

# The Expert Control Designing of Tanker Ship Maneuvering by Optimal Control as a Reference Model

Aulia S. Aisjah<sup>1</sup>

**Abstract** — Fuzzy logic control (FLC) system is a control system which is working based on error input data, rate of error, and accelaret of error of controlling variable. Using some rules of FAM (Fuzzy Associate Memory) which is constructed for resulting a decision can be used to actuator of controller. This paper is describing about designing fuzzy logic as a control system for ship maneuvering, which is input for FLC are yaw error, yaw rate, and tracking error while the output of fuzzy logic control is command rudder signal. FLC consists of two units of controller; it is first controller unit work for autopilot and second controller unit for offset track. Interference function for FLC is Sugeno – Takagi which represent mathematic equation from input variable of FLC. Gain control of FLC based on least square estimation of error yaw, yaw rate, and output control signal relationship from LQR/LTR as a model reference control. Dynamic model of ship maneuvering has been derived on 3 dof with Clarke hydrodynamic coefficient. The capability of logic fuzzy control has been shown on simulation, for tanker ship model without interference or within interference. Robust of fuzzy logic control has been got from trajectory convergence error of yaw and yaw rate error when on turning simulation or off turning simulation toward the sector (0, 0).

**Keywords** — FLC, LQG/LTR, maneuvering, Sugeno – Takagi

## PENDAHULUAN

Metode perancangan sistem kontrol pada maneuvering kapal, sejak diketemukannya giroskop elektrik sampai dengan saat ini, dapat dikategorikan kedalam 4 metode, yaitu metode konvensional, adaptif, modern dan berbasis kepakaran [9]. Metode konvensional mulai berkembang sejak tahun 1911, dari sistem *close loop* yang dikenal sebagai *Metal Mike* [10]. Kemudian Minorsky mengembangkannya menjadi sebuah sistem kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivatif*), yang dikenal sebagai sebuah autopilot pertama kali [14], dimana sistem kontrol rancangan menggunakan SISO (*Single Input Single Output*), dengan input dari giro kompas dan output adalah defleksi/gerakan rudder. Perkembangan selanjutnya adalah *linier steering* yang diturunkan oleh Davidson dan Schiff (1946), Nomoto (1957), dan pula *nonlinier steering* oleh Abkowitz (1964), Norrbinn (1970). Mekanisme perancangan dari usulan peneliti tersebut merupakan sebuah rancangan yang didasarkan pada model

matematis dari dinamika manuvering kapal [10]. Cara seperti ini menyebabkan terjadi beberapa kelemahan, diantaranya sistem kontrol tidak mampu bekerja bila diluar range error masukan controller, dan diperlukan justifikasi gain kontrol [1].

Sebuah teori yang menirukan logika penalaran manusia yang dikenal sebagai teori logika fuzzy, banyak digunakan dalam aplikasi pada sistem kontrol di berbagai produk rumah tangga misalnya mesin cuci, mesin pendingin ruangan, *rice cooker* dan lain-lain. Teori ini tidak hanya berkembang pada penggunaan produk rumah tangga, tetapi juga pada beberapa industri di Jepang sejak awal tahun 1980an. Demikian pula pada sistem maneuvering yang telah diajukan oleh Noguchi dan Mizoguchi (1998) pada maneuvering lintasan aman kapal. Variabel posisi aman kapal dan kategori posisi kapal dinyatakan sebagai variabel fuzzy. Vukic dkk (1998) melakukan perancangan kontrol logika fuzzy melalui dua cara, pertama menggunakan 2 input fuzzy yaitu : error heading dan laju yaw, dan kedua mengembangkannya menjadi 3 input fuzzy dengan menambahkan faktor normalisasi offset. Cara ke 2 memberikan performansi untuk deviasi lintasan lebih baik dibandingkan dengan input 2 fuzzy. Mekanisme ini dikembangkan oleh Aisjah, dimana KLF dengan 3 input yaitu yaw dan error yaw yang dibagi dalam 7 daerah keanggotaan fuzzy. KLF bekerja berdasarkan keluaran kontrol PI (*Proportional-Integral*) dan secara simulasi diaplikasikan pada kapal kelas *Mariner* dengan model Nomoto orde 1. Kemampuan KLF Vukic dengan 3 input pada KLF menghasilkan performansi yang lebih baik dalam berbagai kondisi dibandingkan dengan Aisjah [1]. Berdasarkan performansi hasil tersebut selanjutnya dikembangkan metode perancangan kontrol *robust* melalui pemodelan sistem dalam bentuk persamaan keadaan. Cara ini digunakan untuk memperoleh analisa secara mendetil dari sifat internal dinamika kapal yang dikontrol baik saat tanpa gangguan maupun dengan adanya gangguan [2, 3, 4, 6, 7]

Lee (2004) dalam penelitiannya mengusulkan rancangan KLF dengan FAM (*Fuzzy Associative Memory*) yang disusun berdasarkan eksperimen dan informasi pakar pada kondisi riil. Kontroler fuzzy digunakan untuk mengukur heading, laju yaw, jarak dan kecepatan dari kapal relatif terhadap posisi yang diharapkan (lokasi dan heading) untuk menghasilkan output kontrol pada posisi yang diharapkan. Input kontroler adalah offset posisi relatif kapal terhadap posisi yang diharapkan, error heading, laju yaw, proyeksi vektor jarak dari pusat gravitasi ke posisi yang di-

Naskah diterima pada tanggal 29 Desember 2008, selesai revisi pada tanggal 4 Februari 2009

<sup>1</sup> Aulia S. Aisjah adalah dosen jurusan Teknik Fisika, FTI, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, INDONESIA  
E-mail : auliasa@ep.its.ac.id

harapkan, proyeksi dari kecepatan relatif dari posisi yang diharapkan. Dengan menggunakan fungsi keanggotaan fuzzy trapesium berjumlah tujuh, diperoleh hasil bahwa KLF rancangan mampu merespon lebih cepat pada saat sudut rudder dan thrust bow besar untuk mengkompensasi moment eksternal akibat gangguan. Terlihat bahwa dalam membangun FAM berdasarkan hasil eksperimen seperti yang dilakukan oleh Lee (2004) akan berdampak terhadap kapabilitas sistem kontrol tersebut apabila kapal dioperasikan dalam kondisi yang lain. Hal ini diantisipasi oleh Aisjah yang melakukan perancangan dalam membangun FAM berdasarkan performansi sistem kontrol LQG/LTR yang mampu mengatasi gangguan di perairan dengan model gelombang sinusoidal [3, 5].

