

**IMPLEMENTASI PENGENDALIAN LOGIKA *FUZZY* PADA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PIKOHIDRO (PLTPH) UNTUK
MENJAGA STABILITAS TEGANGAN KELUARAN**

(Skripsi)

Oleh :

JEFRI PRAYOGA

2115031028



JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2025

ABSTRAK

IMPLEMENTASI PENGENDALIAN LOGIKA *FUZZY* PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PIKOHIDRO (PLTPH) UNTUK MENJAGA STABILITAS TEGANGAN KELUARAN

Oleh

JEFRI PRAOGA

Pemanfaatan sumber energi terbarukan menjadi penting dalam menjawab krisis energi global dan menurunnya cadangan bahan bakar fosil. Salah satu bentuk pemanfaatan energi terbarukan adalah sistem Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) yang menggunakan aliran air kecil seperti sungai atau irigasi. Sistem ini efektif diterapkan di daerah terpencil, namun memiliki tantangan dalam menjaga kestabilan tegangan keluaran akibat fluktuasi debit air yang memengaruhi kinerja generator DC. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem pengendalian menggunakan metode logika fuzzy berbasis Arduino Uno untuk menstabilkan tegangan keluaran. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi beban (5W, 10W, 15W) dengan set-point 12V. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem fuzzy menghasilkan rata-rata *rise time* sebesar 0.773 detik, *settling time* 2.39 detik, *overshoot* maksimum 3.47%, dan error steady state sebesar 0.0475%. Sistem mampu merespon perubahan beban secara cepat dan mempertahankan tegangan keluaran yang stabil.

Kata Kunci : Logika fuzzy, PLTPH, generator DC, kestabilan tegangan, Arduino

ABSTRAK

FUZZY LOGIC CONTROL IMPLEMENTATION IN PICO-HYDRO POWER GENERATION SYSTEMS FOR OUTPUT FOR OUTPUT VOLTAGE STABILIZATION

By

JEFRI PRAYOGA

The utilization of renewable energy sources has become essential in addressing the global energy crisis and the depletion of fossil fuel reserves. One form of renewable energy application is the Pico-Hydro Power Plant (PLTPH) system, which harnesses small water flows such as rivers or irrigation channels. This system is effective for remote areas, but it faces challenges in maintaining output voltage stability due to water flow fluctuations that affect DC generator performance. This study designs and implements a control system using fuzzy logic methodology based on Arduino Uno to stabilize the output voltage. The system was tested under various load conditions (5W, 10W, 15W) with a 12V set point. Test results show that the fuzzy system achieved an average rise time of 0.773 seconds, a settling time of 2.39 seconds, a maximum overshoot of 3.47%, and a steady-state error of 0.0475%. The system responded quickly to load changes and successfully maintained stable output voltage.

Keywords: Fuzzy logic, PLTPH, DC generator, voltage stability, Arduino

**IMPLEMENTASI PENGENDALIAN LOGIKA FUZZY PADA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PIKOHIDRO (PLTPH) UNTUK
MENJAGA STABILITAS TEGANGAN KELUARAN
(Skripsi)**

Oleh :

JEFRI PRAYOGA

Sebagai salah satu syarat mendapat gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik

Universitas Lampung



JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2025

Judul Skripsi

**: IMPLEMENTASI PENGENDALIAN LOGIKA
FUZZY PADA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA PIKOHIDRO (PLTPH) UNTUK
MENJAGA STABILITAS TEGANGAN
KELUARAN**

Nama Mahasiswa

: JEFRI PRAYOGA

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2115031028

Jurusan

: Teknik Elektro

Fakultas

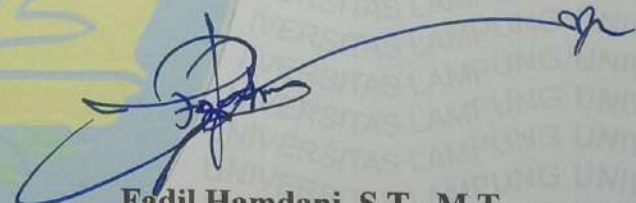
: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Ir. Noer Soedjarwanto, M.T.
NIP. 19631114 199903 1 001

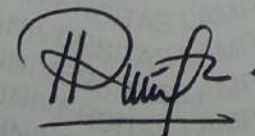


Fadil Hamdani, S.T., M.T.
NIP. 19870726 202203 1 003

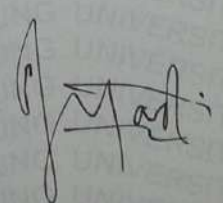
2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Herlinawati, S.T., M.T.
NIP. 19710314 199903 2 001

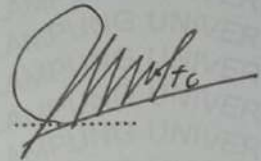


Sumadi, S.T., M.T.
NIP. 19731104 200003 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Ir. Noer Soedjarwanto, M.T.

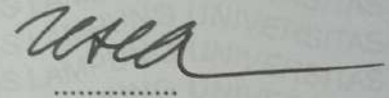


Sekretaris : Fadil Hamdani, S.T., M.T.



Penguji

Bukan Pembimbing : Osea Zebua, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP. 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 12 Juni 2025

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila di kemudian hari terdapat ketidakbenaran pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 12 Juni 2025



Jefri Prayoga

NPM. 2115031028

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Gayau pada tanggal 28 Juli 2003, sebagai anak ke-6 dari 7 bersaudara, dari pasangan Bapak Wagimin dan Ibu Sukarsih. Riwayat pendidikan penulis dimulai Sekolah Dasar (SD) di SDN 5 Banjaran (Saat ini SDN 18 Padang Cermin) pada tahun 2009. Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMPN 25 Pesawaran tahun 2014. Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Kebangsaan Lampung Selatan pada tahun 2018. Pada tahun 2021, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung dengan jalur seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis ikut serta menjadi pengurus di Organisasi dan komunitas swadayan. Diantaranya yaitu, Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) sebagai anggota Hubungan Masyarakat pada periode pertama 2021-2022, lalu menjadi anggota divisi Pendidikan pada periode kedua tahun 2022-2023. Lentera Belajar Indonesia sebagai Admin Sosial Media tahun 2022-2023. Menjadi pengajar daring di komunitas Rumah Sandar. Selain itu, Penulis pernah menjadi asisten laboratorium Konversi Energi Elektrik Universitas Lampung dengan ikut serta di praktikum matakuliah Dasar Tenaga Listrik, Mesin-Mesin Listrik, dan Elektronika Daya. Penulis sempat melaksanakan Kerja Praktik di PT. Semen Baturaja Tbk. Dalam unit *Maintenance Plan and Control*.

Halaman Persembahan

Dengan rasa syukur yang mendalam, karya ini kupersembahkan kepada:

Allah SWT, zat yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang, yang telah memberikan kekuatan, kesehatan, dan petunjuk di setiap langkah perjalanan ini.

Bapak dan Ibu tercinta, sumber semangat dan teladan dalam hidupku. Terima kasih atas doa, kasih sayang, dan pengorbanan tanpa batas yang tak pernah berhenti mengalir.

Mas, Mbak, dan Adek, terima kasih atas dukungan, canda tawa, dan semangat yang membuat hari-hariku penuh warna.

Teman-teman dan sahabat-sahabatku, yang telah hadir dalam suka dan duka, berbagi tawa dan peluh, serta menjadi bagian penting dari perjalanan panjang ini.

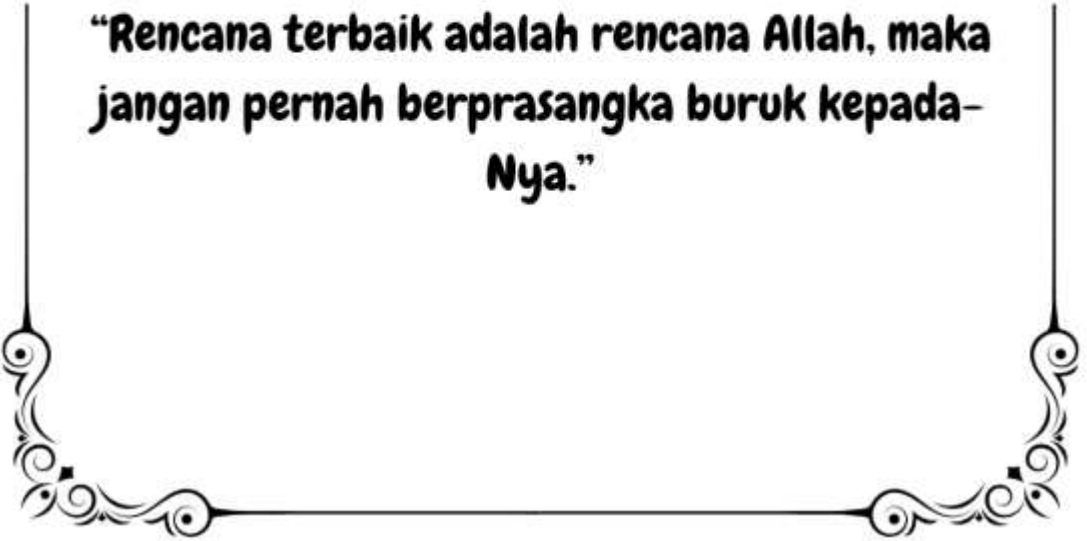
Semoga karya ini menjadi awal dari langkah-langkah besar lainnya dalam hidup, dan menjadi amal kebaikan yang membawa manfaat.

MOTTO

“Maka, sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan.”

Q.S As-Syrah : 5

“Jangan Pernah Lelah Menjadi Orang Baik”



“Rencana terbaik adalah rencana Allah, maka jangan pernah berprasangka buruk kepada-Nya.”

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT karena berkat rahmat, karunia, serta hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul: “Implementasi Pengendalian Logika *Fuzzy* Pada Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) Untuk Mnejaga Stabilitas Tegangan Keluaran” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata 1 (S1) pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa tanpa bimbingan, dukungan, dan bantuan dari berbagai pihak, skripsi ini tidak akan dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT atas segala nikmat dan kemudahannya dalam proses pengerjaan skripsi.
2. Kedua orang tua penulis Bapak Wagimin tercinta yang melihat dari atas sana. Terima kasih telah mendidik sabar, ikhlas, rendah hati, dan syukur penulis dengan amat sangat baik meskipun hanya dalam waktu sesaat namun sangat berarti. Ibu Sukarsi yang tiada henti memberi semangat, Doa, dan selalu mempercayai serta mendukung penulis sepenuhnya.
3. Saudara sedarah: Mas Rian, Reva, Mba Ros, Mba Anisa, Mba Wiwin, dan Mas Heri yang tiada henti memberikan semangat, dukungan, dan doa selama penulis menyelesaikan skripsi ini.
4. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM. selaku Rektor Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
6. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.

