

Simulasi Pengendali Beban Elektronik Berbasis Logika Fuzzy untuk PLTMH Daya Rendah

Abdul Hafid¹, Rahmania², A. Faharudin³, dan Adriani⁴
^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Makassar
Jl. Sultan Alauddin No. 259 Makassar 90221
e-mail: abdul.hafid@unismuh.ac.id

Abstrak—Metode logika fuzzy merupakan salah satu metode yang banyak diaplikasikan pada bidang pengontrolan peralatan. Tulisan ini menghadirkan hasil simulasi pengendali beban elektronik logika fuzzy untuk mikrohidro skala kecil 5 kW. Pengendali menggunakan dua variabel fuzzy masukan, yaitu beban konsumen dan sudut pemicu pada komponen TRIAC α . Masing-masing variabel masukan tersebut terdiri dari enam himpunan fuzzy dengan bentuk fungsi keanggotaan berbentuk segitiga (triangular). Keluaran pengendali berupa variabel frekuensi, dan kecepatan generator. Variabel keluaran mempunyai tiga himpunan fuzzy, dan bentuk fungsi keanggotaan untuk frekuensi berbentuk segitiga (triangular), sedangkan bentuk fungsi keanggotaan untuk kecepatan generator berbentuk trapesium (trapezoidal). Simulasi dilakukan dengan menggunakan FIS editor (MATLAB) tipe Mamdani. Berdasarkan hasil simulasi pada 15 sampel variasi beban konsumen, ditarik kesimpulan bahwa tingkat keberhasilan atau kinerja pengendali cukup baik dalam memperhitungkan frekuensi dan kecepatan generator PLTMH 5 kW.

Kata kunci: Logika fuzzy, PLTMH 5 kW, Pengendali beban elektronik

Abstract—Fuzzy logic method is a method that is widely applied in the field of equipment control. This paper presents the simulation results of a fuzzy logic electronic load controller for a 5 kW small scale micro hydro. The controller uses two fuzzy input variables, namely the consumer load and the trigger angle on the α TRIAC component. Each input variable consists of six fuzzy sets with a triangular form of membership function. Control output in the form of variable frequency and generator speed. The output variable has three fuzzy sets, and the form of the membership function for frequency is triangular (triangular), while the form of the membership function for the speed generator is trapezoidal (trapezoidal). The simulation was carried out using the Mamdani type FIS editor (MATLAB). Based on the simulation results on 15 samples of consumer load variations, it is concluded that the success rate or controller performance is quite good in calculating the frequency and speed of the 5 kW micro hydro generator.

Keywords: Fuzzy logic, micro hydro 5 kW, electronic load controllers

I. PENDAHULUAN

Untuk mengendalikan frekuensi sistem yang dibangkitkan oleh generator mikrohidro agar selalu tetap pada frekuensi 50 Hz meskipun terjadi fluktuasi beban maka diperlukan alat pengendali beban. Pada PLTMH yang menggunakan generator sinkron sebagai pembangkitnya umumnya digunakan pengendali beban elektronik (ELC, *Electronic Load Controller*). Sedangkan pada PLTMH yang menggunakan generator induksi sebagai pembangkitnya digunakan IGC (*Induction Generator Controller*). Pengaturan tegangan dan frekuensi pada sistem mikrohidro jauh lebih mudah dicapai dengan menggunakan pengendali beban elektronik. Sebab respons perangkat yang cepat jika terjadi fluktuasi beban konsumen. Disamping itu biaya rata-rata untuk pembuatan unit pengendali beban elektronik sebesar 10% dibandingkan jika menggunakan *governor* mekanik. Umumnya pengendali beban elektronik selalu dilengkapi dengan beban penyeimbang (*ballast load*). *Ballast load* berfungsi untuk

menyeimbangkan antara energi listrik yang dihasilkan generator dengan beban. Apabila beban dari pelanggan lebih kecil dari produksi energi listrik generator, maka sisanya akan dialihkan ke *ballast load*. Dengan adanya *ballast load* maka tegangan dan frekuensi generator PLTMH akan stabil.

