

Penerapan Algoritma Fuzzy Untuk Optimasi Kontroler PID Pada Sistem Kontrol AVR Generator 3 Fasa 480VA Berbasis Mikrokontroler ATmega16

Tri Dedi Pamungkas¹, Utis Sutisna², Yulis Rijal Fauzan³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro STT Wiworotomo Purwokerto

e-mail: ¹tri_dp@stt-wiworotomo.ac.id, ²utis@stt-wiworotomo.ac.id, ³yulisrf41@gmail.com

Abstract

Generator voltage stabilization at power plant system is very important. There fore, keeps the voltage of it's generator should be needed at the power plant. Generator voltage stabilization was kept by AVR (Automatic Voltage Regulator) devise. AVR units using PID (Proportional Integral Derivative) controller for the operation. PID controller, needs some settings on that parameters (K_p , K_i , K_d) to get good response's controller. In this research, fuzzy algorithm is used to set up the PID parameter's for the optimalization result. Kind of fuzzy that used was sugeno's methot of orde-0 with 15 rules base. Over all, fuzzy algorithm set up for tuning PID parameter's is build up to make it's better performance compared to the ordinary PID controller. The average of PID-fuzzy performance optimalization is about 14,96% in starting mode and 11,03% average in loading mode. That is because the fuzzy algorithm continously counting PID parameters value, when the system starting as well as it's loading.

Keywords: AVR, Fuzzy, PID.

1. Pendahuluan

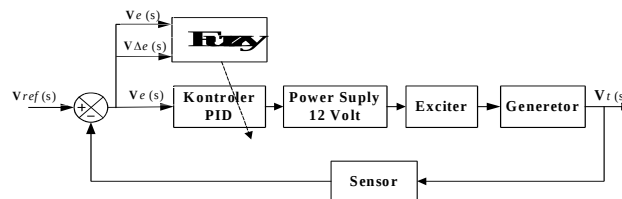
Unit AVR menggunakan sistem kontrol PID (Proporsional Integral Derivatif) dalam operasinya. Kontroler PID memerlukan penalaan pada parameter-parameternya (K_p , K_i , K_d) untuk mendapatkan kontroler dengan respon yang baik. Penalaan parameter PID pada unit AVR, biasa dilakukan oleh teknisi ahli bidang kontroler. Pada penelitian yang dilakukan, penulis menambahkan sebuah algoritma Fuzzy yang digunakan untuk menala parameter-parameter PID baik pada saat *starting* maupun ketika pembebanan.

Beberapa penelitian terkait pernah dilakukan sebelumnya. Pamungkas dkk melakukan modifikasi topologi pengendali PID untuk AVR generator sinkron [1]. Penelitian tentang penerapan kendali *hybrid* Logika Fuzzy-PID untuk meningkatkan performa navigasi robot beroda *wall follower* dilakukan oleh Sutisna dkk [2]. Simulasi kendali PID dan Logika Fuzzy pada Eksitasi Automatic Voltage Regulator dengan menggunakan Simulink Matlab telah dilakukan oleh Jati [3]. Demikian juga Singh dkk melakukan penelitian melalui simulasi *Automatic Voltage Control* untuk stsbilitas sistem tenaga dengan PID dan Logika Fuzzy menggunakan Simulink MATLAB [4]. Sedangkan Sharker dkk melakukan penelitian terkait peningkatan stabilitas tegangan menggunakan sistem kontrol Logika Fuzzy [5].

Mengacu pada penelitian sebelumnya, dilakukan penelitian tentang optimasi kontroler PID menggunakan algoritma fuzzy untuk sistem kontrol sebuah unit AVR. Dalam penelitian ini dilakukan rancang bangun sebuah unit AVR yang diterapkan pada generator 3 fasa 480 VA berbasis ATmega16. Penelitian ini juga membandingkan performa unit AVR dengan kontroler PID biasa dan unit AVR dengan kontroler PID-fuzzy. Kemudian masing-masing kontroler dilihat kemampuannya dalam melakukan *starting* dan pembebanan.

2. Metode Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan sebuah pengaplikasian algoritma fuzzy pada kontroler PID yang digunakan sebagai sistem kontrol sebuah unit AVR. Model dari sistem yang akan dirancang dapat dilihat pada Gambar 1.

