

DESAIN KONTROL ROBUST FUZZY UNTUK STABILITAS SISTEM PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK MESIN TUNGGAL DENGAN VARIASI BEBAN

Anggita P. Septiani^{*)}, Aris Triwiyatno, and Budi Setiyono

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

^{*)}E-mail : anggita599au@gmail.com

Abstrak

Sejalan dengan perkembangan teknologi, dibutuhkan kestabilan sistem yang tinggi dalam merencanakan, menyediakan dan mengoperasikan sistem pembangkit tenaga listrik. Salah satu yang harus dipenuhi untuk mendapatkan sistem pembangkit tenaga listrik berkualitas tinggi adalah mempertahankan tegangan dan frekuensi yang dibutuhkan oleh pusat-pusat beban supaya tetap stabil dengan adanya perubahan beban yang berakibat terjadinya perubahan frekuensi dan tegangan. Robust-Fuzzy merupakan salah satu metode kontrol yang digunakan untuk mengendalikan sistem dengan variasi beban yang menyebabkan perubahan karakteristik pada sistem. Pada penelitian ini digunakan metode kontrol Robust Fuzzy untuk mengetahui respon dinamik sistem bila terjadi gangguan yang bersifat dinamik seperti perubahan beban. Sistem dilinearisasi berdasarkan cluster bebannya dan dicari model linearnya. Model sistem linear tersebut dioptimalkan dengan metode LQR (Linear Quadratic Regulator). Model sistem linear tersebut digunakan untuk membuat fuzzy state model. Nilai optimal dari LQR digunakan untuk membuat robust fuzzy. Implementasi kontroler ini dilakukan dengan menggunakan matlab/simulink. penelitian ini menghasilkan perbandingan respon sistem antara pengontrolan robust-fuzzy dengan kontrol optimal untuk mengetahui respon dinamik sistem bila terjadi gangguan yang bersifat dinamik. Dari hasil perbandingan menunjukkan bahwa kontrol Robust Fuzzy memiliki respon yang lebih baik karena kontrol robust fuzzy mampu mengontrol sistem dengan berbagai variasi beban.

Kata-kunci: Model Generator, Mesin Tunggal, Linear Quadratic Regulator (LQR), matlab/simulink, Robust-Fuzzy

Abstract

One thing that required to achieve a high quality of power generator system is maintaining a high quality voltage and frequency which needed by the load centers in order to remain stable due to the presence of load changes that result in a change in frequency and voltage. Robust Fuzzy is one of control methods to control system with load variations which causing changes in the characteristics of the system. Robust Fuzzy method is used in this research to determine a dynamic response system if there is a dynamic disturbance such as load variety. In the designing, the plant is linearized based on its load cluster and then searched for the linear model. The linear model is optimized with LQR method. The optimal LQR value from linear model is used to create the robust fuzzy. This controler is implemented by using matlab/simulink. The result of the research is comparison of system's responses between robust fuzzy control and optimal control to determine dynamic responses of system if there is a dynamic disturbance. The result indicates that Robust Fuzzy method has better response than the optimal control, because Fuzzy Robust is able to control the system with a variety of loads.

Keywords: Generator Model, Single Machine, Linear Quadratic Regulator (LQR), matlab/simulink, Robust-Fuzzy

1. Pendahuluan

Dalam perkembangannya, salah satu yang harus dipenuhi untuk mendapatkan sistem pembangkit tenaga listrik yang berkualitas tinggi adalah mempertahankan tegangan dan frekuensi yang dibutuhkan oleh pusat-pusat beban supaya tetap stabil.

Kestabilan sistem pembangkit tenaga listrik adalah bila suatu mesin dapat bekerja secara normal pada besar perubahan yang terjadi. Dengan adanya perubahan beban berakibat terjadinya perubahan frekuensi dan tegangan, sehingga kestabilan sistem akan terganggu.