Demikian pula strategi kontrol yang berbasis logika fuzzy pada kontrol posisi kapal, arah kapal, dan lintasan kapal dengan menggunakan fungsi keanggotaan berbentuk trapesium dengan 35 aturan fuzzy dalam FAM. Strategi dilakukan untuk contoh kasus pada kapal drilling 150 meter dengan arus 3 knot, pada arah  $x$ , kedalaman laut 1200 m, dan sudut heading yang diharapkan  $0^\circ$ . Gangguan sistem berasal dari faktor angin. Hasil rancangan berdampak pada konsumsi energi yang lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan strategi kontrol konvensional. Kontrol berbasis logika fuzzy ini mempunyai sifat *robust* karena tidak membutuhkan kepresisian, dan bebas terhadap noise input (Ming dan Kyung, 2004).

Sebuah sistem kontrol fuzzy yang lebih sederhana dalam rule base nya diusulkan oleh Vukic, dkk [19], sebagai pengembangan dari KLF rancangan Velagic, dkk [17], dengan 49 aturan untuk keluaran kontroler berdasarkan masukan error yaw dan yaw rate. Fungsi keanggotaan fuzzy untuk error yaw dan yawrate adalah segitiga sedangkan untuk sinyal keluaran kontroler (*command rudder*) adalah fungsi trapesium. Kemudian Omerdick, dkk[17] mengembangkan penelitian Vukic, dkk [18] dengan menggunakan rule base yang sama dan inferensi menggunakan metode Mamdani dengan menambahkan filter gelombang. Obyek penelitian dalam penelitian Omerdick, dkk [17] adalah kapal klas Mariner dengan panjang  $L_{pp}$  160.93 meter dan kecepatan servis 15 knot. Pada simulasi dijalankan dengan memasukkan faktor gangguan gelombang dengan spektrum Pierson–Moskowitz, frekuensi modal 1 rad/dtk, dan gangguan berasal dari arus yang didekati dengan model Gauss–Markov orde 1. Filter terhadap gangguan gelombang menggunakan Notzh filter. Performansi sistem kontrol rancangan adalah besarnya *settling time*– $T_s$  saat set point  $10^\circ$  dan  $30^\circ$  dicapai kurang dari 150 detik. Sedangkan pada kondisi terdapat gangguan, respon dari KLF rancangan Vukic, dkk berfluktuasi.

Selanjutnya pada makalah ini, dikembangkan sebuah sistem kontrol logika fuzzy dengan rule base yang berbeda dari Vukic dan Omerdick dengan mengurangi jumlah fungsi keanggotaan fuzzy menjadi 5 yaitu NB, NS, ZE, PS, dan PB dan mangakomodasi adanya error lintasan kapal. Pembangunan rule menggunakan mekanisme yang diturunkan oleh Sugeno Takagi, dimana

rule dinyatakan dalam bentuk persamaan matematik sebagai fungsi dari semua variabel masukannya. Rule ini didasarkan dari estimasi least square, hubungan input dan output sebuah kontrol referensi LQG/LTR. Input pada kontrol LQG/LTR adalah error yaw dan yaw rate, sedangkan outputnya adalah sinyal command rudder.

## MATERIAL DAN METODE

**Mekanisme Perancangan KLF.** Pada sistem kontrol logika fuzzy, mekanisme dalam menghasilkan keputusan (sinyal kontrol) melalui beberapa tahapan, yaitu *fuzzifikasi*, mekanisme *inference engine*, dan *defuzzifikasi* [11]. Pada unit defuzzifikasi, berfungsi merubah suatu variabel *crisp* menjadi variabel fuzzy dengan menyertakan fungsi keanggotaannya. Fungsi keanggotaan semesta pembicaraan ini analog terhadap besarnya probabilitas marginal dari variabel tersebut Berbagai penelitian dan perancangan sistem kontrol fuzzy menggunakan fungsi keanggotaan segitiga, dikarenakan bentuk fungsi yang sederhana mudah direpresentasikan dalam variabel numerik [12].

