

Perancangan Sistem Kontrol *Trajectory* pada Kondisi Gangguan Arus Laut *Non Uniform* di Ketapang-Gilimanuk

Anindita Adikaputri Vinaya, 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.id¹⁾, masroeri@its.ac.id²⁾

Abstrak—Sebuah kapal yang berlayar pada dasarnya telah memiliki tujuan pelayaran. Tujuan pelayaran dari sebuah kapal telah ditetapkan sebelumnya dan direpresentasikan oleh suatu bentuk *trajectory*. Pada dasarnya, apabila kondisi gangguan relatif kecil, kapal masih dapat memenuhi *trajectory*-nya. Akan tetapi, apabila kondisi gangguan di laut secara mendadak berubah sewaktu-waktu (*non uniform*), maka kapal tidak dapat memenuhi *trajectory*-nya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang sebuah kriteria sistem kontrol *trajectory* pada kondisi gangguan arus laut tidak statis di Ketapang-Gilimanuk. Perancangan sistem berdasarkan spesifikasi kapal Ferry Ro-Ro 1000GT. Kontrol logika fuzzy (KLF) yang digunakan adalah Sugeno-Takagi dengan masukan berupa error yaw, dan yaw rate sedangkan keluaran berupa aksi command rudder. Jumlah aturan pada KLF adalah 49 aturan dengan 7 fungsi keanggotaan pada masing-masing masukannya. Berdasarkan hasil simulasi secara keseluruhan, KLF yang dirancang mampu mengontrol dinamika kapal sehingga kapal tersebut mampu melawan arus yang ada dan mengikuti desire sesuai skenario yang telah dibuat dengan rata-rata error lintasan terkecil yaitu 0,328 m dengan nilai ITAE sebesar 246,016 pada saat kapal berlayar tanpa ada gangguan dan rata-rata error lintasan terbesar yaitu 7,43m dengan nilai ITAE sebesar 302615,11 pada saat kecepatan arus rata-rata mencapai 7knot.

Kata Kunci— arus *non uniform*, KLF, Ketapang-Gilimanuk, *trajectory*

I. PENDAHULUAN

Sebuah kapal yang berlayar pastinya telah memiliki tujuan pelayaran. Pada dasarnya, tujuan pelayaran telah ditetapkan sebelumnya ketika kapal akan berlayar dan direpresentasikan oleh suatu bentuk *trajectory*. Akan tetapi, terkadang pelayaran tidak dapat memenuhi *trajectory* yang diharapkan. Hal tersebut disebabkan kondisi di laut yang memang memiliki berbagai kondisi ketidakpastian seperti gangguan berupa angin, arus, dan gelombang [1].

Pada jalur penyeberangan Ketapang-Gilimanuk, arus memang menjadi gangguan yang lebih dominan dibandingkan angin dan gelombang. Beberapa kasus terseretnya kapal akibat arus memang banyak terjadi. Sebagai contohnya adalah kasus kapal Nusa Makmur yang terseret satu mil dari pelabuhan Gilimanuk, pada tanggal Jumat, 25 Mei 2012 akibat derasnya arus laut di selat Bali. Kasus serupa terjadi pula pada kapal Labrita Risa yang berangkat sore hari pada tanggal 23 Mei 2012. Kapal tersebut baru dapat berlabuh di pelabuhan Gilimanuk sekitar pukul 22.45 WITA lantaran terseret arus. Kapal tersebut terseret arus ke arah selatan hingga sekitar tiga

kilometer dari lintasan sebenarnya. Sebenarnya sebelumnya juga sudah ada 6 kapal yang hanyut terseret arus. Hal tersebut disebabkan karena 90% kapal di Indonesia merupakan kapal-kapal bekas sehingga kemampuan untuk mengatasi gangguan memang masih kurang

Pada dasarnya, apabila kondisi gangguan arus laut relatif kecil, kapal masih dapat memenuhi *trajectory*-nya. Akan tetapi, apabila kondisi gangguan arus laut secara mendadak berubah, maka kapal akan mengalami kesulitan dalam penentuan *trajectory* karena kapal tidak mungkin menggunakan *trajectory* semula dan dapat menyebabkan kapal terseret oleh arus sehingga berhenti di tempat yang jauh dari target pelayaran semula seperti kasus-kasus yang banyak terjadi sekarang ini.

Untuk mengantisipasi hal tersebut, dibutuhkan suatu sistem kontrol *trajectory*. Dalam perancangan sistem kontrol *trajectory* ini digunakan metode logika Fuzzy. Metode kontrol ini mampu meminimalisir gangguan yang sifatnya *uncertain* sehingga pada saat kapal berada pada kondisi gangguan arus tidak statis, maka kapal dapat melawan arus, dan mampu mencapai tujuan pelayaran [2].