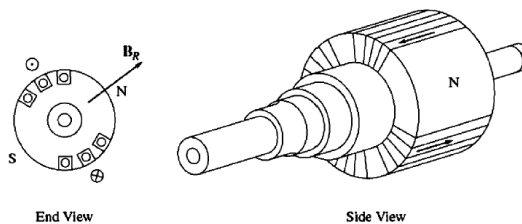


Gambar 1 Diagram blok sistem

Pada Gambar 1 dapat dilihat bahwa variabel yang menjadi variabel masukan fuzzy adalah *error* dan juga perubahan *error*. Disini fuzzy akan mengkalkulasikan nilai *error* dengan perubahan *error* yang terjadi pada sistem, dimana nilai dari kedua variabel tersebut akan dibandingkan untuk menentukan berapa nilai konstanta yang sesuai untuk kontroler PID.

2.1. Generator Sinkron

Dalam generator sinkron, arus dc dialirkan pada belitan rotor melalui *slip ring*. Arus DC inilah yang kemudian menghasilkan medan magnet rotor. Rotor generator kemudian diputar oleh penggerak utama, menghasilkan medan magnet yang berputar didalam mesin. Putaran medan magnet inilah yang kemudian menginduksi tegangan tiga fasa di dalam gulungan stator generator [6]. Rotor generator sinkron dapat dilihat pada Gambar 2.

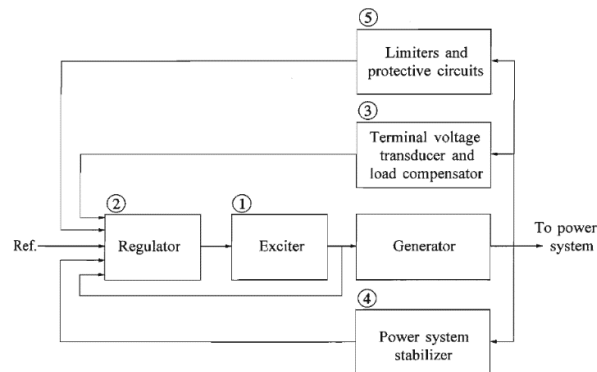


Gambar 2: Rotor Generator Sinkron [6]

2.2. AVR (Automatic Voltage Regulator)

AVR adalah sistem umpan balik yang secara konstan memantau tingkat tegangan yang dihasilkan di terminal generator dan dengan pengontrol sistem AVR mampu mengatur tingkat eksitasi rotor [7]

Prinsip kerja dari sebuah unit AVR adalah mengatur sistem eksitasi pada exciter generator. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal tegangan generator, maka AVR akan memperbesar arus eksitasi pada exciter. Sebaliknya apabila tegangan output generator melebihi tegangan nominal generator, maka AVR akan mengurangi arus eksitasi pada exciter. Dengan demikian, apabila terjadi perubahan tegangan pada output generator akan dapat distabilkan oleh AVR secara otomatis. Blok diagram sistem eksitasi generator sinkron dapat dilihat pada Gambar 3.

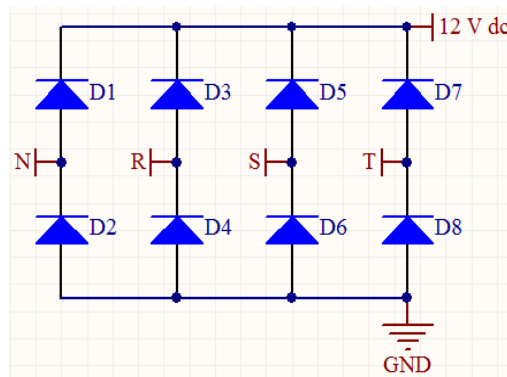


Gambar 3 Blok Diagram Sistem eksitasi Generator Sinkron [8]

2.3. Pembacaan Tegangan

Tegangan keluaran generator merupakan tegangan AC 3 fasa yang tidak dapat dibaca secara langsung oleh mikrokontroler dan tidak dapat dijadikan penguatan pada sistem eksitasi. Oleh sebab itu tegangan perlu disearahkan terlebih dahulu agar dapat dibaca oleh mikrokontroler sekaligus digunakan sebagai tegangan pada sistem eksitasi generator.

