

# DESAIN SISTEM KONTROL FUZZY MODEL REFERENCE LEARNING CONTROL (FMRLC) STUDI KASUS: PENGONTROLAN KETINGGIAN AIR PADA CONICAL TANK

M Arif Syukur D<sup>\*)</sup>, Aris Triwiyatno, and Wahyudi

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang  
Jl. Prof Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

<sup>\*)</sup>Email: *muh.arif.sd@gmail.com*

## Abstrak

FMRLC merupakan modifikasi metode fuzzy logic control (FLC) dan model reference adaptive control (MRAC), yaitu FLC yang memiliki sebuah "sistem pembelajaran" untuk meningkatkan kinerjanya dari waktu ke waktu ketika berinteraksi dengan lingkungannya. Kontroler tersebut telah banyak digunakan untuk mengontrol sistem-sistem nonlinear. Proses perancangan FMRLC memerlukan empat bagian utama: plant, fuzzy controller untuk diatur, model referensi, dan mekanisme pembelajaran (mekanisme adaptasi). Pada penelitian ini, algoritma adaptasi dilakukan dengan menggunakan FLC yang bertindak sebagai penyedia parameter adaptasi, yaitu Fuzzy Inverse Model (FIM). Tujuan dari proses pembelajaran FMRLC adalah meminimalkan error yang terjadi ketika menggunakan kontroler fuzzy Sugeno. Berdasarkan pengujian yang dilakukan dengan menerapkan FMRLC dan FLC pada plant conical tank, untuk perubahan setpoint, diketahui bahwa respon sistem dengan FMRLC memiliki waktu konstan yang lebih cepat dibanding FLC. Ketika mendapat gangguan eksternal, FMRLC dapat mempertahankan performa sistem pada setpoint.

*Kata kunci : FMRLC, model reference adaptive control, fuzzy logic controller, fuzzy inverse model*

## Abstract

FMRLC is a modification of fuzzy logic control (FLC) and model reference adaptive control (MRAC), it can be interpreted with FLC which has a "learning system" to improve its performance over time by interacting with environment. That's controller had been used to control many nonlinear system. To design FMRLC, need four main part : plant, fuzzy controller to be tuning, model reference, and learning mechanism (adaptation mechanism). In this research, the adaptation algorithm use FLC to produce adaptive parameter, that is Fuzzy Inverse Model (FIM). The purpose of FMRLC learning process is to reduce the fuzzy Sugeno system's error. Based on setpoint changes testing that performed by applying FMRLC and FLC on conical tank plant, FMRLC system response has faster constant time than FLC system response. Similarly, when system gets an external disturbance, FMRLC can maintain system performance at setpoint.

*Keyword : FMRLC, model reference adaptive control, fuzzy logic controller, fuzzy inverse model*

## 1. Pendahuluan

Sejak kemunculan teori sistem kendali, para ilmuwan di bidang kendali bekerja keras untuk mengembangkan teori dan teknik baru untuk menjaga kestabilan dan performa sistem agar memiliki hasil memuaskan dengan jalan memberikan kondisi operasi untuk pengendalian[1]. Selama beberapa tahun terakhir kontrol *fuzzy* telah muncul sebagai alternatif praktis untuk skema kontrol klasik ketika seseorang yang tertarik dalam mengendalikan *certain time-varying*, non-linear, dan *illdefined process*[2]. Kontrol *fuzzy* memiliki keunggulan dalam menangani dinamika yang tidak pasti dengan

menyediakan kemampuan penalaran manusia. Model *fuzzy* Takagi-Sugeno (TS) baru-baru ini menjadi metode yang ampuh untuk pemodelan dan pengendalian sistem *nonlinier* tak tentu[3].

Kontrol *fuzzy* memiliki sejumlah besar aplikasi dalam industri seperti transportasi, peralatan rumah, otomotif, dan keamanan[5]. Namun, sebagai alternatif pengganti metode pengendalian konvensional, ada beberapa kelemahan yang membatasi penggunaan kontrol *fuzzy*, antara lain :

1. Banyak waktu yang dibutuhkan untuk menemukan aturan karena sering dicari dengan metode *trial-error*. Selain itu mengalami kesulitan untuk sistem yang kompleks[1][4][5].
2. Desain kontroler *fuzzy* biasanya dilakukan secara *ad hoc*, oleh karena itu sering tidak jelas secara pasti bagaimana untuk membenarkan pilihan bagi banyak parameter dalam kontroler *fuzzy* (misalnya, fungsi keanggotaan, strategi defuzzifikasi, dan strategi inferensi *fuzzy*) [1][5][6].
3. Kontroler *fuzzy* yang dibangun untuk *plant* tertentu, mungkin tidak memadai jika terjadi variasi parameter *plant* yang signifikan, perubahan struktural, atau terjadi gangguan lingkungan[2][5][6].