Pada penelitian ini digunakan metode kontrol Robust Fuzzy untuk mengetahui respon dinamik sistem bila

$$C_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & K_{3,di} & 0 & K_{6,di} & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_i = 0$$

$$E_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{1,ij}}{M_i} & \frac{K_{2,ij}}{M_i} & \frac{K_{1,ik}}{M_i} & -\frac{K_{2,ik}}{M_i} \\ \frac{K_{4,ij}}{T_{doi}} & \frac{C_{3,ij}}{T_{doi}} & \frac{K_{4,ik}}{T_{doi}} & \frac{C_{3,ij}}{T_{doi}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_i = 0$$

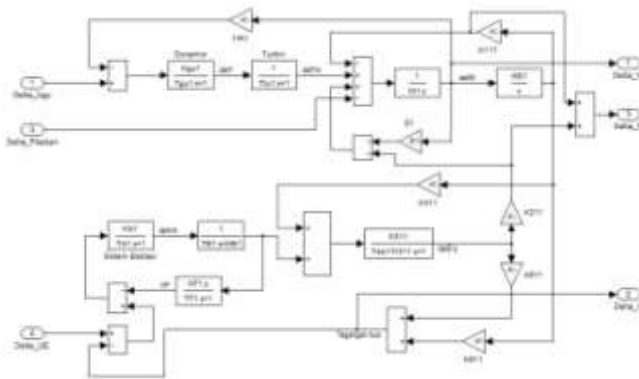
x_d	0.297	Tt	0.1
x'_d	2.0	Tgu	0.2
T'_{do}	7.9	R	5
D	0.6		

Tabel 3 Parameter Mesin 1[5]

$K_{1,11} = 0.0787$	$K_{1,12} = 0.0545$	$K_{1,13} = 0.0242$
$K_{2,11} = 0.0131$	$K_{2,12} = 0.0231$	$K_{2,13} = 0.0142$
$K_{3,11} = 0.9768$	$K_{3,12} = 0.0000$	$K_{3,13} = 0.0000$
$C_{3,11} = 1.0238$	$C_{3,12} = 0.0117$	$C_{3,13} = 0.0054$
$K_{4,11} = 0.0074$	$K_{4,12} = 0.0046$	$K_{4,13} = 0.0028$
$K_{5,11} = 0.0001$	$K_{5,12} = 0.0001$	$K_{5,13} = 0.0000$
$K_{6,11} = 1.0004$	$K_{6,12} = 0.0002$	$K_{6,13} = 0.0001$

2.2 Perancangan Plant Sistem Pembangkit Tenaga Listrik Mesin Tunggal Dengan Variasi Beban

Berdasarkan persamaan (7) sampai dengan persamaan (15) dapat dibuat model dari sistemnya menggunakan *simulink Matlab* dan terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Simulink system pembangkit listrik mesin tunggal. Berdasarkan Gambar 2 dapat diketahui bahwa masukan sistem adalah Delta_Ugu (perubahan sinyal pengendali turbin), Delta_Pbeban (variasi beban), dan Delta_UE (perubahan sinyal pengendali mesin M1). Keluaran sistem adalah Delta_W (perubahan kecepatan rotor), Delta_P (perubahan daya), dan Delta_V (perubahan tegangan)

2.3 Data Parameter Jaringan dan Pembangkit Listrik

Pada penelitian ini, plant yang digunakan adalah mesin tunggal (Mesin 1) dari pembangkit Bus Suralaya[5].

Tabel 1 Data eksitasi Generator[5]

Pembangkit Suralaya	K_A	T_A	K_F	T_F	K_e	T_e
	400.0	0.05	0.04	0.5	1.0	0.98

Tabel 2 Data parameter Generator [5]

Pembangkit	Suralaya	Pembangkit	Suralaya
M	6.9	K_{gu}	1
x_q	2.19	T_{tu}	0.2

2.4 Perancangan Metode Kontrol Robust Fuzzy

2.4.1 Analisis Clustering Data Beban Berdasarkan Pendekatan Analisis Runtun Waktu

Untuk memenuhi kondisi beban real berdasarkan sebaran data dan melihat kondisi beban puncak pada masing-masing pembangkit, pembentukan pola cluster dibuat dalam interval yang dimulai dari 0 MVA dengan kelipatan 18 MVA dalam setiap distribusi. Dalam skala cluster, data pada pembangkit berdasarkan beban puncak yang terjadi dalam sistem menjadi 7 kelas interval dengan distribusi seperti yang tertera pada Tabel 4[6].