Ada beberapa penelitian sebelumnya yang terkait dengan penelitian ini, salah satunya seperti perancangan sistem kendali lintasan kapal berbasis logika fuzzy dengan studi kasus kepulauan riau pada tahun 2006 oleh Illa Rizianiza [3]. Pada penelitiannya, gangguan dititikberatkan pada gelombang laut. Dari hasil penelitiannya, kontrol yang dirancang mampu memenuhi target yang diinginkan meski error lintasan tetap masih ada. Kemudian tugas akhir oleh Robbi Handito pada tahun 2012 mengenai perancangan sistem *guidance* pada kapal PKR KRI Kelas SIGMA. Berdasarkan hasil penelitiannya, kapal mampu berlayar mengikuti trayektori yang ada, walaupun masih terdapat error lintasan [4]. Penelitian mengenai sistem kontrol *trajectory* ini memang pengembangan dari penelitian-penelitian sebelumnya terkait *tracking* dan *dynamic positioning* kapal. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang sistem kontrol *trajectory* pada kondisi gangguan arus laut tidak statis di Ketapang-Gilimanuk. Penelitian ini diharapkan memberikan kegunaan atau manfaat bagi masyarakat, khususnya kalangan akademisi maupun industri perkapalan dalam mengembangkan sistem kontrol *trajectory*..

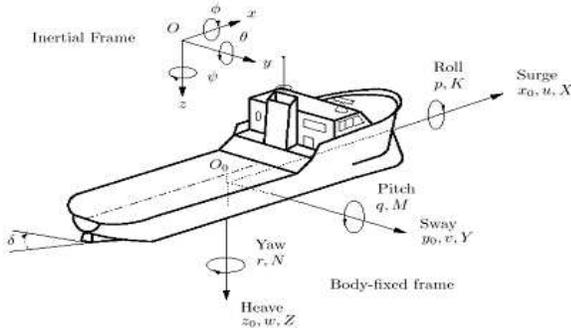
II. DASAR TEORI

A. Model Dinamika Kapal

Secara umum, kapal memiliki 6 derajat kebebasan. Derajat kebebasan tersebut terbagi menjadi 3 gerak translasi dan 3 gerak rotasi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel dan gambar di bawah ini:

Tabel 1.
Derajat Kebebasan Kapal [1]

DOF	Gerakan	Gaya dan Momen	Kecepatan linear dan Anguler	Posisi dan Sudut Euler
1	Gerak arah-x (surge)	X	U	X
2	Gerak arah-y (sway)	Y	V	Y
3	Gerak arah-z (heave)	Z	W	Z
4	Rotasi sumbu-x (roll)	K	P	Φ
5	Rotasi sumbu-y (pitch)	M	Q	Θ
6	Rotasi sumbu-z (yaw)	N	r	Ψ



Gambar.1. Notasi dan gerakan standart pada kapal [1]

Model dinamika kapal didapatkan dari pendekatan yang dilakukan oleh Nomoto pada tahun 1957 sebagai bentuk matematis orde 2. Di bawah ini adalah fungsi transfer dari model Nomoto:

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

Selain model dari *plant* berupa dinamika kapal, model matematis dari *actuator* juga perlu diketahui. Model matematis dari mesin kemudi ini dinyatakan dengan [1]:

$$\delta = \frac{K}{\sigma s + 1} \quad (2)$$

Dengan K = penguat rudder ($\Delta O/\Delta I$)

B. Model Gangguan Berupa Arus

Pada model dinamika kapal ada beberapa gangguan yang mempengaruhi. Gangguan ini meliputi arus, angin, gelombang. Pada penelitian, karena menggunakan studi kasus Ketapang-Gilimanuk ini gangguan lebih dititikberatkan pada arus laut. Komponen arus dapat dijelaskan dengan dua parameter: kecepatan rata-rata arus V_c dan arah arus γ_c . Komponen dari *body-fixed* dapat dihitung dari:

$$u_c = V_c \cos(\gamma_c - \psi) \quad (3)$$

$$v_c = V_c \sin(\gamma_c - \psi) \quad (4)$$

Kecepatan arus laut rata-rata untuk simulasi computer dapat dibangkitkan menggunakan *Gauss-Markov process* orde satu, dijelaskan dengan penurunan^[1]:

$$\frac{dV_c(t)}{dt} + \mu_o V_c(t) = \omega(t) \quad (5)$$

C. Dasar Penentuan Trajectory

Sistem autopilot dapat dinyatakan dalam dua sistem pengendali otomatis yaitu *course keeping* dan *track keeping*. Kedua pengendali tersebut sangat berperan pada saat melakukan pelayaran. Kendali autopilot klasik meliputi pengendalian pada *heading* yang akan menentukan pola *trajectory* [1].

