

Perancangan Sistem Kontrol Sandar Kapal Otomatis Berbasis Logika Fuzzy di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya

Randika Gunawan, Aulia Siti Aisjah, A.A. Masroeri

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

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

Abstrak—Tugas akhir ini berkaitan dengan perancangan simulasi sistem kontrol sandar otomatis dengan jenis kapal AHTS (*Anchor Handling Tug Supply*). Sistem *auto pilot* yang digunakan dalam simulasi ini menggunakan Kontrol Logika Fuzzy (KLF) Sugeno-Takagi. Kontrol Logika Fuzzy digunakan untuk kontrol kemudi (*rudder*), *stern thruster*, dan *bow thruster* selama proses sandar kapal. Simulasi ini menggunakan data dari spesifikasi kapal yang sebenarnya dan menggunakan model pendekatan Nomoto orde II. Agar hasil simulasi mendekati kondisi yang sebenarnya, dilakukan pemodelan arus laut dengan kecepatan arus sesuai dengan kondisi di pelabuhan Tanjung Perak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa simulasi sistem kontrol sandar kapal otomatis dapat mengikuti trayektori (*set point*) yang telah ditentukan dan mempertahankan posisi *heading* sandar kapal. Dengan *error* trayektori antara jalur yang ditentukan dengan jalur sebenarnya jika tidak ada gangguan arus laut maka *root square error* maksimum trayektori sebesar 0,39 m. Dengan adanya gangguan arus laut 2; 2,25 dan 2,5 knot *root square error* maksimum trayektori sebesar 1,26; 0,64 dan 2,68 m. Sedangkan untuk tahapan sandar kapal arah kapal dengan gangguan arus laut 2; 2,25 dan 2,5 knot menghasilkan *error* sebesar $-0,11^0$; $-0,06^0$ dan $-0,03^0$. Waktu yang ditempuh untuk sandar kapal tanpa ada gangguan selama 668 detik, dengan adanya gangguan arus 2; 2,25 dan 2,5 knot berturut-turut selama 113, 96, dan 99 detik.

Kata Kunci—Kontrol logika fuzzy, trayektori, sandar kapal otomatis

I. PENDAHULUAN

Pelabuhan Tanjung Perak merupakan salah satu pintu gerbang masuknya arus barang melalui laut untuk daerah Jawa Timur dan sekitarnya. Selain itu, pelabuhan Tanjung Perak memiliki jumlah kapal keluar masuk dengan intensitas yang sangat tinggi. Sehingga dengan kepadatan bongkar muat kapal mengakibatkan banyaknya jumlah antrian kapal yang akan memasuki dermaga. Selama proses kapal bersandar tersebut memerlukan kapal tunda (*tug boat*) untuk membantu mendorong kapal dalam bersandar. Sedangkan untuk menggunakan fasilitas kapal tunda memerlukan biaya operasi yang cukup tinggi.

Perkembangan IPTEK yang cukup pesat, saat ini sangat dimungkinkan adanya sebuah sistem navigasi secara otomatis yang mengatur pergerakan kapal sehingga dapat bersandar secara otomatis tanpa adanya bantuan dari kapal tunda. Manuver pada kapal dipengaruhi oleh *propeller*, *rudder* dan *thruster* dari ketiga aktuator tersebut dapat dilakukan kontrol,

sehingga dapat memandu kapal untuk bersandar secara otomatis [1].

Terdapat beberapa penelitian sebelumnya yang terkait dengan penelitian sandar kapal secara otomatis baik dalam tahap simulasi maupun *prototype* kapal, seperti Studi Perancangan Sandar Kapal Secara Otomatis Menggunakan Neural Network di pelabuhan Tanjung Perak [2] dan penelitian Automatic Berthing Control Of Ship Using Adaptive Neural Network [3]. Pada kedua penelitian di atas menggunakan metode yang sama yaitu *Neural Network*, yang memerlukan training data untuk parameter yang digunakan seperti sudut yang digunakan pada *rudder* dan kecepatan dari *propeller*. Penelitian tidak berhenti hanya pada tahap simulasi tetapi sudah berkembang menjadi sebuah *prototype* kapal yang di lengkapi dengan peralatan canggih seperti GPS sehingga kapal dapat bersandar secara otomatis sesuai dengan trayektori yang dilalui [4]. Penelitian sandar kapal otomatis ini merupakan pengembangan dari penelitian yang sudah ada sebelumnya, tetapi dengan menggunakan metode yang berbeda yaitu dengan menggunakan metode fuzzy sebagai pemilihan keputusan kontroler pada saat kapal bersandar.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Pemodelan Dinamika Kapal

Pemodelan dinamika kapal dilakukan berdasarkan data spesifikasi kapal dan diolah dengan menggunakan pendekatan matematis Nomoto orde II [5].