7. Bapak Sumadi, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Elektro Universitas Lampung.
8. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan dukungan, motivasi, dan nasihat baik selama proses perkuliahan.
9. Bapak Ir. Noer Soedjarwanto., M.T., selaku dosen pembimbing utama yang selalu memberikan nasihat, bimbingan, motivasi, pengalaman, dan kepercayaan kepada penulis, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
10. Bapak Fadil Hamdani, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing pendamping yang selalu memberikan saran dan masukan kepada penulis dalam pengerjaan skripsi.
11. Bapak Osea Zebua, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan, kritik, dan saran yang membangun kepada penulis dalam pengerjaan skripsi.
12. Dosen-dosen Jurusan teknik elektro yang telah memberikan bahan ajar dan semangat juang kepada penulis selama proses perkuliahan.
13. Almh Ibu Zaitun yang pernah dan selalu menjadi Ibu kedua Penulis, terima kasih untuk hal baik yang pernah diberikan, nasihat, dan kenangan indah yang sangat membekas.
14. Sahabat semasa SMA hingga sekarang : Latif Ghozali dan M. Trio Mulyana. Terima kasih untuk setiap kabar baik, suka duka, dan segala bentuk dukungan walau terhalang jarak kepada penulis sehingga penulis bisa terus bertahan hingga selesai.
15. Sahabat semasa SMP hingga sekarang : Alfian Almakky, M. Agil Ilham, Reta Novita Sari, Ecin Septia, Cesariana, Amanda Dwi Jayanti, Julia Prastika dan Nadia Belbina yang mau dan terus menjalin hubungan baik dan memberikan dukungan yang amat baik kepada penulis.
16. Rekan seperjuangan skripsi : Luki Nurmalik, Ananda Saputri, dan Dona Eliza yang selalu mau dan terus bertahan bersama hingga dapat menyelesaikan skripsi secara bersama.
17. Sahabat dan saudara tak sedarah : Rijal Mahmud Wahyudi, Arya Nugraha, Piz Roni, dan Ruli Amar Ma'ruf yang selalu bersama dari awal masuk ke dunia

18. perkuliahan hingga sekarang, yang selalu membantu, mendukung, menyemangati, dan memberikan hal terbaik kepada penulis hingga penulis mampu terus berjuang hingga selesai.
19. Sahabat dan saudara satu gedung beda jurusan Rega Muarif Fanny yang selalu mau dan terus siap menjadi pendengar yang baik atas segala keluhan duniawi penulis, serta mau menyisihkan waktu dari kesibukan guna memberikan dukungan, bantuan, serta nasihat amat baik kepada penulis hingga penulis siap dan menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
20. Tiga wanita hebat : Annisa Azzahra HP, Herdina Septiani, dan Anisa Salma yang selalu memberikan canda tawa, dukungan dalam bentuk apapun, saran, serta waktu terbaiknya kepada penulis yang akhirnya menjadi kenangan manis yang membekas dan tak terkikis oleh waktu.
21. Keluara Workshop Konversi 21 : Bennyamin, Daniel, Marhadi, Siti, Alex, Dina, Deni, Bimo atas kebersamaan dan kolaborasi yang konstruktif selama masa pembelajaran praktis, yang turut memperkaya pengalaman penulis secara akademik dan personal.
22. Keluarga TTL 21 : Imam Ghozali, Unedo, Frisa, Desta, Rasyid, Serly, Bagus Al fariq, Tegar, Jaya dan lainnya yang senantiasa memberikan dukungan moril dan menciptakan lingkungan belajar yang suportif dan menyenangkan.
23. Konversi 22 : Satriawan, Septa, Humam, Adit, Krisna, Bani, Novian, Emil, Jopen, ayu, Fina, Mutia terima kasih telah mengisi hari-hari dengan tawa, semangat, dan semarak yang menyemangati perjalanan ini.
24. Teman lama Wisnu Tubagus, Rizki Firmansyah, Tirta Pratama, Made Andri, Christian, Khorizal, Kelana, dan Salman yang membersamai selama di TE B.
25. Keluarga “EXCALTO” terima kasih telah menjadi bagian dari cerita ini, menjadi tempat tumbuh dan berbagi energi positif di setiap langkah.
26. Untuk Kak Saka dan Kak Alfin yang bisa menjadi tempat meminta saran baik soal kemajuan perkuliahan.
27. Terakhir untuk rasa kecewa yang sempat singgah, menusuk, bahkan menghentikan langkah sejenak—terima kasih telah hadir dalam perjalanan ini. Dari setiap luka yang ditinggalkan, penulis belajar tentang kekuatan untuk bangkit, tentang melepaskan yang tak bisa dimiliki, dan tentang merelakan demi

28. kebaikan. Rasa itu mengajarkan bahwa tidak semua yang terlihat baik ditakdirkan untuk dimiliki, namun setiap peristiwa—bahkan yang menyakitkan—selalu membawa pelajaran yang mendewasakan.

Bandar Lampung, 12 Juni 2025
Penulis,

Jefri Prayoga
2115031028

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	ii
LEMBAR PERSTUJUAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
SURAT PERNYATAAN.....	v
RIWAYAT HIDUP	ii
PERSEMBAHAN	ii
MOTTO	ii
SANWACANA.....	ii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xx
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Hipotesis	4
1.7 Sistematika Penulisan.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terdahulu.....	6
2.1.1. <i>Design and Prototyping of Electronic Load Controller for Pico Hydropower System</i>	6

2.1.2.	<i>Fuzzy Logic-Based Voltage Controller for Hybrid Off-Grid Pico-Hydropower and Solar Power Generation Systems</i>	6
2.1.3.	<i>Hydro Power Station Load Frequency Control Using Fuzzy Logic Controller</i>	7
2.1.4.	<i>Fuzzy Logic Control and PID Controller for Brushless Permanent Magnetic Direct Current Motor: A Comparative Study</i>	7
2.1.5.	<i>Load Frequency Control of Small Hydropower Plants Using One-Input Fuzzy PI Controller with Linear and Non-Linear Plant Model</i>	8
2.2	Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).....	8
2.3	Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hidro (PLTPH)	11
2.4	Generator DC	12
2.4.1.	Jenis-Jenis Generator DC	13
2.5	Motor DC	15
2.6	Turbin Air.....	16
2.7	Pulley dan V-Belt	17
2.8	Arduino Uno.....	18
2.9	Software Arduino IDE.....	19
2.10	Water Flow Sensor	19
2.11	Sensor Tegangan	20
2.12	Motor Servo.....	21
2.13	Kendali Logika <i>Fuzzy</i>	22
2.14.1	Konfigurasi <i>Fuzzy Logic</i>	23
2.14.2	Himpunan <i>Fuzzy</i>	24
2.14.3	Fungsi Keanggotaan.....	24
2.14.4	<i>Fuzzy Inference System</i>	27
III.	METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	31
3.2	Alat dan Bahan	31
3.2.1.	Perangkat Keras (<i>Hardware</i>)	31
3.2.2.	Perangkat Lunak (<i>Software</i>).....	32
3.3	Tahap Penelitian	32
3.4	Alur Penelitian.....	33
3.5	Diagram Blok Sistem	33

3.6	Diagram Blok Kontrol.....	34
3.7	Perancangan Kontrol Logika <i>Fuzzy</i>	35
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	38
4.1	Hasil Perancangan Kendali <i>Fuzzy</i>	38
4.1.1.	Fungsi Keanggotaan <i>Input</i> dan <i>Output</i>	38
4.1.2.	Grafik Keanggotaan	39
4.1.3.	Aturan Kendali <i>Fuzzy</i>	41
4.2	Skematik Sistem	42
4.3	Perhitungan Galat dan Kalibrasi.....	43
4.3.1.	Kalibrasi Sensor Tegangan	43
4.3.2.	Kalibrasi Motor Servo.....	44
4.4	Relasi Alat	46
4.5	Pemrograman Arduino dengan <i>Fuzzy Logic</i>	48
4.6	Pengujian Sistem <i>Fuzzy Logic</i>	52
4.6.1.	Kondisi Tanpa Beban.....	52
4.6.2.	Kondisi Pengujian Beban 5 Watt	55
4.6.3.	Kondisi Pengujian Beban 10 Watt	56
4.6.4.	Kondisi Pengujian Beban 15 Watt	57
4.7	Analisis Perbandingan Sistem Tanpa Beban dan Berbeban.....	58
V.	SIMPULAN DAN SARAN	60
5.1	Simpulan.....	60
5.2	Saran.....	61
	DAFTAR PUSTAKA	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Gambar 2. 1 Prinsip Kerja PLTA.....	9
2. Gambar 2. 2 Kontruksi Generator DC	12
3. Gambar 2. 3 Rangkaian Ekivalen Generator DC Shunt.....	13
4. Gambar 2. 4 Rangkaian Ekivalen Generator DC Seri.....	14
5. Gambar 2. 5 Rangkaian Ekivalen Generator Berpenguatan Bebas.....	14
6. Gambar 2. 6 Rangkaian Ekivalen Generator Kompon.....	15
7. Gambar 2. 7 Rangkaian Ekivalen Motor DC	16
8. Gambar 2. 8 Pulley dan V-Belt	17
9. Gambar 2. 9 Arduino Uno.....	18
10. Gambar 2. 10 Software Arduino IDE	19
11. Gambar 2. 11 Rangkaian antar Modul Arduino dengan Sensor Flow Meter..	20
12. Gambar 2. 12 Sensor Tegangan DC.....	20
13. Gambar 2. 13 Rangkaian Pembagi Tegangan	21
14. Gambar 2. 14 Motor Servo.....	22
15. Gambar 2. 15 Diagram Blok FLC.....	23
16. Gambar 2. 16 Grafik Keanggotaan Kurva Linier.....	25
17. Gambar 2. 17 Grafik Kurva Linier Naik	25
18. Gambar 2. 18 Grafik Keanggotaan Kurva Segitiga	26
19. Gambar 2. 19 Grafik Keanggotaan Kurva Trapesium	26
20. Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	33
21. Gambar 3. 2 Diagram Blok Sistem	34
22. Gambar 3. 3 Diagram Blok Kontrol <i>Close Loop</i> FLC	34
23. Gambar 3. 4 Blok Diagram FLC.....	35
24. Gambar 3. 5 <i>Flowchart</i> Sistem FLC	36
25. Gambar 3. 6 <i>Input</i> dan <i>Output</i> Pada FLC	37
26. Gambar 4. 1 Membership Function Error	39
27. Gambar 4. 2 Membership Function Δ Error	40

28. Gambar 4. 3 Membersip Function Motor Servo	41
29. Gambar 4. 4 Wiring Sistem PLTPH	42
30. Gambar 4. 5 Proses Kalibrasi Motor Servo	45
31. Gambar 4. 6 (a) Ukuran Rangka PLTPH (b) Transmisi Pulley generator-turbin	46
32. Gambar 4. 7 Keseluruhan Hasil Instalisasi Alat Pada Lokasi Percobaan	47
33. Gambar 4. 8 Tampilan Program di Arduino IDE.....	50
34. Gambar 4. 9 Diagram Program	51
35. Gambar 4. 10 Grafik Respon Sisten Tanpa Beban	52
36. Gambar 4. 11 Grafik Respon Sistem Dengan Beban 5 Watt	55
37. Gambar 4. 12 Grafik Respon Ssitem Dengan Beban 10 Watt	56
38. Gambar 4. 13 Grafik Respon Sistem Dengan Beban 15 Watt	57
39. Gambar 4. 14 Grafik Perbandingan Respon Sistem	58

