

# SISTEM KENDALI ADAPTIF NEURO-FUZZY PID PADA KAPAL KATAMARAN TANPA AWAK

Erwhin Irmawan<sup>\*1)</sup>, Tri Kuntoro Priyambodo<sup>2)</sup>, Edi Sofyan<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Program Studi Teknik Dirgantara, STTKD, Yogyakarta

<sup>2)</sup>Departemen Ilmu Komputer dan Elektronika, FMIPA UGM, Yogyakarta

<sup>3)</sup>Program Studi Aeronautika, STTKD, Yogyakarta

e-mail: <sup>\*1)</sup>[erwhin.irmawan@gmail.com](mailto:erwhin.irmawan@gmail.com), <sup>2)</sup>[mastri.ugm@gmail.com](mailto:mastri.ugm@gmail.com), <sup>3)</sup>[edisofyan@hotmail.com](mailto:edisofyan@hotmail.com)

## Abstrak

Kendali otomatis dibutuhkan oleh kapal katamaran tanpa awak dalam menavigasi menuju arah tertentu dan dapat menangani gangguan serta perubahan kondisi dengan efektif dan optimal. Kendali PID cocok untuk pengendalian kapal, namun mempunyai kelemahan dalam pencarian gain PID optimal untuk setiap kondisi. Fuzzy mampu menangani penjadwalan gain PID untuk setiap kondisi dan neural network mampu mengoptimasi desain fuzzy, sehingga dilakukan penggabungan menjadi kendali adaptif neuro fuzzy PID (N-F PID).

N-F PID merupakan kendali PID dengan penjadwalan gain PID ( $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$ ) yang dinamis berdasarkan besarnya nilai error dan delta error oleh neuro fuzzy. Neuro fuzzy yang digunakan adalah adaptif neuro fuzzy inference system (ANFIS). ANFIS mampu melakukan pembelajaran dengan training data baru untuk memperbaiki performa. Training data baru didapatkan dari proses tuning dengan mengalikan output masing-masing fuzzy yang belum terlatih dengan konstanta tertentu hingga didapatkan settling time cepat dan persentase overshoot maksimum kecil.

Simulasi N-F PID dengan Matlab dan eksperimen kapal katamaran menunjukkan N-F PID mempunyai performa yang lebih baik dari pada kendali fuzzy PID dan kendali PID, dilihat dari settling time dan persentase overshoot maksimum. N-F PID mempunyai tingkat presisi pengendalian yang lebih rendah daripada kendali fuzzy PID dan PID berdasarkan data eksperimen.

**Kata kunci:** kapal tanpa awak, neuro fuzzy, kendali PID, ANFIS

## Pendahuluan

Kapal katamaran tanpa awak merupakan sebuah kapal dengan lambung (*hull*) ganda yang dapat melakukan tugas-tugas gerakan yang kompleks tanpa melibatkan sebagian maupun sepenuhnya instruksi dari manusia sebagai pengendali. Sistem kendali otomatis kapal tanpa awak bertujuan agar dapat menavigasi kapal tanpa awak untuk menyusuri lintasan atau menuju suatu arah yang telah ditentukan, menangani gangguan dan dapat beradaptasi dengan perubahan kondisi. Kendali yang populer digunakan yaitu kendali PID karena karakteristik pengendaliannya dapat diatur dan cocok untuk pengendalian aktuator [1], serta kokoh dan sederhana dalam implementasi [2].

Kapal selalu mengalami gangguan dari faktor eksternal seperti arus dan gelombang air yang tidak linier perubahan kuantitasnya dan perubahan waktunya. Sistem kendali PID dengan *gain* yang besar akan optimal untuk menangani *error* yang besar, namun dengan *gain* yang besar itu tidak optimal untuk menangani *error* yang kecil, demikian pula sebaliknya. Untuk menangani masalah tersebut perlu melakukan penjadwalan *gain* PID sesuai besarnya nilai error untuk mendapatkan kendali yang optimal [3].

Fuzzy mampu melakukan penjadwalan gain PID ( $K_i$ ,  $K_p$  dan  $K_d$ ) dengan merepresentasikan

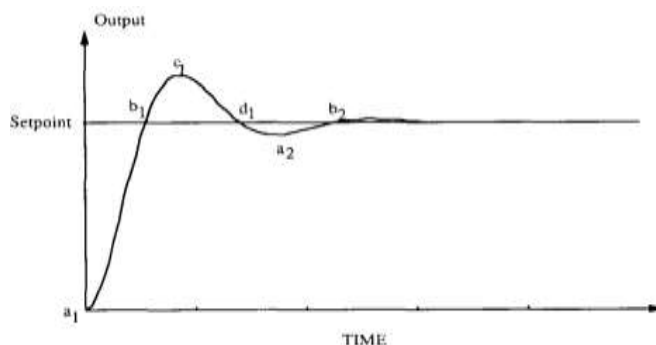
pengetahuan dari pakar atau ahli sehingga terbentuk suatu sistem kendali PID adaptif. Sistem kendali fuzzy PID telah diteliti oleh peneliti sebelumnya [4,5,6] dan menghasilkan performa kendali yang lebih baik dari kendali PID. Namun kelemahan utama dari fuzzy yaitu kurangnya metodologi sistematis dari desainnya. Biasanya pencarian parameter dari fungsi keanggotaan dan penentuan fuzzy set memakan waktu yang relatif lama. Teknik pembelajaran *neural network* dapat mengotomasi proses ini melalui pembelajaran, secara signifikan dapat mengurangi waktu pencarian dan menghasilkan performa yang lebih baik, yang dinamakan *neuro fuzzy*. *Neuro fuzzy* juga mampu memperbaiki performa fuzzy yang ada dengan training data baru. Pada penelitian [7,8], penggunaan *neuro fuzzy* dapat menghasilkan sistem kendali yang baik berdasarkan data riil yang digunakan untuk proses pelatihan fuzzy. Pada penelitian ini akan dibentuk sebuah kendali adaptif *neuro fuzzy PID* untuk mendapatkan kendali yang efektif dan optimal.