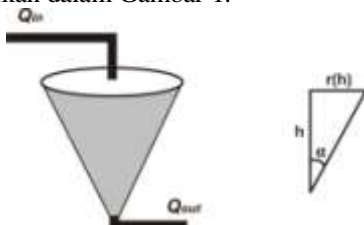
Desain pengendali adaptif yang stabil untuk sistem *nonlinear* merupakan topik hangat dalam bidang pengendalian dan banyak pendekatan telah diusulkan untuk menangani masalah ini. Di antara pendekatan-pendekatan yang ada, kontrol *fuzzy* adaptif telah mengalami perkembangan pesat[3][6]. Baru-baru ini, metodologi kendali *fuzzy* adaptif telah digunakan untuk menghadapi permasalahan dari model tak tentu dan penyesuaian terhadap gangguan[1].

Dalam penelitian ini, disajikan algoritma kontrol "*learning*" yang membantu untuk menyelesaikan beberapa masalah desain kontroler *fuzzy*. Algoritma ini menggunakan model referensi (model *plant* yang berperilaku seperti yang diinginkan) untuk memberikan umpan balik kinerja *close loop* untuk melakukan pengaturan pada *knowledge-base* kontroler *fuzzy*. Oleh karena itu, algoritma ini disebut sebagai "*Fuzzy Model Reference Learning Control*" (FMRLC)[7][8]. FMRLC merupakan kombinasi antara FLC dan MRAC. Algoritma FMRLC akan digunakan untuk merancang dan menyesuaikan *rule-base* kontroler *fuzzy* dalam sistem pengontrolan ketinggian air pada *conical tank*.

## 2. Metode

### 2.1 Pemodelan *Plant Conical Tank*

Sistem dasar *plant* yang digunakan adalah sistem tingkat carian pada *conical tank*[18][19], sistem dapat direpresentasikan dalam Gambar 1.



Gambar 1. *Conical tank*

*Plant* yang ditunjukkan oleh Gambar 1 memiliki spesifikasi dengan tinggi dari tangki air 1 meter dan sudut  $\alpha = 20^\circ$ . Aliran masuk ( $Q_{in}$ ) adalah masukan kontrol ke

sistem dan keluarannya adalah ketinggian air ( $h$ ). Dalam kasus ini,  $Q_{in}$  dikontrol secara langsung dan perubahan yang tiba-tiba dari arus akan membawa efek secara cepat.  $Q_{out}$  merupakan aliran keluar, dalam hal ini  $Q_{out}$  tidak dikontrol, tetapi terkait dengan tekanan hidrostatik. Dalam *conical tank* ini alirannya bersifat turbulen, sehingga  $Q_{out}$  dapat dirumuskan

$$Q_{out} = k_{out} \sqrt{h} \quad (1)$$

dengan  $k_{out}$  adalah konstanta yang mempunyai besaran  $6 \times 10^{-3} \text{ m}^{5/2}/\text{menit}$ [18][19].

Berdasarkan rumus volume kerucut pada ketinggian air  $h$ , volume air adalah

$$V(h) = \frac{1}{3} \pi r(h)^2 h = \left[ \frac{1}{3} \pi \tan^2 \alpha \right] h^3 \quad (2)$$

$r(h)$  adalah jari-jari dari tangki pada ketinggian air  $h$ ,

$$\tan \alpha = \frac{r(h)}{h} \quad (3)$$

Aliran masuk dikurangi aliran keluar selama selang waktu  $dt$  kecil, sama dengan jumlah tambahan air pada tangki, diperoleh :

$$\frac{\Delta V(h)}{dt} = Q_{in} - Q_{out} = Q_{in} - k_{out} \sqrt{h} \quad (4)$$

Jumlah tambahan air pada selang waktu  $dt$  yang kecil sama dengan turunan dari volume air, sehingga diperoleh:

$$\frac{\Delta V(h)}{dt} = \frac{dV(h)}{dt} = \left[ \frac{1}{3} \pi \tan^2 \alpha \right] \frac{dh^3}{dt} = \left[ \pi \tan^2 \alpha \right] h^2 \frac{dh}{dt} \quad (5)$$

Dari persamaan (4) dan persamaan (5) dapat dituliskan

$$\left[ \pi \tan^2 \alpha \right] h^2 \frac{dh}{dt} = Q_{in} - k_{out} \sqrt{h} \quad (6)$$

dari persamaan (6) dapat dibentuk persamaan *conical tank*, yaitu :

$$h = \frac{dh}{dt} = f(h, Q_{in})$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\pi \tan^2 \alpha} h^{-2} Q_{in} - \frac{k_{out}}{\pi \tan^2 \alpha} h^{-3/2}$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\pi r(h)^2} Q_{in} - \frac{k_{out}}{\pi r(h)^2} \sqrt{h} \quad (7)$$

Persamaan *plant* yang ditunjukkan oleh persamaan (7) adalah persamaan *plant* dalam bentuk *nonlinear* dan *time varying* karena dengan melihat bentuk parameter-parameter *plant* yang berubah-ubah yaitu jari-jari yang berubah terhadap ketinggian cairan[18].