Tabel 4 Cluster Beban[6]

No.	Cluster Beban (MVA)
1.	0 – 18 MVA
2.	18 – 36 MVA
3.	36 – 54 MVA
4.	54 – 72 MVA
5.	72 – 90 MVA
6.	90 – 108 MVA
7.	108 – 126 MVA

Nilai masukan dan keluaran sistem dari tiap cluster masukan digunakan untuk mengidentifikasi sistem. Proses identifikasi ini menggunakan *toolbox identification*.

2.4.2 Optimasi Seluruh Operating Point dengan Linear Quadratic Regulator (LQR)

Pada kendali optimal LQR, variabel yang perlu dicari adalah nilai konstanta penguatan umpan balik K. Perhitungan nilai konstanta penguatan umpan balik K dilakukan dengan program Matlab sebagai berikut:

$$[K] = lqr(A, B, Q, R) \tag{16}$$

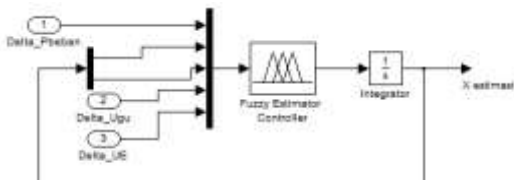
Dalam perhitungan LQR, dibutuhkan Matriks pembobotan Q dan R. Nilai matriks pembobotan Q dapat dicari dengan perhitungan:

$$Q = C'x C \tag{17}$$

Sedangkan untuk pembobotan nilai pembobotan R yang digunakan adalah $R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$.

2.4.3 Desain Fuzzy Model Takagi-Sugeno

Fuzzy model Takagi-Sugeno digunakan untuk estimasi nilai state yang akan dihasilkan jika diberi sebuah nilai masukan.



Gambar 3. Desain fuzzy model Takagi-Sugeno.

Hasil state estimasi ini akan digunakan untuk masukan kontrolernya. Dalam sistem sistem pembangkit tenaga listrik mesin tunggal ini terdapat 2 nilai state estimasi yaitu x_1 dan x_2 . Jumlah state ini didapatkan dari hasil identifikasi yang menggunakan pendekatan orde 2. Rumus perhitungan state estimasi yaitu:

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{18}$$

Persamaan (13) diubah berdasarkan perhitungan keluaran dari fuzzy Takagi-Sugeno yaitu

$$\dot{x}_1 = [0 \quad A_{11} \quad A_{12} \quad B_{11} \quad B_{12} \quad 0] \begin{bmatrix} Cond \\ x_1 \\ x_2 \\ u_1 \\ u_2 \\ c \end{bmatrix} \tag{19}$$

$$\dot{x}_2 = [0 \quad A_{21} \quad A_{22} \quad B_{21} \quad B_{22} \quad 0] \begin{bmatrix} Cond \\ x_1 \\ x_2 \\ u_1 \\ u_2 \\ c \end{bmatrix} \tag{20}$$

Ket:

- \hat{x}_1 = State estimasi 1 x_1 = state x_1
- \hat{x}_2 = State estimasi 2 x_2 = state x_2
- A = matriks A u_1 = masukan system u_1
- B = matriks B u_2 = masukan system u_2
- Cond = Referensi c = Konstanta

Dalam desain fuzzy model, digunakan kontrol fuzzy Takagi-Sugeno. Kontrol fuzzy ini berfungsi memilih nilai state yang akan digunakan. Pemilihan nilai state ini sesuai dengan nilai masukan sistem. Masukan kontrol fuzzy yaitu referensi (cond), nilai state (x_1 dan x_2), dan nilai masukan

sistem (u_1 dan u_2) sedangkan keluaran dari fuzzy yaitu state estimasi 1 (\hat{x}_1) dan state estimasi 2 (\hat{x}_2). Untuk mendesain fuzzy ini, digunakan fungsi fuzzy toolbox pada Matlab.