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Tabel 2. 1 Jenis-Jenis PLTA	10
2. Tabel 2. 2 Jenis-Jenis Turbin	17.
3. Tabel 4. 1 Fungsi Keanggotaan.....	38
4. Tabel 4. 2 Aturan Logika <i>Fuzzy</i>	42
5. Tabel 4. 3 Data Hasil Kalibrasi Sensor Tegangan	44
6. Tabel 4. 4 Data Hasil Kalibrasi Motor Servo.....	45
7. Tabel 4. 5 Spesifikasi Komponen Mekanik	46
8. Tabel 4. 6 Data Hasil Pengujian PLTPH	48
9. Tabel 4. 7 Perbandingan Respon Sistem Pada Berbagai Kondisi Perbebanan	58

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan salah satu hal yang paling penting dalam kehidupan manusia. Energi listrik dibutuhkan dalam beberapa sektor, yaitu sektor rumah tangga, industri, bisnis, sosial, gedung kantor pemerintah, dan penerangan jalan umum. Oleh karena itu, Kebutuhan listrik masa kini semakin meningkat, berbagai upaya terus dilakukan baik mencari potensi baru atau pun dengan mengembangkan teknologinya. Mengingat sumber energi yang digunakan untuk pembangkit energi listrik sebagian besar berasal dari bahan bakar fosil seperti minyak, gas dan batu bara maka ketergantungan terhadap bahan bakar fosil mengakibatkan menipisnya cadangan sumber energi tersebut. Faktor inilah yang menjadi tantangan tersendiri untuk menjauhkan diri dari ketergantungan terhadap minyak bumi, gas alam, dan batubara. Seiring berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, telah ditemukan berbagai macam energi baru terbarukan (EBT) yang berasal dari sumber daya alam, seperti energi angin, air, dan panas bumi[1][2].

Air merupakan potensi sumber energi yang besar, karena pada air tersimpan energi potensial (pada air jatuh) dan energi kinetik (pada air mengalir). Tenaga air (*hydropower*) adalah energi yang diperoleh dari air yang mengalir. Energi yang dimiliki air dapat dimanfaatkan dan digunakan dalam wujud energi mekanis, untuk selanjutnya diubah menjadi energi listrik. Disaat sumber energi lain mulai menipis dan memberikan dampak negatif, maka air menjadi sumber yang sangat penting karena dapat dijadikan sumber energi pembangkit listrik yang murah dan tidak menimbulkan polusi. Selain itu, Indonesia kaya akan sumber daya air sehingga sangat berpotensi untuk memproduksi energi listrik yang bersumber daya air. Pemanfaatan energi air banyak dilakukan dengan menggunakan kincir air atau

turbin air yang memanfaatkan adanya suatu air terjun atau aliran air di sungai. Salah satunya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH)[3].

Pembangkit listrik tenaga air skala piko pada prinsipnya memanfaatkan perbedaan ketinggian dan jumlah debit air per detik yang ada pada aliran air saluran irigasi, sungai atau air terjun. Aliran air ini akan memutar poros turbin sehingga menghasilkan energi mekanik. Energi ini selanjutnya menggerakkan generator dan generator menghasilkan listrik. Kemudian, banyaknya listrik yang dihasilkan berdasarkan kecepatan dari air yang mengalir dan jatuh memutar turbin. Pergerakan air yang tidak stabil dan jumlah air yang jatuh ke turbin, akan menghasilkan tegangan keluaran yang tidak stabil dari Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH)[4][5].

Untuk menjaga keluaran tegangan keluaran generator pada PLTPH yang tidak stabil karena pengaruh jumlah air yang jatuh ke turbin, maka diperlukan sisten kontrol yang mampu menjaga kestabilan tegangan keluaran saat menggunakan beban dan tanpa beban, sehingga tidak merusak beban yang digunakan. Kendali logika *fuzzy* adalah sebuah skema sistem kontrol yang menggunakan konsep teori himpunan *fuzzy* dalam perancangannya. Terdapat tiga tahapan dalam FLC, yaitu fuzzifikasi, mekanisme inferensi dan defuzzifikasi. Logika *Fuzzy* biasa juga disebut dengan logika samar merupakan suatu cara yang tepat untuk memetakan suatu ruang input didasari oleh konsep himpunan *fuzzy*. Ide dasar dari logika *fuzzy* muncul dari prinsip ketidakjelasan. Teori *fuzzy* pertama kali dibangun dengan menganut prinsip teori himpunan. Kecerdasan buatan yang nantinya ditanam ke dalam chip mikrokontroler dengan aturan-aturan yang telah ditentukan. Logika *fuzzy* ini diimplementasikan pada pemrograman arduino[6][3].

Dalam penelitian ini, metode logika *fuzzy* diterapkan untuk merancang sistem kontrol otomatis. Metode ini dipilih karena mampu menangani permasalahan ketidakpastian dan perubahan yang bersifat dinamis, seperti yang terjadi pada PLTPH. Perancangan sistem kendali dilakukan dengan menggunakan mikrokontroler Arduino yang diprogram untuk mengimplementasikan *fuzzy logic controller* (FLC). Sistem ini dirancang dengan menggunakan sensor sebagai input yang mendeteksi tegangan keluaran dan menggunakan motor servo untuk mengatur sudut valve sehingga dapat mengatur jumlah debit air. Data dari sensor

akan diproses oleh Arduino Uno untuk menghasilkan nilai *output* yang digunakan untuk mengontrol sistem agar tegangan keluaran generator tetap stabil, baik saat menggunakan beban maupun tanpa beban. Dengan demikian, penerapan logika fuzzy diharapkan mampu meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pembangkit listrik tenaga pikohidro[1][7].

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana merancang sistem pengendalian logika *fuzzy* berbasis Arduino untuk mengatur stabilitas tegangan keluaran pada PLTPH?
2. Bagaimana pengaruh implementasi sistem logika *fuzzy* terhadap stabilitas tegangan keluaran saat menggunakan beban atau tanpa beban?
3. Bagaimana performa sistem pengendalian logika *fuzzy* dalam menyesuaikan perubahan beban pada PLTPH?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini hanya akan membahas pengendalian logika *fuzzy* pada sistem PLTPH yang berskala piko, yakni pembangkit listrik dengan kapasitas produksi listrik di bawah 0,5 kW.
2. Pengendalian hanya pada keluaran tegangan PLTPH dengan mengatur sudut motor servo dengan umpan balik dari sensor tegangan keluaran
3. Pengujian hanya dengan beban lampu dc, yaitu mulai dari 5 Watt, 10 Watt, dan 15 Watt.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Merancang dan mengimplementasi sistem kontrol logika *fuzzy* untuk menjaga stabilitas tegangan keluaran pada PLTA skala piko.

2. Menganalisis kinerja sistem kontrol logika *fuzzy* dalam mempertahankan kestabilan tegangan keluaran baik dengan beban maupun tanpa beban.
3. Mengidentifikasi pengaruh variasi beban terhadap stabilitas tegangan keluaran PLTPH menggunakan kontrol logika *fuzzy*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Dapat meningkatkan keandalan Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) melalui penerapan sistem kontrol otomatis berbasis logika fuzzy.
2. Dapat mengurangi perubahan tegangan keluaran akibat ketidakstabilan debit air yang mengalir ke turbin.
3. Dapat mengoptimalkan pemanfaatan energi terbarukan yang efisien dan berkelanjutan untuk daerah-daerah terpencil.

1.6 Hipotesis

Hipotesis dari penelitian ini adalah bahwa implementasi *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada pengendalian stabilitas tegangan keluaran Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro akan secara signifikan meningkatkan kestabilan tegangan keluaran generator, meskipun terjadi fluktuasi debit air. Dengan menggunakan FLC, sistem diharapkan mampu secara responsif dan akurat mengatur debit air melalui motor servo, sehingga tegangan keluaran tetap stabil baik dalam kondisi tanpa beban atau berbeban.

1.7 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat penelitian, hipotesis, dan sistematika penulisan.

II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori-teori yang menunjang dan mendasari penelitian serta menjadi referensi yang bersumber dari jurnal, buku, dan penelitian-penelitian terdahulu yang digunakan untuk menulis penelitian ini.

III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang waktu, tempat, alat dan bahan, alur sistem dari penelitian yang akan dilakukan selama waktu yang telah ditentukan.

IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang hasil dan pembahasan yang didapat selama proses penelitian berlangsung seperti data hasil, pengolahan, dan analisa yang didapatkan.

V SIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran yang dapat diberikan untuk menunjang atau memperbaiki hal yang kurang dari penelitian yang telah dilakukan.

II. TINJAUAN PUASTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Adapun penelitian terdahulu yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini adalah:

2.1.1. *Design and Prototyping of Electronic Load Controller for Pico Hydropower System*

Penelitian ini berfokus pada pengembangan prototipe *Electronic Load Controller* (ELC) untuk menjaga stabilitas frekuensi dan tegangan pada pembangkit listrik tenaga pikohidro (PLTPH). ELC bekerja dengan menggunakan sensor frekuensi berbasis *Zero Crossing Detector* untuk mendeteksi frekuensi generator, serta sistem *gating* berbasis TRIAC untuk mengalihkan daya ke beban tambahan saat daya yang dihasilkan lebih besar dari beban utama. Sistem kontrol frekuensi menggunakan algoritma PID untuk menjaga stabilitas frekuensi pada 50 Hz. Pengujian menunjukkan akurasi sensor frekuensi sebesar 99,78% dan presisi 99,99%. Sistem ELC berhasil menjaga stabilitas frekuensi pada 50 Hz meskipun terjadi perubahan beban, dengan rata-rata tegangan keluaran sebesar 183 V[8].

2.1.2. *Fuzzy Logic-Based Voltage Controller for Hybrid Off-Grid Pico-Hydropower and Solar Power Generation Systems*

Penelitian ini membahas tentang ketidakstabilan tegangan keluaran pada generator *pico-hidro* yang seringkali tidak memenuhi kebutuhan sistem. Untuk mengatasi hal ini, mereka mengembangkan pengatur tegangan berbasis algoritma logika fuzzy yang diimplementasikan menggunakan *Fuzzy Logic Toolbox* pada MATLAB dan Arduino. Sistem ini mampu menstabilkan tegangan dengan menyesuaikan arus yang diberikan ke medan generator, sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang stabil sebesar 220V. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ini mampu

merespons fluktuasi tegangan dalam waktu 1,1 detik, lebih cepat dibandingkan metode konvensional, dengan efisiensi pengendali mencapai 93,75%[9].

2.1.3. *Hydro Power Station Load Frequency Control Using Fuzzy Logic Controller*

Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi fluktuasi frekuensi yang sering terjadi pada pembangkit listrik tenaga air akibat perubahan beban pengguna. Sistem pengendali *fuzzy logic* digunakan untuk menjaga kestabilan frekuensi dan efisiensi pembangkit listrik. Dalam penelitian ini, simulasi dan pengujian prototipe dilakukan untuk mengontrol frekuensi melalui umpan balik yang memonitor perubahan frekuensi dan menyesuaikan pengaturan katup air. Hasilnya menunjukkan bahwa pengendali *fuzzy logic* lebih baik dibandingkan dengan metode konvensional seperti PID, terutama dalam mengurangi osilasi frekuensi akibat gangguan beban. Prototipe juga menunjukkan bahwa pengendalian frekuensi ini dapat mengurangi pemborosan air dan memastikan efisiensi tinggi dalam kondisi variasi beban besar. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknologi kontrol pembangkit listrik tenaga air berbasis *fuzzy logic*[10].