Penyearahan tegangan generator dilakukan dengan menyusun delapan buah dioda yang disusun untuk menyearahkan fasa R, S, T dan netral, dikarenakan generator memiliki hubungan bintang sehingga netral juga harus disearahkan. Untuk lebih jelasnya konfigurasi dioda penyearah 3 fasa yang digunakan dapat dilihat pada Gbr. 4.



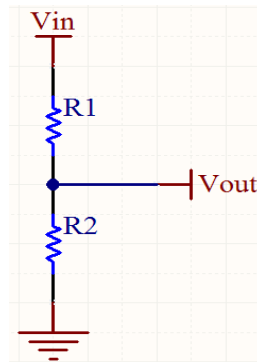
Gambar 4 Konfigurasi Rangkaian Penyearah Tegangan 3fasa

2.4. Rangkaian Pembagi Tegangan

Tegangan nominal keluaran generator adalah 12 volt, sedangkan mikrokontroler hanya mampu membaca *input* ADC (*Analog to Digital Corverting*) sebesar 5 Volt. Untuk itu dilakukan skala menggunakan rangkaian pembagi tegangan Gambar 5.

Pada penelitian ini tegangan akan diskala dengan perbandingan 1:4,3 dimana teganan 12 Volt keluaran generator akan direpresentasikan menjadi 2,79 Volt pada *input* mikrokontroler. Sehingga didapat nilai $R1 : 3,3K\Omega$ dan $R2 : 1K\Omega$.

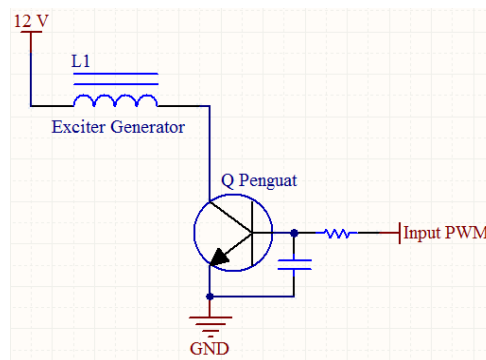
$R1$ dengan nilai $3,3K\Omega$ bertujuan untuk membuat arus yang masuk ke dalam mikrokontroler menjadi 3,6 mA, sehingga aman untuk mikrokontroler.



Gambar 5: Rangkaian Pembagi Tegangan

2.5. Penguatan Arus Eksitasi

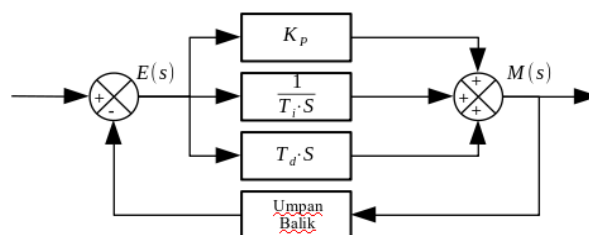
Keluaran mikrokontroler adalah berupa sinyal PWM dengan arus yang sangat kecil dan tidak mampu untuk membangkitkan kemagnetan pada rotor generator. Oleh sebab itu digunakan sebuah rangkaian penguat arus dengan sebuah rangkain DAC sederhana untuk menguatkan arus yang akan mengalir pada *exciter* sekaligus mengubah keluaran PWM menjadi tegangan DC yang dinamis.



Gambar 6: Rangkaian Penguat Arus

Untuk membuat rangkaian penguat arus digunakan 1 buah transistor dan sebuah *Low Pass Filter* pada basis transistor sebagai rangkaian DAC sederhana. Untuk lebih jelasnya rangkaian penguat arus dapat dilihat pada Gambar 6.

2.6. Kontroller PID



Gambar 7: Block Diagram Kontroler PID

Kontroler PID adalah gabungan antara kontroler P, I dan D yang digabungkan secara paralel. Unsur kontroler P, I dan D masing-masing secara keseluruhan berguna untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan offset dan menghasilkan perubahan awal yang besar [9]. Blok diagram kontroler PID dapat dilihat pada Gambar 7.