Rule-Base untuk fuzzy model harus disesuaikan dengan operating point dari sistem. Jumlah operating point dalam sistem ini ada 7 buah. Oleh karena itu, jumlah Rule-Base dalam fuzzy ini ada 7 buah. Rules tersebut sebagai berikut :

1. Jika cond adalah MF1 dan x_1 adalah MF1 dan x_2 adalah MF1 dan u_1 adalah MF1 dan u_2 adalah MF1 maka \hat{x}_1 adalah MF1 dan \hat{x}_2 adalah MF1.
2. Jika cond adalah MF2 dan x_1 adalah MF1 dan x_2 adalah MF1 dan u_1 adalah MF1 dan u_2 adalah MF1 maka \hat{x}_1 adalah MF1 dan \hat{x}_2 adalah MF2.
3. Jika cond adalah MF3 dan x_1 adalah MF1 dan x_2 adalah MF1 dan u_1 adalah MF1 dan u_2 adalah MF1 maka \hat{x}_1 adalah MF1 dan \hat{x}_2 adalah MF3.
4. Jika cond adalah MF4 dan x_1 adalah MF1 dan x_2 adalah MF1 dan u_1 adalah MF1 dan u_2 adalah MF1 maka \hat{x}_1 adalah MF1 dan \hat{x}_2 adalah MF4.
5. Jika cond adalah MF5 dan x_1 adalah MF1 dan x_2 adalah MF1 dan u_1 adalah MF1 dan u_2 adalah MF1 maka \hat{x}_1 adalah MF1 dan \hat{x}_2 adalah MF5.
6. Jika cond adalah MF6 dan x_1 adalah MF1 dan x_2 adalah MF1 dan u_1 adalah MF1 dan u_2 adalah MF1 maka \hat{x}_1 adalah MF1 dan \hat{x}_2 adalah MF6.
7. Jika cond adalah MF7 dan x_1 adalah MF1 dan x_2 adalah MF1 dan u_1 adalah MF1 dan u_2 adalah MF1 maka \hat{x}_1 adalah MF1 dan \hat{x}_2 adalah MF7.

2.4.4 Desain Kontroller Robust Fuzzy

Kontrol robust fuzzy ini berfungsi sebagai soft switching dalam pemilihan nilai gain K dari optimasi LQR. Dalam pemilihan nilai gain K ini akan disesuaikan dengan operating point yang aktif. Hasil dari kontroller ini merupakan sinyal kontrol untuk mengendalikan sistem menuju titik keseimbangan. Rumus perhitungan keluaran kontroller robust fuzzy yaitu:

$$output = K_x x \tag{21}$$

Persamaan (15) diubah berdasarkan perhitungan keluaran dari fuzzy Takagi-Sugeno yaitu

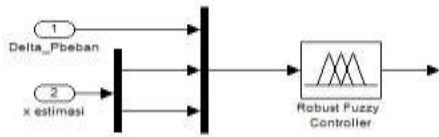
$$output\ 1 = [0 \quad K_{11} \quad K_{12} \quad 0] \begin{bmatrix} cond \\ x_1 \\ x_2 \\ c \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$\text{output 2} = [0 \quad K_{21} \quad K_{22} \quad 0] \begin{bmatrix} \text{cond} \\ x_1 \\ x_2 \\ c \end{bmatrix} \quad (23)$$

Ket:

- output 1 dan output 2 = Nilai keluaran dari kontroler
- K = matriks Nilai LQR
- Cond = Referensi
- x = Nilai state
- c = Konstanta

Dalam desain kontroler *robust fuzzy*, digunakan kontrol *fuzzy* Takagi-Sugeno. Kontrol *fuzzy* ini berfungsi memilih nilai *gain* yang akan digunakan. Pemilihan nilai *gain* ini sesuai dengan nilai referensi. Masukkan kontrol *fuzzy* yaitu referensi (*cond*), dan nilai state (*x*) sedangkan keluaran dari *fuzzy* yaitu nilai LQR (*output*). Untuk mendesain *fuzzy* ini, digunakan fungsi *fuzzy toolbox* pada *Matlab*.