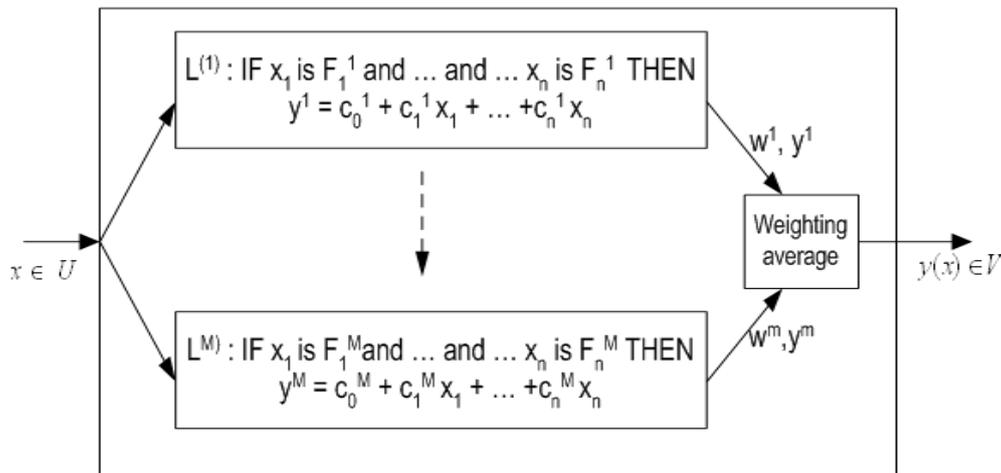
Di dalam *fuzzy rule base* terdiri dari 2 unit yaitu *rule base* dan *data base*. Penentuan *rule base* dan *data base* diperoleh dari :kepakaran seseorang, performansi terbaik dari hasil simulasi, Konfigurasi dasar sistem logika fuzzy murni terdiri dari dua bagian utama : *Fuzzy Rule Base* dan *fuzzy Inference Engine*. Fuzzy Rule Base terdiri dari kumpulan kaidah fuzzy **IF-THEN**, sedangkan Fuzzy Inference Engine menggunakan kaidah fuzzy IF THEN tersebut untuk menentukan pemetaan dari himpunan fuzzy semesta pembicaraan masukan  $U \subset R^n$  ke himpunan fuzzy semesta pembicaraan keluaran  $V \subset R$  yang didasarkan pada prinsip logika fuzzy.

**Fuzzy Rule Base.** Kaidah fuzzy **IF-THEN** dinyatakan dalam bentuk sebagai berikut :

$$R^{(l)} : \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^l, \text{ THEN } y \text{ is } G^l \quad (1)$$

dimana  $F_i^l$  dan  $G^l$  adalah masing-masing himpunan fuzzy ,  $\underline{x} = (x_1, \dots, x_n)^T \in U$  variabel linguistik masukan dan  $y \in V$  variabel linguistik keluaran dan  $M$  adalah jumlah kaidah fuzzy IF-THEN dalam fuzzy rule base :  $l = 1, 2, \dots, M$ .  $\underline{x}$  dan  $y$  masing-masing adalah masukan dan keluaran system logika fuzzy.

**Kontrol Logika Fuzzy Sugeno-Takagi.** Dalam perancangan sebuah kontrol yang keluarannya merupakan sebuah variabel linguistik, sulit untuk diprediksi bahwa keluaran kontroler tersebut bersifat *robust* terhadap gangguan. Pada perancangan KLF disini dalam penentuan basis rule–rule untuk keluaran digunakan aturan sesuai metode Sugeno–Takagi yang menyebutkan bahwa sifat kerobustan keluaran kontrol dapat diperoleh apabila keluaran kontroler tersebut mampu mengeliminir munculnya error.



Gambar 1. Konfigurasi sistem Logika Fuzzy Sugeno Takagi

Pada sistem logika fuzzy dengan tipe Sugeno Takagi (Gambar 1) mempunyai konfigurasi dasar yang terdiri dari dua bagian utama yaitu *Fuzzy Rule Base* dan *Fuzzy Inference Engine*, serta unit fuzzifier dan defuzzifier. Pada fuzzy rule base yang dikemukakan oleh Sugeno Takagi dinyatakan dalam bentuk kaidah :

$R^{(1)}$ : IF  $x_1$  is  $F_1^1$  and ...and  $x_n$  is  $F_n^1$ , THEN  $y^1 = c_0^1 + c_1^1 x_1 + \dots + c_n^1 x_n$

$R^{(2)}$ : IF  $x_1$  is  $F_1^2$  and ...and  $x_n$  is  $F_n^2$ , THEN  $y^2 = c_0^2 + c_1^2 x_1 + \dots + c_n^2 x_n$  ...

(2)

$R^{(M)}$ : IF  $x_1$  is  $F_1^M$  and ...and  $x_n$  is  $F_n^M$ , THEN  $y^M = c_0^M + c_1^M x_1 + \dots + c_n^M x_n$

Dimana  $F_i^j$  adalah set fuzzy,  $c_i$  adalah parameter berharga riil,  $y^k$  keluaran sistem oleh kaidah  $R^{(i)}$ ,  $M$  jumlah rule/kaidah fuzzy. Dari rule tersebut di atas terlihat bahwa bagian IF berupa set fuzzy, sedangkan bagian THEN bernilai *crisp* (numerik), merupakan hasil kombinasi linier dari variabel masukan. Bentuk dari sistem kontrol dengan tipe Sugeno – Takagi dapat dilihat pada Gambar 1 Dengan  $x$  adalah variabel masukan,  $y$  adalah variabel keluaran hasil inferensi Sugeno – Takagi,  $w$  adalah faktor pembobot yang dapat ditentukan secara iterasi pada saat simulasi.

Model referensi digunakan untuk menurunkan dan mengevaluasi performansi kerja KLF yang bekerja berdasarkan pada kontrol LQG/LTR. Model referensi yang bekerja dengan masukan eror yaw dan yawrate ini digunakan untuk memperoleh parameter yang tidak diketahui  $c_{ij}^1$  dan  $c_{ij}^2$  yang digunakan untuk masing – masing rule base pada KLF. Pada saat awal model referensi dijalankan terlebih dahulu mendahului KLF, untuk memperoleh nilai kedua  $c_{ij}$  tersebut melalui estimasi *least square*, dan kemudian model KLF dijalankan secara terpisah tanpa LQG/LTR.

**Manuvering Kapal.** Bentuk umum persamaan manuvering kapal diperoleh dari Hukum Newton II dengan mengabaikan efek *coriolis*, sehingga dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan di bawah.