2.1.4. *Fuzzy Logic Control and PID Controller for Brushless Permanent Magnetic Direct Current Motor: A Comparative Study*

Penelitian ini bertujuan untuk merancang pengendali kecepatan yang efisien bagi motor *Brushless Permanent Magnetic Direct Current* (BLPMDC). Motor BLPMDC sering digunakan karena memiliki rasio torsi terhadap ukuran yang tinggi serta efisiensi yang baik, namun tantangan utamanya adalah sifat non-linearitas bawaan yang menyebabkan pengendali PID konvensional kurang efektif untuk mengontrol kecepatannya. Pengendali berbasis logika *fuzzy* diusulkan sebagai solusi alternatif. Model pengendalian dan simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink untuk tiga skenario: tanpa pengendali, dengan pengendali PID konvensional, dan dengan pengendali logika *fuzzy*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendali logika *fuzzy* menghasilkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan pengendali PID. Dari simulasi, waktu naik untuk PID adalah

66,306 ms, sedangkan untuk logika *fuzzy* hanya 19,530 ms. Overshoot pada PID adalah 6,989% dibandingkan dengan 1,531% pada logika *fuzzy*. Namun, *undershoot* untuk logika *fuzzy* (11,924%) lebih tinggi dibandingkan PID (1,788%). Penelitian ini menunjukkan bahwa pengadopsian logika fuzzy dapat meningkatkan kinerja motor BLPMDC secara signifikan, terutama untuk sistem *non-linear*[11].

2.1.5. Load Frequency Control of Small Hydropower Plants Using One-Input Fuzzy PI Controller with Linear and Non-Linear Plant Model

Penelitian ini membahas kendali frekuensi beban pada pembangkit listrik tenaga air skala kecil (SHP) menggunakan pengendali fuzzy PI satu input. Penelitian ini dilakukan karena pengendali konvensional seperti PI/PID tidak cocok untuk sistem non-linear seperti SHP. Dalam penelitian ini, model kontrol berbasis fuzzy logic PI (FLPI) dirancang untuk mengatur posisi gate turbin melalui servo motor, guna menjaga keseimbangan antara produksi daya dan permintaan beban, sehingga frekuensi keluaran tetap stabil. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink dengan model tanaman linear dan non-linear. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengendali FLPI memiliki waktu settling 8 kali lebih cepat dan overshoot 15 kali lebih kecil dibandingkan pengendali konvensional. Ini membuktikan bahwa FLPI lebih efektif dalam menjaga stabilitas dinamis serta memenuhi tujuan kendali frekuensi beban pada SHP[12].

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air) merupakan pembangkit yang memanfaatkan energi potensial dan kinetik pada air untuk menghasilkan energi listrik. Energi listrik yang dibangkitkan oleh PLTA biasanya disebut sebagai hidroelektrik. PLTA merupakan energi terbarukan karena termasuk salah satu energi yang tidak pernah habis. Mesin penggerak yang digunakan adalah turbin air untuk mengubah energi potensial air menjadi kerja mekanis poros yang akan memutar rotor pada generator untuk menghasilkan energi listrik. Air sebagai bahan baku PLTA dapat diperoleh dengan berbagai cara, misalnya dari sungai secara langsung disalurkan untuk memutar turbin, atau dengan cara ditampung dahulu

dengan menggunakan kolam tandon air atau waduk sebelum disalurkan untuk memutar turbin[1][3].

Dalam sistem kerja pembangkit listrik tenaga air terdapat 3 hal yang paling pokok yaitu air, turbin, dan generator. Sistem kerja PLTA adalah mengubah energi potensial air yang telah ditampung di waduk menjadi energi kinetik dengan cara mengalirkan air melalui pipa pesat (penstock). Kemudian air yang telah dipercepat tersebut akan digunakan untuk memutar turbin. Saat turbin berputar, rotor di dalam generator juga ikut berputar, menghasilkan medan magnet yang berubah-ubah. Perubahan medan magnet ini memotong stator, yang mengakibatkan terbentuknya arus listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Energi listrik yang dihasilkan kemudian dikendalikan dan disalurkan melalui jaringan listrik untuk memenuhi kebutuhan konsumen. Tegangan keluaran yang dihasilkan bergantung pada laju debit air yang jatuh pada turbin[4]. Daya (*power*) yang dihasilkan pada pembangkit listrik tenaga air dapat dihitung berdasarkan rumus berikut :

$$P = \rho \times q \times h \times g \quad (2.1)$$

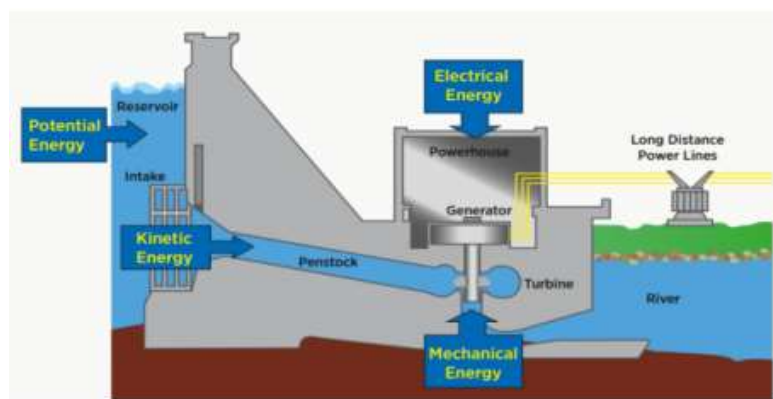
Dimana :

P = Daya Keluaran (Watt)

ρ = Massa Jenis (kg/m³)

Q = Debit Air (m³/s)

g = Gaya gravitasi (m/s²)



(Sumber: Debasis Chowuri The University Of Asia Pasific, 2014)

Gambar 2. 1 Prinsip Kerja PLTA

Tabel 2. 1 Jenis-Jenis PLTA

No.	Kategori	Subkategori / Jenis	Keterangan
1	Berdasarkan Teknis Operasional	PLTA Sungai/Waduk	Memanfaatkan aliran sungai atau air waduk sebagai sumber utama air
		PLTA Pompa (<i>Pumped Storage</i>)	Air dipompa ke reservoir yang lebih tinggi, digunakan saat beban puncak
		PLTA Pasang Surut	Menggunakan energi pasang surut laut
		PLTA Ombak	Menggunakan energi dari gelombang laut
2	Berdasarkan Sistem Bendungan	PLTA <i>Run of River</i>	Tanpa bendungan besar; air langsung digunakan dari aliran sungai
		PLTA dengan Dam	Memanfaatkan bendungan untuk menyimpan dan mengatur aliran air
3	Berdasarkan Kapasitas Daya	a. PLTA <i>Pico Hydro</i> (< 0,5 kW)	Skala sangat kecil; cocok untuk kebutuhan rumah tangga pedesaan
		b. PLTA Micro Hydro (0,5 – 100 kW)	Untuk skala komunitas kecil
		c. PLTA Mini Hydro (100 – 1000 kW)	Cocok untuk desa atau wilayah terpencil
		d. PLTA Skala Kecil (1 – 100 MW)	Skala menengah; dapat melayani kota kecil
		e. PLTA Skala Besar (> 100 MW)	Untuk pembangkit skala industri atau nasional
4	Berdasarkan Tinggi Jatuh Air (<i>Head</i>)	a. PLTA Tekanan Rendah ($H < 15$ m)	Cocok untuk wilayah datar atau aliran lambat
		b. PLTA Tekanan Sedang ($15 \text{ m} < H < 50$ m)	Ketinggian sedang, efisien untuk berbagai aplikasi
		c. PLTA Tekanan Tinggi ($H > 50$ m)	Memerlukan saluran air bertekanan tinggi; efisiensi tinggi

2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hidro (PLTPH)

Pikrohidro atau yang dimaksud dengan Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hidro (PLTPH) adalah suatu pembangkit listrik skala kecil yang menggunakan tenaga air sebagai tenaga penggerakannya seperti, saluran irigasi, sungai atau air terjun alam dengan cara memanfaatkan tinggi terjunan (head) dan jumlah debit air. Piko Hidro merupakan sebuah istilah yang terdiri dari kata Piko yang berarti kecil dan hidro yang berarti air. Secara teknis, Piko Hidro memiliki tiga komponen utama yaitu air (sebagai sumber energi), turbin dan generator. Piko Hidro mendapatkan energi dari aliran air yang memiliki perbedaan ketinggian tertentu. Pada dasarnya, Piko Hidro memanfaatkan energi potensial jatuhnya air (head). Semakin tinggi jatuhnya air maka semakin besar energi potensial air yang dapat diubah menjadi energi listrik.

Piko Hidro merupakan pembangkit listrik tenaga air yang memiliki kapasitas keluaran mulai dari beberapa ratus watt hingga lima kilowatt. Sistem ini memanfaatkan sumber daya alam terbarukan, sehingga dikenal sebagai sumber energi bersih. Mekanisme kerja piko Hidro melibatkan pemanfaatan aliran sungai atau danau yang dibendung pada ketinggian tertentu. Debit air yang cukup kemudian digunakan untuk memutar turbin yang terhubung ke generator, yang mengubah energi potensial air menjadi energi listrik.

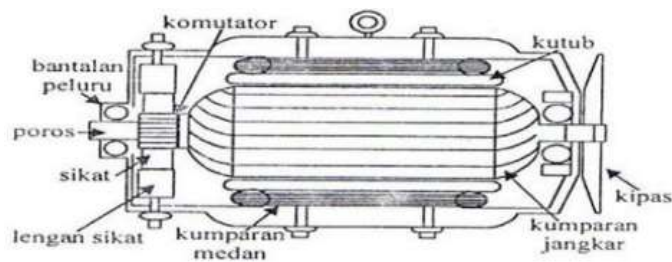
Pada dasarnya, sistem ini terdiri dari tiga komponen utama: sumber energi awal berupa energi air, turbin untuk mengubah energi potensial menjadi energi kinetik, dan generator untuk mengubah energi mekanik menjadi listrik. Piko Hidro dapat dibangun di lokasi-lokasi publik seperti sungai atau saluran irigasi persawahan. Setelah proses pembangkitan listrik selesai, air dapat kembali mengalir tanpa memberikan dampak negatif bagi lingkungan. Selain itu, semakin tinggi ketinggian jatuhnya air, semakin besar energi potensial yang dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik. Hal ini menjadikan piko Hidro sebagai pilihan ramah lingkungan yang layak untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat[8].

