



**SIMULASI KENDALI PID DAN LOGIKA FUZZY
PADA SISTEM EKSITASI *AUTOMATIC VOLTAGE*
REGULATOR DENGAN SIMULINK MATLAB**

Skripsi

disusun dalam rangka penyelesaian Studi Strata 1
untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
Program Studi Fisika

oleh
Pamungkas Jati
4211412033
UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

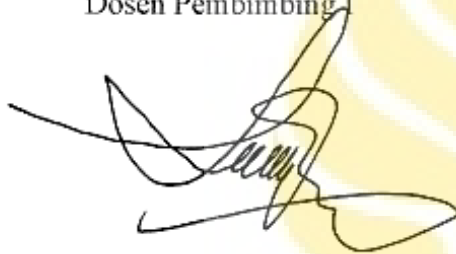
**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2016**

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang ujian skripsi Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.

Semarang, September 2016

Dosen Pembimbing I



Sunarno, S.Si M.Si

NIP. 19720112 199903 1 003

Dosen Pembimbing II



Dr. Sujarwata, M.T.

NIP. 19610104 198903 1 001



UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi ini bebas plagiat, dan apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.

Semarang, September 2016



NIM. 4211412033

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Simulasi Kendali PID dan Logika Fuzzy pada Sistem Eksitasi *Automatic Voltage Regulator* dengan Simulink Matlab

disusun oleh

Pamungkas Jati

4211412033

telah dipertahankan di hadapan sidang Panitia Ujian Skripsi FMIPA UNNES pada tanggal 6 September 2016



Prof. Dr. Zaenuri, S.E, M.Si, Akt

NIP. 19641223 198803 1 001

Sekretaris

Dr. Suharto Linuwih, M.Si.

NIP. 19680714 199603 1 005

Ketua Penguji

Fianti, S.Si. M.Sc., Ph.D.

NIP. 19790121 200501 2 002

Anggota Penguji/

Pembimbing I

Sunarno, S.Si M.Si

NIP. 19720112 199903 1 003

Anggota Penguji/

Pembimbing II

Dr. Sujarwata, M.T.

NIP. 19610104 198903 1 001

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

- ✓ *Life isn't about finding yourself, life is about creating yourself* (George Bernard Shaw)
- ✓ *Don't compare yourself with anyone in this world, if you do so, you are insulting yourself* (Bill Gates)
- ✓ *Masa depan adalah sesuatu yang perlu dipersiapkan dengan matang dan penuh kepastian*
- ✓ *Tidak ada kesuksesan yang bisa dicapai seperti membalikkan telapak tangan* (Chairul Tanjung)
- ✓ *Aku (Allah) menuruti prasangka hamba terhadapKu, jika Ia berprasangka baik terhadapKu, maka baginya kebaikan, maka jangan berprasangka terhadap Allah kecuali kebaikan* (H.R. Bukhari)

PERSEMBAHAN

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

- ✓ *Ibu, bapak dan saudara perempuanku yang tersayang*
- ✓ *Bapak dan ibu dosen untuk semua ilmu yang telah diberikan*
- ✓ *Teman-teman seperjuangan Fisika Unnes 2012, terima kasih untuk do'a dan dukungannya.*

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas limpahan rahmat, taufik dan hidayahnya-Nya hingga penulis menyelesaikan skripsi dengan judul “ **Simulasi Kendali PID dan Logika Fuzzy pada Sistem Eksitasi *Automatic Voltage Regulator* dengan Simulink Matlab** ”.

Penulisan skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik berkat saran, bimbingan ataupun arahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum selaku Rektor Universitas Negeri Semarang.
2. Bapak Prof. Dr. Zaenuri, S.E, M.Si, Akt selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.
3. Bapak Dr. Suharto Linuwih, M.Si. selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.
4. Bapak Sunarno, S.Si M.Si selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, arahan, kritik dan saran selama penyusunan skripsi serta ilmu selama proses perkuliahan.
5. Bapak Dr. Sujarwata M.T. selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, saran, kritik dan ilmu selama proses penulisan skripsi.
6. Bapak Mahsun selaku SPS (Supervisor) Sub Unit PLTA Timo yang memberi izin untuk melaksanakan kegiatan pengambilan data lapangan.

7. Bapak Dr. Agus Yulianto, M.Si. dosen wali yang telah memberikan nasehat, arahan selama proses perwalian serta ilmu selama kuliah.
8. Rohmad, S.Si. yang telah memberikan inspirasi, masukan dan saran dalam mengembangkan desain kendali untuk AVR di Simulink Matlab.
9. Teman-teman Lab Fisika UNNES : Pradita, Farida, Reza, Mahmudah, Hanan, Nita, Susanto, Budi yang telah memberikan semangat dalam proses penyusunan laporan.
10. Teman-teman Fisika UNNES 2012 yang telah meluangkan waktunya untuk hadir menjadi peserta dalam seminar proposal serta memberikan masukan dalam proses penelitian dan semua pihak yang telah membantu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, meskipun begitu penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis, lembaga, dan pembaca pada khususnya.



UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Semarang, Juli 2016

Penulis

ABSTRAK

Jati, P. 2016. *Simulasi Kendali PID dan Logika Fuzzy pada Sistem Eksitasi Automatic Voltage Regulator dengan Simulink Matlab*. Jurusan Fisika. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Negeri Semarang. Pembimbing I: Sunarno, S.Si M.Si, Pembimbing II: Dr. Sujarwata, M.T.

Kata kunci : *Automatic Voltage Regulator*, PID, Fuzzy, Simulink.

Kestabilan tegangan terminal generator merupakan hal yang penting dalam sistem ketenagalistrikan. Alat yang berperan penting dalam stabilitas generator adalah *Automatic Voltage Regulator (AVR)*, sehingga performansi dari alat tersebut merupakan hal yang perlu diperhatikan. Implementasi kendali merupakan cara yang dapat digunakan untuk memperbaiki performansi sebuah AVR. Kendali yang saat ini banyak diaplikasikan dalam industri yaitu PID dan fuzzy. Pemodelan dilakukan untuk mengetahui performansi AVR. Pemodelan sistem AVR beserta kendalinya dibangun menggunakan Simulink Matlab. PID dirancang dengan metode *tuning* Ziegler-Nichols (ZN) dan Tyreus-Luyben (TL) sedangkan kendali fuzzy dibangun dengan 2 variabel *input* dan 1 variabel *output* yang masing-masing terdiri dari 7 himpunan fuzzy sehingga dapat diperoleh 49 aturan fuzzy. Hasil kendali kemudian dianalisis melalui 5 parameter respon waktu yaitu *rise time*, *peak time*, *settling time*, *overshoot* dan *steady state error*. Kendali PID dengan metode *tuning* ZN menghasilkan parameter performansi *rise time* = 0.19 sekon, *peak time* = 1.56 sekon, *settling time* = 3.64 sekon, *overshoot* = 45.9 % dan *SSE* = 0%, kendali PID dengan metode *tuning* TL menghasilkan parameter performansi *rise time* = 0.21 sekon, *peak time* = 1.42 sekon, *settling time* = 1.88 sekon, *overshoot* = 7.78 % dan *SSE* = 0% sedangkan kendali fuzzy memberikan performansi *rise time* = 2.47 sekon, *peak time* = 20.0 sekon, *settling time* = 4.52 sekon, *overshoot* = 0 % dan *SSE* = 0%. Kendali PID memberikan performansi yang lebih baik pada 3 parameter (*rise time*, *peak time*, dan *settling time*) sedangkan kendali fuzzy mampu memberikan performansi yang sangat baik pada parameter *overshoot*.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERSETUJUAN PEMBIMBING	ii
PERNYATAAN	iii
PENGESAHAN	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	v
PRAKATA	vi
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB	
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan	5
1.3. Pembatasan Masalah	5
1.4. Tujuan Penelitian	5
1.5. Manfaat Penelitian	6
1.6. Sistematika Skripsi	6
2. TINJAUAN PUSTAKA	8

2.1 Sistem Eksitasi Generator	8
2.2 AVR (<i>Automatic Voltage Regulator</i>).....	9
2.3 Sistem Kontrol	15
2.4 Kendali PID.....	17
2.5 Metode <i>Tuning</i> PID.....	21
2.6 Logika Fuzzy.....	24
2.7 Analisis Respon Waktu	32
3. METODE PENELITIAN	35
3.1 Tahap Persiapan	36
3.1.1 Persiapan Alat dan Bahan	36
3.1.2 Persiapan Model Simulink AVR	37
3.1.3 Persiapan Kendali AVR.....	38
3.2 Tahap Pengujian.....	41
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Hasil Penelitian	43
4.1.1 Performansi AVR Tanpa Kendali	44
4.1.2 Performansi AVR dengan Kendali PID (ZN).....	45
4.1.3 Performansi AVR dengan Kendali PID (TL)	51
4.1.4 Performansi AVR dengan Kendali Logika Fuzzy	55
4.2 Pembahasan.....	59
5. PENUTUP.....	63
5.1. Simpulan	63
5.2. Saran.....	64