Pemanfaatan mikrohidro di Provinsi Sulawesi Selatan, Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) lebih dulu dimanfaatkan dari PLT energi surya, dan PLT energi angin. Salah satu Provinsi di Sulawesi Selatan yang sudah menggunakan PLTMH sejak tahun 2005 [1] adalah Kabupaten Enrekang. Turbin dan generator PLTMH Palakka di Kabupaten Enrekang didesain untuk daya rencana 50 kW dengan debit air 155 liter/detik dan *head* 50 meter. Menggunakan turbin aliran silang produksi dalam negeri. Sedangkan generator yang digunakan adalah generator sinkron buatan eropa 60 KVA/48 Kw, 1500 rpm, 50 Hz. Antara poros turbin dengan poros generator dihubungkan dengan *pulley* dan *belt*, agar putaran generator cocok dengan putaran 1500/menit. Sistem kontrol PLTMH

Palakka berupa ELC (*electronic load controller*) yang dilengkapi dengan *ballast load* (beban tambahan) dengan *rating power* 60 kW (75kVA). Mikrohidro dengan daya yang lebih kecil juga sudah dimanfaatkan masyarakat di Kabupaten Bulukumba. PLTMH [2] 5 kWatt telah dioperasikan pada kampung Katimbang Kelurahan Borong Rappoa Kecamatan Kindang Kabupaten Bulukumba provinsi Sulawesi Selatan untuk menyalurkan energi listrik untuk 15 KK. PLTMH yang dioperasikan pada daerah ini semuanya menggunakan sistem terisolasi, yakni masing-masing generator menyuplai beban tersendiri.

Pada tulisan ini akan disajikan telaah metode logika fuzzy untuk pengendali beban elektronik PLTMH daya rendah (5 kWatt) dalam bentuk simulasi. Pengendali frekuensi generator sinkron berbasis logika fuzzy memberikan hasil yang memuaskan untuk sistem non-linear yang tidak diketahui dengan mempertahankan titik operasi di wilayah stabil. Pengendali beban elektronik logika fuzzy bekerja seperti sistem penalaran manusia, melalui penggunaan fuzzy set dan model linguistik yang terdiri dari *set IF – THEN Rule*.

II. METODE

A. Objek Penelitian

Daya terbangkit PLTMH yang digunakan dalam penelitian ini memiliki spesifikasi sebagai berikut: debit air (Q) 0,27 m³/detik, tinggi jatuh air (head, h) 2,4 m, dan data parameter:

Efisiensi turbin dan generator ($\eta = 0,8$)

Massa jenis air (pada $t = 40^{\circ}C$, $\rho = 992,2 \text{ Kg/m}^3$)

Daya turbin

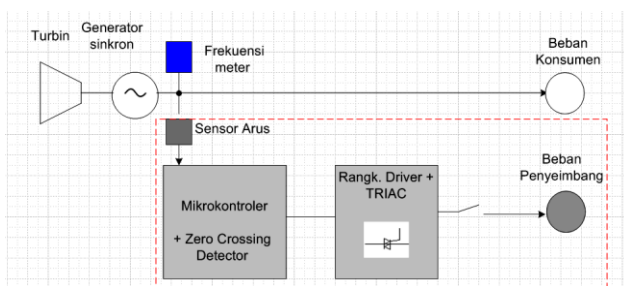
$$P = \eta \rho g Q H \quad (1)$$

$$= 0,8 \times 992,2 \times 9,81 \times 0,27 \times 2,4$$

$$\approx 5 \text{ kWatt}$$

Menggunakan generator sinkron 1 phase 220 V, frekuensi 50 Hz, jumlah kutub 4, daya 5 kWatt, $Pf = 0.8 \text{ lag}$.