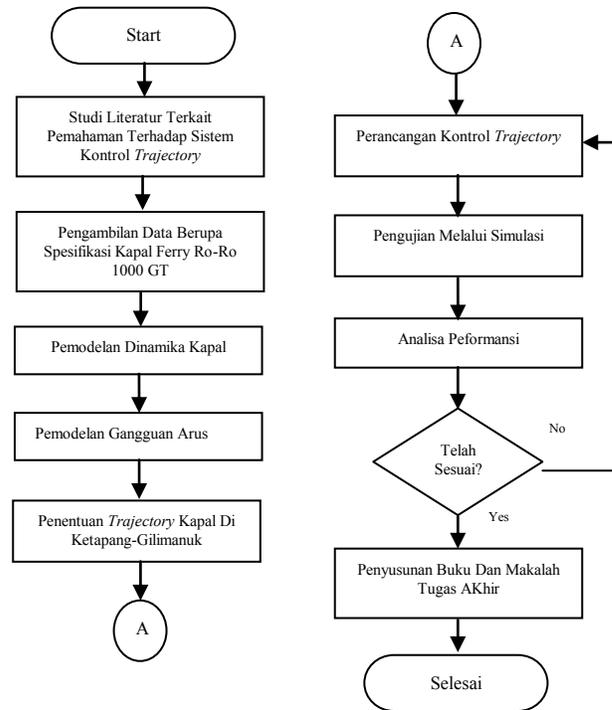
Pada sebuah garis diasumsikan terdapat dua titik yaitu A dan B dengan koordinat $[x_d(t_0), y_d(t_0)]$ dan $[x_d(t_f), y_d(t_f)]$ dan kecepatan kapal U dan pendekatan waktu t_f belum diketahui.

$$\psi_d = \tan^{-1} \left(\frac{y_d(t_f) - y_d(t_0)}{x_d(t_f) - x_d(t_0)} \right) \quad (6)$$

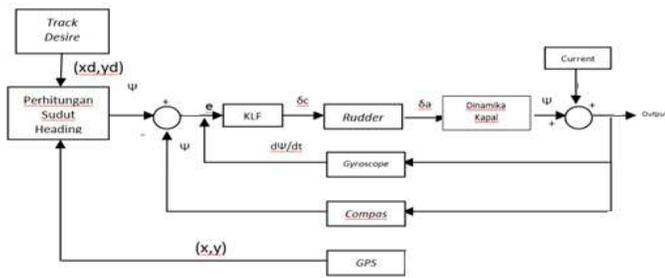
III. METODE

Penelitian ini memiliki tahapan-tahapan tertentu untuk mencapai tujuannya. Tahapan-tahapan tersebut direpresentasikan dalam suatu diagram alir seperti pada gambar di bawah ini:

A. Program Utama Penelitian



Gambar.2. Flowchart Penelitian



Gambar.3. Diagram Blok Sistem Kontrol Trajectory

B. Pemodelan Dinamika Kapal

Model dinamika kapal didapatkan dari pendekatan yang dilakukan oleh Nomoto, berikut fungsi transfer dari spesifikasi kapal Ferry Ro-Ro 1000GT:

$$\frac{\psi}{\delta_r}(s) = \frac{571.07 + 5316.64s}{192.62s^3 + 35.28s^2 + s}$$

C. Pemodelan Arus Laut Tidak Statis

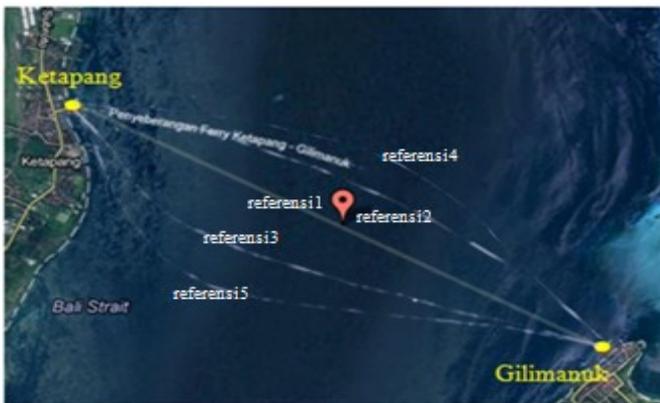
Pemodelan dapat diketahui berdasarkan data arus Markov process orde satu, berikut pemodelan yang telah ditetapkan.