DAFTAR PUSTAKA	65
LAMPIRAN	68



DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Pengaruh konstanta K_p , K_i , K_d terhadap respon sistem (Ang <i>et al.</i> , 2005).....	18
2.2 Metode <i>tuning</i> PID (Shahrokhi dan Zomorodi, 2013).....	21
2.3 <i>Tuning</i> PID metode Ziegler-Nichols (Ogata, 1997)	22
2.4 <i>Tuning</i> PID metode Tyreus-Luyben (Seborg <i>et al.</i> , 2004).	23
3.1 Spesifikasi Samsung NC108P.....	37
3.2 Nilai model AVR (Anwar dan Pan, 2014)	37
3.3 Aturan <i>tuning</i> metode Ziegler-Nichols	39
3.4 Aturan <i>tuning</i> metode Tyreus-Luyben	39
3.5 Variabel fuzzy sistem AVR	40
3.6 Kriteria performansi sistem AVR	41
4.1 Performansi AVR tanpa kendali	45
4.2 Parameter PID (respon osilasi kontinu)	46
4.3 Penentuan nilai K_{cr} dan P_{cr} metode ZN	47
4.4 Nilai K_p menurut metode ZN	48
4.5 Nilai K_p , dan K_d menurut metode ZN	59
4.6 Nilai K_p , K_i , dan K_d menurut metode ZN	50
4.7 Performansi AVR dengan kendali PID (metode ZN)	50
4.8 Nilai K_p menurut metode TL.....	51
4.9 Nilai K_p , dan K_d menurut metode TL.....	53
4.10 Nilai K_p , K_i , dan K_d menurut metode TL.....	54

4.11 Performansi AVR dengan kendali PID (metode TL).....	54
4.12 FAM (<i>Fuzzy Associative Memory</i>) untuk AVR.....	58
4.13 Keterangan Fungsi Keanggotaan (<i>Membership Function</i>)	58
4.14 Performansi AVR dengan kendali fuzzy.....	59
4.15 Komparasi performansi PID dengan FLC pada sistem AVR	60
6.1 Data Tegangan Eksitasi dan Tegangan Terminal Generator Sinkron Unit 2 PLTA Timo	74



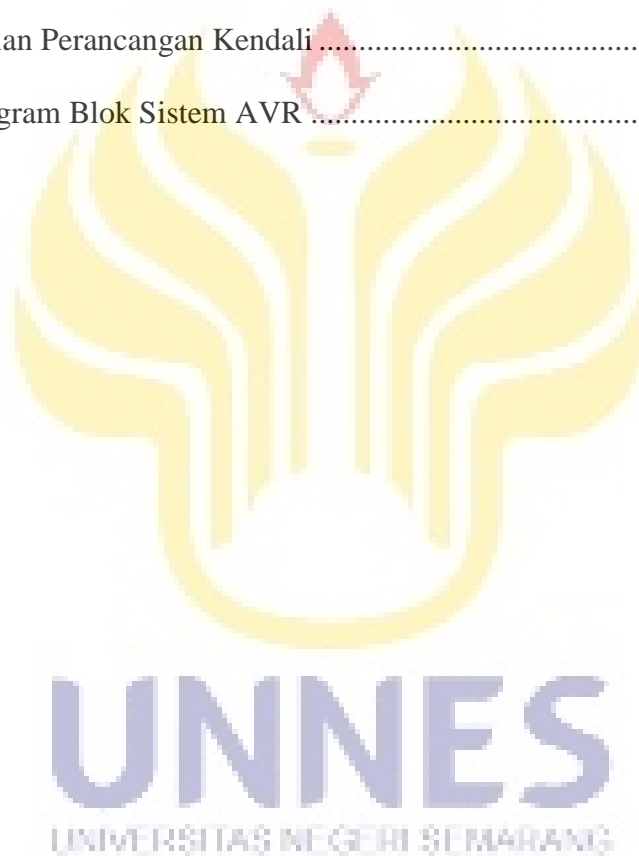
DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 <i>Automatic Voltage Regulator</i> (Gozde <i>et al.</i> , 2010)	10
2.2 Skematik rangkaian AVR (Wood dan Wollenberg, 1984).	11
2.3 Diagram blok <i>amplifier</i> (Saadat, 1999).....	12
2.4 Penambahan blok eksiter (Saadat, 1999)	13
2.5 Penambahan blok generator (Saadat, 1999).....	14
2.6 Penambahan blok sensor (Saadat, 1999)	15
2.7 Blok sederhana sistem kontrol lingkaran terbuka (Alleman, 2014).....	16
2.8 Blok sederhana sistem kontrol lingkaran tertutup (Alleman, 2014)	17
2.9 Diagram blok kontrol proporsional (Ogata, 1997).....	19
2.10 Diagram blok kontrol integral (Ogata, 1997)	20
2.11 Himpunan fuzzy pada variabel penilaian mahasiswa (Kusumadewi dan Purnomo, 2004).....	25
2.12 Representasi linear (a) naik (b) turun (Kusumadewi dan Purnomo, 2004)	27
2.13 Representasi kurva segitiga (Kusumadewi dan Purnomo, 2004)	28
2.14 Representasi kurva trapesium (Kusumadewi dan Purnomo, 2004).....	28
2.15 Struktur dasar sistem kendali fuzzy (Simoed, 2010).....	33
2.16 Kurva respon sinyal masukan Step (Ogata, 1997).....	34
3.1 Diagram alir penelitian.....	35
3.2 Rancang bangun sistem <i>automatic voltage regulator</i>	38
3.3 Kurva respon osilasi kontinu (Ogata, 1997).	39

3.4 Rancang bangun sistem <i>automatic voltage regulator</i> PID	39
3.5 Rancang bangun sistem <i>automatic voltage regulator</i> fuzzy	41
4.1 Performansi AVR tanpa kendali	44
4.2 Performansi AVR osilasi kontinu	46
4.3 Pengaruh implementasi nilai K_p dengan metode ZN	47
4.4 Pengaruh implementasi nilai K_p, K_d dengan metode ZN	50
4.5 Pengaruh Implementasi nilai K_p, K_i, K_d dengan Metode ZN	51
4.6 Pengaruh implementasi nilai K_p dengan metode TL.....	52
4.7 Pengaruh implementasi nilai K_p, K_d dengan metode TL.....	53
4.8 Pengaruh implementasi nilai K_p, K_i, K_d dengan metode TL	54
4.9 FIS editor untuk variabel fuzzy sistem AVR	56
4.10 <i>Membership function</i> variabel <i>error</i>	56
4.11 <i>Membership function</i> variabel <i>dError</i>	57
4.12 <i>Membership function</i> variabel <i>voltage control</i>	57
4.13 Performansi AVR dengan kendali logika fuzzy.....	59
4.14 Perbandingan performansi AVR kendali PID dan fuzzy	60

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
Perumusan Fungsi Alih <i>Automatic Voltage Regulator</i>	69
Perhitungan Kendali PID	73
Data Penelitian Perancangan Kendali	74
Analisis Diagram Blok Sistem AVR	76



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan daya listrik semakin meningkat seiring dengan peningkatan jumlah pengguna. Hal ini mengakibatkan peningkatan pada penggunaan listrik dalam kehidupan sehari-hari. Pertambahan beban oleh para konsumen menimbulkan konsekuensi tersendiri untuk para penyedia jasa ketenagalistrikan. Ketidakteraturan permintaan beban yang setiap saat berubah, mengakibatkan kinerja sistem tenaga listrik mendekati batas tidak aman, sehingga pengendalian operasi sistem tenaga listrik sebagai salah satu elemen penting dalam pengolahan jaringan yang bertujuan untuk memenuhi pembangkitan dan kebutuhan beban juga bertambah kompleks dan rumit (Alam *et al.*, 2015).

Terdapat delapan parameter terkait kualitas tenaga listrik (*Power Quality*) yaitu tegangan diluar standar, tegangan tidak seimbang, lonjakan tegangan, kedip tegangan, kelip, harmonisa, frekuensi, suplai listrik terputus (PLN, 2013). Gangguan yang terjadi pada masing-masing parameter tersebut tidak boleh melebihi batas nilai toleransi yang telah ditentukan, sehingga kestabilan frekuensi dan tegangan harus terjaga. Kestabilan sistem tenaga listrik merupakan kemampuan sistem untuk kembali bekerja normal setelah mengalami perubahan beban, sedangkan

ketidakstabilan sistem tenaga listrik berarti kehilangan sinkronisasi sistem sehingga sistem tidak lagi mampu bekerja normal setelah mengalami perubahan beban. Oleh karena itu, untuk kestabilan sistem tersebut, sebuah generator perlu didukung oleh sistem eksitasi. Menurut Syahril, sebagaimana dikutip Alam *et al.*, (2015: 98), pengendalian generator oleh eksitasi merupakan hal penting yang harus ditangani oleh generator agar sistem tetap terjaga pada kestabilannya. Eksitasi pada generator adalah pemberian arus searah pada belitan medan yang terdapat pada rotor (Pane, 2010). Perubahan arus eksitasi dapat merubah tegangan output generator karena besar kecilnya arus eksitasi mempengaruhi fluks rotor (φ), fluks rotor ini berperan pada pembangkitan gaya gerak listrik induksi (E).

Pengaturan arus eksitasi dilakukan oleh perangkat elektronik yang disebut dengan *Automatic Voltage Regulator* (AVR). AVR adalah suatu perangkat yang dipasang pada generator yang dapat bekerja secara otomatis mengatur tegangan yang dihasilkan oleh generator agar tetap stabil (Gunadin, 2008). Prinsip kerja dari AVR adalah mengatur arus penguatan (*excitation*) pada eksiter. Apabila tegangan *output* generator di bawah tegangan nominal yang telah ditentukan operator, maka AVR akan memperbesar arus penguatan (*excitation*) pada eksiter. Hal ini juga berlaku sebaliknya, apabila tegangan *output* generator melebihi tegangan nominal, maka AVR akan mengurangi arus penguatan (*excitation*) pada eksiter. Setiap ketidakstabilan tegangan output generator akan direspon untuk distabilkan oleh AVR secara otomatis karena dilengkapi dengan peralatan

seperti alat yang digunakan untuk pembatasan penguat minimum ataupun maksimum yang bekerja secara otomatis. Stabilitas dan kecepatan respon merupakan hal yang perlu diperhatikan dari kerja sebuah AVR, induktansi yang tinggi pada belitan medan generator akan menyebabkan sulitnya mengubah arus medan dalam rentang waktu yang singkat. Hal ini mengakibatkan munculnya *lag* (keterlambatan) yang cukup besar dalam fungsi kontrol tegangan generator (Vasanthi *et al.*, 2012). Dengan demikian, diperlukan ketepatan dalam penentuan jenis serta parameter kendali pada AVR.