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_L \quad (3)$$

Pada persamaan (3) dengan  $\mathbf{v} = [u, v, r]^T$  merupakan vektor kecepatan, dan diturunkan bentuk pemodelan dalam dua range frekuensi, yaitu frekuensi rendah dan frekuensi tinggi, dan  $\boldsymbol{\tau}_L$  merupakan vektor kontrol

gaya dan momen.  $\mathbf{M}$  dan  $\mathbf{D}$  merupakan matriks inersia dan damping yang diperoleh dari linierisasi hukum Newton II pada gerak arah surge, sway dan yaw didalam dinamika kapal [3].

Pada pendekatan teori *slender body strip* turunan koefisien hidrodinamika dapat dinyatakan sebagai fungsi dari rasio panjang terhadap lebar dari kapal, dengan dikalikan sebuah konstanta tertentu. Smitt (1970), Norrbinn (1971) dan Inoue (1981) mengembangkan suatu rumusan secara empiris dari beberapa persamaan turunan koefisien hidrodinamika yang kemudian oleh Clarke (1982) dinyatakan dalam bentuk persamaan regresi. Bentuk persamaan regresi ini fungsi dari  $L$  (panjang kapal),  $B$  (lebar kapal),  $T$  (kedalaman kapal),  $C_B$  (koefisien blok) .

Model dinamika manuvering kapal yang dinyatakan dalam persamaan (3) dengan beban gangguan dari lingkungan dalam bentuk persamaan state space sebagai berikut [17] :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{E}\mathbf{w} \quad (4)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v}$$

dengan vektor state  $\mathbf{x} = [x_L^T, x_H^T, x_c^T, x_w^T, \tau^T]^T$ ,

$\mathbf{x}_L = [x_L, y_L, \psi_L, u_L, v_L, r_L]^T$ ,  $\mathbf{x}_c$  = variabel state

untuk gangguan arus laut,  $\mathbf{x}_w$  = variabel state untuk gangguan angin,  $\mathbf{x}_H = [\xi_x, \xi_y, \xi_w, x_H, y_H, \psi_H]^T$ ,

$\mathbf{u} = \boldsymbol{\tau}_L + \boldsymbol{\tau}_w$  merupakan vektor input,  $\mathbf{z} = [z_1, z_2, z_3, z_4, z_5]^T$ , merupakan variabel pengukuran  $z_1$  - posisi surge,  $z_2$  - sway,  $z_3$  - sudut yaw,  $z_4$  - kecepatan angin dan  $z_5$  - arah angin,  $\mathbf{v} = [v_1, v_2, v_3, v_4, v_5]^T$  merupakan *zero mean Gaussian white noise proses*.  $\mathbf{w}$  menandakan komponen gerak frekuensi tinggi dan frekuensi rendah yang dipilih sesuai dengan gerak surge, sway dan yaw.

$w_x, w_y, w_\psi$  merupakan zero mean Gaussian white noise proses. Matriks  $\mathbf{H}$  merupakan konfigurasi matriks  $\mathbf{I}$ . Subscript L menunjukkan low frekuensi, H:high frekuensi, c: currentt, w:wind. Pada persamaan state space tersebut harus memenuhi *observability* dan *controllability* [13], dimana nilai matriks *observable* dan *controllable* mempunyai rank yang memenuhi sifat tersebut [6]. Persamaan (2) merupakan bentuk model state space yang digunakan untuk perancangan kontrol referensi dari KLF ini. Kontrol referensi yang digunakan adalah LQG/LTR – *Linear Quadratic Re-*

*gulo/Loop Transfer Recovery*. Didalam perancangan LQG/LTR dilakukan melalui Perancangan LQR state *feedback* untuk mencapai target loop *feedback* dan perancangan filter Kalman untuk *Recovery Transfer Loop* [5]. Prosedur yang digunakan adalah sebagai berikut : Perancangan LQR state *feedback* untuk target loop *feedback*,

$$0 = A^T S + SA + Q_c - SBR_c^{-1}B^T S \quad (5)$$

$$K = R_c^{-1}B^T S$$

Perancangan Filter Kalman untuk *Recovery transfer loop*

$$0 = AP + PA^T + Q_f - PC^T(v^2 R_f)^{-1}CP \quad (6)$$

$$L = PC^T(v^2 R_f)^{-1}$$

dimana  $Q_f = v^2 Q_0 + BB^T, Q_0 \geq 0$

Didalam kapal tanker yang menjadi obyek penelitian ini, merupakan suatu sistem phase minimum yang ditandai oleh transmisi dari *zero* di bidang sebelah kiri. Kerobustan dari sistem kontrol rancangan juga ditunjukkan dari plot *singular value* seperti pada Gambar 2.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

**KLF pada Manuvering dan Tracking.** Struktur kontrol KLF rancangan terdiri dari dua unit, unit KLF pertama bekerja berdasarkan pada input error yaw ( $e$ ) dan yawrate ( $r$ ), unit KLF kedua bekerja berdasarkan pada normalisasi error lintasan. Struktur KLF tersebut berbeda dengan struktur saat digunakan fungsi inferensi Mamdani. Pada saat fungsi Mamdani digunakan, beberapa parameter kerobustan kontroler tidak ditemui pada beberapa kondisi manuvering, seperti pada saat manuver *circle*. Pada kondisi dengan gangguan kompleks terjadi fluktuasi jari – jari *circle* yang lebih besar dari 20%, dan cenderung tidak konvergen [8].

Fungsi keanggotaan yang digunakan pada KLF rancangan berupa segitiga dengan 7 keanggotaan yang didefinisikan dalam daerah NB – *Negative Big*, NM – *Negative Medium*, NS – *Negative Small*, Z – *Zero*, PS – *Positive Small*, PM – *Positive medium* dan PB – *Positive Big*. Penentuan interval dari daerah keanggotaan fuzzy dilakukan secara iterasi untuk memperoleh performansi keluaran dari kontrol yang terbaik [7].