Ketika kecepatan arus laut rata-rata 3 knot:
 $V_c(t) = 1,5433 + t(\omega(t) - 0.15433)$

Ketika kecepatan arus laut rata-rata 7 knot:
 $V_c(t) = 3.601 + t(\omega(t) - 0.3601)$

D. Penentuan Trajectory Kapal

Penentuan trajectory kapal berdasar pada letak koordinat Ketapang dan Gilimanuk. Pada gambar di bawah ini, ada 5 alur pelayaran referensi di Ketapang-Gilimanuk berdasar dari Dirjen Perhubungan yang akan digunakan dalam penelitian ini.



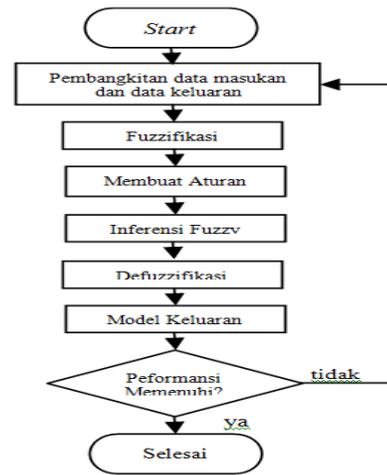
Gambar.4 Jalur Penyeberangan Ketapang-Gilimanuk

Keterangan:

- Referensi 1: Trajectory kapal ketika tanpa gangguan,
- Referensi 2: Trajectory kapal ketika ada gangguan arus dengan kecepatan rata-rata mencapai 3 knot dari arah atas.
- Referensi 3: Trajectory kapal ketika ada gangguan arus dengan kecepatan rata-rata mencapai 3 knot dari arah bawah.

- Referensi 4: Trajectory kapal ketika ada gangguan arus dengan kecepatan rata-rata mencapai 7 knot dari arah atas.
- Referensi 5: Trajectory kapal ketika ada gangguan arus dengan kecepatan rata-rata mencapai 7 knot dari arah bawah.

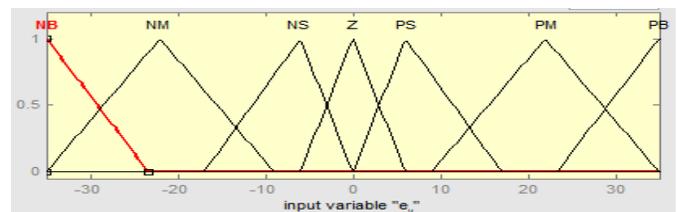
E. Perancangan Sistem Kendali Berbasis Logika Fuzzy



Gambar 5. Flowchart Perancangan Kendali

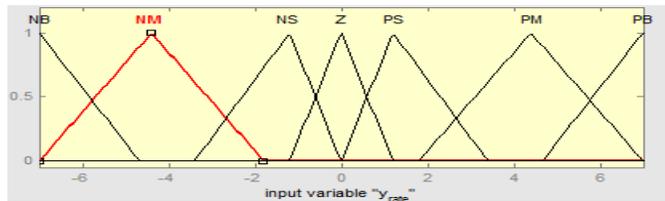
• Fuzzifikasi

Pada proses fuzzifikasi ini data berupa himpunan crisp diubah ke dalam himpunan fuzzy [2]. Gambar 6 merepresentasikan tentang fungsi keanggotaan segitiga yang digunakan dalam perancangan fungsi keanggotaan error yaw (e) sebagai masukan fuzzy. Variabel masukan error yaw (e) dibagi dalam 7 fungsi keanggotaan yaitu NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB dengan rentang kerja yang digunakan untuk fungsi keanggotaan adalah -35 sampai 35. N adalah negatif, ZE adalah zero, P adalah positif, B adalah big.



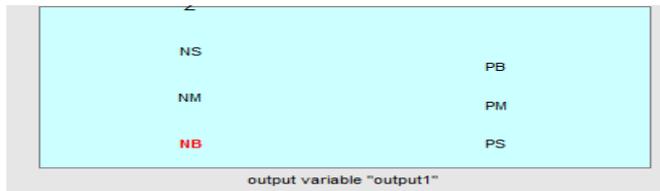
Gambar.6. Fungsi Keanggotaan Untuk Variabel Masukan Error Yaw (e)

Gambar 7 merepresentasikan tentang fungsi keanggotaan segitiga yang digunakan dalam perancangan fungsi keanggotaan yaw rate (r) sebagai masukan fuzzy. Variabel masukan yaw rate (r) dibagi dalam 7 fungsi keanggotaan yaitu NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB dengan rentang kerja yang digunakan untuk fungsi keanggotaan adalah -7 sampai 7. Penentuan range dari masukan yaw rate (r) ini berdasarkan laju kerja rudder van amorengen yaitu sebesar 7⁰/detik.