Kendali yang paling banyak digunakan dalam sistem AVR adalah model kontroler PID, Fuzzy, dan Adaptif (Wilopo, 2011). Proportional Integral Derivative (PID) jenis kendali yang masih banyak digunakan untuk sistem AVR karena PID memberikan kinerja yang baik pada berbagai kondisi operasi dan mudah diimplementasikan (Shayeghi dan Dadashpour, 2012). Hal ini didukung oleh Mukherjee dan Ghoshal (2007: 1689) dalam penelitiannya yang bertajuk "*Intelligent particle swarm optimized fuzzy PID controller for AVR system*" telah melakukan analisis secara komprehensif dari pengaruh parameter kontrol PID yang berbeda pada kinerja dinamis sistem AVR. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penentuan parameter kontrol yang tepat pada PID akan memberikan hasil kinerja yang memuaskan selama gangguan sistem.

Selain kendali PID, terdapat kendali logika fuzzy (*Fuzzy Logic Control*) yang sering digunakan ketika sistem sulit dimodelkan secara

matematis. Aturan kualitatif untuk mengendalikan sistem dapat diperoleh dari logika seorang pakar. Kendali fuzzy dapat menangani sistem nonlinear yang kompleks. Kendali fuzzy didasarkan pada aturan linguistik dengan struktur umum *if-then*, yang merupakan dasar dari logika manusia. Pada saat ini, kendali fuzzy telah diterapkan pada sejumlah studi kestabilan sistem ketenagalistrikan. Karena fleksibel, mudah dioperasikan dan direvisi, kendali fuzzy adalah pilihan yang baik, terutama untuk sistem yang rumit dengan banyak variabel (Ramya dan Selvi, 2011).

Seiring perkembangan teknologi komputasi, telah tersedia beragam perangkat lunak (*software*) yang dapat digunakan untuk mensimulasikan sistem AVR, salah satunya adalah Matlab. Simulasi sistem AVR dengan Matlab bermanfaat untuk mengetahui perilaku tegangan keluaran generator tanpa menyentuh peralatan tersebut. Melalui simulasi, respon sebuah peralatan juga dapat dilihat ketika diberikan input dan ketika input tersebut diubah-ubah (Gunadin, 2008). Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk melakukan simulasi kendali PID dan fuzzy pada AVR menggunakan bantuan *software* Simulink Matlab. Hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai salah satu rujukan untuk penerapan kendali PID dan fuzzy pada AVR berdasarkan hasil respon tegangan keluaran generator yang diperoleh.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan dalam penelitian ini, yaitu,

1. Bagaimana merancang sistem kendali PID dan fuzzy pada AVR menggunakan Simulink Matlab ?
2. Bagaimana performansi sistem AVR terhadap masukan yang diberikan setelah diimplementasikannya kendali PID dan fuzzy ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah,

1. Membangun model sistem kendali PID dan fuzzy pada AVR menggunakan Simulink Matlab.
2. Mengetahui dan membandingkan performansi sistem AVR setelah diimplementasikannya kendali PID dan fuzzy.

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan uraian latar belakang dan tujuan yang telah disebutkan, dapat diperoleh manfaat dalam penelitian ini antara lain :

1. Membantu mengatasi masalah terkait kestabilan tegangan generator melalui hasil respon performansi AVR yang telah diimplementasikan kendali PID dan fuzzy.
2. Memberikan informasi tambahan tentang aplikasi sistem kendali, khususnya ilmu yang berfokus pada kajian kendali PID dan fuzzy.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diterapkan pada penulisan skripsi ini adalah :

1. Kestabilan tegangan terminal generator dipengaruhi pembangkitan medan magnet oleh arus eksitasi yang disuplai AVR sedangkan pengaruh kecepatan rotasi turbin yang diatur oleh governor diabaikan dan dianggap konstan.
2. Penelitian yang dilakukan hanya sebatas simulasi model Simulink AVR menggunakan kontrol PID dan fuzzy, dan tidak membahas terapan pada *hardware*nya.

1.6 Sistematika Penulisan

Penyusunan skripsi ini terdiri dari tiga bagian. Bagian yang pertama adalah bagian awal skripsi, yang terdiri dari halaman judul, persetujuan pembimbing, pengesahan pembimbing, pernyataan, motto, dan persembahan.

Bagian kedua adalah isi skripsi, yang terdiri dari 5 Bab yaitu Bab 1 (Pendahuluan) berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan; Bab 2 (Tinjauan Pustaka) membahas tentang teori yang berkaitan dengan penelitian; Bab 3 (Metode Penelitian) mencakup tentang desain penelitian, diagram alir penelitian, dan metode pengujian sistem; Bab 4 (Hasil dan Pembahasan) berisi tentang hasil penelitian dan pembahasan mengacu pada teori di Bab 2; Bab 5 (Penutup) membahas tentang kesimpulan dan saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil penelitian.

Pada bagian ketiga sekaligus bagian akhir skripsi berisi daftar pustaka dan lampiran.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Eksitasi Generator

Sistem eksitasi merupakan sistem pendukung kerja sebuah generator sinkron. Kinerja sistem ini memberikan dampak secara langsung terhadap kestabilan tegangan terminal generator. Sistem eksitasi generator dapat didefinisikan dengan pemberian arus searah (DC) pada kumparan medan (Pane, 2010). Arus eksitasi yang disuplai oleh sumber eksitasi digunakan oleh kumparan medan (kumparan yang terdapat pada rotor) untuk menghasilkan medan magnet. Sesuai dengan prinsip elektromagnet, apabila terdapat konduktor dialiri arus searah maka konduktor tersebut akan menghasilkan fluks magnet disekitarnya. Selanjutnya kumparan medan yang telah disuplai arus eksitasi akan diputar bersamaan dengan perputaran rotor. Medan magnet putar dari kumparan medan selanjutnya akan diinduksi oleh kumparan jangkar (kumparan yang terdapat pada stator) sehingga akan dihasilkan fluks magnet yang besarnya berubah-ubah terhadap waktu. Perubahan fluks magnet yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan Gaya Gerak Listrik (GGL) induksi pada ujung-ujung kumparan. Relasi antara tegangan induksi dengan medan magnet yang dibangkitkan pada generator sinkron dapat dinyatakan dengan persamaan 2.1,

$$E = c.n.\varphi \qquad 2.1$$

dengan E = Gaya Gerak Listrik Induksi (Volt),

c = Konstanta Generator,

n = Putaran (Rpm),

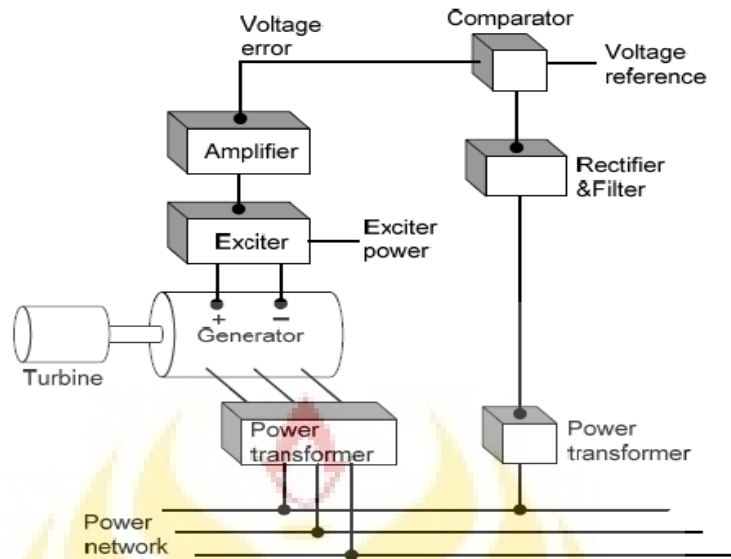
φ = Fluks magnetik (Weber).

Persamaan 2.1 menunjukkan tiga variabel yang mempengaruhi besarnya tegangan induksi yang dihasilkan. Berdasarkan ketiga variabel, hanya terdapat dua variabel yang nilainya dapat diubah-ubah yaitu putaran dan fluks magnetik. Pengaturan putaran turbin dilakukan oleh perangkat disebut Governor sedangkan pengaturan fluks magnetik dilakukan oleh AVR

2.2 AVR (*Automatic Voltage Regulator*)

AVR adalah suatu perangkat yang dipasang pada generator yang dapat bekerja secara otomatis mengatur tegangan yang dihasilkan oleh generator agar tetap stabil (Gunadin, 2008). Model AVR yang biasanya terdapat pada sebuah generator diperlihatkan pada Gambar 2.1. Adapun prinsip kerja AVR adalah sebagai berikut,