Untuk menentukan basis kaidah – *rule base* kontrol fuzzy yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$u = \delta_d + du_1 + du_2 \quad (7)$$

dengan

$$du1_{ij} = c_{ij}^1 e(k) + c_{ij}^2 r(k) \quad (8)$$

Dengan  $\delta_d$  = sinyal rudder command,  $c_{ij}^1$  : gain pada sinyal kontrol berdasarkan nilai perubahan error yaw,  $c_{ij}^2$  : gain pada sinyal kontrol berdasarkan nilai yaw

rate,  $du_2$  keluaran sinyal kontrol berdasarkan masukan error lintasan ternormalisasi  $\eta$ . Untuk memperoleh gain – gain pada persamaan (7) tersebut dilakukan dengan estimasi *least square* secara off line dari hasil keluaran dari kontrol referensi LQG/LTR berupa data pasangan input (*error heading*) dan output dari kontroler (sinyal kontrol) [18].

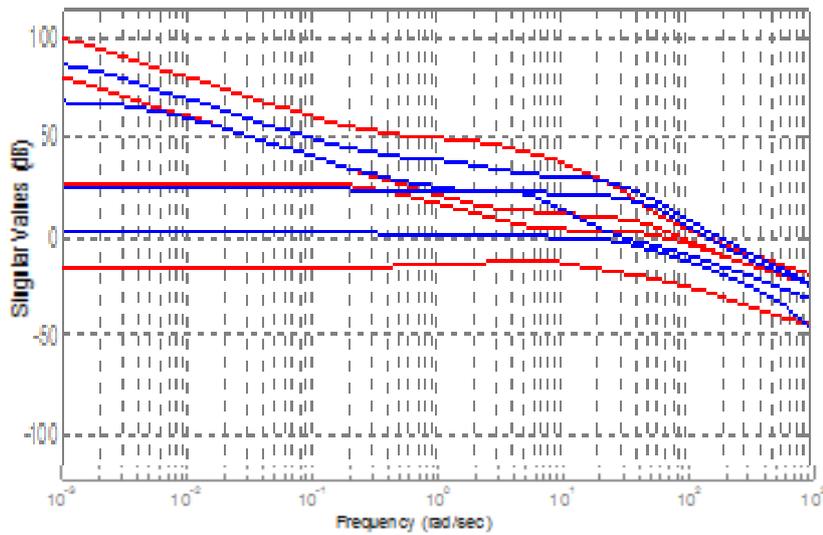
Pada unit kedua KLF dengan masukan normalisasi error lintasan ( $\eta$ ), dimana unit ini menghasilkan keluaran kontroler  $du_2$ , saat  $\eta$  bernilai negatif maka  $du_2$  adalah negatif. Demikian pula sebaliknya bila  $\eta$  bernilai positif maka  $du_2$  adalah positif. Rule yang dapat digunakan untuk logika ini dapat dinyatakan sebagai bentuk seperti pada persamaan (10).

$$du_2 = \tanh(s.\eta) \quad (9)$$

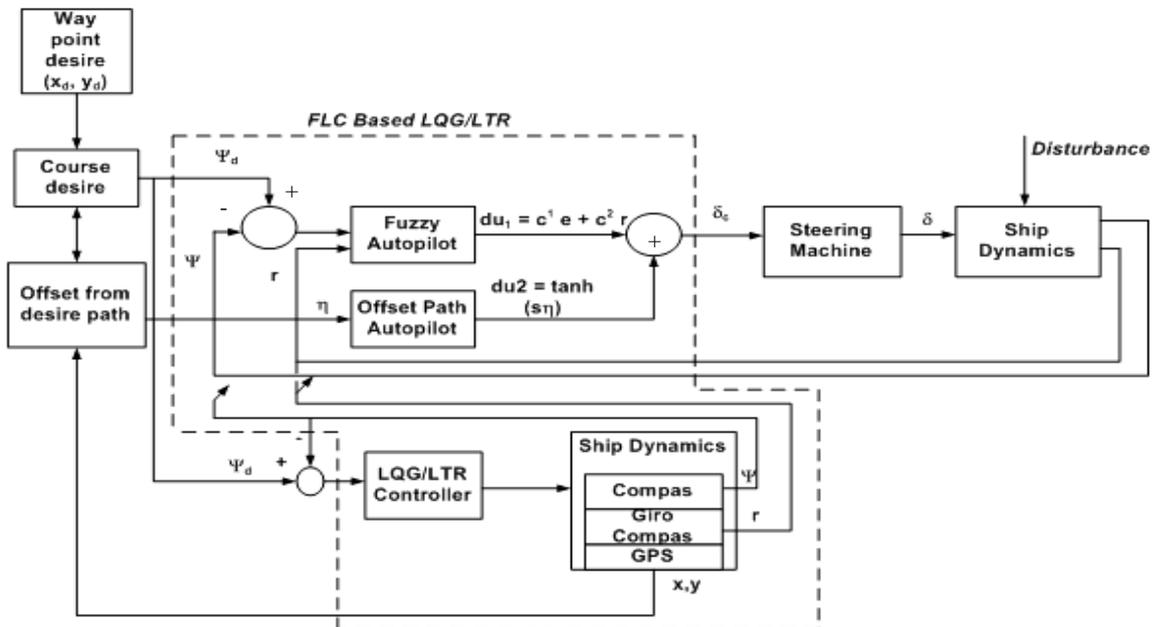
dengan  $s$  : sensitivitas KLF dengan masukan  $\eta$ .