## Metode Penelitian

### 1. Rancangan Sistem Kendali

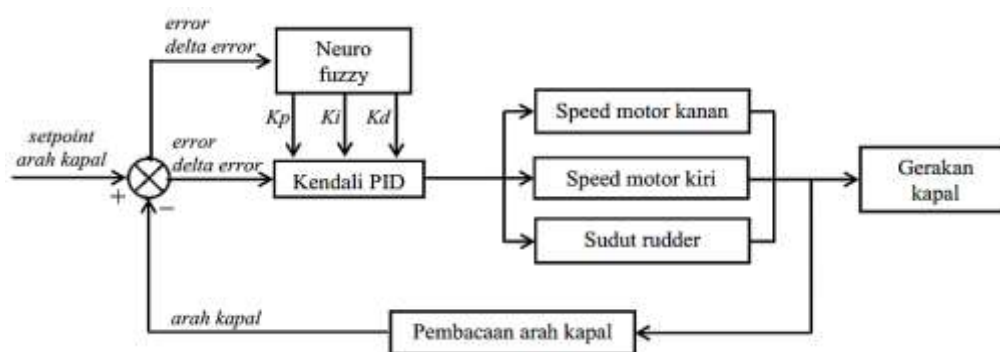
Sistem kendali yang dirancang yaitu sistem kendali adaptif *neuro fuzzy PID*, menggunakan *neuro fuzzy* untuk *tuning* konstanta kendali PID secara *online* pada saat kapal katamaran bermanuver. *Neuro fuzzy* yang digunakan pada penelitian ini yaitu *adaptif neuro fuzzy inference system* (ANFIS). ANFIS mampu melakukan pelatihan dengan adanya training data riil untuk menghasilkan fuzzy yang optimal [8]. Sistem kendali diharapkan mampu untuk menangani gangguan yang dialami oleh kapal katamaran agar tetap bergerak sesuai dengan orientasi arah yang telah ditentukan dalam satuan derajat arah kompas. Perancangan sistem meliputi perancangan untuk simulasi dan juga perancangan untuk eksperimen. Eksperimen merupakan implementasi dari rancangan sistem kendali yang sudah disimulasikan. Proses simulasi dilakukan menggunakan Matlab dan eksperimen menggunakan wahana kapal katamaran tanpa awak.

Gambar 1 merupakan respon dari kendali PID adaptif untuk mencapai setpoint. Dimulai dari titik  $a_1$ , diperlukan sinyal pengendalian dengan *gain* yang besar untuk menghasilkan *settling time* yang cepat. Untuk mendapatkan sinyal pengendalian yang besar maka PID diatur dengan nilai  $K_p$  besar, *integral action* besar ( $\alpha$  kecil) dan nilai  $K_d$  kecil. Pada kendali PID nilai  $\alpha$  yang kecil akan membuat *integral action* yang kuat, karena nilai  $\alpha$  berbanding terbalik dengan nilai  $K_i$ . Nilai tengah *integral action* ditentukan dari penalaan Ziegler Nichols [9] yaitu selalu empat kali dari *derivative time constant*, sehingga nilai  $\alpha$  adalah 4. Untuk memperoleh *integral action* yang lebih kuat maka nilai  $\alpha$  diatur lebih kecil dari 4 dan untuk memperoleh *integral action* yang lebih kecil maka dapat diatur nilai  $\alpha$  lebih besar dari 4. Pada titik  $b_1$  atau mendekati titik  $b_1$  diharapkan sinyal kendali yang dihasilkan adalah kecil untuk meminimalisir terjadinya *overshoot*, sehingga perlu dilakukan pengaturan kendali PID dengan  $K_p$  kecil,  $K_d$  besar dan *integral action* kecil ( $\alpha$  besar). Nilai  $K_d$  yang besar dan  $K_p$  yang kecil diharapkan dapat meredam terjadinya *overshoot*. Pada saat berada di titik  $c_1$  maka kendali PID mengatur nilai  $K_p$  besar,  $K_d$  kecil dan  $\alpha$  kecil untuk menghasilkan sinyal kendali yang kuat sehingga lebih cepat menuju ke *setpoint*, begitu pula pada titik  $d_1$  atau mendekati titik  $d_1$  diatur agar mempunyai sinyal control yang kecil untuk meredam *overshoot*, dan seterusnya hingga dicapai titik stabil. Pada penelitian ini proses penjadwalan *gain* PID atau penalaran mandiri *gain* PID akan dilakukan oleh *neuro fuzzy*.



Gambar 1 Proses respon kendali PID adaptif

Gambar 2 merupakan sistem kendali adaptif neuro fuzzy PID pada kapal katamaran tanpa awak, menunjukkan bahwa *output* dari *neuro-fuzzy* merupakan nilai konstanta PID yaitu  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  berdasar *error* dan *delta error* orientasi arah kapal. Neuro fuzzy terdapat tiga buah ANFIS dimana masing-masing ANFIS bertugas untuk menangani penjadwalan  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$ . Masukan dari kendali PID yaitu *error* dan *delta error* orientasi arah kapal dan keluaran dari kendali PID adalah data koreksi sikap kapal yang digunakan untuk mengatur *speed* motor kanan, *speed* motor kiri dan sudut servo *rudder*.



Gambar 2 Sistem kendali adaptif neuro fuzzy PID

Kendali PID yang digunakan seperti pada persamaan (1). Mengacu pada penelitian [4,5] nilai  $K_p$  dan  $K_d$  diatur dengan interval tertentu  $[K_{p_{\min}}, K_{p_{\max}}]$  dan  $[K_{d_{\min}}, K_{d_{\max}}]$ . Nilai  $K_{p_{\min}}$ ,  $K_{p_{\max}}$ ,  $K_{d_{\min}}$ ,  $K_{d_{\max}}$  ditentukan dengan persamaan (2), persamaan (3), persamaan (4) dan persamaan (5), nilai  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  ditentukan berdasarkan persamaan (5), persamaan (7) dan persamaan (8).  $K_p$  merupakan skala *proportional gain*,  $K_d$  merupakan skala *derivatif gain*, dan  $\alpha$  merupakan skala *integral*. Nilai  $K_u$  dan  $P_u$  diperoleh dari penalaan Ziegler Nichols. Interval konstanta PID mengacu pada penalaan Ziegler Nichols karena metode *tuning* konstanta PID yang populer dan menghasilkan performa yang baik adalah metode *Internal Model Control* (IMC) dan Ziegler Nichols (ZN), namun dari keduanya memiliki kelebihan dan kekurangan, dari penelitiannya menunjukkan bahwa PID Ziegler Nichols mempunyai performa yang lebih baik dibandingkan IMC untuk menangani gangguan [10].