B. Diagram skematis

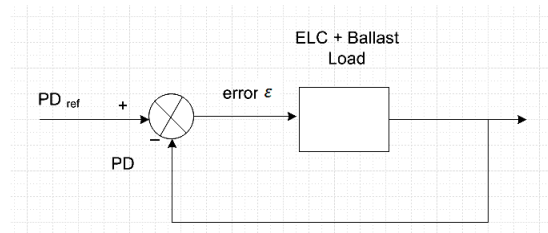


Gambar 2.1 Diagram skematis ELC pada PLTMH

Pengendali beban elektronik seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.1. berfungsi untuk memelihara frekuensi pada nilai nominal $50 \pm 0,02 \text{ Hz}$ (untuk sistem 50 Hz) atau menjaga kecepatan generator agar tetap berada pada putaran 1494 – 1506 RPM (untuk generator 4 kutub), dengan cara menjaga generator selalu memikul daya dalam

keadaan beban penuh. Apabila daya pada beban konsumen berkurang maka pengendali mendistribusikan daya ke beban penyeimbang dalam jumlah tertentu agar generator tetap dalam keadaan beban penuh.

C. ELC berbasis logika fuzzy



Gambar 2.2 Diagram blok ELC

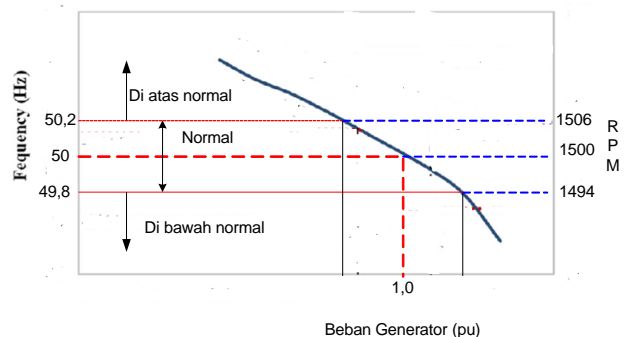
Pada gambar 2.2, variabel PD_{ref} adalah selisih daya beban penuh generator dengan daya konsumen (PK), dan PD adalah daya yang didistribusikan pengendali beban ke beban ballast. Error ϵ didefinisikan dengan persamaan berikut

$$\epsilon = PD_{ref} - PD \quad (2)$$

Apabila pengendali bekerja secara sempurna maka dihasilkan $\epsilon \approx 0$. Hubungan antara sudut pemicu α pada TRIAC dengan daya pada ballast load dinyatakan dengan persamaan berikut

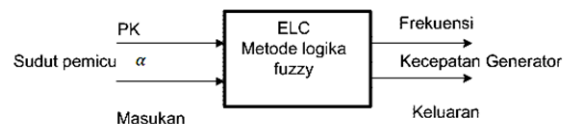
$$P_D = \frac{V_s^2}{R} \left\{ \frac{1}{\pi} \left[(\pi - \alpha) + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right] \right\} \quad (3)$$

Hubungan antara frekuensi generator dengan beban generator pada PLTMH yang menggunakan generator sinkron dengan jumlah kutub 4 dan dilengkapi dengan pengatur beban elektronik diperlihatkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Frekuensi dan rpm generator versus beban

Model ELC berlogika fuzzy yang diusulkan pada penelitian ini diperlihatkan pada gambar berikut



Gambar 2.4 Masukan dan keluaran ELC berbasis logika fuzzy

Metode logika fuzzy bekerja seperti sistem penalaran manusia, melalui penggunaan fuzzy set dan model linguistik yang terdiri dari set IF – THEN Rule. Dalam desain dilakukan langkah: fuzzifikasi, basis aturan fuzzy, Inferensi fuzzy, dan defuzzifikasi

- Fuzzifikasi (*Fuzzyfication*)

Fuzzifikasi adalah proses mapping nilai yang tegas (crisp) atau nilai numerik kedalam himpunan fuzzy. Seperti diperlihatkan pada gambar 2.4, dan tabel 2.1, masukan 1 (beban konsumen) adalah variabel fuzzy dengan 6 fuzzy set yaitu FL (beban penuh), beban tipe 1 sampai tipe 5. Variabel fuzzy masukan 2 (sudut trigger) ada 6 fuzzy set, yaitu alfa 0 sampai alfa 5.