$$\frac{\psi(s)}{\delta_R(s)} = \frac{243,6932s + 106,183}{2,1685s^3 + 2,49077s^2 + s} \quad (1)$$

Untuk pemodelan sandar kapal diperoleh [4]:

$$\frac{R(s)}{E(s)} = \frac{0,034363s + 1,32728 \times 10^{-8}}{s^2 - 4,46514 \times 10^{-6}s + 1,35787 \times 10^{-12}} \quad (2)$$

$$\frac{R(s)}{E(s)} = \frac{-0,00133s - 1,81413 \times 10^{-10}}{s^2 - 4,46514 \times 10^{-6}s + 1,35787 \times 10^{-12}} \quad (3)$$

Pemodelan *rudder* kapal dengan spesifikasi V_{cc} sebesar 380 Volt dan *time constant* sebesar 0,05. Sehingga diperoleh persamaan fungsi transfer sebagai berikut [5]:

$$\delta = \frac{0,6/380}{0,05s + 1} \quad (4)$$

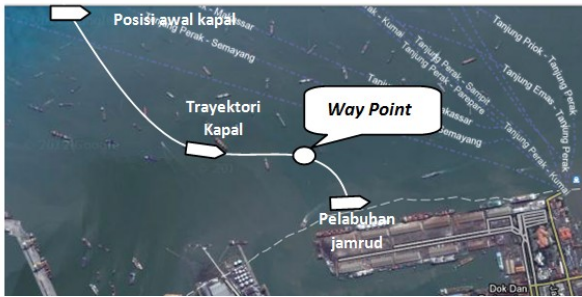
Pemodelan *propeller* Pemodelan dari spesifikasi kapal nilai K_y (*gain constant*) adalah 1, dan n *propeller* 500 rpm. Dari hasil perhitungan T_y diperoleh nilai 0,339 sehingga didapatkan fungsi alih *propeller* menjadi [5]:

$$\frac{Q_m(s)}{Y} = \frac{1}{1+0,339s} \quad (5)$$

B. Penentuan Traytektori Sandar kapal

Lintasan yang digunakan sebagai jalur bersandarnya kapal ditentukan oleh posisi kapal terakhir yang masuk ke dalam area sandar kapal. Dengan koordinat kapal sebagai berikut:

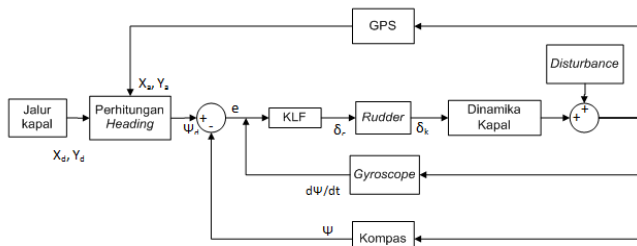
- Posisi Kapal :
 -07° -11' -18" LS dan 112° 43' 00" BT
 Direpresentasikan kedalam koordinat XY kuadran I dengan sebuah titik (10, 1.020) m
 Untuk posisi dermaga berada pada koordinat yang telah ditentukan. Dengan koordinat sebagai berikut :
- Posisi Dermaga Jamrud Utara :
 -07° -11' -51" LS dan 112° 43' 32" BT
 Direpresentasikan kedalam koordinat XY kuadran I dengan sebuah titik (0, 990) m



Gambar 1. Jalur trayektori sandar kapal

C. Perancangan Kontrol Trayektori

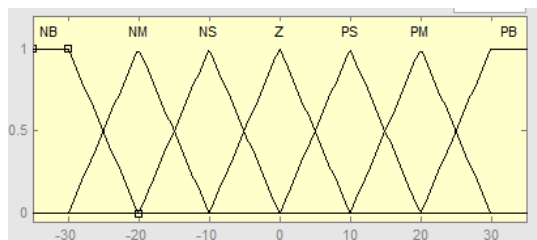
Perancangan kontrol trayektori pada kapal AHTS ini berbasis KLF dengan diagram blok sebagai berikut:



Gambar 2. Diagram blok trayektori kapal

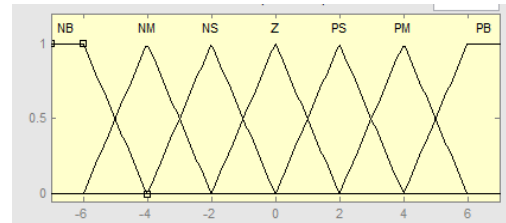
• Fuzzifikasi

Fuzzifikasi dalam KLF berfungsi mengubah input yang berupa *crisp* menjadi himpunan *fuzzy* (*variable linguistic*) [7].