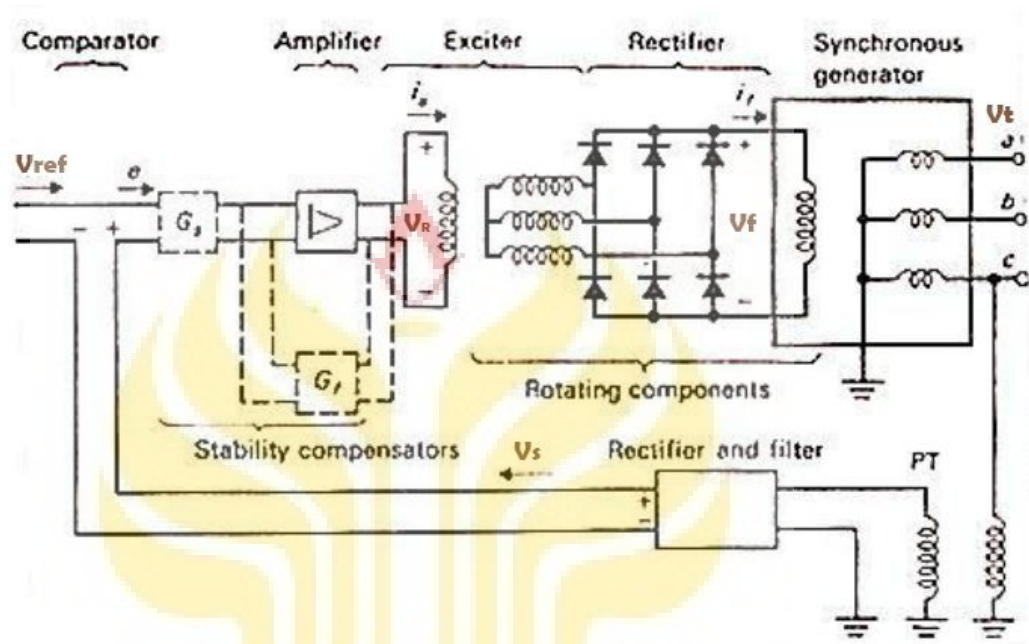
1. Ketika generator terhubung dengan beban, maka akan mengalir arus ke lilitan stator yang besarnya sesuai dengan beban yang terhubung. Arus yang mengalir pada lilitan stator menimbulkan garis gaya magnet yang arahnya berlawanan dengan garis gaya magnet yang dihasilkan lilitan rotor.



Gambar 2.1 *Automatic Voltage Regulator* (Gozde *et al.*, 2010).

2. Gaya magnetik yang saling berlawanan menyebabkan gaya magnetik dari rotor berkurang, sehingga tegangan yang ditimbulkan oleh lilitan stator berkurang.
3. Penurunan tegangan akan dideteksi oleh AVR untuk dibandingkan dengan tegangan referensi. Perbandingan tegangan terminal yang lebih kecil dari tegangan referensi maka AVR akan memberi tambahan arus dengan menaikkan tegangan eksiter.
4. Kenaikan arus pada stator eksiter berpengaruh terhadap tegangan yang dihasilkan rotor eksiter. Apabila arus rotor eksiter meningkat maka suplai arus ke rotor generator utama juga meningkat, sehingga medan magnet yang dihasilkan juga bertambah
5. Penambahan garis gaya magnet setara dengan perlawanan garis gaya yang ditimbulkan arus lilitan stator, dengan demikian tegangan yang terbangkit

akan tetap besarnya. Diagram blok sebuah AVR dapat ditelusur dari skematik rangkaian pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Skematik rangkaian AVR (Wood dan Wollenberg, 1984).

a. *Amplifier*

Tegangan keluaran *amplifier* V_R merupakan hasil dari perkalian konstanta *amplifier* K_A dengan tegangannya *error* V_e . V_e merupakan selisih antara tegangan referensi V_{ref} dengan tegangan yang terdeteksi oleh sensor V_S .

2.2

$$V_R = K_A(|V_{ref}| - |V_S|)$$

ditransformasikan Laplace menjadi

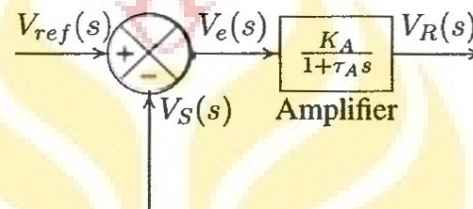
$$V_R(s) = K_A(|V_{ref}|(s) - |V_S|(s)) \quad 2.3$$

$$V_R(s) = K_A V_e(s) \quad 2.4$$

Persamaan 2.4 merupakan gambaran *amplifier* yang memiliki respon yang sangat cepat, tetapi pada kenyataannya, *amplifier* memiliki waktu tunda yang didefinisikan dengan T_A sehingga persamaan 2.4 menjadi,

$$\frac{V_R(s)}{V_e(s)} = \frac{K_A}{1+T_A s} \quad 2.5$$

hasilnya diperoleh diagram blok *amplifier* seperti berikut,



Gambar 2.3 Diagram blok *amplifier* (Saadat, 1999).

b. Eksiter

Peran komponen ini adalah menyediakan atau mensuplai arus medan yang dibutuhkan oleh generator sinkron. Pada tegangan masukan eksiter V_R terdapat arus medan eksiter, resistansi dan induktansi yang berturut-turut dinyatakan dengan i_e , R_e dan L_e sehingga,

$$V_R = R_e i_e + L_e \frac{d}{dt} i_e \quad 2.6$$

transformasi Laplace persamaan 2.6 menjadi,

$$V_R(s) = [R_e + sL_e]i_e(s) \quad 2.7$$

arus medan eksiter i_e menghasilkan tegangan V_f yang disearahkan oleh kumparan *rectifier* K_f pada rotor eksiter yang dapat dinyatakan,

$$V_F = K_f i_e \quad 2.8$$

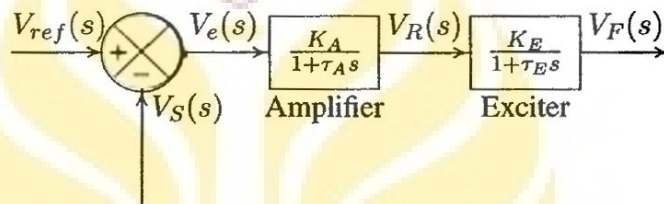
kemudian ditransformasikan Laplace menjadi,

$$V_F(s) = K_f i_e(s) \quad 2.9$$

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_f}{[R_e + sL_e]}$$

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1 + T_E s} \quad 2.10$$

T_E merupakan konstanta waktu eksiter. *Amplifier*, dan eksiter dapat digambarkan dalam diagram *loop* AVR seperti berikut,



Gambar 2.4 Penambahan blok eksiter (Saadat, 1999).

c. Generator

Tegangan masukan generator V_F dapat didefinisikan dengan perkalian arus DC yang disuplai eksiter i_f dengan resistansi kumparan R_f dan induktansi kumparan L_f ,

$$V_F = R_f i_f + L_f \frac{d}{dt} i_f \quad 2.11$$

persamaan 2.11 ditransformasikan Laplace menjadi,

$$V_F(s) = R_f i_f(s) + sL_f i_f(s)$$

$$V_F(s) = [R_f + sL_f] i_f(s) \quad 2.12$$

hubungan tegangan induksi generator V_t dengan arus medan i_f dapat dituliskan,

$$V_t = \frac{\omega L_f a i_f}{\sqrt{2}} \quad 2.13$$

$$i_f = \frac{\sqrt{2}}{\omega L_{fa}} V_t$$

$$i_f(s) = \frac{\sqrt{2}}{\omega L_{fa}} V_t(s) \quad 2.14$$

L_{fa} adalah koefisien induktansi antara medan rotor dan kumparan stator, substitusi persamaan 2.14 ke persamaan 2.12, sehingga diperoleh

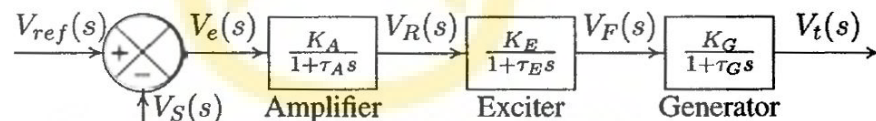
$$V_F(s) = [R_f + sL_f] \frac{\sqrt{2}}{\omega L_{fa}} V_t(s)$$

$$V_t(s) = \frac{\omega L_{fa}}{\sqrt{2}} \frac{1}{R_f + sL_f} V_F(s)$$

$$\frac{V_t(s)}{V_F(s)} = \frac{K_G}{1 + T_G s} \quad 2.15$$

K_G adalah konstanta generator dan T_G adalah konstanta waktu generator.

Penambahan blok generator pada AVR ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Penambahan blok generator (Saadat, 1999).

d. Sensor

Sensor pada AVR berupa *Potential Transformer* (PT) berfungsi untuk mendeteksi tegangan keluaran generator sinkron sekaligus menurunkan level tegangan sebesar K_R , sedangkan *rectifier feedback* berfungsi untuk menyearahkan tegangan dari keluaran generator sinkron V_t . Adapun

tegangan keluaran sensor V_S secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut,

$$V_i = V_t$$

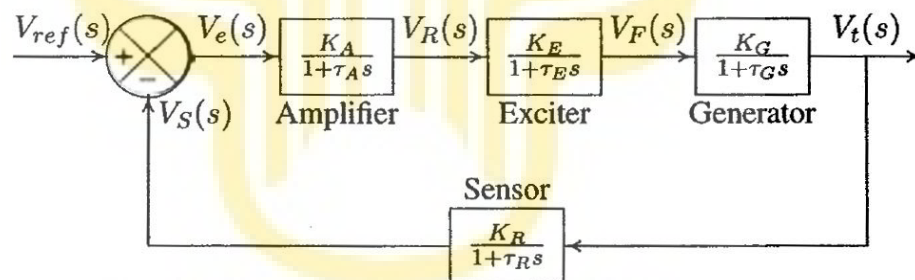
$$V_S = K_R V_t$$

$$V_S(s) = K_R V_t(s) \quad 2.16$$

pada sensor juga terdapat rentang waktu tunda yang didefinisikan dengan T_R sehingga persamaan 2.16 menjadi,

$$\frac{V_S(s)}{V_t(s)} = \frac{K_R}{1+T_R s} \quad 2.17$$

hasilnya diperoleh diagram blok AVR seperti berikut,



Gambar 2.6 Penambahan blok sensor (Saadat, 1999).