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

$$K_{p_{\min}} = 0,32 * K_u \quad (2)$$

$$K_{p_{\max}} = 0,6 * K_u \quad (3)$$

$$K_{d_{\min}} = 0,08 * K_u * T_u \quad (4)$$

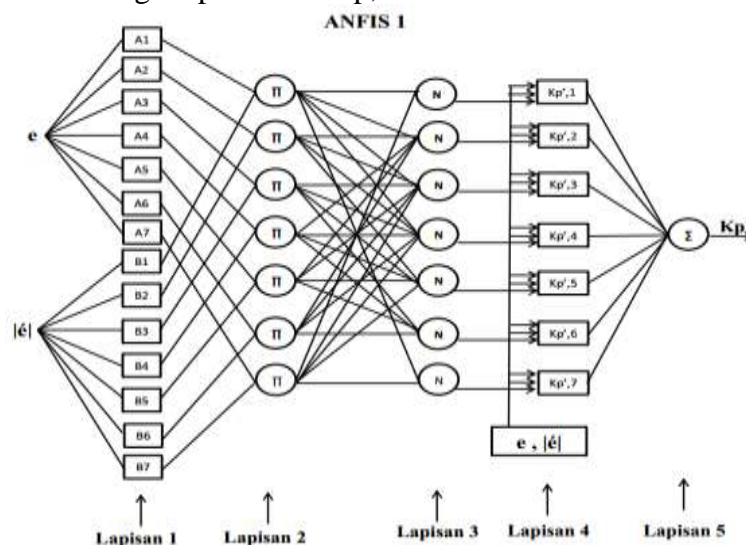
$$K_{d_{\max}} = 0,15 * K_u * T_u \quad (5)$$

$$K_p = K_{p_{\min}} + (K_{p_{\max}} - K_{p_{\min}}) * K_p' \quad (6)$$

$$K_d = K_{d_{\min}} + (K_{d_{\max}} - K_{d_{\min}}) * K_d' \quad (7)$$

$$K_i = K_p^2 / (\alpha * K_d) \quad (8)$$

Struktur ANFIS yang digunakan pada penelitian ini seperti pada Gambar 3, properti dari ANFIS hanya mampu untuk menangani sistem dengan *multiple input* dan *single output*, maka digunakan tiga buah ANFIS untuk menangani pencarian  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$ .



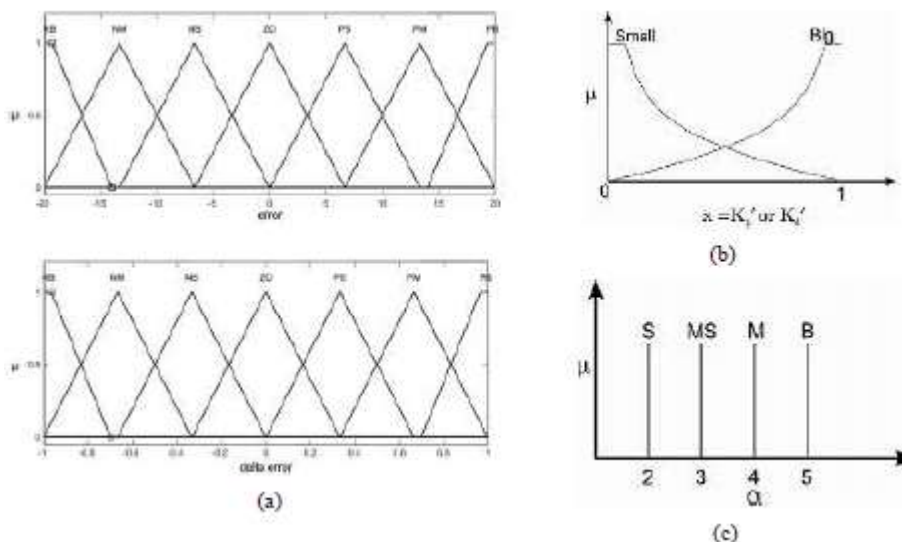
Gambar 3 Struktur ANFIS

Pada lapisan 1 terdapat proses fuzzifikasi *input*, yaitu proses merubah masukan *crisp* dari *error* dan *delta error* sistem kedalam derajat keanggotaan *fuzzy*, pada tahap ini fuzzifikasi melakukan perubahan dari masukan *crisp* kedalam *fuzzy set* yang memetakan masukan kedalam derajat keanggotaan *fuzzy*. Setelah fuzzifikasi selanjutnya adalah tahap *rule base inference* menggunakan *neural network* pada lapisan 2 dan lapisan 3. Defuzzifikasi dilakukan pada lapisan 4 menggunakan aturan fuzzy Sugeno dan adaptasi parameter *consequent* dilakukan berdasarkan nilai *normalized firing strength* pada lapisan 3. Lapisan 5 akan menjumlahkan seluruh keluaran dari lapisan 4 sebagai *output* dari ANFIS berupa nilai  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $\alpha$ .

Terdapat 2 ANFIS yang akan dibentuk pada penelitian ini, yaitu ANFIS inisial pada kendali ANFIS PID inisial dan ANFIS final pada kendali ANFIS PID final (kendali adaptif neuro fuzzy PID). Training data ANFIS inisial didapatkan dari input dan output fuzzy ( $e$ ,  $\Delta e$ ,  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $\alpha$ ) pada kendali fuzzy PID menggunakan fuzzy dari pakar [4]. Training data ANFIS final didapatkan dari input dan output fuzzy pada kendali fuzzy PID dimana nilai  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $\alpha$  telah dikalikan konstanta tertentu untuk mendapatkan kendali dengan respon optimal.

## 2. Implementasi Sistem Kendali Adaptif Neuro Fuzzy PID dengan Simulasi

Pada tahap simulasi, objek kendali yaitu kapal katamaran yang dimodelkan secara empiris menggunakan *system identification toolbox Matlab*. Untuk mencari training data ANFIS dibentuk fuzzy PID dengan fuzzy dari penelitian [4]. Fungsi dari keanggotaan fuzzy input dan output seperti pada Gambar 4. Tabel 1 merupakan fuzzy rule untuk  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $\alpha$ .