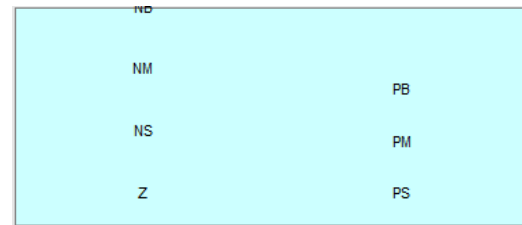
Gambar 3. Membership function error yaw

Gambar 3 menunjukkan nilai masukan dari *error yaw* dibagi menjadi 7 tingkatan yaitu *Negative Big* (NB), *Negative Medium* (NM), *Negative Small* (NS), *Zero* (Z), *Positive Small* (PS), *Positive Medium* (PM), dan *Positive Big* (PB) dari rentang nilai -35° – 35°.



Gambar 4. Membership function yaw rate

Gambar 4 menunjukkan nilai masukan dari *yaw rate* dibagi menjadi 7 tingkatan yaitu *Negative Big* (NB), *Negative Medium* (NM), *Negative Small* (NS), *Zero* (Z), *Positive Small* (PS), *Positive Medium* (PM), dan *Positive Big* (PB) dari rentang nilai -7°/s – 7°/s.



Gambar 5. Membership function rudder

Gambar 5 adalah keluaran yang diharapkan dari *rudder* yang dapat mewakili arah gerak kapal dengan rentang nilai -35° – 35°.

• Role base

Dalam KLF ditentukan nilai dari kepakaran yang dimiliki oleh perancang. *Role base* disusun merepresentasikan hasil yang mendekati kebenaran jika diterapkan pada sistem yang sebenarnya. Tabel 1 adalah *role base* yang digunakan untuk mengendalikan *rudder*.

Tabel 1.

Basis Aturan Pengendalian pada KLF

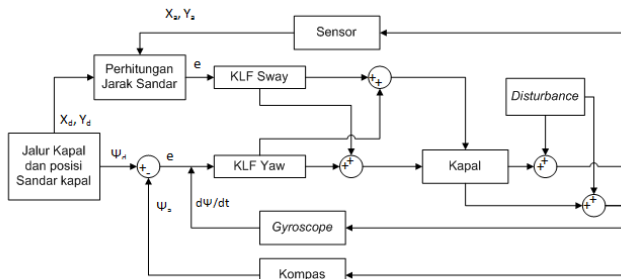
r \ e	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB
NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
NS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
PM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
PB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z

• Defuzzifikasi

Masukan dari proses defuzzifikasi adalah himpunan *fuzzy* yang diperoleh dari *role base* yang telah dibuat sebelumnya. Masukan dari *role base* masih dalam domain bentuk himpunan *fuzzy*. Oleh karena itu harus diubah kembali menjadi bentuk *crisp*. Untuk model Sugeno yang digunakan adalah defuzzifikasi jenis *Average* [6].

D. Perancangan Kontrol Sandar Otomatis

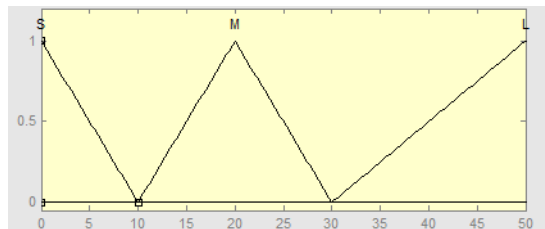
Perancangan kontrol sandar pada kapal AHTS ini berbasis KLF dengan diagram blok sebagai berikut:



Gambar. 6. Diagram blok kontrol sandar kapal

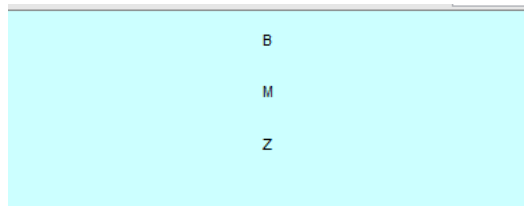
Fuzzifikasi

Gambar 7 menunjukkan nilai keluaran dari KLF berupa tegangan yang memiliki 3 tingkatan yaitu *Zero (Z)*, *Medium (M)* dan *Big (B)*. Dengan rentang nilai antara 0 Volt sampai 12 Volt sesuai dengan spesifikasi motor yang digunakan sebagai penggerak *stern* dan *bow thruster*.



Gambar. 7. Membership function jarak sandar

Gambar 8 menunjukkan nilai keluaran dari KLF berupa tegangan yang memiliki 3 tingkatan yaitu *Zero (Z)*, *Medium (M)* dan *Big (B)*. Dengan rentang nilai antara 0 Volt sampai 12 Volt sesuai dengan spesifikasi motor yang digunakan sebagai penggerak *stern* dan *bow thruster*.