Gambar 4 Subsistem kontroler *robust fuzzy*

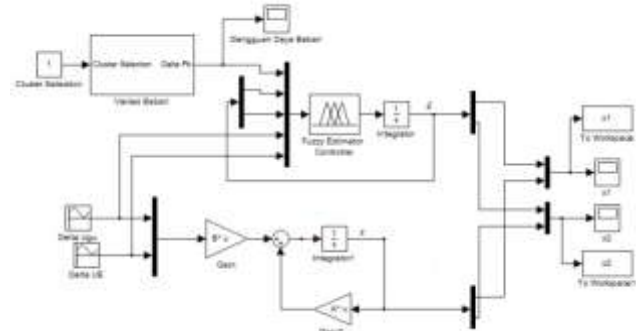
Rule-Base untuk kontrol *robust fuzzy* harus disesuaikan dengan *operating point* dari sistem. Jumlah *operating point* dalam sistem ini ada 7 buah. Oleh karena itu, jumlah *Rule-Base* dalam *fuzzy* ini ada 7 buah. *Rules* tersebut sebagai berikut :

1. Jika *cond* adalah MF1 dan x_1 adalah MF1 dan x_2 adalah MF1 maka *output1* adalah MF1 dan *output2* adalah MF1.
2. Jika *cond* adalah MF2 dan x_1 adalah MF1 dan x_2 adalah MF1 maka *output1* adalah MF2 dan *output2* adalah MF2.
3. Jika *cond* adalah MF3 dan x_1 adalah MF1 dan x_2 adalah MF1 maka *output1* adalah MF3 dan *output2* adalah MF3.
4. Jika *cond* adalah MF4 dan x_1 adalah MF1 dan x_2 adalah MF1 maka *output1* adalah MF4 dan *output2* adalah MF4.
5. Jika *cond* adalah MF5 dan x_1 adalah MF1 dan x_2 adalah MF1 maka *output1* adalah MF5 dan *output2* adalah MF5.
6. Jika *cond* adalah MF6 dan x_1 adalah MF1 dan x_2 adalah MF1 maka *output1* adalah MF6 dan *output2* adalah MF6.
7. Jika *cond* adalah MF7 dan x_1 adalah MF1 dan x_2 adalah MF1 maka *output1* adalah MF7 dan *output2* adalah MF7.

3. Hasil dan Analisis

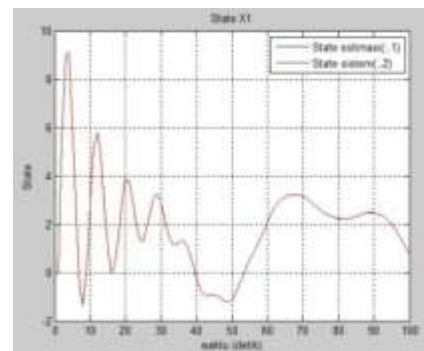
3.1 Pengujian State Estimasi

Pada bagian ini dilakukan pengujian terhadap *fuzzy* model. Dalam pengujian ini, sistem dibuat *open loop*. Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan nilai keluaran *state* sistem dengan nilai keluaran dari *fuzzy* model. Gambar 5 adalah rangkaian *simulink* dari pengujian *fuzzy* model.