Gambar.7. Fungsi Keanggotaan Untuk Variabel Masukan *Yaw Rate* (r)

Keluaran KLF adalah masukan bagi rudder kapal yang berbentuk sinyal command rudder (δc) dengan rentang -3,5 sampai 3,5. Fungsi keanggotaan keluaran KLF terdapat 7 fungsi, yaitu NB, NM, NS, Z, PS, PM, dan PB. Karena fuzzy yang digunakan adalah fuzzy Sugeno, maka nilai yang masuk pada tiap fungsi keanggotaan adalah nilai yang tegas (tidak samar).



Gambar.8. Fungsi Keanggotaan Keluaran

• *Basis Aturan*

Setiap keluaran dari KLF selalu berdasarkan pada basis aturan dan masukan yang telah dibuat sebelumnya. Berikut merupakan basis aturan yang digunakan dalam tugas akhir ini.

Tabel 2.
Basis Aturan Pada Kontrol Logika Fuzzy

e/r	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	Z	PS	PM
ZE	PB	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*

Tahap defuzzifikasi merupakan tahap perubahan fuzzy keluaran menjadi crisp keluaran atau nilai yang tegas/sebenarnya. Hal ini diperlukan oleh aktuator berupa rudder yang berada setelah KLF. Nilai crisp keluaran, berubah-ubah sesuai error yaw dan delta error/ yaw rate dari kapal. Metode yang digunakan untuk defuzzifikasi adalah metode COA (*Center Of Area*) [2].

F. *Perancangan Sistem Kendali Berbasis Logika Fuzzy*

Pengujian melalui simulasi sistem kontrol *trajectory* ini dilakukan dengan *software*. Simulasi yang akan dirancang berdasar pada blok diagram sistem perancangan kontrol *trajectory* yang telah dijelaskan sebelumnya. Model simulasi *closed loop* sistem adalah simulasi dengan masukan berupa jarak yang diinginkan(xd,yd) Ketapang-Gilimanuk.

IV. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. *Skenario A*

Pada skenario A ini, model simulasi menggunakan setpoint berupa plot *trajectory* Ketapang-Gilimanuk di dua titik, yaitu Ketapang (0,2327.9) dan Gilimanuk (3927,0). Pengujian ini dilakukan ketika kapal hendak berlayar dari Ketapang menuju Gilimanuk dan juga sebaliknya.

Tabel 3.
Koordinat *Desire* Dan *Actual Trajectory* Pada Skenario A

Alur Pelayaran	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error terhadap Titik Target (m)
Ketapang-Gilimanuk	3927	0	3927.22	0.1312	0.256
Gilimanuk-Ketapang	0	2327.9	0.288	2328.07	0.327

Berdasarkan tabel di atas, besar error terhadap titik target pelayaran relatif kecil, baik alur Ketapang-Gilimanuk dengan target berupa koordinat Gilimanuk maupun alur Gilimanuk-Ketapang dengan target berupa koordinat Ketapang. Pada skenario A dapat disimpulkan bahwa kontrol yang dirancang mampu mengikuti *trajectory* yang diinginkan.

B. *Skenario B*

Pada skenario kali ini, *trajectory* yang diharapkan didasarkan pada *trajectory* referensi 2 alur pelayaran di Ketapang-Gilimanuk ketika gangguan arus laut yang berubah-ubah hingga mencapai kecepatan 3 knot. Pada skenario ini gangguan arus berasal dari arah atas.

Tabel 4.
Koordinat *Actual* Dan *Desire Trajectory* Pada Skenario B Dengan Alur Ketapang-Gilimanuk

Nama Suar	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan (m)
Gilimanuk	0	2327.9	0	2327.9	0
Point B9	519.5	2219.3	520.12	2220.07	0.98
Point B8	1400.1	1849.9	1400.28	1850.16	0.32
Point B7	1949.8	1600.2	1948.90	1597.64	2.71
Point B6	2199.2	1449.4	2200.51	1450.76	1.89
Point B5	2449.5	1301.2	2450.41	1300.62	1.08
Point B4	2749.8	1099.8	2752.83	1104.08	5.24
Point B3	3249.7	700.2	3249.14	698.65	1.65
Point B2	3601.2	350.5	3600.66	350.65	0.56
Point B1	3700	250	3700.44	250.26	0.51
Ketapang	3927	0	3926.97	-0.44	0.44