Tabel 2.1 Variabel dan himpunan fuzzy masukan

Variabel fuzzy Masukan	Jumlah fungsi keanggotaan	Fuzzy set Label	Bentuk fungsi keanggotaan	Nilai [a b c]
Beban konsumen (Nilai kWatt)	6	FL	Segitiga	[4.9 5.0 5.1]
		Tipe 1		[3 4 5]
		Tipe 2		[2 3 4]
		Tipe 3		[1 2 3]
		Tipe 4		[0 1 2]
		Tipe 5		[0 0 1]
Sudut trigger (Nilai derajat)	6	Alfa 0	Segitiga	[154 180 180]
		Alfa 1		[99 120 180]
		Alfa 2		[81 99 120]
		Alfa 3		[61 81 99]
		Alfa 4		[0 61 81]
		Alfa 5		[0 0 61]

Tabel 2.2 Variabel dan himpunan fuzzy keluaran

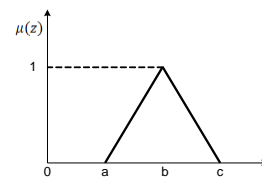
Variabel fuzzy Keluaran	Jumlah fungsi keanggotaan	Fuzzy set Label, Nilai [a b c d]	Bentuk fungsi keanggotaan
Frekuensi (Hz)	3	Normal [49.8 50 50.2]	Segitiga
		f naik [50 50.5 51]	
		f turun [49 49.5 50]	

Variabel fuzzy Keluaran	Jumlah fungsi keanggotaan	Fuzzy set Label	Bentuk fungsi keanggotaan
Kecepatan (rpm)	3	Normal [1494 1497 1503 1506]	Trapezium
		Kec naik [1503 1515 1524 1530]	

		Kec turun [1470 1479 1491 1491]	
--	--	---------------------------------	--

Fungsi keanggotaan segitiga (triangular)

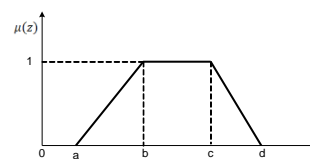
$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$$



Gambar 2.4 Fungsi keanggotaan segitiga

Fungsi keanggotaan trapesium (trapezoidal)

$$f(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}$$



Gambar 2.4 Fungsi keanggotaan trapesium

- Pembentukan dasar aturan

Setelah proses fuzzifikasi selesai, hasilnya digunakan untuk membentuk basis aturan fuzzy. Kaidah fuzzy umumnya menggunakan pernyataan IF - THEN digabungkan oleh agregasi DAN (dalam program komputer). Tabel 2.3 menunjukkan basis aturan untuk model yang diusulkan. Pada tabel 2.3

- f ↑ = Frekuensi naik
- f ↓ = Frekuensi turun
- √ = Frekuensi normal

Untuk variabel fuzzy keluaran kecepatan sama dengan tabel 2.3 dengan frekuensi diganti dengan kecepatan generator tiga himpunan fuzzy yaitu kecepatan normal, naik, dan turun.

Tabel 2.3 Rule

		Sudut trigger					
		Alfa 0	Alfa 1	Alfa 2	Alfa 3	Alfa 4	Alfa 5
Beban	FL	✓	f ↓	f ↓	f ↓	f ↓	f ↓ 2
	Tipe 1	f ↑	✓	f ↓	f ↓	f ↓	f ↓ 3
	Tipe 2	f ↑	f ↑	✓	f ↓	f ↓	f ↓ 3
	Tipe 3	f ↑	f ↑	f ↑	✓	f ↓	f ↓ 3
	Tipe 4	f ↑	f ↑	f ↑	f ↑	✓	f ↓ 3
	Tipe 5	f ↑	f ↑	f ↑	f ↑	f ↑	✓

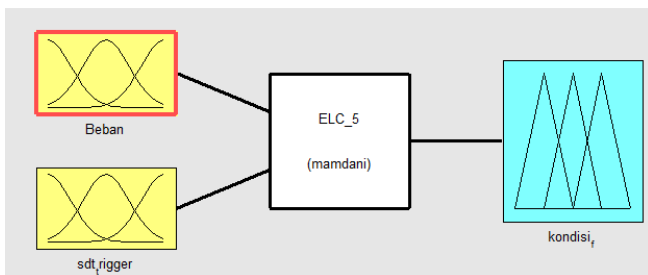
• Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah proses memproduksi aksi kontrol yang bersih /garing (crisp) dari output pada aksi kontrol fuzzy. Metode defuzzifikasi yang digunakan dalam model adalah metode Center of Area (COA). Metode ini paling umum digunakan, dan disebut juga sebagai pusat gravitasi atau metode daerah pusat. Metode ini didefinisikan dengan persamaan aljabar