### 2.2 Metode Kontrol *Fuzzy Sugeno*

Model *fuzzy* Sugeno (dikenal juga dengan model *fuzzy* TSK) diusulkan oleh Takagi, Sugeno, dan Kang. Tidak seperti aturan *fuzzy* Mamdani, aturan TSK menggunakan fungsi dari variabel *input* sebagai konsekuensi aturan[14]. Model ini merupakan pendekatan sistematis pembangkit aturan *fuzzy* dari himpunan data masukan dan keluaran yang diberikan[14][18]. Aturan *fuzzy* berbentuk:

$$\text{IF } x \text{ is } A \text{ AND } y \text{ is } B \text{ THEN } z = f(x, y) \quad (8)$$

dengan A dan B adalah himpunan *fuzzy* dalam *antecedent* dan  $z = f(x, y)$  adalah fungsi tegas dalam konsekuensi. Biasanya  $f(x, y)$  adalah *polynomial* dalam variabel x dan y. Karakteristik dari *fuzzy* Sugeno adalah bagian

konsekuennya bukan merupakan himpunan fuzzy, melainkan suatu persamaan linear dengan variabel-variabel sesuai dengan variabel-variabel masukannya[14][15].

Ada 2 model untuk sistem inferensi fuzzy model TSK, yaitu model TSK orde-0 dan model orde-1[14][15]

1. Model Fuzzy Sugeno orde-0

$$\text{IF } (x_1 \text{ is } A_1) \bullet (x_2 \text{ is } A_2) \bullet (x_3 \text{ is } A_3) \bullet \dots \bullet (x_n \text{ is } A_n) \text{ THEN } z = k \quad (9)$$

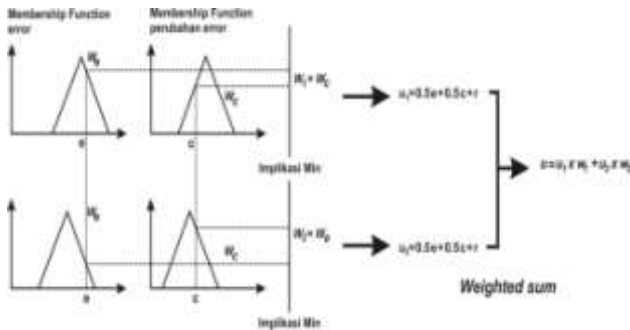
Bila  $f(x,y)$  polynomial orde-0,  $f$  adalah konstan, dengan  $A_n$  adalah himpunan fuzzy ke- $n$  sebagai antecedent,  $\bullet$  adalah operator fuzzy (seperti AND atau OR), dan  $k$  adalah suatu konstanta (tegas) sebagai konsekuen.

2. Model Fuzzy Sugeno orde-1

$$\text{IF } (x_1 \text{ is } A_1) \bullet \dots \bullet (x_n \text{ is } A_n) \text{ THEN } z = p_1 \cdot x_1 + \dots + p_n \cdot x_n + q \quad (10)$$

$A_n$  adalah himpunan fuzzy ke- $n$  sebagai antecedent,  $\bullet$  adalah operator fuzzy (seperti AND atau OR), dan  $p_i$  adalah suatu konstanta tegas ke- $i$  dan  $q$  juga merupakan konstanta dalam konsekuen.

Gambar 2 merupakan tampilan dari inferensi fuzzy model Sugeno. Input yang digunakan merupakan himpunan fuzzy sedangkan bagian output merupakan keluaran yang berupa persamaan linear.

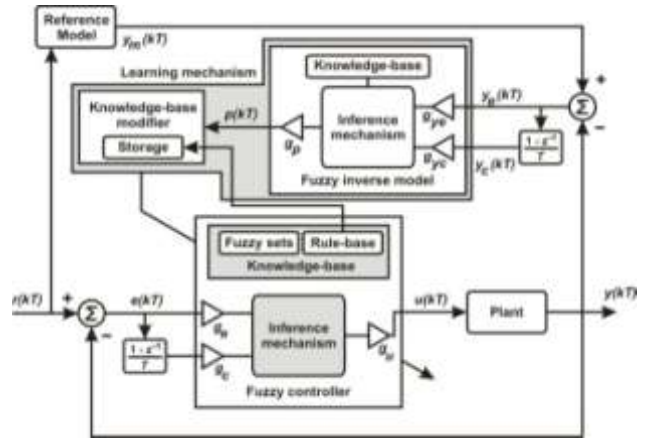


Gambar 2. Inferensi fuzzy model Sugeno[19].