Gambar. 8. Membership function tegangan bow thruster

Role base

Basis aturan diterapkan berdasarkan masukan berupa jarak kapal dengan pelabuhan dan keluaran berupa tegangan *bow thruster* dan *stern thruster* yang mempengaruhi kecepatan pergerakan sandar kapal.

Tabel 2. Basis Aturan Pengendalian pada KLF Bow

Input Jarak	Output	
	Vb	Vs
S	B	B
M	M	M
L	Z	Z

Defuzzifikasi

Metode defuzzifikasi yang digunakan dalam pemodelan ini menggunakan jenis *average*[6].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

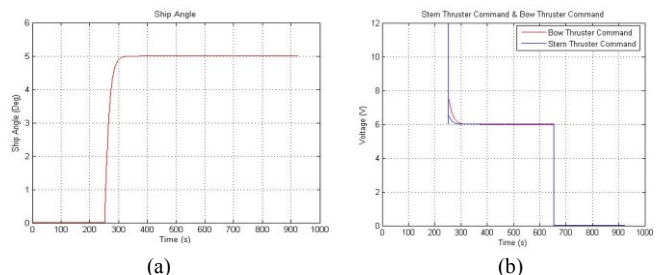
A. Analisa Sistem Kontrol pada Kapal Tanpa Gangguan Arus Laut

Posisi awal kapal pada koordinat (10,1002) dengan arah kapal mula-mula 0° dan posisi akhir kapal pada koordinat (950,280) dengan arah kapal 1,4°. Untuk mengatur manuver pada kapal maka aktuator berupa *rudder* dikontrol sesuai dengan *role base* logika *fuzzy*. Dari posisi akhir kapal tersebut sebagai acuan untuk kapal dalam tahap bersandar. Waktu yang di tempuh kapal untuk sampai ke *way point* selama 732 detik. Selama kapal melintasi trayektori terdapat selisih dengan trayektori yang diharapkan dengan *root square error* maksimum sebesar 0,39 m dan error minimum 0,07 m. Selisih simpangan antara *trak actual* dan *track desired* diakibatkan dari kecepatan kapal yang konstan saat melewati lintasan. Sehingga pada koordinat tersebut kapal melebihi *set point* trayektori.

Tabel 3. Error Trayektori Tanpa Gangguan

Time (s)	Ship Angle (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0	0,00	20,00	950,00	20,00	950,00	0,00
135	-74,90	100,00	730,00	100,03	729,88	0,12
251	-59,67	200,00	550,00	200,10	549,84	0,19
330	-42,72	300,00	450,00	300,08	449,91	0,12
418	-51,33	400,00	330,00	400,04	329,96	0,06
479	-14,44	500,00	290,00	500,00	289,93	0,07
536	-3,34	600,00	280,00	600,12	279,96	0,12
592	-3,06	700,00	275,00	700,13	275,00	0,13
732	1,40	950,00	280,00	950,39	280,01	0,39

Dalam proses sandar kapal terdapat perbedaan dengan kontrol trayektori. Kontrol sandar kapal menggunakan *bow thruster* dan *stern thruster* untuk menggerakkan dinamika kapal. Dalam sistem kontrol tersebut terdapat saling ketergantungan antara satu sistem dengan sistem yang lain dan biasanya disebut dengan Multi Input Multi Output (MIMO). Masukan berupa tegangan pada masing-masing thruster dan keluaran berupa koordinat posisi kapal dan arah kapal. Sedangkan input berupa tegangan *stern thruster* dan *bow thruster*. Untuk mencapai pelabuhan maka pergerakan manuver kapal dikendalikan agar kapal dapat berjalan sesuai *set point* dan sesuai dengan standar.



Gambar. 9. Kendali olah gerak sandar tanpa gangguan (a) *Heading* kapal (b) *Bow* dan *stern command*

Tabel Dari Gambar 9 (a) diketahui parameter *set point* untuk sandar kapal adalah koordinat terakhir kapal (950, 280) dan kapal bergerak menuju koordinat (950, 230) dengan menjaga arah kapal tetap pada sudut 5°. Dari Gambar 9 (a) diketahui bahwa *heading* kapal berubah pada saat waktu mencapai 250 detik dan mencapai *set point* sudut 5° pada saat waktu telah mencapai 330 detik. Perubahan tersebut diakibatkan oleh perubahan *yaw rate* kapal sebesar 0,3 derajat/detik yang ditunjukkan oleh Gambar 9 (b).

Perubahan *heading* kapal sangat bergantung dari perubahan tegangan dari kontroler terhadap aktuator yaitu *bow thruster* dan *stern thruster*. Dari Gambar 9 (b) menunjukkan bahwa output tegangan maksimal dari kontroler sebesar 12 V dan minimal 0 V. Pada saat kapal mendekati ke pelabuhan maka dari kontroler memberikan output tegangan yang semakin menurun sesuai dengan *role base* pada KLF yang telah dirancang. Hal ini mengakibatkan kecepatan *sway* kapal menurun. Selain itu, perubahan *heading* kapal dipengaruhi oleh perbedaan dari perubahan tegangan *stern thruster* dan *bowthruster*.