2.4 Generator DC

Generator DC merupakan suatu mesin DC yang dapat menghasilkan daya listrik arus searah (DC) dengan cara merubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan perantara energi magnet. Pada generator DC, energi mekanik yang berasal dari penggerak mula yang dikopel dengan rotor. Penggerak mula ini dapat berasal dari tenaga uap panas, tenaga potensial air, motor diesel, dan lain sebagainya. Energi listrik keluaran generator dikeluarkan pada kumparan jangkar generator yang juga terdapat pada rotornya. Generator DC menghasilkan listrik arus searah dalam penggunaannya, generator DC ini kadang-kadang ditempatkan secara tetap atau dalam keadaan bergerak bersama dengan bebanya. Generator DC yang diletakkan secara tetap contohnya adalah generator yang dipergunakan untuk pengisian accu pada perusahaan pengisi accu dan generator yang ditempatkan secara bergerak dengan bebanya misalnya pada pusat-pusat tenaga listrik arus bolak-balik, dimana generator DC ini berfungsi sebagai sumber eksitasi magnet (exciter) pada generator utama pembangkit listrik arus bolak balik[6].

Generator DC dibuat menggunakan dua jenis magnet penguat, yaitu :

1. Penguat elektromagnetik
2. Magnet permanent/ magnet tetap



Gambar 2. 2 Kontruksi Generator DC

(Sumber: Muddin Martua, Jurnal Karya Ilmiah Multidisiplin, 2021)

Generator DC dibagi dua bagian, yang pertama stator bagian mesin DC yang diam dan yang kedua bagian rotor bagian mesin DC yang berputar. Bagian stator terdiri dari: rangka motor, belitan stator, sikat arang, bearing dan terminal box. Sedangkan bagian rotor terdiri dari: komutator, belitan rotor, kipas rotor dan poros rotor. Pada saat batang magnet didorongkan ke dalam kumparan, maka jarum galvanometer bergerak dan akan kembali diam bila batang magnet tadi dihentikan mendorongnya.

Kemudian batang magnet diubah arah geraknya (ditarik) jarum galvanometer juga bergerak sesaat yang arahnya berlawanan dari gerakan sebelumnya dan kembali diam seperti semula bila batang magnet dihentikan menariknya. Bergeraknya jarum tersebut disebabkan karena timbulnya gaya gerak listrik (GGL) induksi pada kumparan yang besar GGL induksi rata-rata (E) dapat dinyatakan seperti persamaan (2.2) sebagai berikut:

$$E = -N \left(\frac{d\phi}{dt} \right) \quad (2.2)$$

Dimana :

E = Banyaknya lilitan kumparan

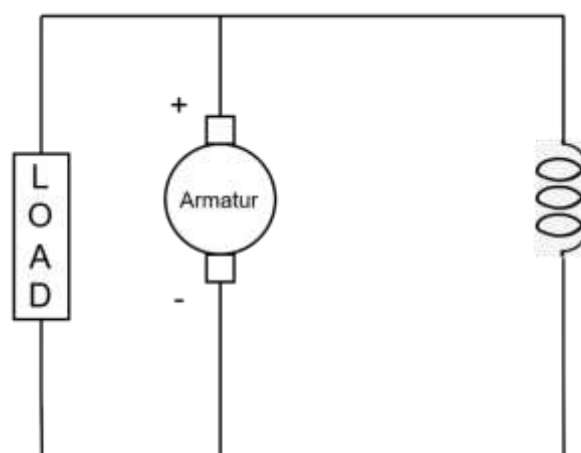
$d\phi$ = Perubahan pada fluks magnet

dt = Perubahan terhadap waktu

2.4.1. Jenis-Jenis Generator DC

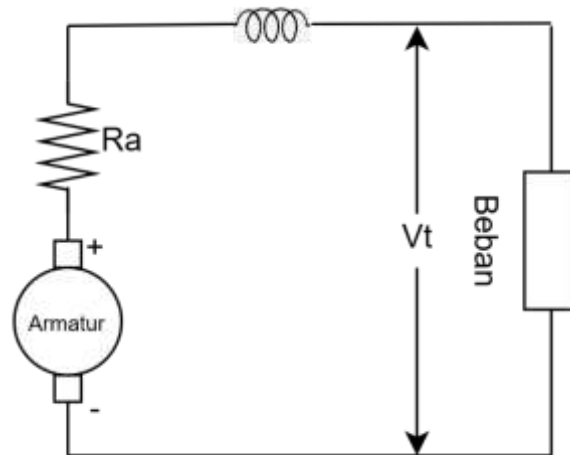
Terdapat beberapa jenis dari Generator DC, diantaranya yaitu Generator DC Shunt, Generator DC Seri, Generator DC Berpenguatan Bebas, dan Generator DC Kompon[13][11].

1. Generator DC *Shunt* : Suatu jenis Generator DC yang dimana antara kumparan jangkar dan kumparan terminal dihubungkan secara paralel, sehingga besar kecilnya tegangan terminal berdasarkan sisa medan magnet pada kumparan medan.



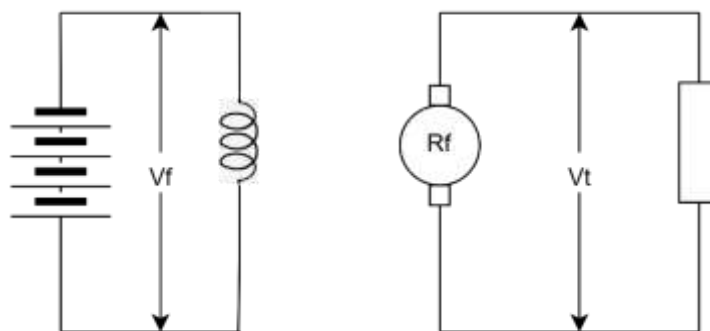
Gambar 2. 3 Rangkaian Ekuivalen Generator DC Shunt

2. Generator DC Seri : Jenis generator Dc yang dimana kumparan jangkar dan kumparan medan dihubungkan secara seri, sehingga arus medan (I_f), arus jangkar (I_a), dan arus beban (I_L) adalah sama.



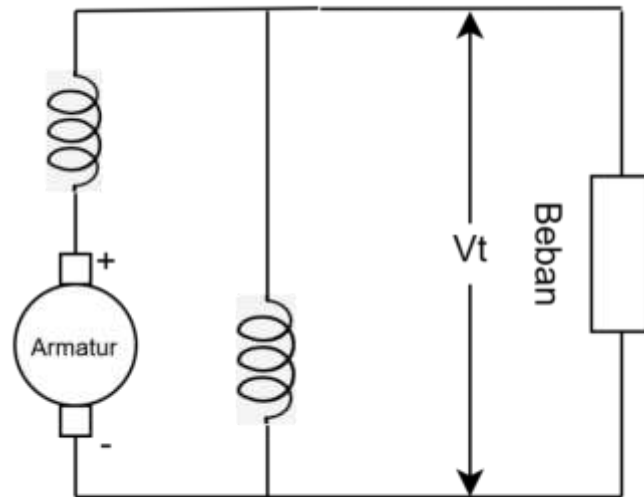
Gambar 2. 4 Rangkaian Ekivalen Generator DC Seri

3. Generator DC Berpenguatan Sendiri : Sebuah Generator Dc yang dimana kumparan medan diberi eksitasi berupa arus DC, yang akan meningkatkan medan magnet pada kumparan medan. Sehingga besar kecilnya tegangan terminal dapat di atur dengan mengatur arus eksitasi yang diberikan.



Gambar 2. 5 Rangkaian Ekivalen Generator Berpenguatan Bebas

4. Generator DC Kompon : Jenis Generator Dc yang menggabungkan karakteristik generator Shunt dan generator Seri. Dimana lilitan medan akan diserikan dan diparalelkan dengan kumparan jangkar.



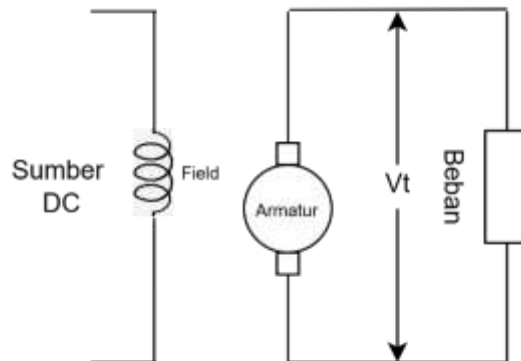
Gambar 2. 6 Rangkaian Ekivalen Generator Kompon

2.5 Motor DC

Motor Dc merupakan mesin yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, berkebalikan dengan Generator DC. Pada motor DC terdapat jangkar dengan satu atau lebih kumparan terpisah. Setiap kumparan pada ujungnya terpasang cicin belah atau sering disebut komutator. Motor Dc bekerja berdasarkan prinsip dasar gaya Lorentz, yang menyatakan dimana ketika sebuah konduktor diberi arus listrik dan diletakkan di antara dua buah medan magnet, maka akan ada gaya (gaya Lorents) yang tercipta secara ortogonal diantara arah medan magnet dan arah aliran arus[14].

Motor DC adalah suatu motor yang berfungsi untuk mengubah tenaga listrik arus searah menjadi tenaga gerak atau tenaga mekanik. Motor DC digunakan pada penerapan tertentu yang membutuhkan penyalaan torsi yang tinggi atau percepatan yang tetap untuk kisaran kecepatan yang luas. Torsi adalah putaran dari suatu gaya terhadap suatu poros. Suatu motor listrik di sebut sebagai sebagai motor DC jika

membutuhkan pasokan tegangan searah pada kumparan jangkar dan kumparan medannya untuk dikonversi menjadi energi mekanik.



Gambar 2. 7 Rangkaian Ekivalen Motor DC

Pada motor DC, kumparan medan yang dialiri arus listrik menghasilkan medan magnet yang melingkupi kumparan jangkar dengan arah tertentu. Konversi energi listrik yang diubah menjadi energi mekanik berlangsung melalui media medan magnet Motor DC di susun dari dua bagian yaitu bagian diam (stator) dan bagian bergerak (rotor). Stator motor arus searah adalah bodi motor atau kutub magnet (sikot-sikot), sedangkan rotor adalah jangkar lilitannya. Inti stator dibuat dari lapisan pelat baja yang ditopang dalam rangka stator. Lilitan stator diletakkan dalam alur stator yang terpisah 120 derajat. Sedangkan rotor adalah inti berlapis motor dengan konduktor yang dipasang secara paralel bersama poros dan mengelilingi permukaan inti. Konduktor tidak di sekat dari inti karena arus rotor mengalir melalui tahanan dalam pada konduktor rotor. Di setiap ujung rotor, konduktor rotor dihubungkan dengan cincin ujung[15][13].

2.6 Turbin Air

Turbin air merupakan suatu alat yang digunakan untuk mengubah energi potensial (air) menjadi energi mekanik. Energi mekanis diubah dengan menggunakan generator listrik menjadi energi listrik. Turbin air dikembangkan untuk digunakan sebagai penyangga energi yang dibutuhkan oleh industri maupun non-industri. Turbin air biasanya digunakan dan dikembangkan untuk pembangkit energi yang terbarukan dengan ditopong oleh energi potensial air salah satunya adalah PLTPH. Turbin secara umum dapat diartikan sebagai mesin penggerak mula

dimana energi fluida kerja yang digunakan langsung memutar roda turbin, fluida kerjanya berupa air, uap dan gas. Dengan demikian turbin air dapat diartikan sebagai suatu mesin penggerak mula yang fluida kerjanya adalah air[1][3][16].