2.3 Metode Fuzzy Model Reference Learning Control (FMRLC)

FMRLC merupakan perpaduan antara fuzzy logic control (FLC) dan model reference adaptive controller (MRAC)[17][20]. Dalam FMRLC, istilah "learning" digunakan sebagai pengganti "adaptif" karena FMRLC tidak hanya menyesuaikan parameter membership function (fungsi keanggotaan), tetapi juga mengingat nilai yang telah diatur sebelumnya[12][17]. Oleh karena itu, dalam beberapa aplikasi ketika FMRLC dirancang secara tepat untuk kondisi operasi yang sering terjadi, FMRLC akan tahu bagaimana cara mengontrol untuk kondisi tersebut.

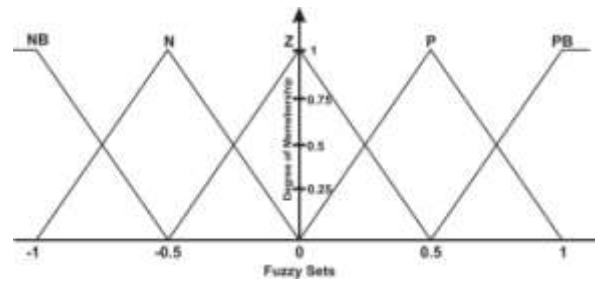
Fungsional diagram blok untuk FMRLC ditunjukkan pada Gambar 3. FMRLC memiliki empat bagian utama: plant, kontroler fuzzy untuk diatur, model referensi, dan mekanisme pembelajaran (mekanisme adaptasi).



Gambar 3. Skema FMRLC<sup>[6][9][12][17]</sup>.

2.3.1 Kontroler Fuzzy

Fuzzy yang dirancang merupakan kendali fuzzy dengan aturan Sugeno, terdiri dari dua input, yaitu error dan perubahan error, dan satu output, yaitu perubahan sinyal kontrol. Jumlah fungsi keanggotaan yang digunakan adalah 5 buah yaitu NB, N, Z, P, dan PB. Struktur fungsi keanggotaan fuzzy ini ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 4. Struktur fungsi keanggotaan pada FLC

Pada FLC ini digunakan 25 buah rule-base. Bentuk aturan dasar yang diterapkan adalah

$$\text{If } e \text{ is } E^j \text{ and } c \text{ is } C^l \text{ Then } u \text{ is } U^m \quad (11)$$

Fungsi output untuk fuzzy Sugeno ditunjukkan pada persamaan (12).

$$u = ax_1 + bx_2 + r \quad (12)$$

Rule-Base yang digunakan ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Rule-base fuzzy logic controller

If-Then Rule	Perubahan Error (c)					
	NB	N	Z	P	PB	
Error (e)	NB	UR1	UR2	UR3	UR4	UR5
	N	UR6	UR7	UR8	UR9	UR10

Z	UR11	UR12	UR13	UR14	UR15
P	UR16	UR17	UR18	UR19	UR20
PB	UR21	UR22	UR23	UR24	UR25

**2.3.2 Model Referensi**

Model referensi dirancang dengan ketentuan sebagai model yang mengkuantifikasi kinerja yang diinginkan [12][17]. Model referensi yang digunakan dalam penelitian ini merupakan persamaan kontinyu *close-loop* dalam fungsi *laplace* orde satu. Persamaan yang digunakan adalah persamaan dengan bentuk sebagai berikut

$$model\ referensi = \frac{y_m}{r} = \frac{a}{s+a} \tag{13}$$

Konstanta *a* dipilih dengan mempertimbangkan hasil respon sistem dari dua *setpoint* berbeda, dengan menunjukkan nilai IAE yang lebih kecil dan waktu menetap yang lebih cepat dari respon *fuzzy* Sugeno. Pertimbangan tersebut karena model referensi menjadi acuan perbaikan *fuzzy* Sugeno.