Tabel 4.
Error Yaw Sandar Tanpa Gangguan

Time (s)	Yaw (°)	Error Yaw(°)	Vbow (V)	VStern (V)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)
0	0,00	5,00	12,00	12,00	950	230	950	275
166	0,00	5,00	8,00	6,00	950	230	950	260
481	5,00	0,00	0,00	0,00	950	230	950	240
668	5,00	0,00	0,00	0,00	950	230	950	230

Dari Tabel 4 diketahui proses sandar kapal ini membutuhkan waktu selama 668 detik karena kecepatan olah gerak kapal untuk arah *sway* berbeda dengan kecepatan kapal untuk arah *surge*. Pergerakan yang lambat ini diakibatkan gaya dorong kapal dari *stern* dan *bow* karena berhubungan dengan lambung kapal yang lebih lebar daripada saat berjalan menuju arah *surge*.

Aksi kontroler pada aktuator *stern* dan *bow thruster* berhenti untuk jarak aman kapal sejauh 20 meter dari *center of mass* kapal terhadap bibir dermaga. Tali pengikat kapal dilemparkan ke dermaga oleh awak kapal dan diharapkan kapal dapat berjalan secara perlahan meskipun tidak ada aktuator karena gerakan hidrodinamika dari kapal tersebut.

B. Analisa Sistem Kontrol pada Kapal Terhadap Trayektori Dengan Gangguan Arus Laut 2 Knot

Gangguan arus sebesar 2 knot mengakibatkan *root square error* antara *track desired* dengan *track actual* mengalami penambahan. Dengan error maksimum sebesar 1,26 m pada saat mencapai *way point*. *Error* yang cukup jauh ini dapat di akibatkan dari arus mencapai nilai maksimum pada koordinat (950,280).

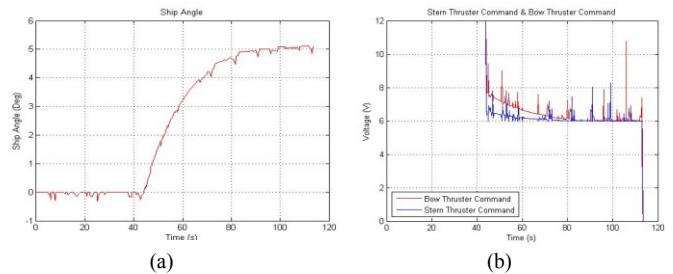
Tabel 5.
Error Trayektori Dengan Gangguan 2 Knot

Time (s)	Ship Angle (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0	0,00	20,00	950,00	20,00	950,00	0,00
135	-79,94	100,00	730,00	100,69	730,19	0,71
251	-73,61	200,00	550,00	201,07	550,47	1,17
332	-30,25	300,00	450,00	300,00	449,90	0,10

420	-63,36	400,00	330,00	400,58	330,38	0,70
483	-9,15	500,00	290,00	499,99	289,69	0,31
540	-16,38	600,00	280,00	600,04	280,29	0,29
597	19,61	700,00	275,00	700,13	275,61	0,63
738	13,45	950,00	280,00	950,21	278,76	1,26

Penentuan posisi dan arah kapal disamakan dengan *set point* untuk kapal tanpa ada gangguan yaitu koordinat (950, 280) dengan arah kapal sebesar 5°. Dengan adanya gangguan arus laut sebesar 2 knot diharapkan kapal dapat mencapai *set point* yang telah di tentukan. Dari Gambar 10 (a) dapat diketahui bahwa *heading* kapal mengalami osilasi. Dengan gangguan yang mengarah pada badan kapal, kontroler menjaga agar tetap mencapai *set point* yaitu 5°.

Pada Gambar 10 (b) tegangan keluaran dari *bow thruster* dan *stern thruster* mengalami perbedaan. Hal ini diakibatkan *heading* kapal yang berubah-ubah sehingga kontroler menyesuaikan terhadap gangguan. Kontrol berupa KLF berjalan maksimal dengan *role base* yang telah diatur agar tahan terhadap gangguan. Aksi kontroler juga reaktif terhadap gangguan yang masuk dalam sistem.