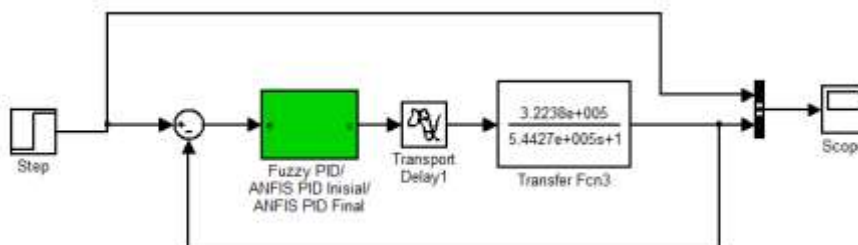
Gambar 4 (a) Fungsi keanggotaan input fuzzy, (b) Fungsi kenggtotaan output  $K_p'$  dan  $K_d'$ , (c) Fungsi keanggotaan output  $\alpha$

Tabel 1 Fuzzy rule untuk  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $\alpha$ .

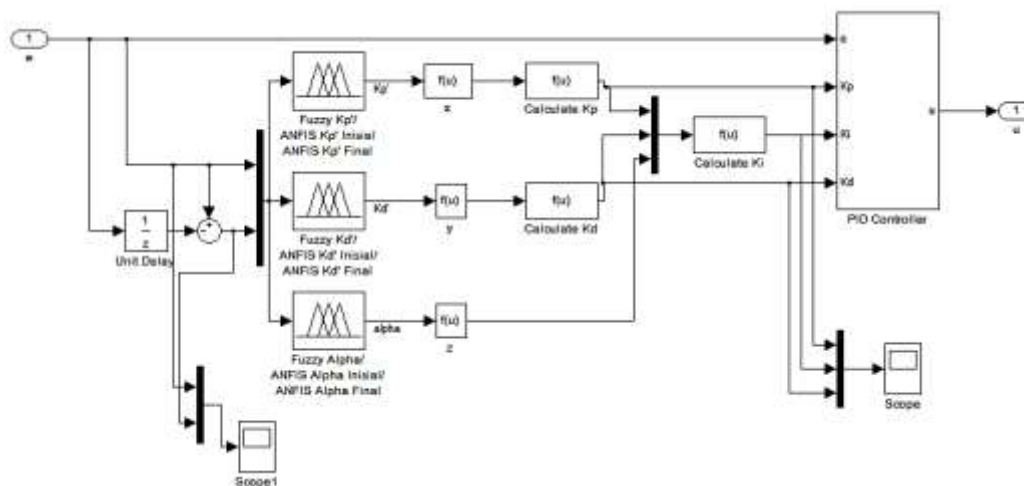
$K_p', K_d', \alpha$	error rate, $\Delta e(t)$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B,S,S	B,S,S	B,S,S	B,S,S	B,S,S	B,S,S	B,B,S
NM	S,B,MS	B,B,MS	B,S,S	B,S,S	B,S,S	B,B,MS	S,B,MS
NS	S,B,M	S,B,MS	B,B,MS	B,S,S	B,B,MS	S,B,MS	S,B,M
ZO	S,B,B	S,B,M	S,B,MS	B,B,MS	S,B,MS	S,B,M	S,B,B
PS	S,B,M	S,B,MS	B,B,MS	B,S,S	B,B,MS	S,B,MS	S,B,M
PM	S,B,MS	B,B,MS	B,S,S	B,S,S	B,S,S	B,B,MS	S,B,MS
PB	B,S,S	B,B,S	B,S,S	B,S,S	B,S,S	B,S,S	B,S,S

Gambar 5 merupakan blok diagram kendali dari tahap kendali fuzzy PID hingga kendali adaptif neuro fuzzy PID . *Transport delay* dan *transfer function* merepresentasikan model kapal katamaran.

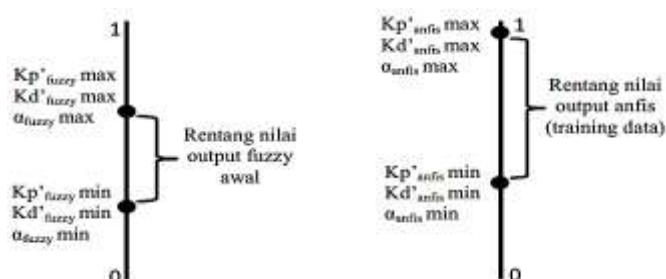
Gambar 6 merupakan blok diagram fuzzy PID/ ANFIS PID secara rinci. Pada saat mencari training data untuk ANFIS inisial nilai x, y, z adalah 1 dan fuzzy yang digunakan dari penelitian [4]. Kemudian data diakuisisi dan digunakan untuk pembentukan ANFIS  $K_p'$  inisial, ANFIS  $K_d'$  inisial dan ANFIS Alpha inisial. Pada saat kendali fuzzy PID disimulasikan dihasilkan performa kendali yang memiliki *settling time* lebih cepat daripada kendali PID, namun dengan persentase *overshoot* maksimum yang lebih besar, sehingga diperlukan training data yang baru untuk memperbaiki performa kendali.



Gambar 5 Blok diagram sistem kendali



Gambar 6 Blok diagram fuzzy PID /ANFIS PID



Gambar 7 Perubahan interval nilai output fuzzy

Proses pencarian training data untuk ANFIS final dengan mengatur nilai x, y dan z, sehingga diperoleh training data yang merepresentasikan sistem kendali dengan settling time cepat dan persentase maksimum overshoot kecil. Perubahan interval kontanta PID seperti Gambar 7. Dari proses tuning kendali optimal pada saat nilai  $x = 1,4$ ,  $y = 1,4$  dan  $z = 3,0$ . Pencarian training data ditunjukkan Tabel 2, dilakukan dengan mengatur nilai x, y, z secara bertahap hingga didapatkan respon terbaik. Nilai e,  $\Delta e$  serta  $Kp'$ ,  $Kd'$ ,  $\alpha$  yang sudah dikalikan dengan x, y, z, digunakan untuk pembentukan ANFIS final pada kendali ANFIS PID final.