**2.3.2 Mekanisme Pembelajaran**

Mekanisme pembelajaran (*learning mechanism*) merupakan sebuah fungsi yang melakukan *tuning* pada *rule-base* dari kendali *fuzzy* sehingga sistem *close-loop* berperilaku seperti model referensi [12][17]. Mekanisme pembelajaran terdiri dari dua bagian utama, yaitu *fuzzy inverse model* dan *knowledge-base modifier*.

a. *Fuzzy Inverse Model*

*Fuzzy inverse model* merupakan sebuah kendali yang serupa dengan kendali *fuzzy* biasa, hanya saja hasil keluarannya akan menjadi variabel yang akan merubah *rule* dari kontroler *fuzzy* yang digunakan dalam FMRLC. *Fuzzy inverse model* yang dirancang memiliki dua *input*, yaitu  $y_e(kT)$ , yang merupakan *error* selisih dari *output plant* dan *output model reference*, dan  $y_c(kT)$ , yang merupakan perubahan *error* dari  $y_e(kT)$ . Perancangan *fuzzy inverse model* memiliki struktur yang sama dengan kendali *fuzzy* yang digunakan sebagai kontroler.

b. *Knowledge-base modifier*

Perancangan *knowledge-base modifier* berdasarkan persamaan (14).

$$r(kT) = r(kT - T) + p(kT) \tag{14}$$

dimana  $r(kT)$  adalah konstanta pada fungsi *output fuzzy* Sugeno pada persamaan (12). Inisialisasi awal untuk  $r(kT - T)$  pada fungsi *output fuzzy* bernilai nol. Dengan menyubstitusikan persamaan (14) ke persamaan (12) diperoleh persamaan (15).

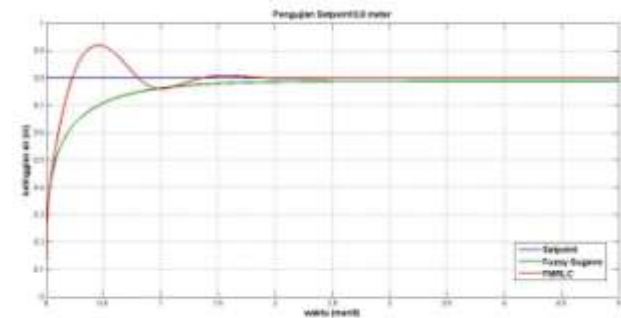
$$u(kT) = ax_1(kT) + bx_2(kT) + r(kT - T) + p(kT) \tag{15}$$

Dengan demikian, fungsi *output* pada *rule fuzzy* Sugeno telah mengalami adaptasi yang ditunjukkan pada perubahan persamaan (12) menjadi persamaan (15).

**3. Hasil dan Analisis**

**3.1 Pengujian terhadap Setpoint Normal**

Pengujian terhadap *setpoint* normal dilakukan dengan memberikan masukan sistem berupa sinyal referensi dengan nilai *setpoint* sebesar 0,2 m, 0,4 m, 0,6 m, dan 0,8 m. Respon sistem terhadap pengujian *setpoint* normal 0,8 m ditunjukkan pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Respon sistem ketinggian air *conical tank* SP=0,8 m

Respon sistem dengan pengujian *setpoint* normal dirangkum dalam Tabel 2.

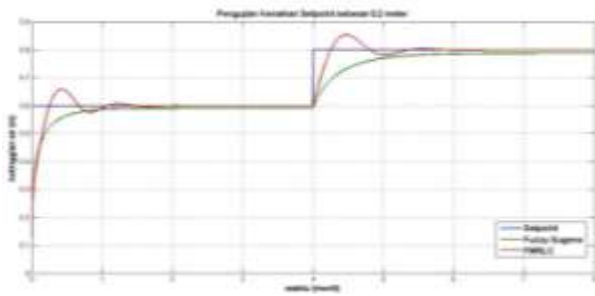
**Tabel 2.** Perbandingan respon sistem pengujian *setpoint* normal

Setpoint (m)	Fuzzy Sugeno		FMRLC	
	Waktu menetap (menit)	IAE	Waktu menetap (menit)	IAE
0,2	0,204	0,02813	0,349	0,00535
0,4	1,008	0,05345	1,509	0,02
0,6	2,455	0,1017	2,606	0,05682
0,8	3,911	0,1862	3,447	0,1093

Dari Tabel 2, dapat diketahui bahwa respon sistem dengan FMRLC mencapai waktu menetap lebih lambat dari pada *fuzzy* Sugeno. Dilihat dari nilai *Integral Area Error* (IAE), nilai IAE dengan kontroler FMRLC lebih kecil dibandingkan IAE dengan *fuzzy* Sugeno, hal ini karena respon *fuzzy* Sugeno masih mempunyai *steady state error*.

**3.2 Pengujian terhadap Setpoint Naik**

Pengujian terhadap *setpoint* naik dilakukan dengan memberikan masukan sistem berupa sinyal *step* sebagai penjumlahan dengan nilai *setpoint* dinaikkan sebesar 0,1 m, 0,2 m, dan 0,3 m dari *setpoint* normal 0,6 m. Dari pengujian dengan kenaikan *setpoint*, didapatkan hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 6, dengan kenaikan *setpoint* 0,2 m.