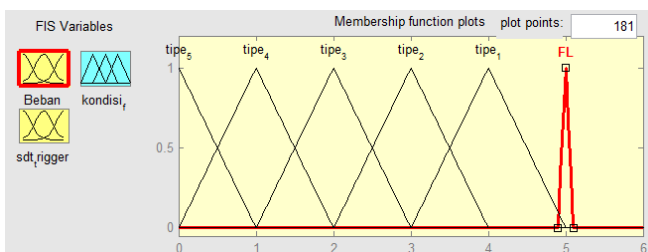
$$z^* = \frac{\int \mu(z) z dz}{\int \mu(z) dz} \quad (4)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN HASIL

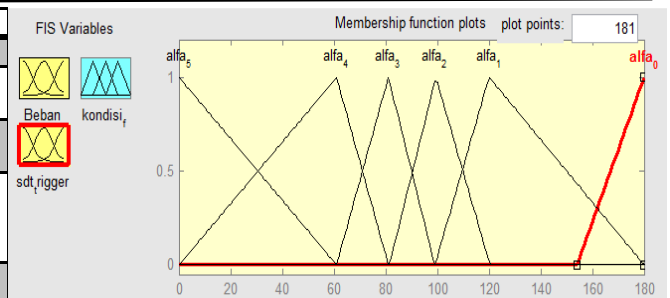
A. Simulasi menggunakan FIS (Fuzzy Inference System) editor pada MATLAB



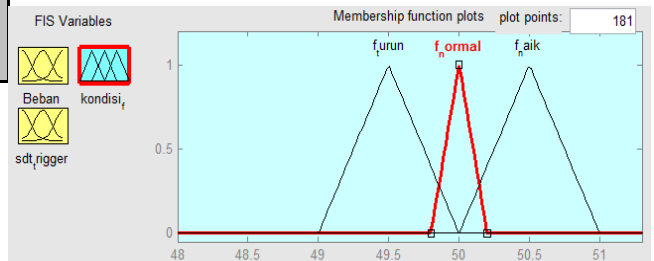
Gambar 3.1 Tampilan simulasi ELC berbasis fuzzy logic



Gambar 3.2 Fungsi keanggg. variabel masukan 1 (beban)



Gambar 3.3 Fungsi keanggg. variabel masukan 2 (sudut pemacu)



Gambar 3.4 Fungsi keanggotaan variabel keluaran (frekuensi)

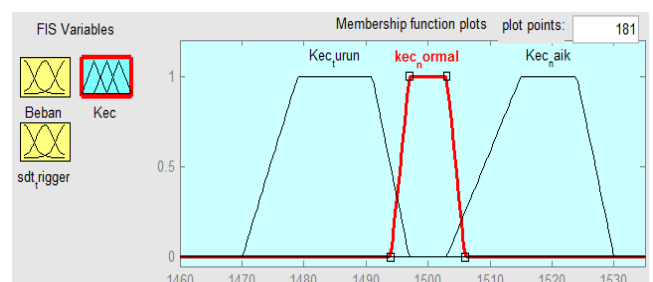
Aturan IF THEN untuk fungsi keluaran frekuensi

```

1. If (Beban is FL) and (sdt_trigger is alfa_0) then (kondisi_f is f_normal) (1)
2. If (Beban is FL) and (sdt_trigger is alfa_1) then (kondisi_f is f_turun) (1)
3. If (Beban is tipe_1) and (sdt_trigger is alfa_0) then (kondisi_f is f_naik) (1)
4. If (Beban is tipe_1) and (sdt_trigger is alfa_1) then (kondisi_f is f_normal) (1)
5. If (Beban is tipe_1) and (sdt_trigger is alfa_2) then (kondisi_f is f_turun) (1)
6. If (Beban is tipe_2) and (sdt_trigger is alfa_1) then (kondisi_f is f_naik) (1)
7. If (Beban is tipe_2) and (sdt_trigger is alfa_2) then (kondisi_f is f_normal) (1)
8. If (Beban is tipe_2) and (sdt_trigger is alfa_3) then (kondisi_f is f_turun) (1)
9. If (Beban is tipe_3) and (sdt_trigger is alfa_2) then (kondisi_f is f_naik) (1)
10. If (Beban is tipe_3) and (sdt_trigger is alfa_3) then (kondisi_f is f_normal) (1)
11. If (Beban is tipe_3) and (sdt_trigger is alfa_4) then (kondisi_f is f_turun) (1)
12. If (Beban is tipe_4) and (sdt_trigger is alfa_3) then (kondisi_f is f_naik) (1)
13. If (Beban is tipe_4) and (sdt_trigger is alfa_4) then (kondisi_f is f_normal) (1)
14. If (Beban is tipe_4) and (sdt_trigger is alfa_5) then (kondisi_f is f_turun) (1)
15. If (Beban is tipe_5) and (sdt_trigger is alfa_4) then (kondisi_f is f_naik) (1)
16. If (Beban is tipe_5) and (sdt_trigger is alfa_5) then (kondisi_f is f_normal) (1)
    
```