Tabel 2 Data pencarian training data

No	x	y	z	Settling time (detik)	Overshoot (%)
1	0.60	1.00	1.00	3.55	44
2	0.70	1.00	1.00	3.40	44
3	0.80	1.00	1.00	3.30	44
4	0.90	1.00	1.00	3.15	43
5	1.00	1.00	1.00	3.05	43
6	1.10	1.00	1.00	2.95	43
7	1.20	1.00	1.00	2.85	43
8	1.30	1.00	1.00	2.75	43
9	1.40	1.00	1.00	2.65	43
10	1.40	0.60	1.00	2.50	44
11	1.40	0.70	1.00	2.55	43
12	1.40	0.80	1.00	2.55	43
13	1.40	0.90	1.00	2.60	43
14	1.40	1.00	1.00	2.65	43
15	1.40	1.10	1.00	2.70	42

Tabel 2 (lanjutan)

No	x	y	z	Settling time (detik)	Overshoot (%)
16	1.40	1.20	1.00	2.75	42
17	1.40	1.30	1.00	2.80	42
18	1.40	1.40	1.00	2.85	41
19	1.40	1.40	1.50	2.45	36
20	1.40	1.40	2.00	2.95	32
21	1.40	1.40	2.10	3.05	31
22	1.40	1.40	2.20	3.15	31
23	1.40	1.40	2.30	3.25	30
24	1.40	1.40	2.40	3.35	29
25	1.40	1.40	2.50	3.45	29
26	1.40	1.40	2.60	3.50	28
27	1.40	1.40	2.70	3.60	28
28	1.40	1.40	2.80	3.70	27
29	1.40	1.40	2.90	3.80	27
30	1.40	1.40	3.00	3.95	26

### 3. Implementasi Sistem Kendali Adaptif Neuro Fuzzy PID dengan Eksperimen

Proses ekeperimen yang dilakukan dengan langkah-langkah sama dengan simulasi, yaitu pembentukan kendali fuzzy PID, kendali ANFIS PID inisial dan ANFIS PID final. Algoritma kendali ditanamkan pada Arduino Due, menggunakan library fuzzy [11] untuk mengimplementasikan ANFIS. Eksperimen dilakukan di Laguna Pantai Samas Kabupaten Bantul. Kapal katamaran yang digunakan yaitu kapal katamaran Savinna seperti pada Gambar 8. Data pencarian training data untuk ANFIS final terdapat pada Tabel 3.



Gambar 8 kapal katamaran tanpa awak Savinna

Tabel 3 Data pencarian training data pada eksperien

No	x	y	z	Settling time (sec)				Overshoot Maks (%)			
				Ke-1	Ke-2	Ke-3	Rata-rata	Ke-1	Ke-2	Ke-3	Rata-rata
1	2.00	1.00	1.00	2.60	2.70	2.70	2.67	28.00	29.00	28.00	28.33
2	3.00	1.00	1.00	2.40	2.50	2.40	2.43	27.00	27.00	28.00	27.33
3	4.00	1.00	1.00	2.20	2.20	2.30	2.23	30.00	31.00	30.00	30.33
4	3.00	2.00	1.00	2.40	2.40	2.50	2.43	27.00	27.00	27.00	27.00
5	3.00	3.00	1.00	2.60	2.50	2.60	2.57	25.00	27.00	26.00	26.00
6	3.00	4.00	1.00	2.80	2.90	2.80	2.83	26.00	26.00	26.00	26.00
7	3.00	3.00	2.00	2.20	2.30	2.40	2.30	20.00	20.00	21.00	20.33
8	3.00	3.00	4.00	2.20	2.20	2.30	2.23	15.00	15.00	16.00	15.33
9	3.00	3.00	6.00	2.30	2.30	2.30	2.30	14.00	13.00	14.00	13.67
10	3.00	3.00	8.00	2.50	2.60	2.60	2.57	13.00	14.00	15.00	14.00

Dari proses pencarian data diperoleh data latih dengan kombinasi *settling time* dan persentase maksimum *overshoot* terbaik dengan mangalikan nilai  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan dengan  $x = 3,0$ ,  $y = 3,0$  dan  $z = 6,0$ .

## Hasil dan Pembahasan

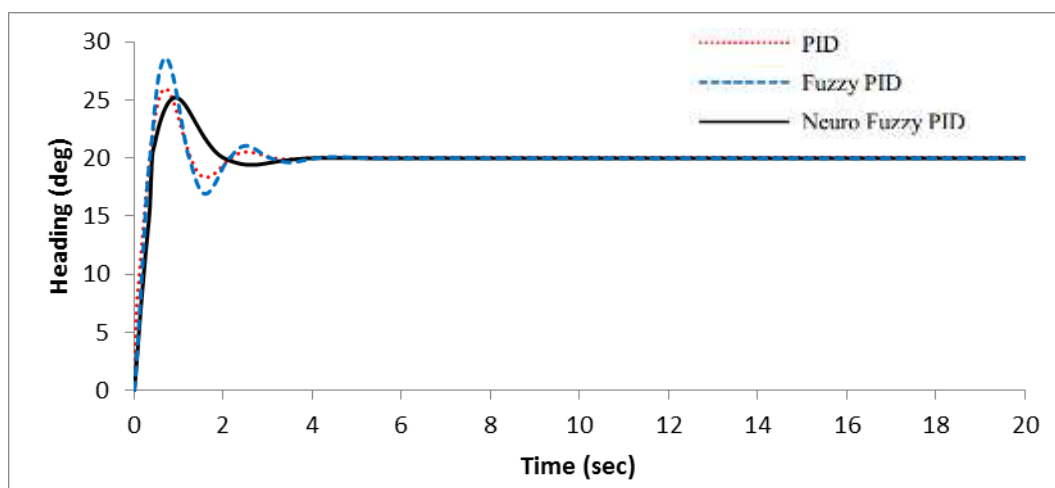
### 1. Simulasi

Pada simulasi dilakukan pengujian terhadap kendali PID, kendali fuzzy PID dan kendali adaptive neuro fuzzy PID. Pengujian dilakukan dengan memberikan setpoint kapal dengan arah  $0^\circ$ , kemudian diberi gangguan dengan simpangan sebesar  $20^\circ$  sesuai dengan saran dari International Maritime Organization (IMO) [5]. Parameter yang menjadi pembanding dari sistem kendali PID,

kendali fuzzy PID dan kendali ANFIS PID yaitu *settling time* dan persentase *overshoot* maksimum.