2.7. Fuzzifikasi

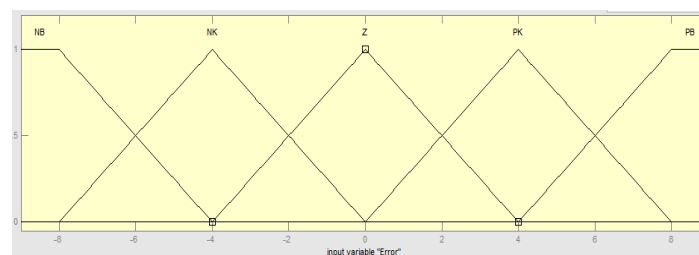
Fuzzifikasi adalah proses yang dilakukan untuk mengubah variabel nyata (crisp) menjadi bentuk variabel fuzzy. Hal ini ditujukan agar masukan kontroler fuzzy bisa dipetakan menuju jenis yang sesuai dengan himpunan fuzzy. Penentuan jumlah fuzzy subset dan pemilihan bentuk membership function untuk input dan output fuzzy sangat penting dalam proses fuzzifikasi [10].

Pada penelitian ini, dibuat dua buah variabel yaitu variabel Error dan delta error (Derror). Kemudian kedua variabel tersebut akan didefinisikan dalam lima himpunan fuzzy yaitu Zerro (Z), Negatif Kecil (NK), Negatif Besar (NB), Positif Kecil (PK), Positif Besar (PB). Himpunan variabel Error dan Derror dapat dilihat pada Tabel 1.

Table 1 Himpunan Variable Error dan Derror

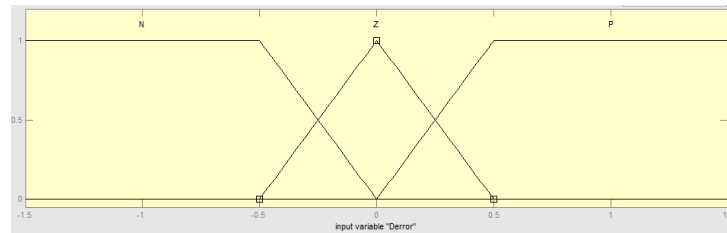
Variabel	Himpunan	Domain	Fungsi Keanggotaan
Error	NB	[-12 -4]	Trapeسيوم
	NK	[-8 0]	Segitiga
	Z	[-4 4]	Segitiga
	PK	[0 8]	Segitiga
	PB	[4 12]	Trapeسيوم
Derror	N	[-1,5 0]	Trapeسيوم
	Z	[-0,5 0,5]	Segitiga
	P	[0 1,5]	Trapeسيوم

Untuk merepresentasikan himpunan fuzzy pada variabel *error* digunakan bentuk kurva trapeسيوم bahu kiri untuk himpunan NB, kurva segitiga untuk himpunan NK, kurva segitiga untuk himpunan Z, kurva segitiga untuk himpunan PK, kurva trapeسيوم bahu kanan untuk himpunan PB. Representasi himpunan fuzzy variabel *Error* dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Fungsi keanggotaan variabel Error

Untuk merepresentasikan himpunan fuzzy pada variabel Derror digunakan bentuk kurva trapeسيوم bahu kiri untuk himpunan N, kurva segitiga untuk himpunan Z, kurva trapeسيوم bahu kanan untuk himpunan P. Representasi himpunan fuzzy variabel Derror dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9 Fungsi keanggotaan variabel Derror

2.8. Sistem Inferensi

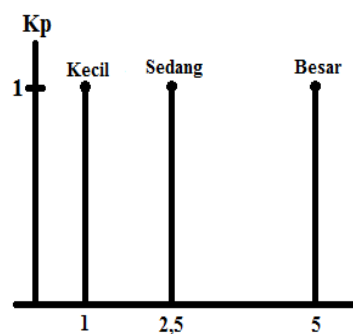
Penelitian kali ini menggunakan sistem inferensi fuzzy metode Sugeno Orde-0 dimana fungsi keanggotaan keluaran adalah sebuah konstanta tegas sebagai kusekuen [11]. Proses fuzifikasi ini akan mencari nilai fungsi keanggotaan dari variabel Kp dan Ki dengan fungsi keanggotaan singleton yang berisikan himpunan Kecil (K), Sedang (S) dan besar (B).