Gambar 3.5 IF THEN Rule yang digunakan

Untuk variabel keluaran kecepatan generator digunakan membership function trapesium seperti gambar 3.6, dan aturan sama seperti gambar 3.3 dengan variabel frekuensi menjadi kecepatan



Gambar 3.6 Fungsi keanggotaan kecepatan generator

IV.PEMBAHASAN

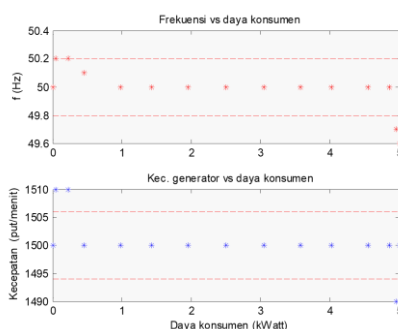
Hasil proses defuzzifikasi diperlihatkan pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Hasil proses defuzzifikasi

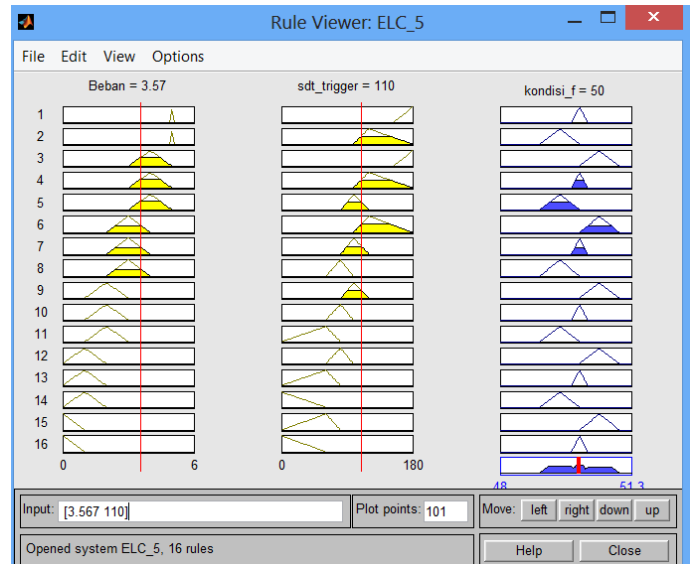
Beban Generator (kWatt)	P konsumen (kWatt)	Sudut trigger α (0^0)	f (Hz)	Kecepatan (RPM)
5,00	0	0	50	1500
	0,044	20	50.2	1510
	0,224	35	50.2	1510
	0,454	45	50.1	1500
	0,977	60	50	1500
	1,432	70	50	1500
	1,950	80	50	1500
	2,500	90	50	1500
	3,050	100	50	1500
	3,567	110	50	1500
	4,022	120	50	1500
	4,546	135	50	1500
	4,856	150	50	1500
	4,956	160	49.7	1490
	5,000	180	49.6	1500