Gambar 6. Respon sistem ketinggian air conical tank setpoint naik

Respon sistem dengan pengujian terhadap setpoint naik dirangkum dalam Tabel 3.

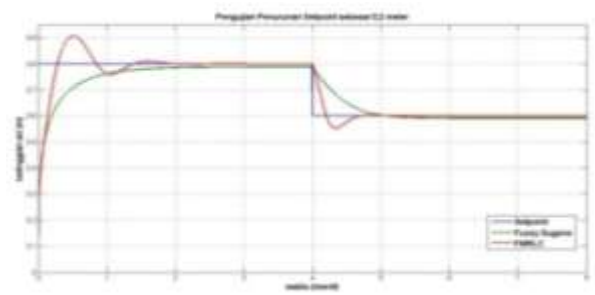
Tabel 3. Perbandingan respon sistem pengujian setpoint naik.

Kenaikan Setpoint (m)	Fuzzy Sugeno		FMRLC	
	Waktu menetap (menit)	IAE	Waktu menetap (menit)	IAE
0,1	1,735	0,1659	1,569	0,07821
0,2	2,28	0,2133	1,893	0,1034
0,3	2,612	0,2734	2,114	0,1318

Dari Tabel 3, dapat diketahui bahwa respon sistem ketinggian air dengan FMRLC mencapai waktu menetap lebih cepat dari pada kontroler fuzzy Sugeno. Dilihat dari nilai IAE pada sistem, nilai IAE dengan kontroler FMRLC lebih kecil dibandingkan IAE dengan kontroler fuzzy Sugeno, hal ini karena respon fuzzy Sugeno masih mempunyai steady state error.

### 3.3 Pengujian terhadap Setpoint Turun

Pengujian terhadap setpoint turun dilakukan dengan memberikan masukan sistem berupa sinyal step sebagai pengurang dengan nilai setpoint diturunkan sebesar 0,1 m, 0,2 m, dan 0,3 m dari setpoint normal 0,8 m. Dari pengujian dengan penurunan setpoint, didapatkan hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 7, dengan kenaikan 0,2 m.



Gambar 7. Respon system ketinggian air conical tank setpoint turun

Respon sistem dengan pengujian terhadap setpoint turun dirangkum dalam Tabel 4.

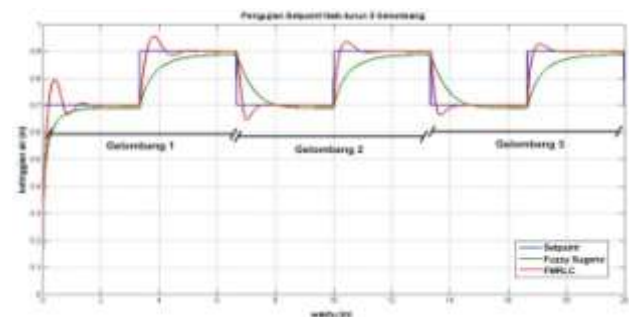
Tabel 4. Perbandingan respon sistem pengujian setpoint turun.

Penurun-an Setpoint (m)	Fuzzy Sugeno		FMRLC	
	Waktu menetap (menit)	IAE	Waktu menetap (menit)	IAE
0,1	1,822	0,2321	1,275	0,1282
0,2	1,598	0,2652	0,964	0,1415
0,3	1,336	0,2911	0,802	0,152

Dari Tabel 4.3, dapat diketahui bahwa respon sistem ketinggian air dengan FMRLC mencapai waktu menetap lebih cepat dibandingkan fuzzy Sugeno. Dilihat dari nilai IAE pada sistem, nilai IAE dengan kontroler FMRLC lebih kecil dibandingkan IAE dengan fuzzy Sugeno, hal ini karena respon fuzzy Sugeno masih mempunyai steady state error.

### 3.4 Pengujian terhadap Setpoint Naik-Turun

Pengujian terhadap setpoint naik-turun dilakukan dengan memberikan masukan referensi berupa sinyal gelombang kotak dengan nilai setpoint naik-turun sebesar 0,2 m. Dari pengujian, didapatkan hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Respon system ketinggian air conical tank setpoint naik-turun

Respon system dengan pengujian terhadap setpoint naik-turun dirangkum dalam Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan respon sistem pengujian setpoint naik-turun

Percobaan	Kontroler	
	FMRLC	Fuzzy Sugeno
2 gel	- Overshoot gelombang 1	0,0554 m
	- Over shoot gelombang 2	0,0347 m
	- IAE =	0,2014
3 gel	- Overshoot gelombang 1	0,0555 m
	- Over shoot gelombang 2	0,0346 m
	- IAE =	0,7393