Berdasarkan fungsi keanggotaan masukan dan keluaran yang telah ditentukan, maka langkah selanjutnya adalah membuat aturan-aturan (rule base) dalam sebuah penalaran. Sistem ini menggunakan aturan fuzzy tunggal dengan dua anteseden. Anteseden pertama dan kedua adalah variabel Error dan variabel Derror. Basis aturan variabel Kp dan Ki dapat dilihat pada Tabel 2.

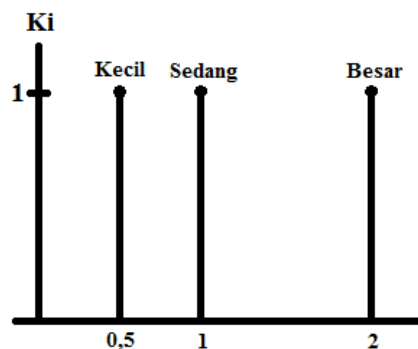
Table 2 Basis aturan fuzzy Kp dan Ki

		Error				
		NB	NK	Z	PK	PB
Derror	N	B	B	K	B	B
	Z	B	S	K	S	B
	P	B	S	K	S	B

Konstanta tegas untuk nilai himpunan keluaran variabel Kp adalah Kecil (K) = 1, Sedang (S) = 2,5 dan Besar (B) = 5. Untuk himpunan variabel Ki adalah Kecil (K) = 0,5, Sedang (S) = 1 dan Besar (B) = 2. Fungsi keanggotaan keluaran variabel Kp dapat dilihat pada Gambar 10 dan Ki pada Gambar 11.



Gambar 10: Fungsi keanggotaan variabel Kp



Gambar 11: Fungsi keanggotaan variabel Ki

2.9. Defuzzifikasi

Proses defuzzifikasi digunakan untuk mendapat nilai rekomendasi [10]. Proses defuzzifikasi akan dilakukan menggunakan metode *Weigth Average*. Untuk defuzzifikasi variabel Kp dan Ki adalah sebagai berikut:

$$WA = \frac{\alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_{15} z_{15}}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_{15}}$$

Keterangan : WA = Nilai rata-rata

α = Nilai predikat aturan

Z = Indeks nilai output (konstanta)

3. Hasil Dan Pembahasan

Pengujian sistem dilakukan dalam dua tahap. Pertama pengujian dilakukan terhadap sistem AVR yang hanya menggunakan kontroler PID saja. Kedua pengujian dilakukan dengan menambahkan algoritma fuzzy untuk optimasi kontroler PID pada sistem AVR. Masing-masing kontroler diuji sebanyak 5 kali dengan beban 5 lampu yang berbeda agar mampu merepresentasikan kinerja sistem secara keseluruhan. Dari sini kemudian dilihat apakah algoritma fuzzy mampu memperbaiki kinerja dari kontroler PID atau tidak.

Sistem AVR yang dirancang, diuji kemampuannya dalam menangani 4 kondisi yaitu :

1. *starting*
Sistem diuji kemampuannya ketika generator dinyalakan untuk pertama kali. Pada tahap ini dilihat berapa *rise time*, *settling time*, *overshoot* dan *osilasi* masing-masing kontroler.
2. *Steady state error*
Ketika *steady state* tegangan keluaran generator memiliki toleransi untuk naik sebesar dan turun sebesar 5% dari tegangan nominalnya. Itu artinya dengan tegangan nominal 12 Volt, toleransi adalah 0,6 Volt naik dan turun.
3. Saat beban dimasukkan
Sistem diuji kemampuannya ketika ada beban masuk. Pada tahap ini dilihat berapa besar *undershoot* yang terjadi dan berapa waktu yang dibutuhkan untuk sistem kembali *steady state*.
4. Saat beban dilepaskan
Sistem diuji kemampuannya ketika beban dilepaskan. Pada tahap ini dilihat berapa besar *overshoot* yang terjadi dan berapa waktu yang dibutuhkan untuk sistem kembali *steady state*.