Gambar. 10. Kendali olah gerak sandar kapal dengan gangguan arus 2 knot (a) *Heading* kapal (b) *Bow* dan *stern command*

Terjadi perbedaan *error* antara *heading* kapal yang diinginkan dengan *actual* sebesar -0,11° yang ditunjukkan pada Tabel 6 Sehingga meskipun terdapat gangguan arus sebesar 2 knot kontroler masih bisa mengendalikannya. Waktu yang di butuhkan untuk sandar kapal pun semakin cepat dibandingkan dengan tanpa adanya gangguan arus, hal ini dikarenakan gerakan kapal untuk arah *sway* dipercepat dengan adanya gangguan berupa arus laut. Sehingga pada jarak aman 20 meter dari pelabuhan, kapal berjalan perlahan tanpa ada kendali dari kontroler untuk menghindari kapal menabrak dinding dermaga.

Tabel 6.
Error Yaw Sandar Dengan Gangguan Arus Laut 2 Knot

Time (s)	Yaw (°)	Error Yaw(°)	Vbow (V)	VStern (V)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)
0	0,00	5,00	12,00	12,00	950	230	950	275
44	0,01	4,99	7,62	6,77	950	230	950	260
100	4,95	0,05	0,02	0,47	950	230	950	240
113	5,11	-0,11	0,00	0,02	950	230	950	230

C. Analisa Sistem Kontrol pada Kapal Terhadap Trayektori Dengan Gangguan Arus Laut 2,25 Knot

Dari Tabel 7 menunjukkan bahwa nilai *error* maksimum pada waktu 333 dengan *error* sebesar 0,64 m. Dengan terjadinya *error* tersebut *rudder* langsung bekerja merubah sudutnya sampai sebesar -15.6° agar kapal tidak melebar dan

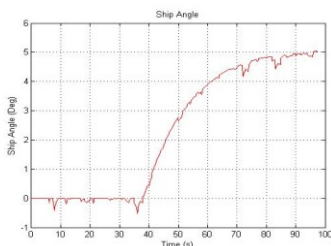
terbawa oleh arus laut. Dari hasil perubahan *rudder* mengakibatkan *heading* kapal yang berubah naik dari yang sebelumnya $-55,18^0$ menjadi $-24,5^0$. Dibandingkan dengan *error* maksimum untuk gangguan arus laut sebesar 2 knot malah mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan untuk pemodelan arus laut sendiri selalu berubah ubah kecepatannya setiap waktu. Sedangkan untuk sampel titik trayektori kapal hanya pada koordinat tertentu. Kemungkinan yang terjadi arus maksimum terdapat pada titik perhitungan tersebut sehingga menghasilkan *error* maksimum. Parameter lain yang menunjukkan bahwa kecepatan arus tidak sama di setiap titik adalah perbedaan selisih respon *rudder* terhadap waktu.

Tabel 7.
Error Trayektori Dengan Gangguan 2.25 Knot

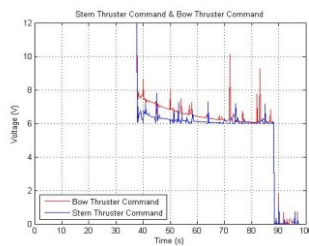
Time (s)	Ship Angle (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0	0,00	20,00	950,00	20,00	950,00	0,00
135	-83,67	100,00	730,00	100,36	730,04	0,37
252	-45,48	200,00	550,00	199,93	549,92	0,10
333	-55,18	300,00	450,00	300,51	450,39	0,64
421	-36,65	400,00	330,00	400,33	330,15	0,36
483	-38,85	500,00	290,00	500,17	290,39	0,42
540	5,48	600,00	280,00	600,02	280,04	0,04
597	-11,29	700,00	275,00	700,19	274,97	0,20
738	5,35	950,00	280,00	950,16	279,64	0,39

Proses sandar kapal yang menggunakan aktuator *stern thruster* dan *bow thruster* menunjukkan perbedaan yang signifikan. Waktu yang diperlukan kapal dari *way point* menuju dermaga lebih cepat. Hal ini disebabkan gangguan berupa arus laut mempercepat pergerakan sandar kapal. Dengan panjang lintasan sejauh 50 m dibutuhkan waktu 96 detik untuk mendekati badan kapal dengan jarak henti kapal. Sedangkan jarak berhentinya kapal dengan bibir dermaga sebesar 20 m. Arah kapal untuk acuan sandar sebesar 5^0 dari *actual* dan nilai *root square error* sebesar $-0,06^0$. Sedangkan *trend* grafik pada Gambar 11 (b) menunjukkan tegangan output *bow thruster* dan *stern thruster* hampir sama dengan tegangan output pada saat tidak ada gangguan. Tetapi masih terjadi perubahan tegangan secara fluktuatif yang diakibatkan pengaruh gangguan arus laut.

KLF yang diterapkan dalam simulasi ini masih mampu meminimalisir gangguan sebesar 2,25 knot sehingga kapal dapat mencapai set point baik arah kapal maupun posisi sandar kapal. Pada Gambar 11 (b) dapat diketahui saat kapal mencapai waktu 84 detik masih terdapat tegangan keluaran dari kontroler. Hal ini dikarenakan kapal sudah mencapai posisi sandar tetapi arah kapal masih belum sesuai dengan *set point* sehingga dengan tegangan seminimum mungkin dapat mengubah arah dari kapal.