Pada Gambar 2 menunjukkan blok diagram struktur kontrol rancangan. Mekanisme dari KLF adalah dengan berdasarkan variabel masukan yaitu error yaw ( $e$ ) dan yaw rate ( $r$ ), saat melakukan aksi *course keeping*. Keluaran sinyal kontrol KLF adalah  $du_1$  yang diumpankan ke mesin kemudi dan kemudian mesin kemudi menggerakkan kapal sesuai dengan setting heading. Apabila dilakukan setting heading untuk target posisi, maka KLF bekerja dengan masukan error yaw ( $e$ ), yawrate ( $r$ ) dan error lintasan ( $\eta$ ) dan keluaran sinyal kontrol KLF adalah  $du_1 + du_2$  yang menggerakkan mesin kemudi. Kemudian mesin kemudi ini akan menggerakkan ke arah posisi yang diharapkan.

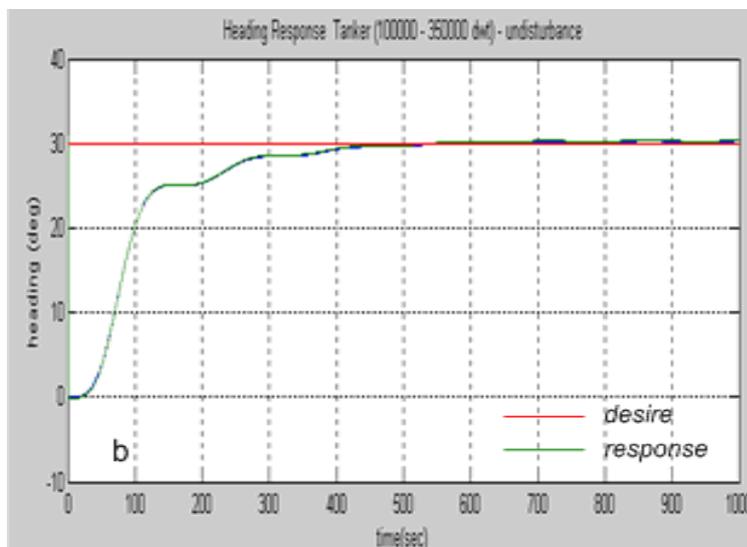
**Simulasi Course Keeping.** Pada pemenuhan *course keeping* (haluan tetap), kontrol akan bekerja apabila  $d \sim 0$ , disini pada KLF unit 2 tidak bekerja. Tujuan sistem kontrol logika fuzzy adalah membawa kapal pada sudut *yaw / heading* yang diharapkan, atau  $\Delta\psi = \psi_d - \psi = 0$ . KLF unit 1 aktif, dengan masukan  $e$  dan  $r$ , KLF 2 tidak aktif, dan aksi kontrol adalah  $du_1$  yang merupakan sinyal *command rudder*  $\delta_c = du_1$ . Simulasi pada *course keeping* dilakukan dengan memberikan sinyal uji berupa fungsi step pada masukan sistem kontrol. Sinyal uji ini dikatakan sebagai set point untuk kontroler. Pada simulasi pertama, set point heading adalah tetap sebesar  $30^\circ$  dan dilakukan pada saat kondisi tanpa gangguan. Hasil simulasi seperti terlihat pada Gambar 4 untuk kapal Tanker (100000 - 350000 dwt). Pada gambar tersebut, dengan set point heading  $30^\circ$  diperoleh *settling time* ( $T_s$ ) hasil LQG/LTR adalah  $T_s$  kapal Tanker (100000 - 350000 dwt) adalah 379.3 detik (KLF) dan 410.9 detik (LQG/LTR). Nilai ini lebih baik dibandingkan dengan hasil kontrol LQR.



Gambar 2. Plot singular value dari loop full - state feedback (----) dan LQG (—)



Gambar 3. Blok diagram KLF Sugeno – Takagi dengan model referensi kontrol LQG/LTR



Gambar 4. Respon heading dengan set point 30° tanpa gangguan untuk kapal Tanker

Performansi kontroler dalam domain waktu, secara umum ditandai dengan parameter : *maximum overshoot* (mov), *settling time* (Ts), *time constant* (T), *rise time* (Rs), *error steady state* (e<sub>ss</sub>). Parameter ini memberikan gambaran secara umum dari kestabilan sebuah kontroler. Meskipun parameter tersebut bukan satu – satunya karakteristik kebaikan sebuah kontroler. Untuk memperoleh parameter kestabilan seperti tersebut di atas, dengan cara melalui pemberian sinyal–sinyal uji tertentu dan membandingkan respon terhadap sinyal uji ini. Dengan sinyal uji dapat dilakukan analisis secara matematik dan eksperimental dari sistem kontrol [15]. Untuk kapal Tanker (190000 dwt) panjang 304.65 meter, kecepatan servis 8.24 m/dt, nilai konstanta waktu keduanya adalah 289.82 detik

**Kerobustan KLF.** Mekanisme dari keluaran kontroler logika fuzzy dengan metode inferensi Sugeno Takagi (u – sinyal *command rudder*) sebagai fungsi dari *error yaw* (e) dan *yaw rate* (r). Keluaran dari kontroler tersebut merupakan interpolasi dari suatu fungsi output (sinyal *command rudder*) terhadap semua nilai input (error yaw dan yawrate). Bila dinyatakan dengan suatu bentuk persamaan matematis hu-

ngun dari semua himpunan variabel output fuzzy terhadap himpunan variabel masukan :