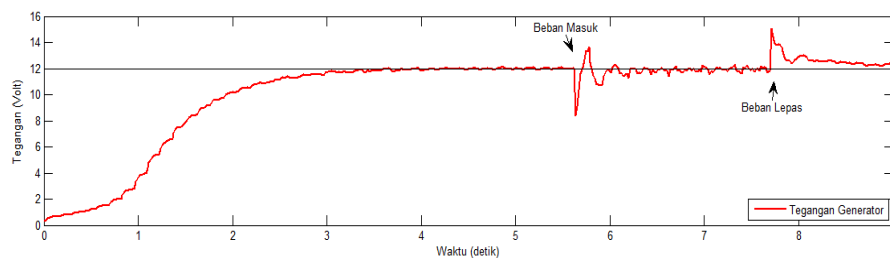
3.1. Kontroler PID

Tahap awal dalam melakukan pengujian kontroler PID adalah dengan menentukan nilai-nilai parameter Kp dan Ki. Penalaan parameter Kp dan Ki dilakukan dengan mengidentifikasi plan, yaitu dengan melihat respon sinyal keluaran terhadap sinyal masukan. Penalaan parameter Kp dan Ki dilakukan menggunakan metode try and error. Dari hasil percobaan, didapat nilai untuk Kp sebesar 2,5 dan Ki sebesar 1. Hasil pengujian unit AVR yang dirancang menggunakan kontroler PID dapat dilihat pada Tabel 3.

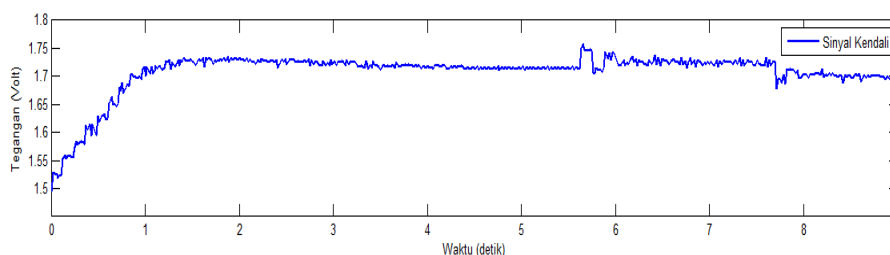
Table 3: Hasil Pengujian Kontroler PID

No.	Starting			Beban Masuk		Beban Lepas	
	Rise Time (detik)	Settling Time (detik)	Steady State Error (%)	Undershoot (volt)	Osilasi (detik)	Overshoot (volt)	Osilasi (detik)
1	1,86	3,02	2,67%	3,60	0,41	3,02	0,19
2	1,85	3,02	1,92%	4,45	0,37	3,08	0,13
3	1,84	2,99	2,00%	4,16	0,42	3,21	0,13
4	1,89	3,12	1,67%	3,59	0,36	2,43	0,11
5	1,88	3,16	2,08%	4,34	0,42	2,58	0,26

Grafik pengujian sistem pada pengujian pertama dapat dilihat pada Gambar 12 dan sinyal kontrol pada Gambar 13.



Gambar 12: Grafik starting dan pembebanan PID pengujian pertama



Gambar 13: Grafik sinyal kontrol PID pengujian pertama

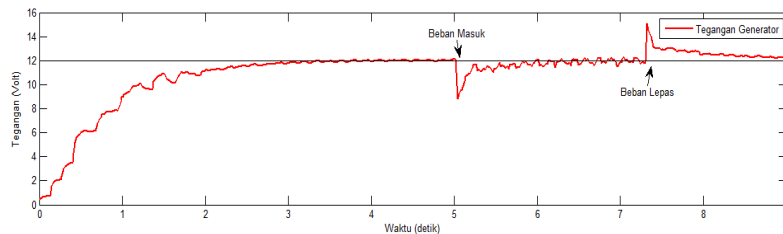
3.2. Kontroler PID-Fuzzy

Pada tahap ini algoritma fuzzy ditambahkan ke dalam sistem AVR untuk mengoptimalkan kinerja kontroler PID. Algoritma fuzzy digunakan untuk menala parameter Kp dan Ki kontroler PID. Di sini nilai parameter Kp dan Ki menjadi dinamis tergantung kondisi *error* dan *delta error*. Hasil pengujian unit AVR yang dirancang menggunakan kontroler PID logika fuzzy dapat dilihat pada Tabel 4.