Berdasarkan tabel di atas terlihat bahwa terdapat error lintasan pada setiap suar. Akan tetapi, kontrol *trajectory* yang dirancang mampu meminimalisir error lintasan sehingga kapal dapat sampai ke Gilimanuk dengan rata-rata error lintasan yaitu 1.4m. Pada hasil simulasi kali ini, kapal mampu berlayar dari Ketapang menuju Gilimanuk dengan waktu 1522 detik. Ketika alur pelayaran diubah dari Gilimanuk menuju Ketapang didapatkan error rata-rata lintasan sehingga kapal dapat sampai ke Ketapang dengan error lintasan yang kecil yaitu 1.33m. Pada hasil simulasi kali ini, kapal mampu

berlayar dari Gilimanuk menuju Ketapang dengan waktu 1519 detik.

C. Skenario C

Pada skenario kali ini, *trajectory* yang diharapkan didasarkan pada *trajectory* referensi 3 pada alur pelayaran Ketapang-Gilimanuk ketika gangguan arus laut dari arah bawah mencapai 3 knot. Ketika arah arus dari arah bawah, maka bentuk *trajectory* akan melawan arah arus yang ada.

Tabel 5. Koordinat *Actual* Dan *Desire Trajectory* Pada Skenario C Dengan Alur Ketapang-Gilimanuk

Nama Suar	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan (m)
Ketapang	0	2327.9	0	2327.9	0
Point D1	100.2	2199.8	98.87	2199.05	1.53
Point D2	249.7	2000.1	249.40	1999.38	0.78
Point D3	380	1749.3	379.03	1749.42	0.98
Point D4	699.8	1301.3	701.29	1301.03	1.52
Point D5	849.7	1180	850.90	1180.97	1.54
Point D6	1350	899.5	1351.77	903.34	4.22
Point D7	1601	800	1600.68	801.33	1.37
Point D8	2102	599.3	2099.89	599.72	2.15
Point D9	2450	498.	2449.62	498.33	0.50
Point D10	2799	350.1	2799.87	349.36	1.14
Point D11	3199	250.2	3200.19	250.48	1.22
Gilimanuk	3927	0	3927.86	1.81	2.01

Berdasarkan tabel di atas terlihat bahwa terdapat error lintasan pada setiap suar. Akan tetapi, kontrol *trajectory* yang dirancang mampu meminimalisir error lintasan sehingga kapal dapat sampai ke Gilimanuk dengan rata-rata error lintasan yaitu 1.302 m. Pada hasil simulasi kali ini, kapal mampu berlayar dari Ketapang menuju Gilimanuk dengan waktu 1819 detik. Apabila alur pelayaran diubah dari Gilimanuk menuju Ketapang diperoleh rata-rata error lintasan yang tidak berbeda jauh ketika alur pelayaran dari Ketapang ke Gilimanuk yaitu 1,85m dan kapal mampu berlayar dari Gilimanuk menuju Ketapang dengan waktu 1836 detik.

D. Skenario D

Pada skenario kali ini, *trajectory* yang diharapkan didasarkan pada *trajectory* referensi 4 dari alur pelayaran Ketapang-Gilimanuk ketika gangguan arus laut dari arah atas dengan kecepatan arus mencapai 7 knot. Berdasarkan hasil simulasi, pada *actual trajectory* terdapat sedikit *ripple* yang disebabkan pengaruh kecepatan arus laut yang mencapai 7 knot, dan sifatnya yang berubah-ubah, sehingga dibutuhkan waktu yang cukup lama agar dinamika kapal dapat stabil. Pada skenario ini, kapal juga terlihat beberapa kali terseret arus sekitar 0,8 m dibandingkan skenario sebelumnya tetapi hal tersebut tidak mengakibatkan perubahan bentuk *trajectory* pelayaran.

