (heading 20°)				
Gangguan Gelombang	Mp (%)	t _r (s)	t _s (s)	e _{ss} (%)
Sea state 1	7.1	11.89	65	0.2
Sea state 2	6	11.9	60	0.17
Sea state 3	7.25	11.9	60	0.19
Sea state 4	9.52	11.4	60	0.12
Sea state 5	12.5	9.63	60	0.36
Sea state 6	13.05	10.35	75	0.6
Sea state 7	14.55	10.37	75	0.99

Tabel 6.

Data analisa uji simulasi dengan gangguan gelombang (heading 30°)				
Gangguan Gelombang	Mp (%)	t _r (s)	t _s (s)	e _{ss} (%)
Sea state 1	22.43	8.13	65	0.31
Sea state 2	23.3	8.1	60	0.29
Sea state 3	20.87	8.1	70	0.38
Sea state 4	20.97	8.068	70	0.43
Sea state 5	24	8.156	200	0.11
Sea state 6	23	8.9	160	0.01
Sea state 7	24.41	9	80	1.03



Gambar. 9. Uji turning circle

D. Analisa Uji Circle

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan oleh Gambar 9, diperoleh jarak *advanced diameter* kapal PKR KRI Diponegoro Kelas SIGMA sebesar 235 m atau 2.59 Lpp dan *tactical diameter* sebesar 235 m atau 2.59 Lpp. Pergerakan *circle* dimulai dari koordinat (0,0) dan waktu yang dibutuhkan untuk satu kali putaran sebesar 360° adalah 75 detik.

V. KESIMPULAN

Performansi sistem stabilisasi *rudder* yang diperoleh adalah sebagai berikut:

1. Stabilitas *rolling* dengan *setpoint heading* 20° dan 30° mampu menahan gangguan gelombang hingga *state* 7 dengan sudut *roll* maksimum sebesar 2.233° dan 3.95°.
2. *Maximum overshoot* yang dihasilkan oleh sistem *close loop* dengan gangguan gelombang telah memenuhi kriteria kestabilan sistem. *Maximum overshoot* sudut *heading* dengan *setpoint* 20° lebih kecil daripada *setpoint* 30°.

3. *Error steady state* sistem *close loop* dengan gangguan gelombang *state* satu sampai tujuh telah memenuhi kriteria kestabilan sistem. *Error steady state* terkecil terdapat pada respon sistem *close loop* dengan gangguan gelombang laut *state* enam *setpoint heading* 30°.
4. Respon uji *close loop* dengan gangguan gelombang menggunakan *setpoint heading* 30° lebih cepat daripada *setpoint* 20°. Hal tersebut disebabkan pergerakan *rudder* sebesar 30° membutuhkan momen dan gaya yang besar sehingga respon sistem lebih cepat.
5. Perancangan sistem stabilisasi *rudder roll* menghasilkan performansi manuver sesuai dengan standar IMO dengan jarak *advanced diameter* sebesar 235 m atau 2.59 Lpp dan *tactical diameter* sebesar 235 m atau 2.59 Lpp.

Untuk penelitian berikutnya, dapat dilakukan perancangan sistem stabilisasi *rudder roll* dengan konsep nonlinier dari *coupling sway-yaw*, dan *roll* sehingga performansi sistem yang dihasilkan lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chen, Shyh-Leh., Hsu, Wei-Chih. 2003. *Fuzzy Sliding Mode Control for Ship Roll Stabilization*. *Asian Journal of Control*, Vol 5, No. 2, 187-194
- [2] Oda, H., Ohtsu, K., Hotta, T. 1996. *Statistical Analysis and Design of A Rudder Roll Stabilization System*. *Control Engineering Practice*, Vol 4, No.3, pp 351-358:Elsevier Science Ltd
- [3] Amerongen, J. Van, Klugt, P.G.M.Van Der, Lemkes, H.R. Van Nauta. 1990. *Rudder Roll Stabilization for Ships*. *Automatica*, Vol. 26, No.4, pp 679-690: Pergamon Press pic
- [4] Alarcin, Fuat., Gulez, Kayhan. 2007. *Rudder Roll Stabilization for Fishing Vessel using Neural Network Approach*. *Ocean Engineering* 34 1811-1817: Elsevier Science Ltd
- [5] Dontiawan, Vibrio Yulian. 2012. Tugas Akhir: "Perancangan Sistem Kendali Stabilitas *Rolling* pada Kapal Perang Kawal Rudal Kelas Sigma-KRI Diponegoro dengan menggunakan Logika Fuzzy", Teknik Fisika FTI-ITS Surabaya
- [6] Fossen, Thor. I. 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicle*. John Willy & Son.