2.3 Sistem Kontrol

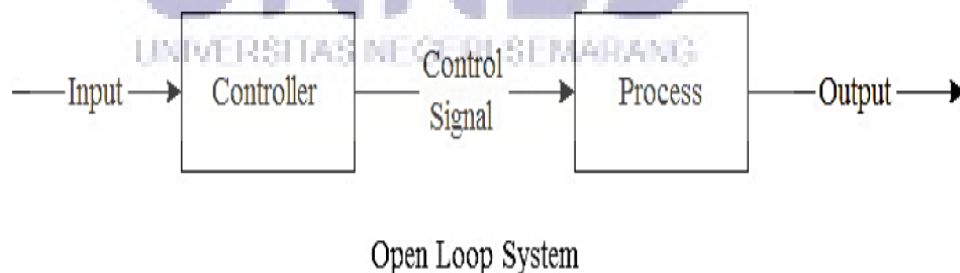
Sistem kontrol merupakan cara yang dipelajari dari kebiasaan manusia dalam pengamatan kualitas produk yang dihasilkan sehingga memiliki karakteristik sesuai dengan yang diharapkan. Seiring perkembangan teknologi, cara manusia dalam melakukan kegiatan kontrol juga ikut mengalami pergeseran. Semula pekerjaan kontrol hanya dilakukan oleh manusia (*manual system*), tetapi kemudian perlahan-lahan mulai digantikan

oleh mesin yang bekerja secara otomatis (*automatic system*). Pada bidang industri penerapan mesin-mesin otomatis pada sistem kontrol bertujuan untuk meningkatkan kualitas produksi, meningkatkan kuantitas produksi dan menekan biaya produksi.

Sistem kontrol pada dasarnya memiliki tujuan untuk menghasilkan nilai keluaran (*output*) sesuai yang diharapkan berdasarkan nilai masukan (*input*) yang diberikan kepada sistem. Sistem kontrol dapat digolongkan menjadi dua jenis yaitu sistem kontrol lingkaran terbuka (*open loop system*) dan sistem kontrol lingkaran tertutup (*close loop system*).

2.3.1 Sistem Kontrol Lingkaran Terbuka

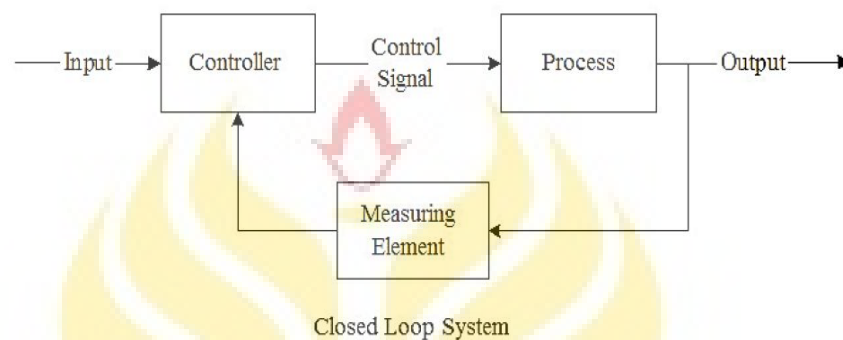
Sistem kontrol lingkaran terbuka adalah sistem kontrol yang nilai keluarannya tidak diumpanbalik untuk dibandingkan dengan nilai masukan. Diagram sederhana sistem kontrol lingkaran terbuka dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Blok sederhana sistem kontrol lingkaran terbuka (Alleman, 2014).

2.3.2 Sistem Kontrol Lingkaran Tertutup

Merupakan sistem kontrol dengan nilai keluarannya diumpanbalik untuk dibandingkan dengan nilai masukan sistem. Gambar 2.8 menunjukkan diagram sederhana sistem kontrol lingkaran tertutup.



Gambar 2. 8 Blok sederhana sistem kontrol lingkaran tertutup (Alleman, 2014).

2.4 Kendali PID

PID merupakan teknik kontrol yang banyak digunakan dalam proses industri. Berdasarkan survey, dijumpai kenyataan bahwa 97% industri yang bergerak dalam bidang proses (seperti industri kimia, *pulp*, makanan, minyak dan gas) menggunakan PID sebagai komponen utama dalam pengontrolannya (Setiawan, 2008). Terdapat beberapa pertimbangan mengapa kontrol PID banyak digunakan, diantaranya adalah kesederhanaan dan minim biaya (Vasanthi *et al.*, 2012). Dewasa ini PID sering dijumpai bukan hanya dalam bentuk modul kontrol sederhana seperti *temperature controller*, *pressure controller* dan sebagainya, tetapi sudah berkembang dalam bentuk modul yang lebih kompleks yang dapat berfungsi untuk mengontrol beberapa

variabel sekaligus (*Distributed Control System*), bahkan dalam bentuk modul independen seperti sistem PLC (*Programmable Logic Controller*).

PID didefinisikan melalui tiga parameter kontrol yaitu proportional (K_p), integral (K_i) dan derivative (K_d). Masing – masing parameter tersebut saling mempunyai pengaruh yang berbeda terhadap pencapaian performansi sistem yang ditentukan, sehingga perlu dikombinasikan untuk melengkapi kekurangan masing-masing parameter. Pengaruh dari masing-masing kontroler terhadap respon transien dan respon tunak sistem secara lengkap ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Pengaruh konstanta K_p, K_i, K_d terhadap respon sistem
(Ang *et al.*, 2005).

Closed-Loop Response	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady-State Error	Stability
Increasing K_p	Decrease	Increase	Small Increase	Decrease	Degrade
Increasing K_i	Small Decrease	Increase	Increase	Large Decrease	Degrade
Increasing K_d	Small Decrease	Decrease	Decrease	Minor Change	Improve

2.4.1 Kontrol Proportional (K_p)

Kontrol proportional pada dasarnya adalah sebuah *amplifier* dengan penguatan (*gain*) yang disesuaikan (Ogata, 1997). Hubungan antara sinyal keluaran kendali dengan sinyal kesalahan pada aksi kontrol proportional dapat dituliskan,

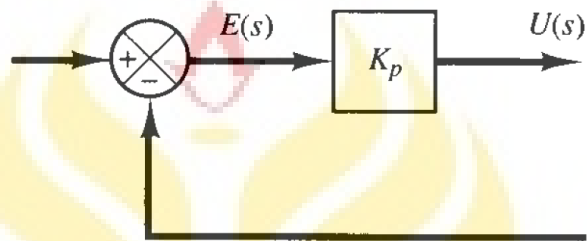
$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad 2.18$$

persamaan 2.18. apabila ditransformasikan Laplace menjadi

$$U(s) = K_p \cdot E(s)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad 2.19$$

diagram blok kontrol proportional ditunjukkan pada Gambar 2.9



Gambar 2. 9 Diagram blok kontrol proportional (Ogata, 1997).

2.4.2 Kontrol Integral (K_i)

Pada kontrol integral, sinyal keluaran kendali ini didefinisikan sebagai tingkat perubahan sinyal keluaran yang sebanding dengan sinyal kesalahan (*error*). Persamaan matematis kontrol integral dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i \cdot e(t)$$

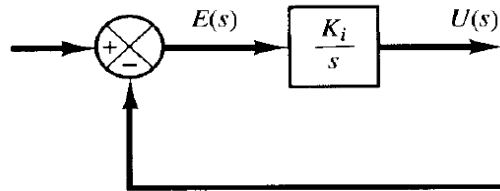
$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad 2.20$$

ditransformasikan Laplace menjadi

$$U(s) = \frac{K_i}{s} E(s)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad 2.21$$

Gambar 2.10 menunjukkan diagram blok untuk kontrol integral.



Gambar 2. 10 Diagram blok kontrol integral (Ogata, 1997).

2.4.3 Kontrol Derivative (K_d)

Kontrol derivative tidak bisa diaplikasikan tanpa kendali lain, karena kontroler ini hanya akan bekerja jika terdapat perubahan *error*, apabila *error* statis maka kontrol derivative tidak bereaksi.

2.4.4 Kombinasi K_p , K_i , dan K_d

Terdapat beberapa kombinasi PID yang diperbolehkan yakni PI, PD, dan PID. Secara garis besar kelebihan pada masing-masing parameter PID adalah,

- K_p : mempercepat respon transien
- K_i : memperbaiki respon *steady state error*
- K_d : memberikan efek redaman.

Kendali PID dapat dituliskan secara matematis sebagai berikut,

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad 2.22$$

ditransformasikan Laplace menjadi

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{K_p}{T_i s} E(s) + K_p T_d s E(s)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_p}{T_i s} + K_p T_d s$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad 2.23$$

dengan $K_p = \text{Gain Proportional}$

$T_i = \text{Waktu Integral}$

$T_d = \text{Waktu Derivative}$

2.5 Metode *Tuning* PID

Tuning kontroler merupakan proses pemilihan parameter kontroler sehingga diperoleh performansi yang baik (Ogata, 1997). Menurut Shahrokhi dan Zomorodi (2013:1), terdapat beberapa jenis *tuning* PID yang disediakan yaitu,

Tabel 2. 2 Metode *tuning* PID (Shahrokhi dan Zomorodi, 2013).

Metode Close Loop	Metode Open Loop
Ziegler Nichols	Cohen Coon
Tyres-Luyben	Ziegler Nichols Open Loop
Osilasi Teredam	Kriteria Kesalahan Minimum

Pada sistem lingkaran tertutup (*Close Loop System*), metode yang cukup banyak diaplikasikan untuk mencari nilai PID adalah Ziegler-Nichols dan Tyres-Luyben. Kedua metode tersebut sering digunakan karena prosedur *tuning* yang sederhana dan memberikan performansi yang baik pada *plant*.