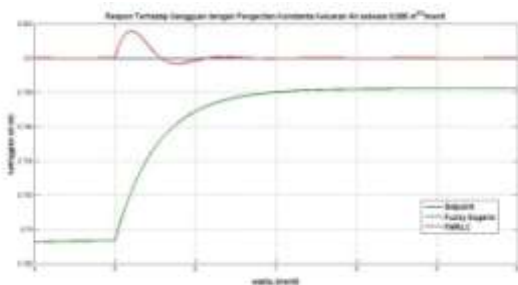


4 gel	- <i>Over shoot</i> gelombang 3 0,0259 m	Tidak mencapai setpoint
	- IAE = 0,2575	
	- <i>Overshoot</i> gelombang 1 0,0553 m	
	- <i>Over shoot</i> gelombang 2 0,0347 m	
	- <i>Over shoot</i> gelombang 3 0,0259 m	
5 gel	- <i>Over shoot</i> gelombang 4 0,0207 m	IAE = 0,8978
	- IAE = 0,3054	
	- <i>Overshoot</i> gelombang 1 0,0558 m	
	- <i>Over shoot</i> gelombang 2 0,0347 m	
	- <i>Over shoot</i> gelombang 3 0,0258 m	Tidak mencapai setpoint
	- <i>Over shoot</i> gelombang 4 0,0207 m	IAE = 1,045
	- <i>Over shoot</i> gelombang 5 0,0171 m	
	- IAE = 0,3492	

Dari Tabel 5, dapat diketahui bahwa respon sistem dengan FMRLC mampu memperbaiki responnya untuk proses yang sama, hal ini ditunjukkan oleh berkurangnya nilai *over shoot error*. Dilihat dari nilai IAE pada sistem, nilai IAE dengan kontroler FMRLC lebih kecil dibanding IAE dengan *fuzzy* Sugeno, hal ini karena respon *fuzzy* Sugeno belum mencapai *setpoint*.

### 3.5 Pengujian terhadap Gangguan

Pengujian terhadap gangguan dilakukan pada sistem dengan *setpoint* 0,8 m yang mengalami penyempitan saluran keluar air. Gangguan semacam ini dianalogikan sebagai endapan yang menumpuk di saluran keluar air. Gangguan dilakukan dengan memberikan aksi berupa sinyal *step* sebagai pengurang yang membuat konstanta *output* pada *plant* berkurang. Respon sistem ditampilkan pada Gambar 9.



Gambar 9 Respon sistem ketinggian air *conical tank* dengan gangguan

Dari Gambar 9, respon sistem *fuzzy* Sugeno tidak mencapai *setpoint*, baik sebelum maupun sesudah terjadi gangguan. Respon dari *fuzzy* Sugeno memperlihatkan bahwa kontroler *fuzzy* Sugeno tidak mampu menangani gangguan yang terjadi. Berbeda dengan FMRLC, respon yang ditunjukkan oleh FMRLC membuktikan bahwa

FMRLC mampu menangani gangguan dan bertahan pada posisi *setpoint*.

Respon sistem dengan pengujian dengan variasi gangguan dirangkum dalam Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan responsistem pengujian dengan gangguan

Gangguan (m <sup>5/2</sup> /mnt)	Fuzzy Sugeno		FMRLC	
	Waktu menetap (menit)	IAE	Waktu menetap (menit)	IAE
0,001	0,918	0,1094	1,834	0,2316
0,002	1,036	0,1096	2,054	0,2237
0,003	1,076	0,1097	2,077	0,2158
0,004	1,433	0,1098	2,367	0,2078
0,005	1,497	0,11	2,608	0,1998

Dari Tabel 6, dapat diketahui bahwa dengan pemberian gangguan pada *plant conical tank*, respon sistem dengan *fuzzy* Sugeno belum dapat mencapai *setpoint*, sedangkan respon sistem dengan FMRLC dapat mempertahankan kondisi pada *setpoint* selama gangguan berlangsung. Jika dilihat dari waktu menetap kedua kontroler ketika menerima gangguan, FMRLC lebih cepat dibanding *fuzzy* Sugeno. Begitu juga ketika dilihat dari nilai IAE pada kedua sistem, kontroler FMRLC memiliki nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan nilai IAE *Fuzzy* Sugeno.

## 4. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa algoritma FMRLC dapat memperbaiki kinerja *fuzzy* Sugeno. Pengontrolan ketinggian air pada *conical tank* dengan menggunakan FMRLC mempunyai respon yang lebih baik dari pengontrolan dengan menggunakan *fuzzy* Sugeno, hal ini membuktikan bahwa FMRLC dapat mengatasi keterbatasan dan kelemahan dari *fuzzy* Sugeno dalam mengontrol ketinggian air pada *conical tank*.