Pada tabel 3.1, kolom 1 adalah beban generator dalam kondisi beban penuh. Nilai pada kolom 2 dan kolom 3 adalah variabel fuzzy masukan, yaitu beban konsumen dan sudut pemacu α referensi. Kolom 4 dan kolom 5 masing-masing adalah variabel fuzzy keluaran, yaitu frekuensi sistem, dan kecepatan generator dalam putaran peminet. Proses defuzzifikasi menggunakan metode COA (Center of Area). Berdasarkan tabel 3.1, pengontrol menghasilkan informasi tentang frekuensi dan kecepatan generator untuk suatu beban tertentu jika TRIAC diberi sudut pemacu dengan sudut α referensi. Seperti yang dicantumkan dalam tabel 3.1, dari 15 contoh beban konsumen, 2 titik pembebanan yang menghasilkan frekuensi di bawah normal (f normal 49,8 – 50.2 Hz), yaitu beban 4,956 kWatt, dan beban 5,0 kWatt. Sementara putaran generator naik sedikit untuk beban 0,044 kWatt, dan 0,224 kWatt, dan kecepatan turun sedikit di bawah normal untuk beban 4,956 kWatt (RPM normal 1494-1506). Hasil defuzzifikasi

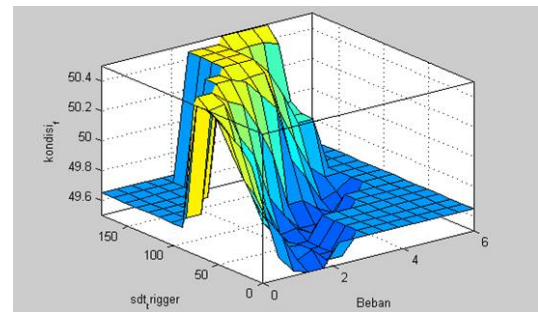
Gambar 3.7 Perubahan frekuensi dan kecepatan terhadap daya konsumen



menggunakan 16 aturan fuzzy, untuk frekuensi tampilannya diperlihatkan pada gambar 3.8 dan 3.9.

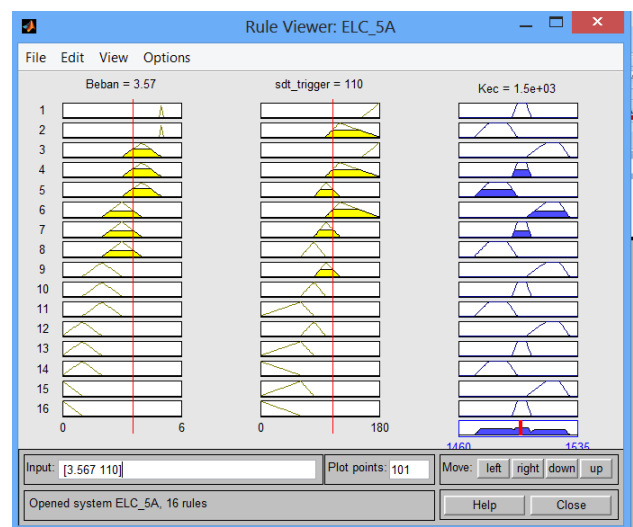


Gambar 3.8 Rule Viewer PK= 3,567 kWatt, dan $\alpha = 110^0$, hasil f = 50 Hz

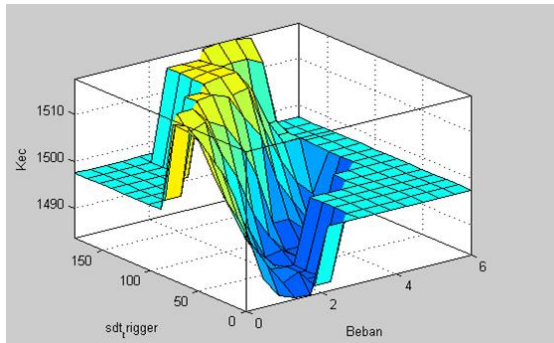


Gambar 3.9 Surface viewer frekuensi

Hasil defuzzifikasi menggunakan 16 aturan fuzzy, untuk kecepatan generator tampilannya diperlihatkan pada gambar 3.10 dan 3.11.