Tabel 6. Koordinat *Actual* Dan *Desire Trajectory* Pada Skenario D Dengan Alur Ketapang-Gilimanuk

Nama Suar	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan (m)
Ketapang	0	2327.9	0	2327.9	0
Point C1	249.7	2299.3	250.95	2299.55	1.28
Point C2	379.8	2275	383.26	2272.24	4.43
Point C3	850	2239.8	857.97	2235.73	8.94
Point C4	1150	2175.4	1162.00	2175.37	12.00
Point C5	1349.7	2130	1362.38	2130.77	12.70
Point C6	2100.6	1901.3	2110.78	1904.65	10.71
Point C7	2450	1699.7	2454.68	1695.06	6.59
Point C8	2799.3	1400.3	2814.00	1398.72	14.78
Point C9	3202	899.2	3201.51	902.38	3.22
Gilimanuk	3927	0	3921.32	-4.99	7.56

Berdasarkan tabel di atas terlihat bahwa error lintasan pada skenario ini lebih besar daripada skenario sebelumnya, hal tersebut disebabkan kecepatan arus laut pada skenario ini juga bertambah yaitu mencapai 7 knot. Pada simulasi kali ini, kapal dapat sampai ke Gilimanuk dengan error lintasan yaitu 7,47 m. Pada hasil simulasi kali ini, kapal mampu berlayar dari Ketapang menuju Gilimanuk dengan waktu 3687 detik. Apabila alur pelayaran diubah dari Gilimanuk menuju Ketapang dapat diketahui rata-rata error lintasannya juga yaitu 5,79m. Pada hasil simulasi kapal mampu berlayar dari Gilimanuk menuju Ketapang dengan waktu 3696 detik.

E. Skenario E

Pada skenario kali ini, *trajectory* yang diharapkan didasarkan pada *trajectory* referensi 5 pada alur pelayaran Ketapang- Gilimanuk ketika gangguan arus laut dari arah bawah mencapai 7 knot.

Tabel 7. Koordinat *Actual* Dan *Desire Trajectory* Pada Skenario E Dengan Alur Ketapang-Gilimanuk

Nama Suar	Xd (m)	Yd (m)	Xa (m)	Ya (m)	Error Lintasan (m)
Ketapang	0	2327.9	0	2327.9	0
Point E1	150	1999.2	148.59	1999.18	1.41
Point E2	219	1751	217.50	1749.23	2.32
Point E3	300.2	1499	296.90	1498.94	3.30
Point E4	399.6	1301.2	397.42	1300.01	2.48
Point E5	508.1	1102.1	508.65	1100.74	1.46
Point E6	649.8	899.3	648.50	898.82	1.39
Point E7	749.4	799.5	751.27	797.16	3.00
Point E8	999.7	600.3	990.35	590.00	13.91
Point E9	1401.2	471	1389.49	465.98	12.74
Point E10	1802	402	1791.65	397.34	11.35
Point E11	2450.3	299.3	2444.20	304.54	8.04
Point E12	3199.8	200.3	3199.65	196.24	4.06
Point E13	3599	99	3601.96	103.49	5.38
Gilimanuk	3927	0	3928.70	5.02	5.30

Berdasarkan tabel di atas maka dapat diketahui rata-rata error lintasannya yaitu 5,08 m. Kapal dapat berlayar menuju Gilimanuk dalam waktu 3179 detik dan sebaliknya kapal mampu berlayar menuju Ketapang dalam waktu 3183 detik dengan dengan rata-rata error lintasan yaitu 5.31m.

Berdasarkan keseluruhan skenario yang telah dibuat, maka dapat diketahui perbandingan rata-rata error lintasan, waktu dalam pencapaian target pada tiap-tiap skenario, dan nilai ITAE (*Integral of Time Absolute Error*). Pada penelitian ini berdasarkan pada fungsi diskrit sehingga untuk menentukan nilai ITAE menggunakan notasi sigma (Σ) dari waktu dan harga mutlak dari error. Berikut adalah perbandingan rata-rata error lintasan, nilai kriteria ITAE, dan waktu dalam mencapai titik target pelayaran pada keseluruhan skenario:

Tabel 8.
Perbandingan Rata-rata Error Lintasan, Nilai ITAE, dan Waktu dalam Mencapai Titik Target Pelayaran

Skenario	Alur	Rata-rata Error Lintasan (m)	ITAE	Waktu Mencapai Target(s)
A	Ketapang-Gilimanuk	0.128	246.016	961
	Gilimanuk-Ketapang	0.163	314.217	961
B	Ketapang-Gilimanuk	1.40	23408.36	1522
	Gilimanuk-Ketapang	1.33	22268.54	1519
C	Ketapang-Gilimanuk	1.302	34488.24	1819
	Gilimanuk-Ketapang	1.85	44247.6	1836
D	Ketapang-Gilimanuk	7.47	302615.11	3687
	Gilimanuk-Ketapang	5.79	287135.2	3696
E	Ketapang-Gilimanuk	5.08	242049.06	3179
	Gilimanuk-Ketapang	5.31	253366.8	3183