(a)



(b)

Gambar. 11. Kendali olah gerak sandar kapal dengan gangguan arus 2,25 knot (a) *Heading* kapal (b) *Bow* dan *stern command*

Tabel 8 menjelaskan hubungan antara posisi koordinat kapal dengan arah kapal serta aksi dari kontroler. Nilai parameter yang diperoleh ini sesuai dengan Gambar 11 hanya saja untuk menunjukkan hubungan antara ketiga parameter lebih mudah dengan menggunakan tabel.

Tabel 8.
Error Yaw Sandar Dengan Gangguan Arus Laut 2,25 Knot

Time (s)	Yaw (°)	Error Yaw(°)	Vbow (V)	VStern (V)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)
0	0,00	5,00	12,00	12,00	950	230	950	275
36	0,51	5,51	10,33	6,10	950	230	950	260
84	4,62	0,48	0,23	0,00	950	230	950	240
96	5,06	-0,06	0,00	0,01	950	230	950	230

D. Analisa Sistem Kontrol pada Kapal Terhadap Trayektori Dengan Gangguan Arus Laut 2,5 Knot

Nilai *root3 square error* maksimum terjadi pada koordinat (290,00; 498,98) dengan selisih antara *track actual* dan *track desired* sebesar 2.68 m. Terjadinya *error* yang sangat besar tersebut di akibatkan pada *track* sebelumnya kapal masih belum memenuhi set point sehingga pada data mencapai koordinat tersebut nilai *error* menjadi maksimum. Hal ini dapat disebabkan oleh kecepatan kapal yang konstan sehingga pada saat *set point* trayektori berbelok kapal masih berusaha mengurangi erornya. Selain itu juga diakibatkan arus laut yang cukup kuat sehingga kapal ikut terseret arus terlebih dahulu sebelum kembali ke *track*. Tetapi untuk koordinat berikutnya *error* yang diakibatkan tidak terlalu signifikan. Tabel 9 menunjukkan nilai selisih antara *track actual* dan *track desired*.

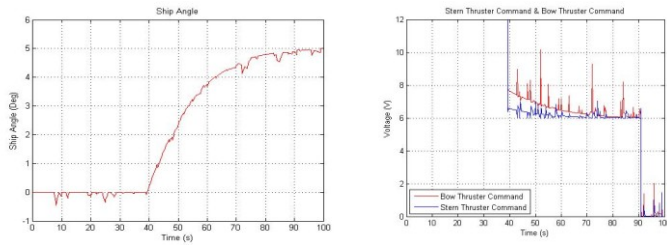
Tabel 9.
Error Trayektori Dengan Gangguan 2,5 Knot

Time (s)	Ship Angle (°)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error (m)
0	0,00	20,00	950,00	20,00	950,00	0,00
135	-70,12	100,00	730,00	99,21	729,69	0,85
252	-55,80	200,00	550,00	199,56	549,74	0,51
332	-24,75	300,00	450,00	299,53	449,50	0,69
421	-46,59	400,00	330,00	400,25	330,15	0,29
483	15,31	500,00	290,00	498,98	287,53	2,68
540	1,28	600,00	280,00	599,95	279,32	0,68
597	-25,24	700,00	275,00	700,06	275,23	0,23
738	8,79	950,00	280,00	950,15	279,94	0,16

Untuk tahapan sandar kapal dari Gambar 12 (a) menunjukkan bahwa aktuator masih mampu menyesuaikan *set point* meskipun arus laut dinaikkan. *Error* arah kapal hanya sebesar -0.03^0 hal ini menunjukkan bahwa sistem yang di rancang robust. Waktu sandar kapal juga sebanding dengan simulasi untuk arus 2 knot maupun 2,25 knot selama 99 detik.

Dibandingkan dengan gangguan arus laut sebelumnya *error heading* kapal antara *set point* dengan *actual* malah mengalami penurunan. Padahal seharusnya semakin kuat arus laut posisi dan *heading* kapal semakin sulit untuk dikendalikan. Aksi dari KLF untuk masing-masing gangguan tidak mengalami perubahan. Hanya saja untuk gangguan arus laut tersebut bersifat acak dan perubahannya pada saat

mencapai koordinat tujuan malah mengalami penurunan sehingga dapat mengakibatkan *error heading* kapal menjadi kecil walaupun arus maksimum yang diberikan sebesar 2,5 knot.