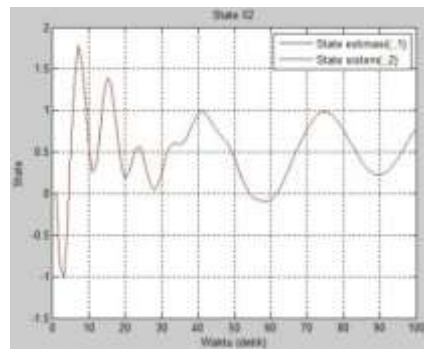


Gambar 5 *Simulink* pengujian *fuzzy* model

Berikut ini adalah hasil pengujian dari *fuzzy state estimator* yaitu:



(a)



(b)

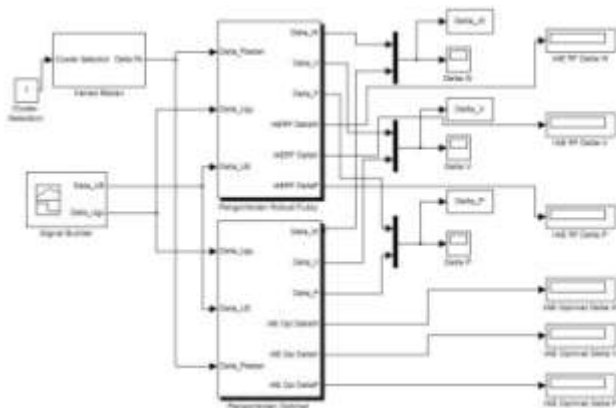
Gambar 6 Grafik *state* dengan masukan sebesar 100 MVA
(a) State 1 (x_1) (b) State 2 (x_2)

Berdasarkan hasil data pengujian, *fuzzy state estimator* memiliki nilai yang sama dengan *state* dari model sistem. Hal ini berarti nilai *state* dari *fuzzy state estimator* dan nilai *state* dari model sistem sama sehingga dapat dikatakan *fuzzy state estimator* bekerja dengan baik.

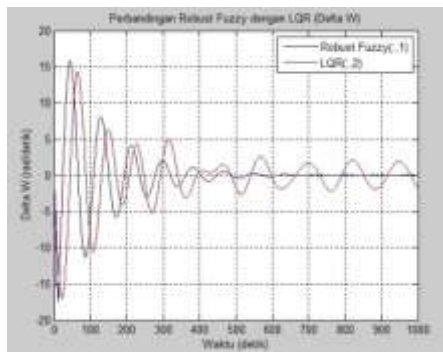
3.2 Pengujian Perbandingan Respon Sistem Dengan *Robust Fuzzy* dan Kontrol Optimal

Pada bagian ini dilakukan perbandingan respon sistem linier dengan metode kontrol *robust fuzzy* dan optimal untuk masing-masing keluaran sistem, yaitu keluaran Delta ω , keluaran Delta V, dan keluaran Delta P.

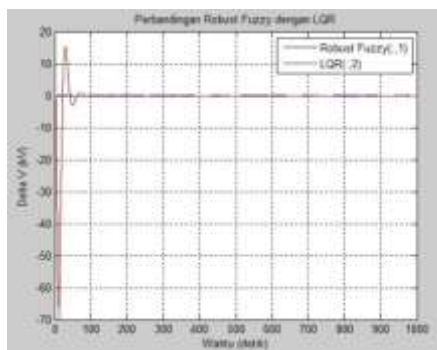
Nilai IAE (*integral area error*) dari tiap metode kontrol juga dibandingkan untuk mengetahui nilai *error* dari masing-masing metode. Gambar 7 adalah rangkaian *simulink* dari pengujian perbandingan respon sistem linier dengan *robust fuzzy* dan kontrol optimal terhadap sistem linier.