Tabel 2. 2 Jenis-Jenis Turbin

No	Jenis Turbin	Kategori
1	Turbin Pleton	Implus
2	Turbin Turgo	Implus
3	Crossflow	Implus
4	Turbin Francis	Reaksi
5	Turbin Kaplan	Reaksi
6	Kincir Air	Reaksi

2.7 Pulley dan V-Belt

Pulley adalah mekanisme terdiri dari roda pada sumbu atau poros yang mungkin memiliki alur antara dua flensa yang melingkar. Sebuah tali, kabel, sabuk, biasanya berlangsung selama roda dan di dalam alur, jika ada. *Pulley* digunakan untuk mengubah arah atau meneruskan suatu gaya, mengirimkan gerak rotasi, atau merealisasikan dari keuntungan mekanis atau sistem rotasi linier gerak. *V-Belt* merupakan sabuk atau *Belt* terbuat dari karet dan mempunyai penampang trapesium.. perbandingan kecepatan antara poros penggerak dan poros yang digerakkan tergantung pada perbandingan diameter pulley yang digunakan. Agar dapat mentransmisikan daya, *pulley* dihubungkan dengan *belt* (sabuk) dan memanfaatkan kontak gesek antara *pulley* dengan *belt*[17].



Gambar 2. 8 Pulley dan V-Belt

Untuk menghitung rasio perbandingan *pulley*, yaitu :

$$R = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} \geq \quad (2.3)$$

Dimana :

R = Rasio kecepatan

n_1 = Putaran penggerak (rpm)

n_2 = Putaran *output* (rpm)

d_1 = Diameter *pulley* kecil (mm)

d_2 = Diameter *pulley* besar (mm)

Untuk menghitung panjang sabuk-v, yaitu :

$$L = 2C + \frac{\pi}{2}(dp + Dp) + \frac{1}{4c}(Dp - dp)^2 \quad (2.4)$$

Dimana :

L = Panjang sabuk (mm)

C = Jarak sumbu turbin (mm)

Dp = Diameter *pulley* besar (mm)

dp = Diameter *pulley* kecil (mm)

2.8 Arduino Uno

Arduino merupakan sebuah board mikrokontroler yang berbasis ATmega 328. Arduino memiliki 14 pin input/output yang mana 6 pin dapat digunakan sebagai output PWM, 6 pin sebagai input analog, 16 MHz osilator kristal, koneksi USB, jack power, kepala ICSP, dan tombol reset. Untuk mendukung mikrokontroler agar dapat digunakan, cukup menghubungkan Board Arduino Uno ke komputer dengan menggunakan kabel USB atau listrik AC ke adaptor DC atau baterai untuk menjalankannya. [6].



Gambar 2. 9 Arduino Uno

2.9 Software Arduino IDE

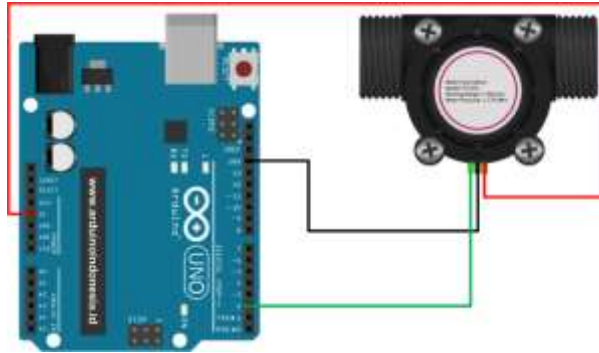
Software Arduino Integrated Development Environment merupakan sebuah perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan pemrograman. Program yang ditulis dengan menggunakan *Software Arduino IDE* disebut sebagai *sketch*. *Sketch* ditulis dalam suatu editor teks dan disimpan dalam file dengan ekstensi .ino. Pada *Software Arduino IDE*, terdapat semacam message box berwarna hitam yang berfungsi menampilkan status, seperti pesan *error*, *compile*, dan upload program. Di bagian bawah paling kanan *Software Arduino IDE*, menunjukkan board yang terkonfigurasi beserta COM Ports yang digunakan.



Gambar 2. 10 Software Arduino IDE

2.10 Water Flow Sensor

Water flow sensor merupakan sensor yang digunakan untuk mendeteksi aliran air. Baik itu aliran yang mempunyai *pressure* tertentu, aliran air dengan tekanan sangat kecil serta kecepatan aliran yang minim maupun aliran air ditempat terbuka seperti parit, sungai atau aliran irigasi. *Water flow sensor* terdiri dari bodi katup berbahan kuningan, rotor air dan *sensor hall effect*. Prinsip kerja sensor ini adalah dengan memanfaatkan *sensor hall effect*. *Hall effect* ini didasarkan pada efek medan magnetik terhadap partikel bermuatan yang bergerak. Ketika ada arus listrik yang mengalir pada *hall effect* yang ditempatkan dalam medan magnet yang arahnya tegak lurus.



Gambar 2. 11 Rangkaian antar Modul Arduino dengan Sensor Flow Meter

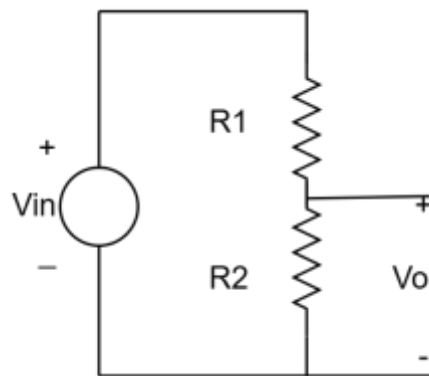
Pada diagram tersebut, kabel merah menghubungkan pin 5V Arduino ke pin VCC sensor untuk memasok daya, sedangkan kabel hitam menghubungkan pin GND Arduino ke pin GND sensor sebagai ground. Kabel hijau menghubungkan pin digital 2 Arduino ke pin data sensor untuk membaca sinyal pulsa.

2.11 Sensor Tegangan

Sensor tegangan merupakan sebuah perangkat yang digunakan untuk mengukur dan mendeteksi tegangan dalam suatu sistem rangkaian. Dimana sistem kerjanya berdasarkan prinsip pembagi tegangan. Dalam konfigurasi ini, tegangan input yang lebih tinggi dibagi menjadi nilai yang lebih rendah, sehingga dapat diukur oleh perangkat seperti Arduino. Sensor ini akan terhubung ke mikrokontroler Arduino, yang dimana koneksi terminal positif sensor dihubungkan ke sumber tegangan, dan terminal negatif dihubungkan ke ground. Output sensor dihubungkan ke pin analog pada arduino untuk pembacaan data. Rangkaian dasar pembagi tegangan dengan 2 buah resistor R1 dan R2, tegangan sumber V_I dan tegangan keluaran V_o seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2. 12 Sensor Tegangan DC



Gambar 2. 13 Rangkaian Pembagi Tegangan

Arus I mengalir melalui $R1$ dan $R2$, sehingga tegangan sumber V_I adalah penjumlahan tegangan V_S dan V_O . Tegangan sumber terbagi di beban $R1$ dan $R2$ yang tegangan masing-masing sebanding dengan nilai resistor yang dikenakan tegangan masukan. Besarnya tegangan keluaran V_O didapat dari persamaan:

$$V_I = V_S + V_O = i \cdot R1 + i \cdot R2 \quad (2.5)$$

$$V_O = V_I \cdot \left(\frac{R2}{R1 + R2} \right) \quad (2.6)$$

Dimana :

V_I = Tegangan total (V)

V_S = Tegangan Sumber (V)

V_O = Tegangan Keluaran (V)

$R1$ = Resistansi *High* (Ω)

$R2$ = Resistansi *Low* (Ω)

2.12 Motor Servo

Motor servo adalah sebuah perangkat atau aktuator putar (motor) yang dirancang dengan sistem kontrol umpan balik loop tertutup (servo), sehingga dapat di-set-up atau diatur untuk menentukan dan memastikan posisi sudut dari poros output motor. Motor servo merupakan perangkat yang terdiri dari motor DC, serangkaian gear, rangkaian kontrol dan potensiometer. Serangkaian gear yang melekat pada poros

motor DC akan memperlambat putaran poros dan meningkatkan torsi motor servo, sedangkan potensiometer dengan perubahan resistansinya saat motor berputar berfungsi sebagai penentu batas posisi putaran poros motor servo[18].



Gambar 2. 14 Motor Servo

2.13 Kendali Logika Fuzzy

Kendali Logika *Fuzzy* merupakan sebuah kontrol sistem yang menggunakan sebuah variabel linguistic sebagai masukan dan keluaran dari sebuah kontrol sistem tersebut. *Fuzzy logic* memiliki kelebihan ketika sebuah sistem yang memiliki tingkat kompleksitas yang tinggi sehingga membuat pemodelan matematika dari sistem tersebut semakin susah sehingga kontrol sistem *fuzzy logic* ini dapat diandalkan. Kendali logika fuzzy atau populer dengan istilah adalah sebuah skema sistem kendali yang menggunakan konsep teori himpunan *fuzzy* dalam perancangannya. *Fuzzy logic* memiliki beberapa metode inferensi seperti Mamdani, sugeno dan sukamoto. Pada penelitian ini menggunakan metode Mamdani dalam logika *fuzzy* kontrol yang digunakan. Dalam metode mamdani ini menghasilkan output berupa suatu nilai pada domain himpunan *fuzzy* yang dikategorikan dalam komponen linguistik.

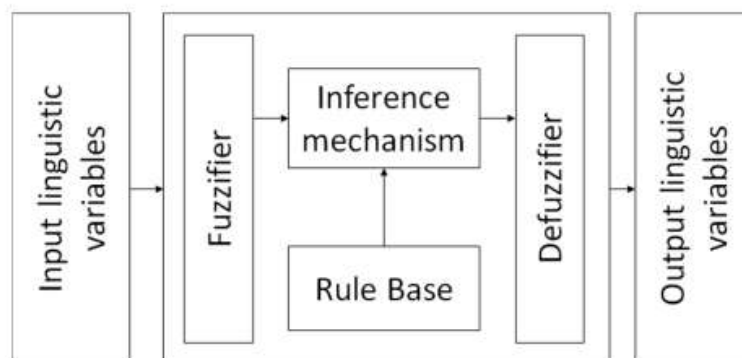
Logika *fuzzy* adalah metodologi sistem kontrol pemecahan masalah, yang cocok untuk diimplementasikan pada sistem, mulai dari sistem yang sederhana, sistem kecil, embedded system, jaringan PC, multichannel atau workstation berbasis akuisisi data, dan sistem kontrol. Metodologi ini dapat diterapkan pada perangkat keras, perangkat lunak, atau kombinasi keduanya. Dalam logika klasik dinyatakan bahwa segala sesuatu bersifat biner, yang artinya adalah hanya mempunyai dua kemungkinan, “Ya atau Tidak”, “Benar atau Salah”, “Baik atau Buruk”, dan lainlain. Oleh karena itu, semua ini dapat mempunyai nilai keanggotaan 0 atau 1. Akan tetapi, dalam logika *fuzzy* kemungkinan nilai keanggotaan berada diantara 0

dan 1. Artinya, bisa saja suatu keadaan mempunyai dua nilai “Ya dan Tidak”, “Benar dan Salah”, “Baik dan Buruk” secara bersamaan, namun besar nilainya tergantung pada bobot keanggotaan yang dimilikinya. Variabel dalam logika *fuzzy* dideskripsikan dalam bentuk himpunan *fuzzy*, diantaranya dalam bentuk segitiga, trapezoidal, Gaussian, Gaussian-bell dan sigmoid [19][20].