Gambar 9 dan Tabel 4 menunjukkan respon kendali dari hasil simulasi. Pada kendali PID, konstanta PID dihasilkan dengan proses penalaan Ziegler Nichols, konstanta PID pada kendali ini selalu konstan pada saat proses menuju kondisi stabil. *Settling time* kendali PID 4,3 detik dengan persentase *overshoot* maksimum 28%. Kendali fuzzy PID mempunyai respon pengendalian dengan *settling time* 4,1 detik dan *overshoot* maksimum 43%. Kendali fuzzy PID mempunyai *settling time* yang lebih cepat daripada kendali PID namun dengan persentase *overshoot* maksimum lebih besar, sehingga fuzzy yang digunakan untuk penalaan *gain* PID perlu dilakukan perbaikan agar diperoleh kendali dengan *settling time* cepat dan persentase *overshoot* maksimum kecil.

Dari proses tuning, diperoleh training data terbaik dengan nilai  $x = 1,4$ ,  $y = 1,4$  dan  $z = 3,0$ , sehingga interval nilai PID dapat bergeser. Nilai  $K_p$  akan menjadi lebih besar unruk mempercepat *settling time*, nilai  $K_d$  menjadi lebih besar untuk memperkecil persentase *overshoot* maksimum dan nilai  $K_i$  menjadi lebih kecil karena berbanding terbalik dengan nilai  $\alpha$  sehingga dapat meminimalisir terjadinya osilasi namun tetap tidak menimbulkan *steady state error*.



Gambar 9 Grafik respon kendali PID, kendali fuzzy PID dan kendali adaptif neuro fuzzy PID

Tabel 4 Respon kendali PID, kendali fuzzy PID dan kendali adaptif neuro fuzzy PID

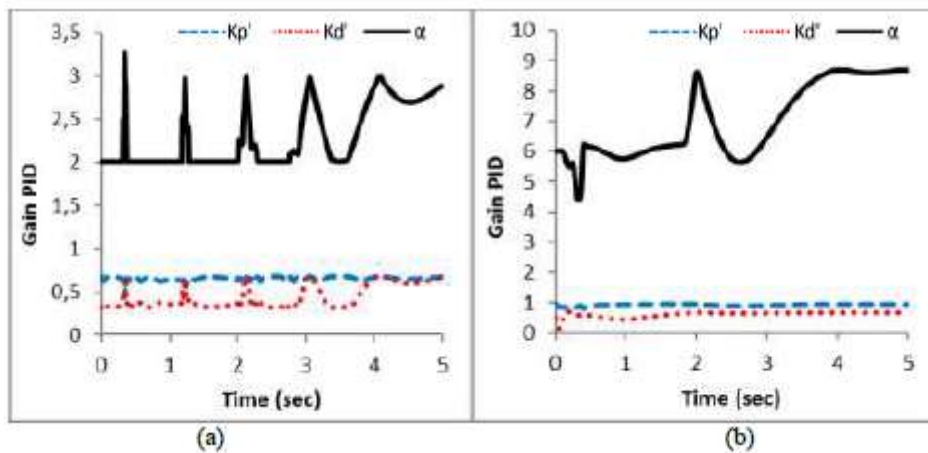
No	Jenis kendali	<i>Settling time</i>	Persentase <i>overshoot</i> maksimum
1	PID	4,3 detik	28%
2	Fuzzy PID	4,1 detik	43%
3	Neuro Fuzzy	3,9 detik	25%

Dari hasil simulasi terlihat bahwa respon kendali adaptif neuro fuzzy PID lebih baik dari pada kendali fuzzy PID dan kendali PID, baik dari segi *settling time* dan persentase *overshoot* maksimum. Dilihat dari jumlah osilasi yang terjadi sebelum mencapai *steady state*, kendali PID dan fuzzy PID terjadi tiga simpangan sebelum keadaan stabil dicapai, sedangkan pada kendali adaptif neuro fuzzy PID terjadi dua simpangan sebelum mencapai keadaan stabil. Hal ini menunjukkan kendali adaptif neuro fuzzy PID lebih efisien, karena tidak menimbulkan jumlah osilasi yang lebih banyak dibandingkan kendali PID dan kendali fuzzy PID.

Gambar 10 menunjukkan perubahan nilai  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $\alpha$  sesuai dengan perubahan error dan delta error, hal ini menunjukkan proses pengaturan/penjadwalan konstanta PID berjalan. Pada ANFIS

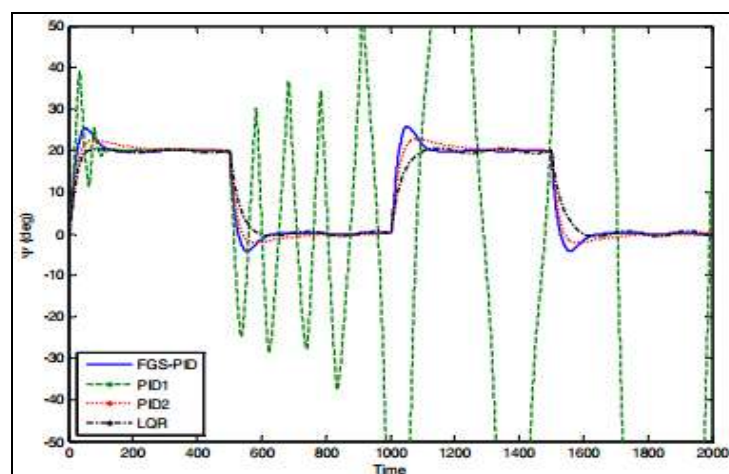


final interval nilai  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $\alpha$  lebih besar dari pada ANFIS inisial karena telah dilakukan pelatihan dengan *training data* baru. Terjadi pergeseran interval  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $\alpha$  setelah dilakukan pelatihan ANFIS. Nilai  $K_p'$  pada ANFIS final mendekati nilai 1 sehingga nilai  $K_p$  yang sering digunakan pada ANFIS final mendekati  $K_{p_{maks}}$  atau mendekati nilai  $K_p$  dari penalaan Ziegler Nichols, sehingga *settling time* ANFIS PID final lebih cepat. Nilai dari  $K_d'$  pada ANFIS final juga lebih besar daripada  $K_d'$  pada ANFIS inisial, sehingga persentase *overshoot* maksimum pada ANFIS PID final lebih kecil. Nilai  $\alpha$  pada ANFIS PID final lebih besar daripada nilai  $\alpha$  pada ANFIS inisial, sehingga nilai  $K_i$  akan menjadi lebih kecil karena berbanding terbalik dan jumlah osilasi sebelum mencapai *steady state* lebih kecil.