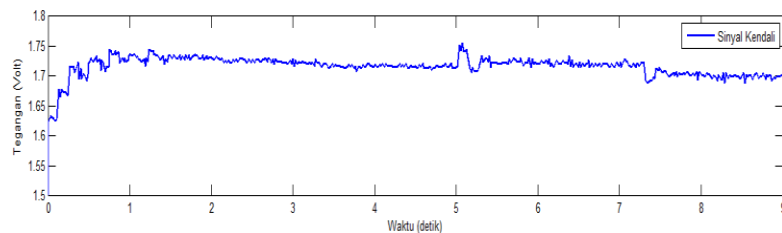
Table 4: Hasil Pengujian Kontroler PID logika fuzzy

No.	Starting			Beban Masuk		Beban Lepas	
	Rise Time (detik)	Settling Time (detik)	Steady State Error (%)	Undershoot (volt)	Osilasi (detik)	Overshoot (volt)	Osilasi (detik)
1	1,11	2,75	2,42%	3,17	0,22	3,08	0,14
2	1,26	2,73	2,25%	3,85	0,19	2,69	0,23
3	1,13	2,44	2,25%	3,81	0,17	2,84	0,09
4	1,17	2,52	2,00%	3,56	0,22	2,92	0,22
5	1,11	2,67	2,17%	3,63	0,23	3,31	0,31

Grafik pengujian sistem pada pengujian pertama dapat dilihat pada Gambar 14 dan sinyal kontrol pada Gambar 15.



Gambar 14: Grafik starting dan pembebanan PID-fuzzy pengujian pertama



Gambar 15: Grafik sinyal kontrol PID-fuzzy pengujian pertama

Setelah dilakukan pengujian, kemudian dicari persentase peningkatan performa kinerja kontroler PID-fuzzy terhadap kontroler PID. Analisis peningkatan performa kontroler PID-fuzzy dibagi dalam 2 keadaan yaitu pada keadaan starting dan keadaan pembebanan.

Pada percobaan yang dilakukan, tidak selalu terjadi peningkatan performa, terkadang juga terjadi penurunan. Maka dari itu pada tabel yang disajikan, penurunan performa ditunjukkan menggunakan bilangan negatif dan untuk peningkatan menggunakan bilangan positif. Untuk data hasil pengujian kinerja starting dapat dilihat pada tabel dibawah.

Table 5: Peningkatan kinerja Rise Time

No.	Rise Time (detik)		
	PID	PID-fuzzy	Peningkatan
1	1,86	1,11	40,32%
2	1,85	1,26	31,89%
3	1,84	1,13	38,59%
4	1,89	1,17	38,10%
5	1,88	1,11	40,96%

Table 6: Peningkatan kinerja Settling Time

No.	Settling Time (detik)		
	PID	PID-fuzzy	Peningkatan
1	3,02	2,75	8,94%
2	3,02	2,73	9,60%
3	2,99	2,44	18,39%
4	3,12	2,52	19,23%
5	3,16	2,67	15,51%

Table 7: Peningkatan kinerja Steady State Error

No.	Steady State Error (%)		
	PID	PID-fuzzy	Peningkatan
1	2,67%	2,42%	9,36%
2	1,92%	2,25%	-14,67%
3	2,00%	2,25%	-11,11%
4	1,67%	2,00%	-16,50%
5	2,08%	2,17%	-4,15%

Kemudian untuk data hasil pengujian kinerja kontroler pada kondisi pembebanan dapat dilihat pada tabel-tabel dibawah.

Table 8: Peningkatan kinerja Pembebanan saat beban masuk

No.	Beban Masuk					
	Undershoot (volt)			Osilasi (detik)		
	PID	PID-fuzzy	Peningkatan	PID	PID-fuzzy	Peningkatan
1	3,60	3,17	11,94%	0,41	0,22	46,34%
2	4,45	3,85	13,48%	0,37	0,19	48,65%
3	4,16	3,81	8,41%	0,42	0,17	59,52%
4	3,59	3,56	0,84%	0,36	0,22	38,89%
5	4,34	3,63	16,36%	0,42	0,23	45,24%

Table 9: Peningkatan kinerja Pembebanan saat beban dilepas

No.	Beban Lepas					
	Overshoot (volt)			Osilasi (detik)		
	PID	PID-fuzzy	Peningkatan	PID	PID-fuzzy	Peningkatan
1	3,02	3,08	-1,95%	0,19	0,14	26,32%
2	3,08	2,69	12,66%	0,13	0,23	-43,48%
3	3,21	2,84	11,53%	0,13	0,09	30,77%
4	2,43	2,92	-16,78%	0,11	0,22	-50,00%
5	2,58	3,31	-22,05%	0,26	0,31	-16,13%