2.14.1 Konfigurasi *Fuzzy Logic*

Terdapat tiga tahapan dalam FLC, yaitu fuzzifikasi, mekanisme inferensi dan defuzzifikasi[21][15].

1. *Fuzzifikasi* merupakan fase pertama dari perhitungan *fuzzy*, yaitu mengubah masukan - masukan yang nilai kebenarannya bersifat pasti ke dalam bentuk *fuzzy input* yang berupa tingkat keanggotaan / tingkat kebenaran. Dengan demikian, tahap ini mengambil nilai-nilai crisp dan menentukan derajat di mana nilai-nilai tersebut menjadi anggota dari setiap himpunan *fuzzy* yang sesuai.
2. Inferensi adalah melakukan penalaran menggunakan *fuzzy input* dan *fuzzy rules* yang telah ditentukan sehingga menghasilkan *fuzzy output*. Secara sintaks, suatu *fuzzy rule* (aturan *fuzzy*) dituliskan sebagai berikut:
IF antecedent THEN consequent
3. Defuzzifikasi adalah mengubah keluaran *fuzzy* menjadi nilai tegas berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Defuzzifikasi merupakan metode yang penting dalam pemodelan sistem *fuzzy*.



Gambar 2. 15 Diagram Blok FLC

(Sumber: Alvaro Telavero, The University Of Asia Pasific, 2017)

2.14.2 Himpunan Fuzzy

Himpunan fuzzy adalah himpunan-himpunan yang akan dibicarakan pada suatu variabel dalam sistem *fuzzy*. Himpunan *fuzzy* mempunyai 2 atribut, yaitu :

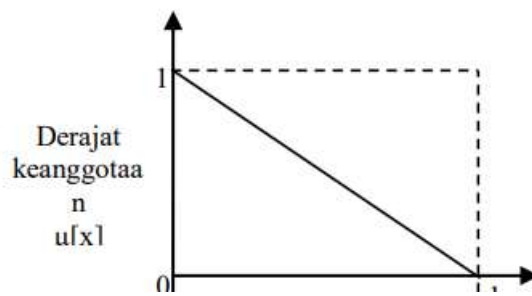
1. Linguistik, yaitu penamaan suatu grup yang mewakili suatu keadaan atau kondisi tertentu dengan menggunakan bahasa alami. Variabel linguistik adalah Variabel yang mempunyai nilai kata atau kalimat dalam natural atau bahasa cerdas. Misalnya : Tegangan Kecil, Tegangan Sedang, Tegangan Besar, dan lain sebagainya.
2. Numeris, yaitu suatu nilai (angka) yang menunjukkan ukuran dari suatu variabel. Misalnya : 40, 25, 20, dan lain sebagainya.

2.14.3 Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan (membership function) adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik input data kedalam nilai keanggotaannya (sering juga disebut dengan derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 sampai dengan 1. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan adalah dengan melalui pendekatan fungsi. Untuk menentukan derajat keanggotaan dari himpunan *fuzzy* yang dirancang, maka diperlukan fungsi dari himpunan tersebut. Fungsi ini dibangun berdasarkan persamaan garis yang dibentuk oleh himpunan fuzzy tersebut. Beberapa fungsi keanggotaan *fuzzy* yang dikenal dalam himpunan *fuzzy* yaitu fungsi keanggotaan linear naik, fungsi segitiga, dan fungsi keanggotaan linear turun[9][22].

a. Grafik keanggotaan kurva linier turun

Kurva linier turun yaitu himpunan *fuzzy* dimulai dari nilai domain dengan derajat keanggotaan tertinggi pada sisi kiri, kemudian bergerak menurun ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih rendah.



Gambar 2. 16 Grafik Keanggotaan Kurva Linier

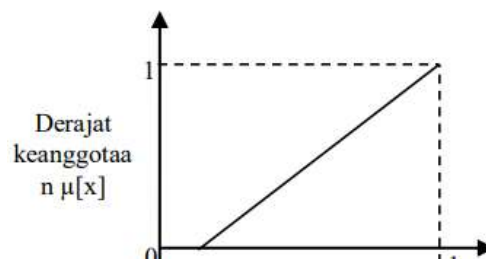
(Sumber: Bintang Lazuardi, ICM, 2018)

Dimana fungsi persamaan matematisnya adalah sebagai berikut :

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x > b \\ \frac{b-x}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ 1; & x \leq a \end{cases} \quad (2.7)$$

b. Grafik Keanggotaan Linier Naik

Kurva linier naik yaitu kenaikan himpunan *fuzzy* dimulai pada nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan nol [0] bergerak ke kanan menuju ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih tinggi.



Gambar 2. 17 Grafik Kurva Linier Naik

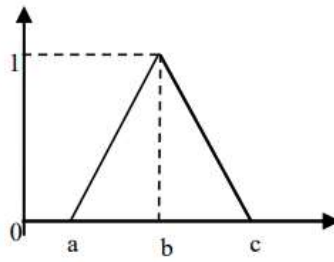
(Sumber: Bintang Lazuardi, ICM, 2018)

Dimana fungsi keanggotaanya adalah :

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ 1; & x \geq b \end{cases} \quad (2.8)$$

c. Grafik Keanggotaan Kurva Segitiga

Fungsi keanggotaan segitiga merupakan gabungan dari fungsi keanggotaan linear naik dan linear turun.



Gambar 2. 18 Grafik Keanggotaan Kurva Segitiga

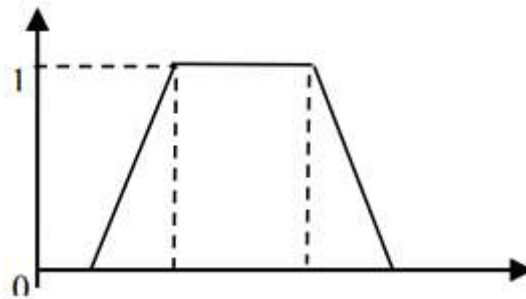
(Sumber: Bintang Lazuardi, ICM, 2018)

Himpunan fuzzy dengan grafik keanggotaan segitiga dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x < a \text{ atau } x > c \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}; & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (2.9)$$

d. Grafik Keanggotaan Kurva Trapezium

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



Gambar 2. 19 Grafik Keanggotaan Kurva Trapezium

(Sumber: Bintang Lazuardi, ICM, 2018)

Dimana himpunan fungsi keanggotaanya adalah :

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x < a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ 1; & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}; & c \leq x \leq d \end{cases} \quad (2.10)$$

Ada beberapa hal yang perlu diketahui dalam memahami sistem *fuzzy*, yaitu:

1. Variabel *fuzzy*, merupakan variable yang hendak dibahas dalam suatu sistem *fuzzy*.
2. 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. Adakalanya nilai semesta pembicaraan ini tidak dibatasi batas atasnya.
3. Domain himpunan *fuzzy* adalah keseluruhan nilai yang diizinkan 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 maupun negatif

2.14.4 *Fuzzy Inference System*

fuzzy inference system (FIS) yaitu suatu sistem perhitungan yang menggunakan logika *fuzzy* untuk memetakan variabel input menjadi variabel output yang diharapkan. Sistem inferensi *fuzzy* pada dasarnya mendefinisikan pemetaan *nonlinear* dari vektor data input menjadi scalar output. Proses pemetaan melibatkan input / output fungsi keanggotaan, operator - operator *fuzzy*, aturan *fuzzy if - then*, agregasi dari himpunan output dan *defuzzification*[21][23].

1. Metode Mamdani

Metode Mamdani paling sering digunakan dalam aplikasi aplikasi karena strukturnya yang sederhana, yaitu menggunakan operasi *MIN-MAX* atau *MAX-PRODUCT*. Metode Mamdani bekerja berdasarkan aturan-aturan linguistik. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim H. Mamdani pada tahun 1975, untuk mendapatkan output (hasil). Model

Mamdani merupakan model relasional fuzzy dimana setiap aturan direpresentasikan dengan hubungan *IF-THEN*, karena baik anteseden maupun konsekuen merupakan proposisi fuzzy, disebut juga sebagai model linguistik. Strukturnya dibuat secara manual. Fungsi keanggotaan fuzzy berdasarkan aturan yang dibuat selama proses pemodelan merupakan keluaran dari model tipe Mamdani[23].

If x is A and y is B, then z is C

Dimana x dan y adalah input sistem, z adalah output sistem, dan A, B, serta C adalah fungsi keanggotaan untuk bagian awal (anteseden) dan akhir (konsekuen). Ada 3 metode yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem fuzzy, yaitu: max, additive dan probabilistik OR.

- Metode Max (Maksimum)

Pada metode ini, himpunan *fuzzy* diperoleh dengan cara mengambil nilai maksimum aturan, kemudian menggunakannya untuk memodifikasi daerah *fuzzy*, dan mengaplikasikannya ke *output* dengan menggunakan operator OR.

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow \max(\mu_{sf}[x_i], \mu_{kf}[x_i]) \quad (2.11)$$

Dimana :

$\mu_{sf}[x_i]$ = nilai keanggotaan solusi *fuzzy* sampai aturan ke-i

$\mu_{kf}[x_i]$ = nilai keanggotaan kosekuen *fuzzy* aturan ke-i

- Metode Additive (Sum)

Pada metode ini, solusi himpunan *fuzzy* diperoleh dengan cara melakukan *bounded-sum* terhadap semua keluaran daerah *fuzzy*. Secara umum dapat ditulis dalam persamaan (2.12).

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow \min(1, \mu_{sf}[x_i] + \mu_{kf}[x_i]) \quad (2.12)$$

Dimana :

$\mu_{sf}[x_i]$ = nilai keanggotaan solusi *fuzzy* sampai aturan ke-i

$\mu_{kf}[x_i]$ = nilai keanggotaan kosekuen *fuzzy* aturan ke-i

- Metode Probabilistik OR (Probor)

Pada metode Propbabilistik OR diperoleh dengan cara melakukan *product* terhadap semua keluaran daerah *fuzzy*. Secara umum dapat ditulis dalam persamaam (2.13)

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow (\mu_{sf}[x_i] + \mu_{kf}[x_i]) - (\mu_{sf}[x_i] * \mu_{kf}[x_i]) \quad (2.13)$$

Dimana:

$\mu_{sf}[x_i]$ = nilai keanggotaan solusi *fuzzy* sampai aturan ke-i

$\mu_{kf}[x_i]$ = nilai keanggotaan kosekuen *fuzzy* aturan ke-i

Pada metode Mamdani, terdapat beberapa komposisi aturan pada tahap *defuzzyfikasi*. Diantaranya, yaitu :

- Metode Centroid (*Composite Moment*)

Pada metode Centroid, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil pada titik pusat (z^*) pada daerah *fuzzy* [14][22]. Secara umum dirumuskan dalam persamaan:

Untuk domain kontinu,

$$z^* = \frac{\int_z z \mu(z) dz}{\int_z \mu(z) dz} \quad (2.14)$$

Untuk domain diskrit,

$$z^* = \frac{\sum_{j=1}^n z_j \mu(z_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(z_j)} \quad (2.15)$$

- Metode Bisektor

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai pada domain *fuzzy* yang memiliki nilai keanggotaan separo dari jumlah total nilai keanggotaan pada daerah *fuzzy*. Secara umum dirumuskan dalam persamaan berikut:

$$\int_{\alpha}^{z^{BOA}} \mu(z) dz = \int_{z^{BOA}}^{\beta} \mu(z) dz \quad (2.16)$$

2. Metode Tsukamoto

Pada metode Tsukamoto, setiap kesimpulan dalam aturan If-Then harus diwakili oleh himpunan *fuzzy* yang fungsi keanggotaannya monoton. Hasilnya, *output* dari hasil inferensi setiap aturan diberikan secara tegas(*crisp*) sesuai dengan α -predikat(*fire strength*), lalu selanjutnya dilakukan perhitungan rata-rata terbobot. Pada proses inferensi menggunakan metode Tsukamoto, fungsi Min (Minimum) digunakan untuk menghasilkan nilai α predikat untuk setiap aturan ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$). Setiap nilai α -predikat digunakan untuk menghitung hasil inferensi tegas (*crisp*) dari setiap aturan ($z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$). Untuk tahap defuzzifikasi, metode Tsukamoto menggunakan metode rata-rata terbobot.