2.5.1. Metode Ziegler – Nichols

Metode Ziegler-Nichols (ZN) dipublikasikan oleh John G Ziegler dan Nathaniels B Nichols pada tahun 1942. Metode ZN dibagi lagi menjadi 2 metode yaitu, metode kurva reaksi (*open loop*) dan metode osilasi (*close loop*). Pada metode *close loop*, penentuan K_p , K_i , dan K_d diperoleh dengan melibatkan nilai penguatan kritis (K_{cr}) dan periode kritis (P_{cr}). Penguatan kritis adalah nilai K_p ($K_i, K_d = 0$) pada saat respon sistem berosilasi kontinu, sedangkan periode kritis adalah selisih antara puncak ke puncak atau lembah ke lembah yang berdekatan ketika respon sistem berosilasi kontinu.

Tabel 2. 3 *Tuning* PID metode Ziegler-Nichols (Ogata, 1997).

Jenis Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$		
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1.2}$	-
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

2.5.2. Metode Tyreus – Luyben

Menurut Haugen, sebagaimana dikutip oleh Raut (2014: 618), prosedur metode Tyreus – Luyben (TL) hampir sama dengan metode Ziegler-Nichols tetapi terdapat perbedaan pada *setting* akhir parameter kendali. Metode ini dapat digunakan untuk kendali dengan kombinasi PI dan PID. Metode Tyreus-Luyben juga menggunakan penguatan kritis (K_{cr}) dan periode kritis (P_{cr}) yang kemudian disubstitusikan ke dalam perumusan seperti ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 *Tuning* PID metode Tyreus-Luyben (Seborg *et al.*, 2004).

Jenis Kontroler	K_p	T_i	T_d
PI	$\frac{K_{cr}}{3.2}$	$2.2P_{cr}$	-
PID	$0.45K_{cr}$	$2.2P_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{6.3}$

Metode Tyreus-Luyben memiliki keunggulan pada respon osilasi yang lebih kecil dibandingkan dengan metode Ziegler-Nichols, selain itu juga memberikan respon yang lebih baik terhadap gangguan.

2.6 Logika Fuzzy

Logika fuzzy adalah suatu cara memetakan suatu ruang *input* ke dalam suatu ruang *output*. Pada tahun 1965, Profesor Lotfi Asker Zadeh, seorang guru besar *University of California* mempublikasikan karya ilmiah berjudul “*Fuzzy sets*”, dalam karya ilmiah tersebut Zadeh membuat terobosan baru yang memperluas konsep himpunan tegas (*Crisp Sets*), dalam arti bahwa himpunan tegas merupakan kejadian khusus dari himpunan *fuzzy* (*fuzzy sets*). Logika klasik (*crisp*) menyatakan bahwa segala hal dapat diekspresikan dalam istilah Biner (0 atau 1, hitam atau putih, ya atau tidak) sedangkan logika fuzzy memungkinkan nilai keanggotaan antara 0 dan 1, tingkat keabuan dan juga hitam dan putih, dan dalam bentuk linguistik, konsep tidak pasti seperti “sedikit”, “lumayan”, dan “sangat”.

Terdapat beberapa alasan yang mendasari mengapa logika fuzzy banyak digunakan (Kusumadewi dan Purnomo, 2004) yaitu,

1. Konsep logika fuzzy mudah dimengerti.
2. Logika fuzzy sangat fleksibel.
3. Logika fuzzy memiliki toleransi terhadap data-data yang tidak tepat.
4. Logika fuzzy mampu memodelkan fungsi-fungsi non linier yang sangat kompleks.
5. Logika fuzzy dapat membangun dan mengaplikasikan pengalaman-pengalaman para pakar secara langsung tanpa harus melalui proses pelatihan
6. Logika fuzzy dapat bekerja sama dengan teknik kendali secara konvensional.
7. Logika fuzzy didasarkan pada bahasa alami.

Pada saat ini logika fuzzy telah diaplikasikan ke dalam beberapa bidang keilmuan diantaranya,

1. Bidang teknologi, seperti transmisi otomatis pada mobil dan pemberhentian otomatis pada kereta bawah tanah.
2. Bidang kedokteran, seperti sistem diagnosis berbagai penyakit.
3. Bidang lingkungan, seperti kendali kualitas air, prediksi cuaca.
4. Bidang Ekonomi, seperti pemodelan fuzzy pada sistem produksi dan pemasaran yang kompleks.

2.6.1 Istilah-istilah Sistem Fuzzy

Ada beberapa hal yang perlu diketahui dalam memahami sistem fuzzy (Kusumadewi dan Purnomo, 2004) yaitu,

- a. Variabel Fuzzy

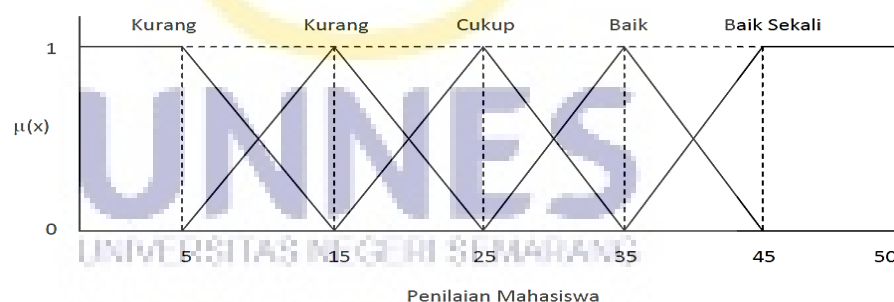
Variable fuzzy merupakan variabel yang akan dibahas dalam suatu sistem fuzzy. Contoh: umur, temperatur, permintaan.

b. Himpunan Fuzzy

Himpunan fuzzy merupakan suatu grup yang mewakili suatu kondisi atau keadaan tertentu dalam variabel fuzzy. Himpunan fuzzy memiliki dua atribut yaitu,

1. Linguistik, yaitu penamaan suatu grup yang mewakili suatu keadaan atau kondisi tertentu dengan menggunakan bahasa alami, seperti: Kurang, Cukup, Baik, Baik Sekali.
2. Numeris, yaitu suatu nilai (angka) yang menunjukkan ukuran dari suatu variable seperti: 5, 25, 35, 45.

Adapun contohnya, terdapat variabel penilaian mahasiswa yang terbagi menjadi 5 himpunan fuzzy seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Himpunan fuzzy pada variabel penilaian mahasiswa (Kusumadewi dan Purnomo, 2004).

c. Semesta Pembicaraan

Semesta pembicaraan adalah keseluruhan nilai yang diperbolehkan untuk dioperasikan dalam suatu variabel fuzzy. Semesta pembicaraan merupakan himpunan bilangan *real* yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton

dari kiri ke kanan. Nilai semesta pembicaraan dapat berupa bilangan positif maupun negatif. Contoh, semesta pembicaraan untuk variable penilaian mahasiswa dari Gambar 2.11: [0 50].

d. Domain

Domain himpunan fuzzy adalah keseluruhan nilai yang diijinkan dalam semesta pembicaraan dan boleh dioperasikan dalam suatu himpunan fuzzy. Seperti halnya semesta pembicaraan, domain merupakan himpunan bilangan real yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton dari kiri ke kanan. Nilai domain dapat berupa bilangan positif dan bilangan negatif. Contoh domain himpunan fuzzy pada Gambar 2.14 adalah,

- Kurang Sekali = [0 15]
- Kurang = [5 25]
- Cukup = [15 35]
- Baik = [25 45]
- Baik Sekali = [35 50]

2.6.2 Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik input data ke dalam nilai keanggotaannya (sering juga disebut dengan derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 sampai 1.

a. Representasi Linier

Pada representasi linear, pemetaan input ke derajat keanggotaannya digambarkan sebagai suatu garis lurus. Terdapat 2 keadaan himpunan fuzzy yang linear yaitu linear naik dan linear turun.

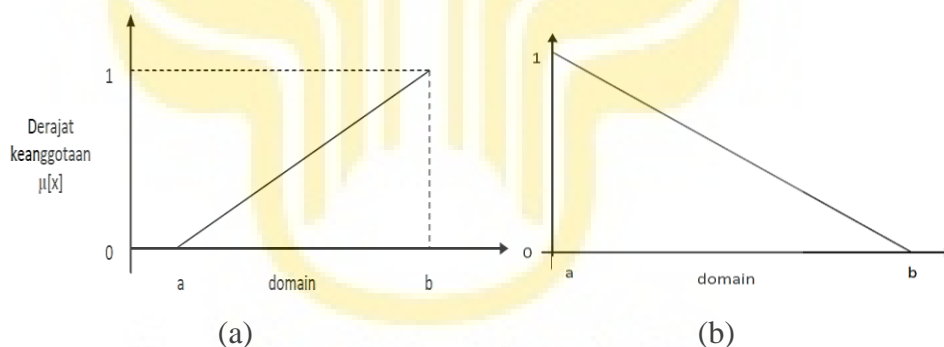
Linear naik menunjukkan semakin ke kanan nilai domain semakin besar derajat keanggotaannya, sedangkan linear turun merupakan kebalikannya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12.