$$f_k(x) = \sum_{j=1}^m \eta_{jk} \xi(\|x - c_j\|) \tag{10}$$

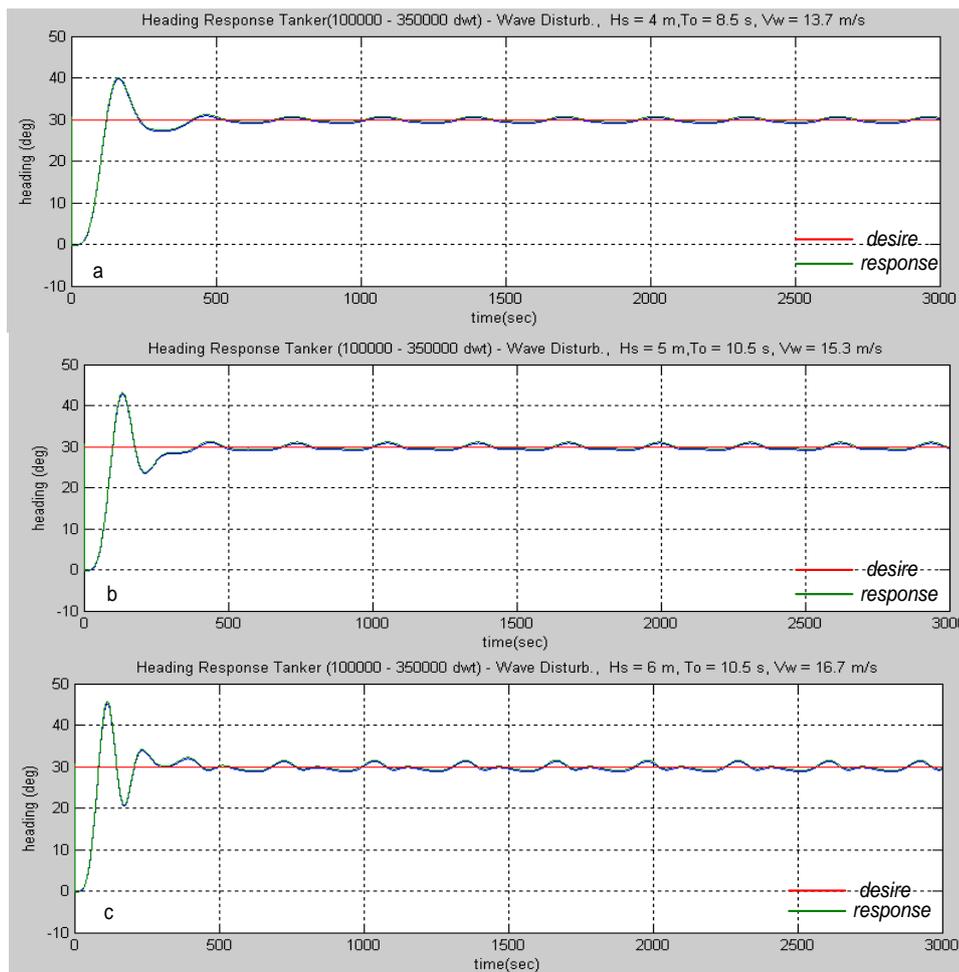
dimana  $f_k$  : persamaan fungsi inferensi kontrol fuzzy,  $x$  = variabel input fuzzy,  $\eta$  : parameter yang tidak diketahui dan  $\xi$  : fungsi nonlinier dari  $x$ . Bentuk persamaan diatas untuk data yang tidak sama akan menghasilkan bentuk persamaan matriks

$$\begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2m} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ f_{m1} & f_{m2} & \dots & f_{mm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_{11} & \eta_{12} & \dots & \eta_{1m} \\ \eta_{21} & \eta_{22} & \dots & \eta_{2m} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ \eta_{n1} & \eta_{n2} & \dots & \eta_{nm} \end{pmatrix} \tag{11}$$

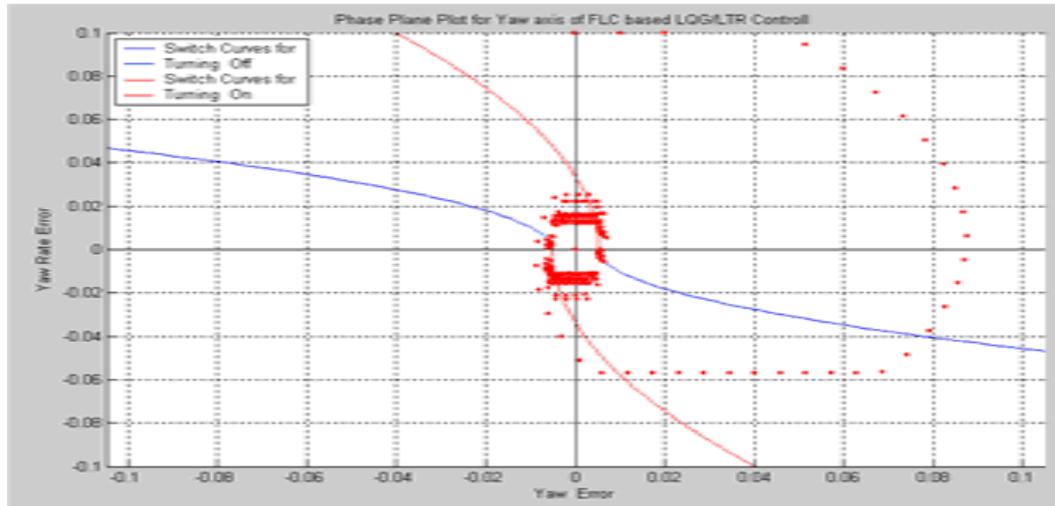
atau

$$\mathbf{f} = \mathbf{A} \boldsymbol{\eta} \quad \text{dengan} \quad \boldsymbol{\eta} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{f} \tag{12}$$

Trajektori dari  $\boldsymbol{\eta}$  untuk turning dapat diplot dalam bentuk diagram phase antara *error yaw* dan *error yawrate*. Dengan sifat persamaan yang *non singular* untuk matrik  $\mathbf{A}$  maka ini harus menghasilkan diagram *phase* yang konvergen.