4. Kesimpulan

Pengujian algoritma fuzzy untuk optimasi kontroler PID pada sistem kontrol AVR ini menghasilkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Sebuah unit AVR dengan kontroler PID algoritma fuzzy dapat dibangun menggunakan sebuah mikrokontroler ATmega16 sebagai CPU utama. Proses utama yang dilakukan oleh

ATMega16 adalah pembacaan tegangan, pemrosesan data dan pemberian keluaran berupa sinyal PWM.

2. Sebuah kontroler PID mampu dijadikan kontroler utama dari sebuah sistem AVR. Sistem kontrol ini mampu menstabilkan tegangan keluaran generator dengan cukup baik, karena kontroler PID merupakan kontroler umpan balik yang mengoreksi nilai kesalahan secara terus menerus.
3. Dari hasil pengujian, didapat bahwa algoritma fuzzy mampu mengoptimalkan kinerja kontroler PID. Algoritma fuzzy mampu mencari nilai optimal dari parameter Kp dan Ki kontroler PID. Hal inilah yang menyebabkan kontroler PID menjadi lebih optimal setelah dilakukan optimasi menggunakan algoritma fuzzy.
4. Secara keseluruhan, penerapan algoritma fuzzy untuk optimasi kontroler PID pada sistem kontrol AVR yang dirancang memberikan peningkatan rata-rata sebesar 14,96% pada keadaan starting dan rata-rata 11,03% pada kondisi pembebanan. Itu artinya usaha optimasi kontroler PID pada sistem AVR yang dirancang telah berhasil dilakukan.

5. Daftar Pustaka

- [1] Pamungkas, Tri Dedi; Haddin, Muhamad dan Rijanto, Estiko. 2017. "Modifikasi Topologi Pengendali PID untuk *Automatic Voltage Regulator* Generator Sinkron". Teknik elektro. Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
- [2] Sutisna, Utis; Siregar, Wahyu Diputra dan Nurhadiyono, Siswanto. 2016. "Penerapan Kendali Hybrid Logika Fuzzy-PID Untuk meningkatkan Performa Navigasi Robot Beroda Wall Follower". Teknik Elektro. Sekolah Tinggi Teknik Wiworotomo Purwokerto
- [3] Jati, Pamungkas. 2016. "Simulasi Kendali PID dan Logika Fuzzy pada Eksitasi *Automatic Voltage Regulator* dengan Simulink Matlab". Fisika. Universitas Negeri Semarang.
- [4] Singh, Mr. Omveer; Agarwa, Shiny; Singh, Shivi dan Khan Zuyyina. 2013. "*Automatic Voltage Control For Power System Stability Using PID and Fuzzy Logic Controller*". *International Journal of Engineering Research & Technology* (IJERT), Vol. 2 Issue 5.
- [5] Sharker, Pejust Chandra; Mahafuzz, Md. Nagib; Saha, Subarna. 2013. "*Voltage Stability Improvement Using Fuzzy Logic Control System*". *International Journal of Scientific & Engineering Research* (IJSER), Vol 4 Issues 10.
- [6] Chapman. Stephen J. 2002. *Electric machinery and power system fundamentals*, New York. McGraw-Hill.
- [7] Ivanic, Boris. 2013. "*AVR for a synchronous generator with a six-phase PM alternator and rotating excitation system*". Uppsala Universitet.
- [8] Kundur, Prabha. 1994. *Power Systems Stability and Control*. Electric Power Research Institute. McGraw-Hill, Inc.
- [9] Gunterus, Frans. 1994. *Falsafah Dasar: Sistem Pengendalian Proses*. PT. Elex Media Komputindo. Jakarta.
- [10] Kusumadewi, Sri dan Purnomo, Hari. 2004. *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan*. Graha Ilmu. Yogyakarta.
- [11] Kusumadewi, Sri dan Hartati, Sri. 2006. *Neuro fuzzy Integrasi sistem fuzzy dan jaringan syaraf*. Graha Ilmu. Yogyakarta.