Gambar. 12. Kendali olah gerak sandar kapal dengan gangguan arus 2,5 knot (a) *Heading* kapal (b) *Bow* dan *stern command*

Perubahan tegangan antara *bow thruster* dan *stern thruster* menunjukkan grafik yang sebanding. Tegangan menurun dari 12 volt menjadi 6 volt dan turun menjadi 0 volt diakibatkan jarak kapal yang semakin mendekat ke pelabuhan. Besarnya tegangan sebanding dengan kecepatan kapal untuk arah *sway*. Diharapkan kecepatan kapal sandar semakin berkurang dengan semakin pendeknya jarak antara dermaga dengan kapal.

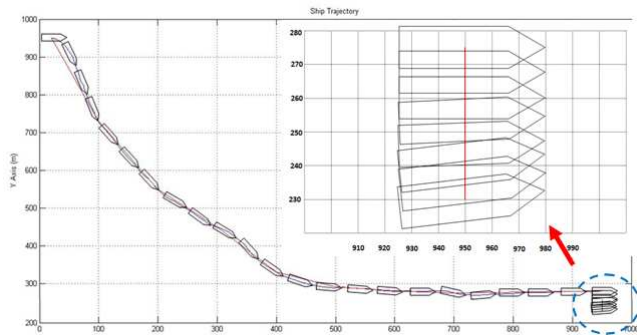
Diperlukan waktu yang cukup lama untuk mengubah sudut kapal dari 0° sampai 5°. Pada Tabel 10 dari waktu 36 detik sampai 90 detik digunakan untuk mengubah sudut dari kapal. Penyebab lambatnya perubahan kapal dikarenakan bentuk dari fungsi matematis pemodelan dinamika kapal itu sendiri.

Tabel 10.

Error Yaw Sandar Dengan Gangguan Arus Laut 2,5 Knot

Time (s)	Yaw (°)	Error Yaw(°)	Vbow (V)	VStern (V)	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)
0,00	0,00	5,00	12,00	12,00	950	230	950	275
36	0,00	5,00	8,01	6,00	950	230	950	260
90	4,83	0,17	0,27	0,00	950	230	950	240
99	5,03	-0,03	0,00	0,00	950	230	950	230

Hasil simulasi sandar kapal otomatis dapat dilihat pada Gambar 13 Simulasi ini menggambarkan posisi sebenarnya dari pelabuhan Tanjung Perak Surabaya dengan arah kapal yang menghadap ke arah timur.



Gambar. 13. Hasil simulasi sandar kapal otomatis

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini telah dirancang sebuah sistem kendali otomatis untuk sandar kapal. Perancangan tersebut didasarkan pada aksi yang diberikan oleh nahkoda pada saat menyandarkan kapal dipelabuhan. Dengan menggunakan pemilihan Kontrol Logika Fuzzy (KLF) sebagai kontroler dengan *role base* yang disesuaikan dengan kondisi arus laut di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya. Hasil perancangan kontrol sandar kapal diperoleh sebagai berikut:

- Kapal dapat mengikuti trayektori yang telah ditentukan walaupun dengan adanya gangguan arus laut.
- Nilai *root square error* lintasan kapal maksimum dengan gangguan arus sebesar 2 knot adalah 1,26 m, untuk arus 2,25 sebesar 0,64 m sedangkan untuk arus 2,5 knot 2,68 m.
- Perancangan sandar kapal dapat mengontrol aktuator *stern thruster* dan *bow thruster* sehingga mencapai *set point* 5°.
- Untuk tahapan sandar kapal dengan gagguan arus laut 2; 2,25 dan 2,5 knot menghasilkan *error* sebesar -0,11°; -0,06° dan -0,03°.
- Waktu yang ditempuh untuk sandar kapal tanpa ada gangguan selama 668 detik, dengan adanya gangguan arus 2; 2,25 dan 2,5 knot berturut-turut selama 113, 96, dan 99 detik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Distrik Navigasi Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya, dan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya khususnya Jurusan Teknik Fisika dan Sistem Perkapalan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zhang, Yao; Grant e. Hearn; Pratyush Sen. 1997. *A Multivariable Neural Controller for Automatic Ship Berthing*. IEEE Journal
- [2] Oskar. 2007. *Studi Perancangan Sandar Kapal Secara Otomatis Menggunakan Neural Network*. ITS Surabaya
- [3] Nguyen, Phung Hung. 2007. *Automatic Berthing Control Of Ship Using Adaptive Neural Network*. Korea Maritime University
- [4] Lee, S.D. 2012. *Design and Experiment of A Small Boat Auto-Berthing Control System*. IEEE Journal
- [5] Fossen, Thor. I. 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicle*. John Willy & Son. USA: John Willey & Sons, Inc
- [6] Kusumadewi, Sri. 2002. *Analisis dan Desain Sistem Fuzzy Menggunakan Tool Box Matlab*. Graha Ilmu Yogyakarta