Untuk pengembangan lebih lanjut disarankan untuk menggunakan *integral error* sebagai masukan FLC, serta menggunakan skema adaptasi untuk mengadaptasi penguat *input* dan *output* FLC pada FMRLC.

## Referensi

- [1] A. Ismail, *Fuzzy model reference learning control of multi-stage flash desalination plants*, Desalination, vol. 116, no. 2-3, pp. 157-164, Sep. 1998.
- [2] P. S. Khuntia and D. Mitra, *Fuzzy Model Reference Learning Controller For Pitch Control System of an Aircraft*, Georgian Electronic Scientific Journal: Computer Science and Telecommunications, vol. 3, no. 3, pp. 36-46, 2009.
- [3] R. Qi and M. A. Brdys, *Indirect Adaptive Fuzzy Control For Nonlinear Systems With Online Modelling*, Department of Electronic Electrical & Computer Engineering, University of Birmingham, 2004.
- [4] O. Cerman and P. Husek, *Fuzzy Model Reference Learning Control with Modified Adaptation Mechanism*,

Department of Control Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University.

- [5] O. Aydogdu and O. Alkan, *Adaptive control of a time-varying rotary servo system by using a fuzzy model reference learning controller with variable adaptation gain*, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, Selcuk University, pp. 1–31, 2009.
- [6] J. R. Layne and K. M. Passino, *Fuzzy model reference learning control*, [Proceedings 1992] The First IEEE Conference on Control Applications, pp. 686–691, 1992.
- [7] O. Cerman and P. Husek, *Fuzzy Model Reference Learning Control with Convergent Rule Base*, Department of Control Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University.
- [8] N. Abdellatif, Y. Ramdani, and H. Hamdaoui, *A new adaptive controller of facts-based FMRLC aimed at improving power system stability*, Serbian Journal of Electrical Engineering, vol. 5, no. 2, pp. 229–245, 2008.
- [9] J. R. Layne and K. M. Passino, *Fuzzy Mode Reference Learning Control for Cargo Ship Steering*, IEEE Control Systems Magazine, 13(6), no. December, pp. 23–34, 1993.
- [10] V. Kaminskas and R. L. Cius, *Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Plant with Changing Dynamics*, Informatica Journal, vol. 13, no. 3, pp. 287–298, 2002.
- [11] S. Kuswadi, *Kendali Cerdas Teori dan Aplikasi Praktisnya*. Yogyakarta: Andi, 2007.
- [12] K. Passino, *Fuzzy Control*, vol. 20106837. California: Addison Wesley Longman, Inc, 2010, pp. 55–1–55–27.
- [13] S. Kusumadewi, *Neuro-Fuzzy Integrasi Jaringan Syaraf dan Sistem Fuzzy*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2006.
- [14] S. Kusumadewi and S. Hartati, *Neuro-Fuzzy Integrasi Sistem Fuzzy & Jaringan Syaraf*, 2nd ed. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2010.
- [15] F. A. Alifia, A. Triwiyatno, and Wahyudi, *Desain Sistem Kontrol Adaptive Neuro Fuzzy Inference System ( Anfis ) Studi Kasus: Pengontrolan Ketinggian Air Dan Temperatur Uap Steam Drum Boiler*, Universitas Diponegoro, 2012.
- [16] Erwanda, D. Kusuma, and Dkk., *Pengendalian Temperatur pada Economizer Unit Boiler Menggunakan Fuzzy Gain Scheduling PID Controller di PT. Petrokimia Gresik*, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, 2011.
- [17] A. Abdulshaheed Aldair, *Neurofuzzy Controller Based Full Vehicle Nonlinear Active Suspension Systems*, University of Sussex, 2012.
- [18] K. Mehran, *Takagi-Sugeno Fuzzy Modeling for Process Control*, Newcastle University, 2008.
- [19] J.-S. Jang and Dkk., *Neuro-Fuzzy And Soft Computing*. Prentice-Hall International, Inc., 1997.
- [20] O. S. EMILIAN, Dkk, *Fuzzy Model Reference Learning Control Application*, University Of Târgu, no. November, pp. 10–11, 2005.
- [21] M. Nasrulloh, *Kendali Plant Time Varying Menggunakan Jaringan Saraf Tiruan Dengan Metode Langsung (Studi Kasus pada Kontrol Level Conical Tank)*, Diponegoro, 2005.
- [22] Norgaard, M., Ravn, O., N. K. Poulsen, and Hansen L.K., *Neural Network for Modelling and Control of Dynamic Systems*, Springer-Verlag : London, 2000.