Fungsi keanggotaan linier naik :

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x-a) / (b-a); & a < x < b \\ 1; & x \geq b \end{cases} \quad 2.24$$

Fungsi keanggotaan linier turun :

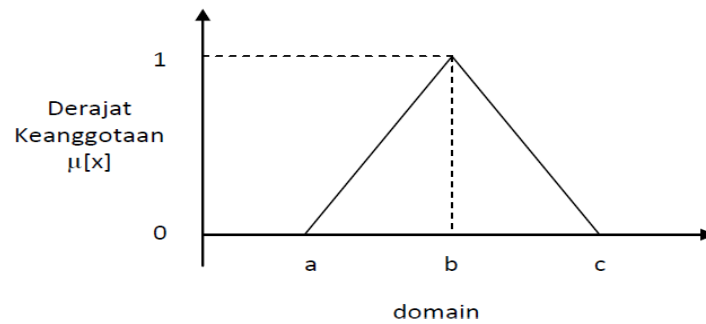
$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \geq b \\ (b-x) / (b-a) & a < x < b \\ 1; & x \leq a \end{cases} \quad 2.25$$



Gambar 2. 12. Representasi linear (a) naik (b) turun
(Kusumadewi dan Purnomo, 2004).

b. Representasi Kurva Segitiga

Kurva segitiga pada dasarnya merupakan gabungan antara dua garis linear. Representasi jenis ini dapat ditunjukkan seperti Gambar 2.13.



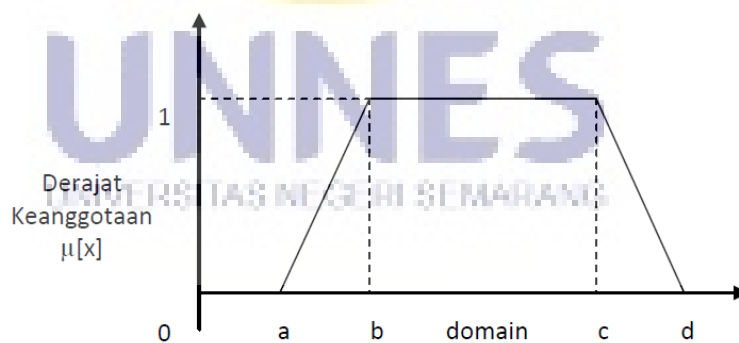
Gambar 2. 13 Representasi kurva segitiga (Kusumadewi dan Purnomo, 2004).

Fungsi Keanggotaan :

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \geq c \text{ atau } x \leq a \\ (x-a) / (b-a) & a < x < b \\ (c-x) / (c-b) & b < x < c \end{cases} \quad 2.26$$

c. Representasi Kurva Trapesium

Kurva trapesium pada dasarnya seperti bentuk segitiga, hanya saja ada titik yang memiliki nilai keanggotaan 1.



Gambar 2. 14 Representasi kurva trapesium (Kusumadewi dan Purnomo, 2004).

Fungsi Keanggotaan :

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \geq d \text{ atau } x \leq a \\ (x-a) / (b-a); & a < x < b \\ (d-x) / (d-c); & c < x < d \\ 1; & b \leq x \leq c \end{cases} \quad 2.27$$

2.6.3 Operator Dasar Zadeh

Terdapat beberapa operasi yang digunakan untuk mengkombinasi dan memodifikasi himpunan fuzzy. Hasil dari operasi 2 himpunan sering dikenal dengan nama α –predikat. Ada 3 operator dasar yang diciptakan oleh Zadeh, yaitu:

a. Operator AND

α –predikat dari hasil operasi dengan operator AND diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terkecil dari himpunan yang bersangkutan.

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A[x], \mu_B[y]) \quad 2.28$$

b. Operator OR

α -predikat dari hasil operasi dengan operator OR diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terbesar dari himpunan yang bersangkutan.

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A[x], \mu_B[y]) \quad 2.29$$

c. Operator NOT

α -predikat dari hasil operasi dengan operator NOT diperoleh dengan mengurangi nilai keanggotaan elemen pada himpunan yang bersangkutan dari 1.

$$\mu'_A = 1 - \mu_A[x] \quad 2.30$$

2.6.4 Fungsi Implikasi

Bentuk umum dari aturan yang digunakan dalam fungsi implikasi adalah,

$$\text{if } x \text{ is } A \text{ then } y \text{ is } B$$

dengan x dan y adalah skalar, sedangkan A dan B adalah himpunan fuzzy.

Proposisi yang mengikuti *if* disebut Anteseden dan Proposisi yang mengikuti *then* disebut Konsekuen.

2.6.5 Sistem Inferensi Fuzzy

2.6.5.1 Metode Mamdani

Metode Mamdani sering juga dikenal dengan nama metode Max-Min. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975.

Untuk mendapatkan *output* diperlukan 4 langkah yaitu,

1. Fuzzifikasi

Variabel *input* maupun *output* dibagi menjadi satu atau lebih himpunan.

2. Aplikasi Fungsi Implikasi

Fungsi implikasi yang digunakan dalam metode Mamdani adalah Min.

3. Komposisi Aturan (Agregasi)

Terdapat tiga metode yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem fuzzy, yaitu : max, sum dan probabilitistik OR (Probor)

4. Defuzzifikasi

Input dari defuzzifikasi adalah suatu himpunan yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan fuzzy, sedangkan *output* yang dihasilkan

merupakan suatu bilangan pada domain himpunan fuzzy tersebut.

Beberapa metode defuzzifikasi aturan Mamdani,

- a. Metode Centroid (*Center of Area*)
- b. Metode *Mean of Maximum* (MOM)
- c. Metode *Largest of Maximum* (LOM)

2.6.5.1 Sistem Kendali Fuzzy

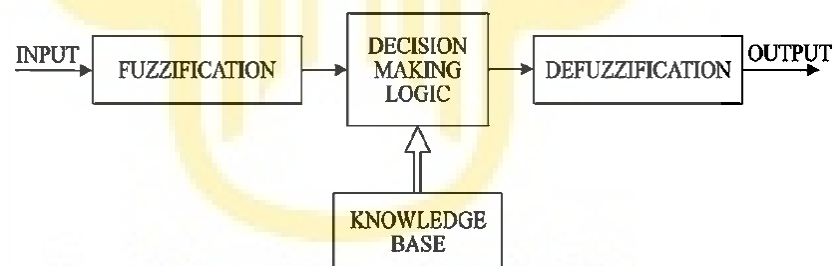
Salah satu aplikasi logika fuzzy yang telah berkembang sangat luas dewasa ini adalah dalam sistem inferensi fuzzy yaitu sistem komputasi yang bekerja atas dasar penalaran fuzzy, misalnya sistem kendali otomatis, sistem klasifikasi data, sistem pakar, sistem pengenalan pola, robotika dan lain-lain (Susilo, 2006). Terdapat empat langkah yang dapat dilakukan untuk membangun sistem kendali fuzzy, yaitu,

- a. Menentukan semua variabel yang terkait dalam proses yang akan dikendalikan. Proses ini meliputi penentuan variabel masukan dan variabel keluaran kemudian penentuan semesta numeris dan nilai linguistiknya yang direpresentasikan menggunakan fungsi keanggotaan tertentu. Hal yang perlu diperhatikan ketika menentukan variabel sistem kendali adalah,
 - *Error* (e), yaitu selisih antara nilai sesungguhnya dengan nilai yang diinginkan.
 - *Delta Error* (Δe) atau turunan dari *error*, yang menyatakan perubahan *error* itu sendiri.

Sistem kendali akan menghasilkan nilai keluaran yang menyatakan besar pengendalian yang harus diambil berdasarkan nilai e dan Δe .

- b. Menentukan fuzzifikasi yang sesuai dengan variabel-variabel yang terlibat.
- c. Membangun basis aturan fuzzy, berupa implikasi dari relasi variabel masukan dan variabel keluaran.
- d. Menentukan defuzzifikasi yang sesuai untuk mengubah himpunan fuzzy menjadi bilangan tegas (*crisp*).

Langkah-langkah tersebut dapat disajikan secara skematis seperti pada Gambar 2.15 di bawah ini.



Gambar 2. 15 Struktur dasar sistem kendali fuzzy (Simoes, 2010).

2.7 Analisis Respon Waktu

Respon waktu pada sebuah sistem kendali terdiri dari 2 (dua) bagian yaitu transien dan tunak. Respon transien (*transient response*) adalah respon sebuah sistem dari keadaan awal sampai keadaan akhir, respon ini juga disebut respon peralihan, sedangkan respon tunak (*steady-state response*)

adalah respon sesudah respon transien berakhir sampai dengan waktu tak terhingga.

Pada dasarnya sinyal masukan sistem kendali bersifat *random* sehingga sulit untuk dianalisis, oleh karena itu diperlukan sinyal uji untuk membantu memudahkan analisis performansi sebuah sistem kendali. Salah satu sinyal uji yang sering digunakan dalam analisis performansi kendali adalah sinyal undak (*step*). Menurut Ogata (1997:150) dalam bukunya yang berjudul "*Modern Control Engineering Third Edition*" terdapat beberapa spesifikasi respon transien sistem kendali dengan sinyal masukan *step* yaitu:

a. *Delay time* (t_d)

Waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai setengah dari nilai akhir.

b. *Rise Time* (t_r)

Waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai nilai akhir (0 % - 100 %)

c. *Peak Time* (t_p)

Waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai puncak pertama

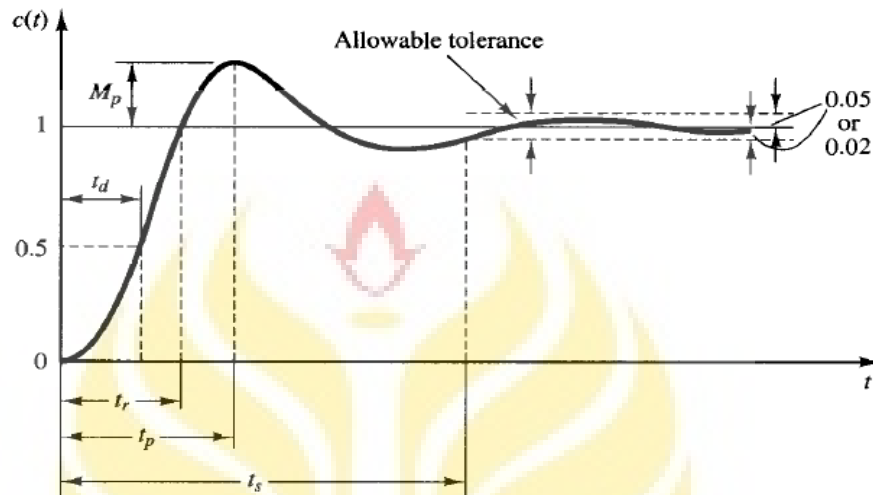
d. *Settling Time* (t_s)

Waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai kestabilan atau berada pada rentang nilai akhir (2 % - 5 %).

e. *Overshoot* (M_p)

Puncak maksimum kurva respon yang diukur dari nilai akhir.