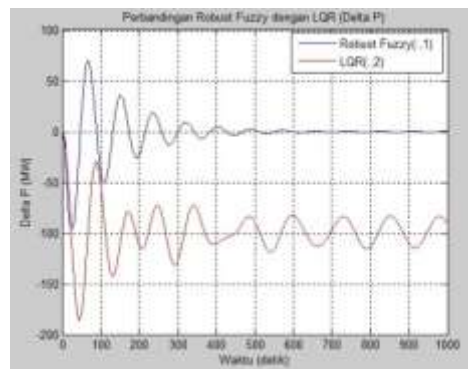
Gambar 7 Simulink pengujian perbandingan respon *robust fuzzy* dan LQR terhadap model linier



(a)



(b)



(c)

Gambar 8 Grafik respon sistem dengan masukan 100 MVA (a) Delta ω (b) Delta V (c) Delta P

Gambar 8 merupakan hasil keluaran dari sistem berupa posisi dan sudut. Selain data Delta ω , Delta V, dan Delta P, didapatkan juga data nilai IAE (*integral area error*). *Integral area error* digunakan untuk menganalisis metode kontrol mana yang memiliki pengontrolan yang lebih baik. Pada tabel 3 merupakan data *integral area error*.

Tabel 5 Perbandingan nilai IAE antara *robust fuzzy* dan optimal untuk sistem linier pada keluaran Delta ω

No.	Nilai Masukan (MVA)	Integral Area Error	
		Robust fuzzy	Optimal
1.	0 – 18	13,07	141,7
2.	18 – 36	34,85	150,7
3.	36 – 54	64,19	172,3
4.	54 – 72	97,17	201,5
5.	72 – 90	134,5	233,4
6.	90 – 108	171,8	266,7
7.	108 - 126	211,5	300,7

Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa Delta ω yang dihasilkan dari pengontrolan sistem dengan menggunakan *Robust Fuzzy* menghasilkan nilai IAE yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan kontrol optimal.

Tabel 6 Perbandingan nilai IAE antara *robust fuzzy* dan optimal untuk sistem linier pada keluaran Delta V

No.	Nilai Masukan (MVA)	Integral Area Error	
		Robust fuzzy	Optimal
1.	0 – 18	2,032	1191
2.	18 – 36	2,176	2676
3.	36 – 54	2,243	4466
4.	54 – 72	2,292	6265
5.	72 – 90	2,362	8063
6.	90 – 108	2,478	9860
7.	108 - 126	2,711	11660

Dari Tabel 6 dapat dilihat bahwa Delta V yang dihasilkan dari pengontrolan system dengan menggunakan *Robust Fuzzy* menghasilkan nilai IAE yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan kontrol optimal.

Tabel 7 Perbandingan nilai IAE antara *robust fuzzy* dan optimal untuk sistem linier pada keluaran Delta P

No.	Cluster Beban (MVA)	Integral Area Error	
		<i>Robust fuzzy</i>	Optimal
1.	0 – 18	78,73	99,38
2.	18 – 36	195,3	113,7
3.	36 – 54	352,6	110
4.	54 – 72	532,6	105,8
5.	72 – 90	725,6	102,5
6.	90 – 108	923,2	100,2
7.	108 – 126	1132	98,46

Pada Tabel 7, nilai IAE yang dihasilkan oleh pengontrolan *robust fuzzy* lebih baik daripada nilai IAE optimal terletak pada *cluster* beban 0 MVA \leq Delta P beban < 18 MVA. Sedangkan untuk *cluster* beban yang lainnya, dapat dilihat bahwa nilai IAE optimal yang dihasilkan ternyata lebih baik dibandingkan dengan hasil IAE *robust fuzzy*.

Berdasarkan Tabel 5, Tabel 6, dan Tabel 7, pengontrolan sistem dengan menggunakan *robust fuzzy* memiliki respon keluaran Delta ω dan Delta V yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan Optimal. Untuk Delta P, respon keluaran yang dihasilkan oleh pengontrolan optimal lebih baik dibandingkan dengan menggunakan *robust fuzzy*.

4. Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil data pengujian, *fuzzy state estimator* memiliki nilai yang sama dengan *state* dari model sistem. Hal ini berarti nilai *state* dari *fuzzy state estimator* dan nilai *state* dari model system sama sehingga dapat dikatakan *fuzzy state estimator* bekerja dengan baik.
2. Delta ω (perubahan kecepatan rotor) yang dihasilkan dari pengontrolan sistem dengan menggunakan *Robust Fuzzy* menghasilkan nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan kontrol optimal dengan rata-rata prosentase perbaikan sebesar 55,685 %.
3. Delta V (perubahan tegangan) yang dihasilkan dari pengontrolan system dengan menggunakan *Robust Fuzzy* menghasilkan nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan kontrol optimal dengan rata-rata prosentase perbaikan sebesar 99,941 %.
4. Pada keluaran Delta P (perubahan daya), pengontrolan *robust fuzzy* menghasilkan nilai IAE yang lebih kecil daripada nilai IAE optimal terletak pada *cluster* beban 0 - 18 MVA dengan prosentase perbaikan sebesar 20,779 %. Sedangkan untuk *cluster* beban yang lainnya, pengontrolan *robust fuzzy* menghasilkan nilai

IAE yang lebih besar dari nilai IAE pengontrolan optimal.

5. Pengontrolan sistem dengan menggunakan *robust fuzzy* memiliki respon keluaran Delta ω dan Delta V yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan kontrol optimal. Untuk Delta P, respon keluaran yang dihasilkan oleh pengontrolan optimal lebih baik dibandingkan dengan menggunakan *robust fuzzy*.

Referensi

- [1]. Dwi Imami, Reza, Desain Kontrol *Inverted Pendulum* dengan Metode Kontrol Robust Fuzzy, Teknik Elektro UNDIP, Semarang, 2013
- [2]. F. Khaber, K. Zehar, and A. Hamzaoui, “State feedback controller design via Takagi-Sugeno fuzzy model: LMI approach”, International Journal of Computation Intelligence, Vol 2, No 2, pp. 148-153, 2005. http://www.ece.uvic.ca/~agullive/trans/B_p1-38.pdf, Oktober 2012.
- [3]. Kusumadewi, Sri dan Sri Hartati, *Neuro-Fuzzy Integrasi Sistem Fuzzy & Jaringan Syaraf Edisi 2*, Penerbit Graha Ilmu, Yogyakarta, 2010.
- [4]. Lewis, Frank, dkk. *Optimal Control*, John Wiley & Sons, Inc, 1995.
- [5]. Mado, Ismit, *Perancangan Kontrol Optimal Adaptif Melalui Obesrever Beban pada Sistem Pembangkit Listrik Mesin Tunggal yang Ter-Interkoneksi*, Tesis S-2, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2006.
- [6]. Mado, Ismit. Soeprijanto, Adi. Suhartono. *Clustering Data Beban Listrik di PJB UP Gresik Berdasarkan Pendekatan Analisis Runtun Waktu*. Paper. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya. 2012.
- [7]. N.E. Mastorakis, “Modeling dynamical systems via the Takagi-Sugeno fuzzy model”, Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Fuzzy sets and Fuzzy Systems, Udine, Italy, march 25-27, 2004.
- [8]. Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1*, diterjemahkan oleh Edi Leksono, Erlangga, Jakarta, 1994.
- [9]. P. M, Anderson and A. A. Foud, *Power System Control and Stability*, The Iowa state University Press, 1982
- [10]. Robandi, Imam. *Modern Power System Control – Desain, Analisis dan Solusi Kontrol Tenaga Listrik*. Andi Publisher. Jakarta. 2010
- [11]. T. Takagi and M. Sugeno, “Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. SMC-15, pp. 116–132, May 1985.
- [12]. Triwiyatno, Aris., Mohammad Nuh., Ari Santoso., I Nyoman Sutantra., *A New Method of Robust Fuzzy Control: Case Study of Engine Torque Control of Spark Ignition Engine*, Dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2011.
- [13]. Triwiyatno, Aris., Mohammad Nuh., Ari Santoso., I Nyoman Sutantra., “Fuzzy State Observer Design for Engine Torque Control System of Spark Ignition Engine”, Dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2011.