Berdasarkan tabel di atas, rata-rata error dan nilai ITAE yang dihasilkan pada skenario D dan E memang lebih besar daripada skenario yang lain. Hal ini disebabkan gangguan arus laut berkecepatan mencapai 7 knot bersifat mendorong gerakan kapal lebih jauh dari lintasan yang diinginkan. Osilasi respon sistem juga terlihat lebih besar dari skenario yang lainnya dan kapal membutuhkan waktu yang lebih lama untuk stabil. Pada keseluruhan skenario yang ada, kapal terlihat tidak dapat mencapai titik target baik Ketapang maupun Gilimanuk dengan tepat dalam artian tidak ada error sama sekali, hal tersebut selain disebabkan kecepatan kapal yang melaju dianggap konstan dari awal keberangkatan sampai titik akhir sehingga kapal kurang dapat berhenti tepat pada titik tujuan kapal. Akan tetapi, dari keseluruhan hasil simulasi yang telah dirancang menghasilkan error terhadap titik target dan rata-rata error lintasan yang relatif kecil. Di samping itu, kapal juga dapat mengikuti *trajectory* yang telah ditetapkan dan dapat mengatasi gangguan arus laut yang sifatnya *non uniform* di Ketapang-Gilimanuk sehingga kontrol *trajectory* yang telah dirancang dapat dikatakan baik.

V. KESIMPULAN

Dari hasil perancangan sistem kontrol *trajectory* yang telah dilakukan, maka dapat ditarik suatu kesimpulan bahwa telah

diperoleh suatu rancangan kriteria sistem kontrol *trajectory* pada kondisi gangguan arus laut tidak statis di Ketapang-Gilimanuk menggunakan kontrol logika Fuzzy (KLF). KLF yang dirancang mampu mengontrol dinamika kapal Ferry Ro-Ro 1000GT sehingga kapal tersebut mampu melawan arus yang sifatnya *non uniform*, mengikuti *desire trajectory*, dan mencapai titik target pelayaran sesuai skenario yang telah dibuat dengan error rata-rata lintasan terkecil yaitu 0,256 m dengan nilai ITAE sebesar 246,016 pada skenario A ketika kapal berlayar tanpa adanya gangguan dan 7,47m untuk error lintasan rata-rata terbesar pada skenario D ketika ada gangguan arus berkecepatan 7knot dengan nilai ITAE sebesar 302615,11. Berikut parameter dari kontrol *trajectory* yang telah dirancang:

- Masukan kendali logika fuzzy berupa error yaw, dan yaw rate. Sedangkan keluaran berupa aksi kendali sebagai bentuk command rudder.
- Aturan yang telah dirancang sebanyak 49 aturan dengan fungsi keanggotaan masukan berupa *error yaw* dibagi dalam 7 fungsi keanggotaan, dan *yaw rate* dengan 7 fungsi keanggotaan.
- Fungsi keanggotaan tipe segitiga digunakan sebagai masukan KLF.

Penelitian ini masih perlu dilakukan pengembangan, maka saran yang disampaikan dalam laporan Tugas Akhir ini adalah dilakukan penelitian dengan menambah variabel yang dikendalikan yaitu berupa kecepatan, karena pada dasarnya untuk setiap perubahan *heading* kapal pada waktu mengikuti *desire trajectory*, kecepatan kapal sebenarnya perlu dikendalikan untuk mencapai respon yang maksimal. Kemudian pada penelitian selanjutnya, perlu dilakukan penambahan databased *trajectory* dengan variasi kecepatan arus, kecepatan angin maupun ketinggian gelombang.

VI. UCAPAN TERIMAKASIH

Dalam penulisan makalah ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada pihak-pihak yang membantu dalam menyelesaikan penelitian ini, Secara khusus penulis menyampaikan terima kasih kepada keluarga tercinta yang telah memberikan dorongan dan bantuan serta pengertian yang besar kepada penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fossen, T.I., *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, USA: John Wiley & Sons, Inc, 1994, pp. 1-292.
- [2] Pathan Dur Muhammad, Unar Mukhtiar Ali, Memon Zeeshan Ali, 2012, "Fuzzy Logic Trajectory Tracking Controller for a Tanker", *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology*, Vol 31, 315-32
- [3] Rizianiza Illa, Aisjah, A.S, Masroeri, A.A. 2010. "Design Tracking Control Of Ship Based On Fuzzy Logic" ITS Surabaya
- [4] Handito Robbi, Aisjah, A.S, Masroeri, A.A. 2012. "Perancangan Sistem Guidance Untuk Membangun Autopilot Kapal PKR KRI Kelas Sigma." ITS Surabaya.