Gambar 10 (a) Grafik perubahan nilai  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $\alpha$  ANFIS inisial, (b) Grafik perubahan nilai  $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $\alpha$  ANFIS final

Gambar 11 menunjukkan grafik respon kendali FGS-PID (*fuzzy gain scheduling* – PID), PID1, PID2 dan LQR (*linear quadratic regulator*) pada simulasi pergerakan arah kapal (*heading*) dengan kondisi tanpa gangguan dari arus dan gelombang air pada penelitian [5]. PID1 merupakan kendali PID *trial-error*, sedangkan PID2 merupakan PID Ziegler-Nichols. *Fuzzy gain scheduling* PID yaitu penjadwalan konstanta PID secara mandiri dengan menggunakan fuzzy. *Settling time* tercepat yaitu FGS-PID, dibandingkan dengan yang lain, namun FGS-PID mempunyai nilai persentase *overshoot* maksimum yang lebih besar daripada PID2. Hal ini dikarenakan menggunakan fuzzy pada penelitian [4], namun *plant* yang dikendalikan berbeda sehingga diperlukan penyesuaian fuzzy untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal.

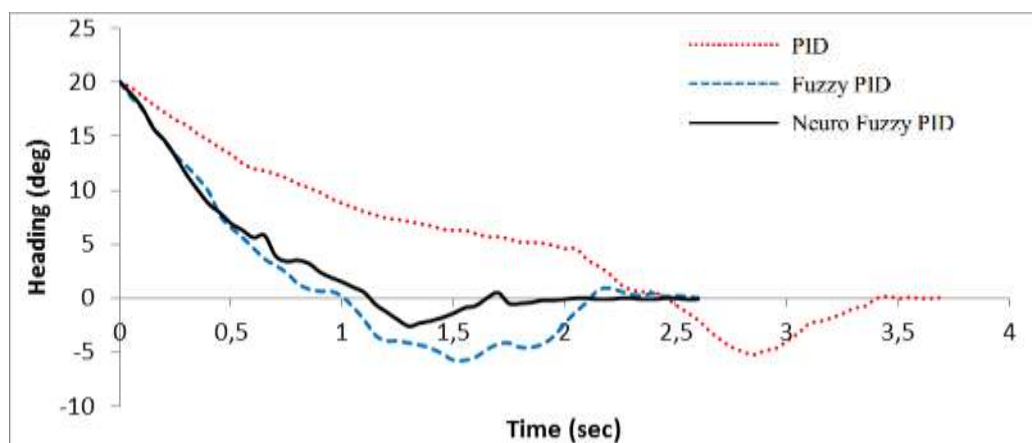


Gambar 11 Respon kendali PID, kendali FGS-PID dan kendali LQR

Fuzzy PID pada penelitian ini mempunyai karakteristik yang sama jika dibandingkan dengan FGS-PID dilihat dari perbandingan *settling time* dan persentase *overshoot* maksimum, karena mempunyai *settling time* yang lebih baik daripada PID Ziegler-Nichols namun mempunyai persentase *overshoot* maksimum yang lebih besar. Pada penelitian ini dilakukan pelatihan terhadap ANFIS inisial dengan *training data* baru sehingga diperoleh *settling time* yang lebih cepat dan persentase *overshoot* maksimum yang lebih kecil. Setelah dilakukan *training* maka didapatkan ANFIS final yang dipakai pada kendali ANFIS PID final yang mempunyai karakteristik *settling time* lebih cepat dan *overshoot* maksimum yang lebih kecil daripada kendali PID atau kendali fuzzy PID.

## 2. Eksperimen

Pengujian kendali kapal katamaran meliputi pengujian kendali PID, kendali fuzzy PID, dan kendali adaptif neuro fuzzy PID yang dilakukan di Laguna Pantai Samas Bantul Yogyakarta dengan kondisi arus dan gelombang air relatif tenang. Kapal diberi *setpoint* awal, kemudian saat kapal berjalan dengan kendali PID, kendali fuzzy PID atau kendali adaptif neuro fuzzy PID, kapal diberi gangguan dengan simpangan sebesar  $20^\circ$  dan dilihat respon untuk kembali ke *setpoint* awal.



Gambar 12 Grafik respon terbaik kendali PID, kendali fuzzy PID dan kendali adaptif neuro fuzzy PID hasil pengujian kapal katamaran

Tabel 5 Respon terbaik kendali PID, kendali fuzzy PID dan kendali adaptif neuro fuzzy PID hasil pengujian kapal katamaran

No	Jenis kendali	<i>Settling time</i>	Persentase <i>overshoot</i> maksimum
1	PID	3,4 detik	26%
2	Fuzzy PID	2,35 detik	29%
3	Neuro Fuzzy	2,1 detik	13%

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kendali adaptif neuro fuzzy PID mempunyai performa yang lebih baik dibandingkan dengan kendali PID dan kendali fuzzy PID dilihat dari *settling time* dan persentase maksimum *overshoot*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12 dan Tabel 5. Pada Gambar 12 terlihat bahwa kendali fuzzy PID dan kendali adaptif neuro fuzzy PID mempunyai respon yang hampir sama pada waktu 0-0,5 detik, namun setelah 0,5 detik pada kendali adaptif neuro fuzzy PID terjadi penurunan gain untuk menghindari terjadinya *overshoot* yang besar, sehingga pada saat terjadi *overshoot* nilainya tidak sebesar *overshoot* pada kendali fuzzy. Nilai

*overshoot* yang kecil akan mempercepat menuju pada kondisi stabil, sehingga *settling time* kendali adaptif neuro fuzzy PID lebih cepat.