Spesifikasi-spesifikasi tersebut dapat ditunjukkan melalui grafik seperti pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Kurva respon sinyal masukan *step* (Ogata, 1997).

BAB V

PENUTUP

13.1 Simpulan

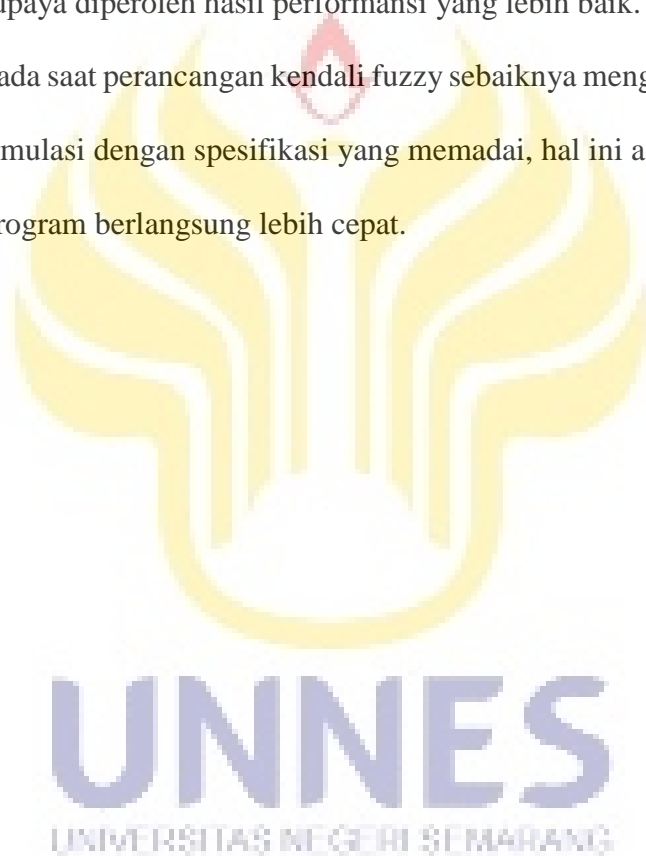
Performansi AVR merupakan hal yang perlu diperhatikan agar tegangan generator tetap dalam keadaan stabil. Implementasi kendali eksternal seperti PID dan fuzzy merupakan cara yang dapat digunakan untuk memperbaiki kinerja alat tersebut. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diperoleh beberapa simpulan sebagai berikut :

1. Model sistem kendali pada AVR menggunakan Simulink telah berhasil dibangun. Kendali PID dirancang dengan metode *tuning* ZN dan TL. Kendali logika fuzzy dirancang menggunakan 2 variabel *input* dan 1 variabel *output* yang masing – masing terdiri dari 7 MF, sehingga dapat dibuat 49 aturan fuzzy.
2. Kendali PID metode TL menghasilkan performansi *rise time* = 0.21 sekon, *peak time* = 1.42 sekon, *settling time* = 1.88 sekon, *overshoot* = 7.78 % dan *SSE* = 0 % sedangkan kendali fuzzy menghasilkan *rise time* = 2.47 sekon, *peak time* = 20.0 sekon, *settling time* = 4.52 sekon, *overshoot* = 0 % dan *SSE* = 0 %. Kendali PID lebih unggul pada parameter *rise time*, *peak time*, dan *settling time* sedangkan kendali fuzzy lebih baik pada tingkat *overshoot*.

13.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, adapun saran yang dapat disampaikan oleh penulis adalah:

1. Pada saat perancangan kendali fuzzy selain dibutuhkan data primer juga diperlukan konsultasi dengan seseorang yang kompeten pada bidangnya supaya diperoleh hasil performansi yang lebih baik.
2. Pada saat perancangan kendali fuzzy sebaiknya menggunakan perangkat simulasi dengan spesifikasi yang memadai, hal ini agar proses eksekusi program berlangsung lebih cepat.



DAFTAR PUSTAKA

- Alam, A. A., S. Syahrial., & N. Taryana. 2015. Pemodelan dan Simulasi Automatic Voltage Regulator untuk Generator Sinkron 3 kVA Berbasis Proportional Integral. *Reka Elkomika*, 3(2), 97-110.
- Alleman, G. B. 2014. *Control Systems - Their Misuse and Abuse*. Tersedia di http://herdingcats.typepad.com/my_weblog/2014/07/control-systems-their-misuse-and-abuse.html [diakses 5-4-2016].
- Anwar, M. N., & S. Pan. 2014. A frequency domain design of PID controller for an AVR system. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE C (Computers & Electronics)*, 15(4), 293-299.
- Ang, K. H., Chong, G., & Y. Li. 2005. PID control system analysis, design, and technology. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 13(4), 559-576.
- Gaurav, A. K. 2012. Comparison between Conventional PID and Fuzzy Logic Controller for Liquid Flow Control: Performance Evaluation of Fuzzy Logic and PID Controller by Using MATLAB/Simulink. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 84-88.
- Ginanjari, A. 2011. *Penerapan Metode Tsukamoto (Logika Fuzzy) Dalam Sistem Pendukung Keputusan Untuk Menentukan Jumlah Produksi Barang Berdasarkan Data Persediaan dan Jumlah Permintaan*. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Godjevac, J. 2000. *Comparison Between PID and fuzzy control*. Tersedia di <http://citeseer.nj.nec.com/godjevac93comparison.html>[diakses 25-5-2016].
- Gunadin, I. C. 2008. Analisis Penerapan PID Controller Pada AVR (Automatic Voltage Regulator). *Media Elektrik*, 155-161.
- Haugen, F. 2010a. Comparing PI Tuning Methods in a Real Benchmark Temperature Control System. *Modeling, Identification and Control*, 31(3), 79-91.
- Haugen, F. 2010b. Ziegler-Nichols' Closed-Loop Method. *TechTeach*, Hal. 1-7.
- Kusumadewi, S. & H. Purnomo. 2010. *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan* (2nd ed.). Yogyakarta: Graha Ilmu.

- Mukherjee, V., & S. P. Ghoshal. 2007. Intelligent Particle Swarm Optimized Fuzzy PID Controller for AVR System. *Electric Power Systems Research*, 77(12), 1689-1698.
- Ogata, K. 1997. *Modern Control Engineering* (3rd ed.). New Jersey: Prentice-Hall.
- Olle, I. E. 2003. *Electric Energy System Theory – An Introduction*. New Delhi: Tata Mc Graw Hill publishing Company.
- Pane, E. 2010. *Studi Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Permanent Magnet Generator (Aplikasi pada Generator Sinkron di PLTD PT. Manunggal Wiratama)*. Medan: Jurusan Teknik Elektro FT Universitas Sumatera Utara.
- PLN. 2013. *Mutu Produk Menuju World Class Services 2015*. Surabaya: PT. PLN (Persero) Distribusi Jawa Timur.
- Ramya, R. & K. Selvi. 2011. A Simple Fuzzy Excitation Control System for Synchronous Generator. *Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT)*, 35-39.
- Raut, K. H. & S. R. Vaishnav. 2014. Performance Analysis of PID Tuning Techniques Based on Time Response Specification. *IJIREEICE*, 2(1), 616-619.
- Saadat, H. 1999. *Power System Analysis*. Boston: McGraw-Hill.
- Seborg, D.E., T.F. Edgar & D.A. Mellichamp. 2004. *Process Dynamics and Control* (2nd ed.). New Jersey: John Wiley and Sons.
- Setiawan, Iwan. 2008. *Kontrol PID untuk Proses Industri*. Jakarta: Elex Media Komputindo.
- Shahrokhi, M. & A. Zomorodi. 2013. *Comparison of PID Controller Tuning Methods*. Tehran: Department of Chemical & Petroleum Engineering Sharif University of Technology.
- Shayeghi, H. & J. Dadashpour. 2012. Anarchic Society Optimization Based PID Control of an Automatic Voltage Regulator (AVR) System. *Electrical and Electronic Engineering*, 2(4), 199-207.
- Simoës, M. 2010. *Introduction to Fuzzy Control*. Colorado: Colorado School of Mines-Engineering Division.
- Skogestad, S. 2001. Probably the Best Simple PID Tuning Rules In The World. *Journal of Process Control*, 1-28.

- Susilo, F. 2006. *Himpunan dan Logika Kabur serta Aplikasinya*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Syahril, D. 2004. *Perancangan Automatic Voltage Regulator*. Bandung: Institut Teknologi Nasional.
- Vasanthi, S., M.Gopila. & I.Gnanambal. 2012. Fuzzy and PID Excitation Control System with AVR In Power System Stability Analysis. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*,1(5), 95-99.
- Wilopo, E. N. 2011. *Perencanaan Optimal Sistem Kontrol AVR (Automatic Voltage Regulator) Untuk Memperbaiki Kestabilan Tegangan Dengan Menggunakan Algoritma Genetik (Doctoral dissertation)*. Semarang: Jurusan Teknik Elektro FT Universitas Diponegoro.
- Wood, A. J. & B. F. Woolenberg. 1984. *Power Generation Operation and Control*. New York: John Wiley and Sons.