Gambar 5. Heading respon dengan set point 30° saat kondisi gangguan gelombang yang dibangkitkan angin pada kapal Tanker (100000 – 350000 dwt) (a) Hs = 4 m, (b) Hs = 5 m dan (c) Hs = 6 m



Gambar 6. Plot bidang fasa kapal Tanker

Gambar 6 menunjukkan diagram *phase trajectory* dari *error yaw* dan *error yaw rate* pada keseluruhan kondisi, pada saat dilakukan simulasi *turning off* maupun *turning on*. Terlihat pola yang konvergen untuk kedua perubahan tersebut. Pola seperti ini menunjukkan bahwa trayektory dari *error yaw* dan laju *error yaw* konvergen menuju daerah 0, 0. Trayektory dengan pola seperti ini menunjukkan bahwa sistem yang dikontrol oleh KLF selalu stabil [15].

### KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa Kontroler KLF Sugeno–Takagi memberikan kemampuan yang baik pada saat turning, ini ditandai oleh hasil respon waktu dan parameter gain Nomoto hasil respon mendekati nilai gain Nomoto hitung. Kontroler KLF dengan fungsi konsekuensi Sugeno Takagi menghasilkan performansi saat *turning* dan *tracking* mengikuti setting yang diharapkan pada saat terjadi gangguan gelombang. Kemampuan KLF Sugeno Takagi mengikuti kemampuan kontrol robust LQG/LTR, dengan garansi kerobustan seperti pada kontrol LQG/LTR.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aisjah, A.S., Soegiono, Masroeri, AA., Djatmiko, E.B., Wasis dan Sutantra, I.N., 2004. Linear Tracking Sea Vehicle based on Fuzzy, *Proceeding Seminar Nasional Pasca Sarjana ITS*, 2004, Surabaya
- [2] Aisjah, A.S., Soegiono, Masroeri, AA., Djatmiko, E.B., Wasis, Sutantra, I.N dan Buda, K., 2005. The extended of Tracking Control Sea Vehicle based on Fuzzy Logic, *Prosidi. Seminar Nasional FTI ITS*, 2005, Surabaya.
- [3] Aisjah, A.S., Soegiono, Masroeri, A.A., Djatmiko, E.B., Wasis, Sutantra I.N. dan Buda, K., 2005. A Study of Extended Fuzzy Logic Control for Ship Maneuvering Based on LQG/LTR Control, *Proceeding Seminar Nasional FTI ITS*, 2005, Surabaya.
- [4] Aisjah, A.S., Masroeri, AA., 2005. Maneuvering Sea Vehicle using LQR Control. , *Proceeding Seminar Pasca Sarjana ITS*, 2005, Surabaya.
- [5] Aisjah, A.S., Masroeri, A.A, 2005. Extended Fuzzy Logic Control for Ship Maneuvering Based on LQG/LTR Control, *International Seminar ISME – Japan*, 2005. Japan.
- [6] Aisjah, A.S., Soegiono, Masroeri, AA., Djatmiko, E.B., Wasis, Sutantra I.N. dan Buda, K., 2005. Robust Controller in Ship Maneuvering, *Proceeding Seminar Nasional Teknologi Kelautan FTK – ITS*, 2005. Surabaya.
- [7] Aisjah, A.S., dan Masroeri, AA., 2006. Fuzzy Logic Control of Type Sugeno Takagi with The Model Reference of LQG/LTR at Maneuvering Ship Controller, *International Seminar JSPS*, 2006.
- [8] Aisjah, A.S., Soegiono, Masroeri, A.A., Djatmiko, E.B., Wasis dan Sutantra, I.N., 2006. Stability Area of Ship Maneuvering using Fuzzy Logic Control, *Seminar Nasional Teori dan Aplikasi Tekn. Kelautan VI, FTK ITS*, 2006. Surabaya.
- [9] Aisjah, A.S., Soegiono, Masroeri, AA., Djatmiko, E.B., Wasis, D.A., 2007. Perkembangan Strategi Kontrol Pada Manuvering Kapal : Konvensional, Modern, Vs kepakaran, *Proceeding Seminar T. Kelautan - SENTA , ITS*, 20 Novemvber 2007. Surabaya.
- [10] Fossen, T. I., 2000. A Survey on Non Linear Ship Control : From Theory to Practice, *5th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, MCMC*, 2000, Aalborg, Denmark.
- [11] Jamshidi, M., Vadie, N., Ross, T., 1993. Fuzzy Logic and Control software and hardware applications, Vol. 2, Prentice Hall.
- [12] Kvam, K., Ohtsu, K. dan Fossen, T.I., 2000. Optimal ship Maneuvering using Bryson and HO's time Vrying LQ Controller, *5th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, MCMC 2000*, 2000 Aalborg, Denmark.
- [13] Lewis, F. L., 1992. Applied Optimal Control & Estimation, Prentice Hall.
- [14] Minorsky, N., 1922. Directional Stability of Automatic Steered Bodies, *Journal America of Naval Enegineers*, Vol. 2, No. 34.
- [15] Ogata, K., 1992. Modern Control Engineering, Second Ed, Prentice Hall, hal. 253.
- [16] Omerdick, E., dan Roberts, G.N., 2004. A fuzzy track – keeping autopilot for ship steering, *Journal of Marine Engineering and Technology*, Vol. A2.
- [17] Velagic, J., Vukic, Z. dan Omerdick, E., 2000, Adaptive Fuzzy Ship Autopilot for Track Keeping, *5th Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, MCMC 2000*.
- [18] Vukic, Z., Omerdic, E. dan Kuljaca, L., 1998. Improved Fuzzy Autopilot for Tracking Keeping, *IFAC Conference CAMS'98*, Fukuoka Japan. 1998.
- [19] Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L., dan Ye, K., 2002. Probablity and Statistics for Engineers & Scientists, 7<sup>ed.</sup>, Prentice Hall