Tabel 6 merupakan data hasil pengujian eksperimen dari sistem kendali PID, Fuzzy PID dan ANFIS PID atau adaptif neuro fuzzy PID. Pada Tabel 6 ditampilkan 10 data *settling time* dan persentase maksimum *overshoot* pada saat kapal diberi simpangan sejauh  $20^\circ$  untuk melihat tingkat presisi dari masing-masing sistem kendali yang diuji. Dari pengolahan data menunjukkan standar deviasi (SD) dan presentase standar deviasi (%SD), standar deviasi menunjukkan sebaran data atau simpangan baku. Presentase standar deviasi *settling time* dan *overshoot* maksimum kendali PID mempunyai persentase yang paling kecil yaitu 11,01% dan 14,77%, kendali ANFIS PID persentasenya paling besar yaitu 16,70% dan 23,31%, sedangkan fuzzy PID mempunyai presentase diantara keduanya yaitu 14,64% dan 19,33%. Data tersebut menunjukkan bahwa tingkat kepresisian kendali ANFIS PID lebih rendah daripada kendali PID maupun kendali ANFIS PID, karena mempunyai persentase standar deviasi yang besar yang merepresentasikan sebaran datanya besar.

Tabel 6 Hasil pengujian tingkat presisi respon kendali

Data ke-	<i>Settling time</i> (detik)			Persentase <i>Overshoot</i> Maks. (%)		
	PID	Fuzzy PID	Neuro Fuzzy PID	PID	Fuzzy PID	Neuro Fuzzy PID
1	3.50	2.60	2.40	27.00	28.00	15.00
2	3.40	2.40	2.30	29.00	27.00	14.00
3	3.70	2.55	2.10	27.00	29.00	13.00
4	3.40	2.35	2.25	26.00	29.00	12.00
5	3.50	2.40	2.15	26.00	33.00	14.00
6	3.65	2.50	2.20	27.00	28.00	14.00
7	3.55	2.70	2.30	30.00	32.00	15.00
8	3.75	2.35	2.15	29.00	29.00	13.00
9	3.40	2.45	2.35	27.00	29.00	14.00
10	3.45	2.35	2.30	27.00	31.00	15.00
<b>Rata-rata</b>	<b>3.53</b>	<b>2.47</b>	<b>2.25</b>	<b>27.50</b>	<b>29.50</b>	<b>13.90</b>
<b>SD</b>	<b>0.39</b>	<b>0.36</b>	<b>0.38</b>	<b>4.06</b>	<b>5.70</b>	<b>3.24</b>
<b>% SD</b>	<b>11.01</b>	<b>14.64</b>	<b>16.70</b>	<b>14.77</b>	<b>19.33</b>	<b>23.31</b>

## Kesimpulan

1. Sistem kendali adaptif neuro fuzzy PID mempunyai performa yang lebih baik daripada kendali PID maupun kendali fuzzy PID dilihat dari *settling time* dan persentase *overshoot* maksimum, berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen dengan kapal katamaran.
2. Simulasi kendali adaptif neuro fuzzy PID menghasilkan *settling time* 3,9 detik dan *overshoot* maksimum 25%, sedangkan dari eksperimen menghasilkan *settling time* 2,1 detik dan *overshoot* maksimum 13%.
3. Training data untuk ANFIS pada kendali adaptif neuro fuzzy PID menentukan karakteristik kendali.
4. Proses tuning untuk mendapatkan *training data* baru dilakukan dengan mengalikan nilai output masing-masing fuzzy PID ( $K_p'$ ,  $K_d'$  dan  $\alpha$ ) dengan konstanta tertentu mampu menghasilkan *training data* yang efektif dan dapat memperbaiki performa kendali.

5. Tingkat presisi kendali adaptif neuro fuzzy PID lebih rendah dibandingkan kendali fuzzy PID dan kendali PID, berdasarkan hasil pengujian.

## Saran

Pada eksperimen penelitian ini terdapat kelemahan dalam tingkat presisi dari kendali adaptif neuro fuzzy PID, untuk penelitian selanjutnya dapat mencari metode untuk memperbaiki tingkat presisi dari sistem kendali.

## Daftar Pustaka

- [1] Li, Z., Hu, J., Huo, X., 2012, PID Control Based on RBF Neural Network for Ship Steering, *IEEE (978-1-4673-4805-8/12)*.
- [2] Goodwin, G. C., Graebe, S. F., Salgado, M. E., 2009, *Control System Design*, Pearson Education, Australia.
- [3] Doren, V.V., 2010, *How Gain Scheduling Works*, <http://www.controleng.com/search/search-single-display/back-to-basics-how-gain-scheduling-works/52cd5aac6a456dfb6b1352494e4dd169.html>, diakses pada 26 Juli 2016.
- [4] Zhao, Z.Y., Isaka, S., 1993, Fuzzy Gain Scheduling of PID Controller, *IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics*, Vol. 23, No. 5, September/October 1993.
- [5] Santoso, M.Y., Su, S.F., Aisjah, A.S., 2013, Nonlinear Rudder Roll Stabilization using Fuzzy Gain Scheduling – PID Controller for Naval Vessel, *Proceedings of 2013 International Conference on Fuzzy Theory and Its Application National Taiwan University of Science and Technology*, Taipei, Taiwan, Dec. 6-8, 2013
- [6] Yunsheng, F., Xiaojie, S., Guefeng, W., Chen, G., 2015, On Fuzzy Self-adaptive PID Control for USV Course, *Proceedings of the 34th Chinese Control Conference*, China.
- [7] Lakshmi, K.V., Nabi, M., 2012, An Adaptive Neuro-Fuzzy Control Approach for Motion Control of a Robot Arm, *IEEE/OSA/IAPR International Conference on Informatics, Electronics & Vision*, New Delhi.
- [8] Jacomini, R.V., Rocha, C.M., Altuna, J.A.T., Azcue, J.L., Capovilla, C.E., Filho, A.J.S., 2014, Implementation of a Neuro-Fuzzy Direct Torque and Reactive Power Control for DFIM, *IEEE (978-1-4799-4032-5-15)*.
- [9] Ziegler, J. G., Nichols, N. B., 1942, Optimum Settings for Automatic Controllers, *Trans. ASME*, vol. 64, pp. 759-768.
- [10] Skogestad, S., 2006, Tuning for Smooth PID Control with Acceptable Disturbance Rejection, *Ind. Eng. Chem. Res.* 45, 7817–7822.
- [11] Zerokol, 2012, *eFLL - A Fuzzy Library for Arduino and Embeded Systems*, <http://www.zerokol.com/2012/09/arduinofuzzy-fuzzy-library-for-arduino.html>, diakses pada tanggal 10 Mei 2016