Gambar 3.10 Rule Viewer PK = 3,567 kWatt, dan $\alpha = 110^0$, hasil kecepatan 1500 RPM



Gambar 3.11 Surface viewer kecepatan generator

V. KESIMPULAN

Pengendali beban elektronik berbasis logika fuzzy untuk pembangkit listrik tenaga mikrohidro daya 5 kW telah disimulasikan pada tulisan ini. Pengendali menggunakan dua variabel fuzzy masukan, yaitu beban konsumen dan sudut picu triac, dan variabel fuzzy keluaran berupa informasi frekuensi, dan kecepatan generator. Berdasarkan hasil simulasi untuk 15 sampel daya konsumen, diketahui pengendali beban elektronik dengan metode logika fuzzy menghasilkan informasi frekuensi dalam batas normal untuk 13 titik pembebanan, sedangkan 2 sampel pembebanan lainnya menghasilkan frekuensi sedikit di bawah frekuensi normal. Sementara untuk 15 sampel beban konsumen menghasilkan informasi kecepatan generator dalam batas normal untuk 12 titik pembebanan, dan masing-masing 2 titik pembebanan di atas kecepatan normal dan satu di bawah kecepatan normal. Secara keseluruhan berdasarkan hasil simulasi tersebut maka dapat disimpulkan tingkat keberhasilan atau kinerja pengendali cukup baik dalam memperhitungkan frekuensi dan kecepatan generator PLTMH 5 kW..

REFERENSI

- [1] Umi Hanifah dkk, EVALUASI TERHADAP KONDISI FISIK, PENGELOLAAN DAN PEMANFAATAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO DI DESA PALAKKA KEC.MAIWA KAB. ENREKANG, Prosiding SNaPP2011 Sains, Teknologi, dan Kesehatan ISSN:2089-3582 (akses 26-05-2020)
- [2] <https://perkumpulanoase.org/pengembangan-mikrohidro-borong-rappoa/>
- [3] Kapoor P, Phunchok L, Kumar S. 2012. Frequency Control Of Micro Hydro Power Plant Using Electronic Load Controller. *Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* ISSN: 2248-9622. Vol. 2 (4): 733-737.
- [4] Hafid, Abdul, Rahmania. 2018. Analisis pengendali beban elektronik untuk pembangkit listrik tenaga pikohidro dengan metode kendali sudut fase dan beban biner. *Jurnal INSTEK* P-ISSN: 2541-1179, E-ISSN:2581-1711. Vol. 3(1):31-40.
- [5] Singh B, Rajagopal V. 2009. Battery energy storage based voltage and frequency controller for isolated pico hydro systems, *Journal of Power Electronics*. Vol. 9 (6): 874-883.
- [6] Kandaswamy S, Ponnusamy V. 2017. MODIFIED TECHNIQUE FOR GATE VALVE CONTROL OF MICRO HYDRO POWER PLANT USING FUZZY LOGIC CONTROLLER, *International Journal of Pure and Applied Mathematics* Volume 116 No. 21 , 291-296
- [7] Sing RR, Kumar AB, Shruti D, Panda R, Raj TC, Review and experimental illustrations of electronic load controller used in standalone Micro-Hydro generating plants, *Engineering Science and Technology, an International Journal* 21 (2018) 886-900
- [8] Andrik M, Farul M, Cahyono I, Rusklin, OPTIMASI LOAD FREQUENCY CONTROL (LFC) PADA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO BERBASIS PID-ANFIS, *Jurnal Rekayasa Mesin* Vol.9, No.1 Tahun 2018: 61-64 ISSN 2477-6041
- [9] Putra RMM, Kirom RM, Iskandar FR, IMPLEMENTASI KONTROL FUZZY PADA SISTEM KENDALI BEBAN PEMBANGKIT LISTRIK MIKROHIDRO, *e-Proceeding of Engineering* : Vol.2, No.3 Desember 2015 | Page 7345, ISSN : 2355-9365
- [10] Sivanandam S.N, Sumathi S, Deepa S.N, 2007, *Introduction to FuzzyLogic using MATLAB*, ISBN-13 978-3-540-35780-3 Springer Berlin Heidelberg New York,