3. Metode Sugeono

Metode TakagiSugeno merupakan metode inferensi *fuzzy* untuk aturan yang direpresentasikan dalam bentuk (*IF – THEN*) dimana output sistem tidak berupa himpunan fuzzy, melainkan berupakan konstanta atau persamaan linear. Fungsi keanggotaan pada metode *fuzzy* Sugeno disebut fungsi singleton yaitu fungsi keanggotaan yang memiliki nilai keanggotaan 1 pada fungsi aktual tunggal dan 0 pada fungsi aktual yang lain. Suatu aturan *fuzzy* dalam model *fuzzy* Sugeno dapat diatur dalam persamaan:

$$\text{if } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ then } z = f(x, y)$$

Dimana A dan B himpunan fuzzy dalam anteseden dan $z = f(x, y)$ fungsi tegas dalam konsekuen. Jika $f(x, y)$ polinomial orde satu, FIS yang dihasilkan disebut model *fuzzy* Sugeno orde satu. Jika f konstan, dihasilkan model *fuzzy* Sugeno orde nol. Sistem inferensi *fuzzy* menggunakan metode Sugeno memiliki karakteristik, yaitu konsekuen tidak merupakan himpunan *fuzzy*, namun merupakan suatu persamaan linear dengan variabel - variabel sesuai dengan variabel - variabel inputnya.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu dan tempat penelitian dilaksanakan sejak bulan Oktober 2024 sampai dengan Mei 2025 di Gedung Laboratorium Konversi Energi Elektrik, Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung dan Pengujian alat dilakukan di Gisting, Kab. Tanggamus.

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.2.1. Perangkat Keras (*Hardware*)

Adapun perangkat keras yang digunakan adalah sebagai berikut :

- | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Satu buah Laptop | 11. 1 buah <i>Water Flow Sensor</i> |
| 2. 1 buah Motor DC | 12. 1 buah Box |
| 3. Rangka Besi L bolong | 13. 1 buah Breadboard |
| 4. Papan Kayu | 14. 1 buah Motor Servo 18 kg |
| 5. 1 buah Turbin Pelton 12 Bilah | 15. 1 buah Pipa PVC |
| 6. 2 buah Bearing | 16. 1 buah Valve |
| 7. 2 buah <i>Pulley</i> | 17. Kabel Jumper |
| 8. 1 buah <i>V-Belt</i> | 18. 1 buah Multimeter |
| 9. 1 buah Arduino | 19. 1 buah Tachometer |
| 10. 1 buah Sensor Tegangan 25 V | |

3.2.2. Perangkat Lunak (*Software*)

Adapun perangkat lunak yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Perangkat lunak Arduino IDE 1.8.19
2. Matlab

3.3 Tahap Penelitian

Adapun tahap penelitian dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Pada tahapan pertama ini dilakukan dengan tahapan mencari sumber literatur yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan.

2. Perancangan Alat dan Pembuatan Program *fuzzy logic* Kontrol

Tahap ini mencakup perancangan alat PLTPH dan sistem kontrol fuzzy logic (fuzzyfication, inference, defuzzyfication). Model dibuat di MATLAB Simulink, lalu diubah menjadi program untuk Arduino R3 dengan Arduino IDE.

3. Pengujian Alat dan Pengujian Sistem Kontrol

Pada tahapan ketiga ini, sistem diuji pada alat yang sudah jadi. Dimana sistem ini bertujuan untuk mengendalikan tegangan keluaran dengan pengaturan set point yang telah ditentukan dengan metode *Fuzzy Logic Controller*

4. Pengambilan Data

Tahapan keempat adalah pengambilan data dari sistem kontrol yang telah dibuat pada keseluruhan sistem alat, dimana dilakukan pengambilan data dengan beban dan tanpa beban.

5. Analisis Data dan Pembuatan Laporan

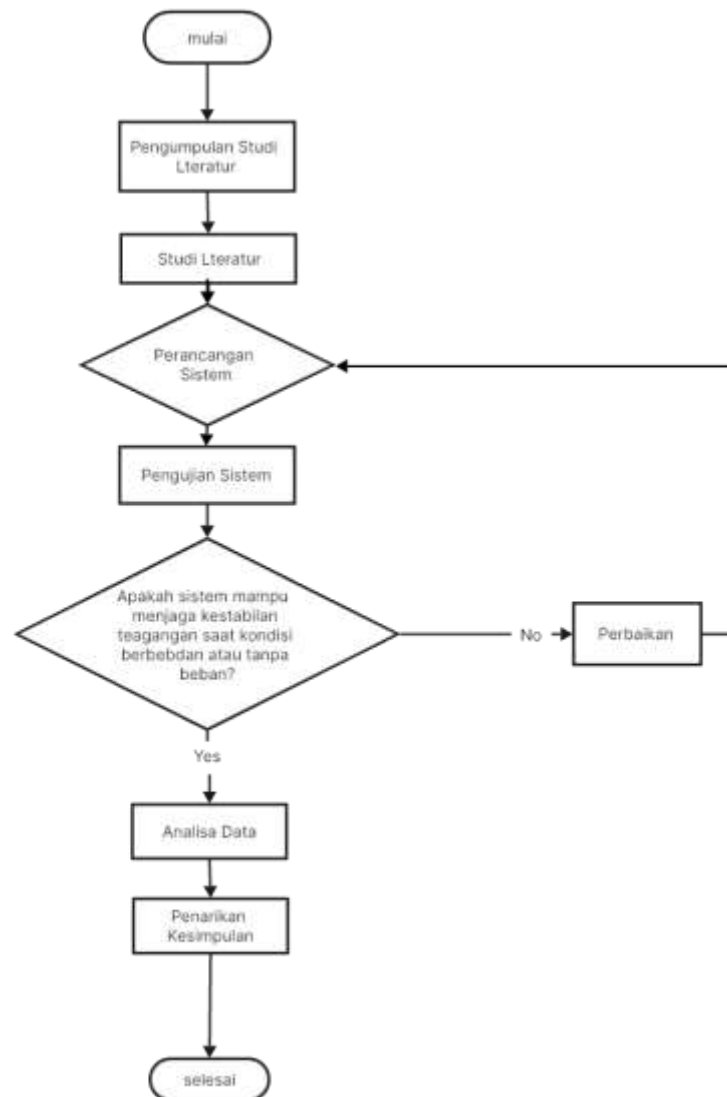
Tahap keenam adalah analisis data yang diperoleh dan membuatnya menjadi sebuah laporan hasil dari penelitian yang telah dilakukan.

6. Kesimpulan dan Saran

Tahapan keenam adalah tahapan terakhir dimana dilakukan penarikan kesimpulan dan saran dari pengujian dan analisa data yang diperoleh selama penelitian berlangsung serta memberikan saran untuk penelitian selanjutnya

3.4 Alur Penelitian

Adapun alur penelitian dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

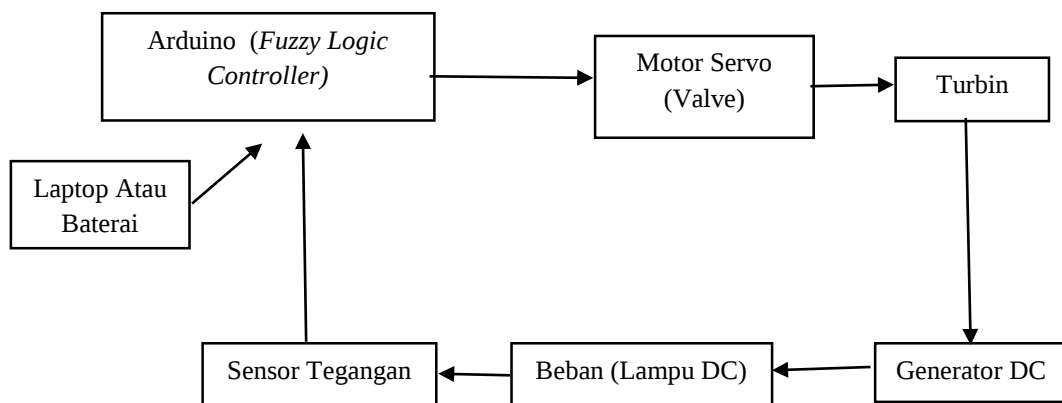


Gambar 3. 1Diagram Alir Penelitian

3.5 Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem berisikan komponen-komponen utama yang menyusun sistem dalam penelitian ini. Dimana komponen penyusun utamanya yang pertama, yaitu Laptop atau baterai sebagai suplai daya pada Arduino Uno R3. Arduino Uno R3 ini sebagai mikrokontroler yang berisikan program kenali dengan *Fuzzy Logic Controller*. Selanjutnya terdapat motor servo yang digunakan untuk mengatur sudut valve, sehingga aliran air yang jatuh ke turbin bisa atur. Kemudian Turbin,

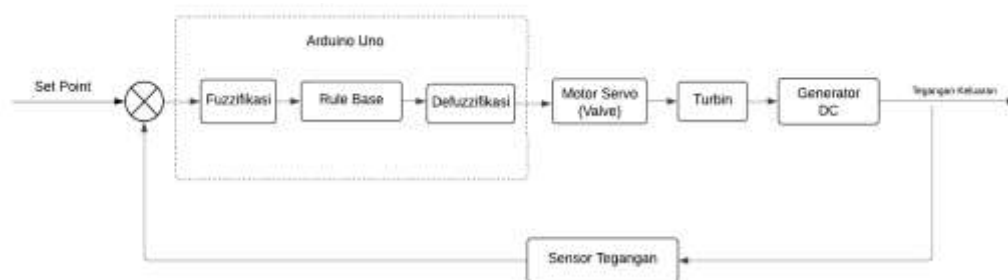
digunakan sebagai penggerak Generator DC yang di kopel menggunakan *V-Belt* yang terpasang di poros Turbin dan Generator DC yang di tautkan ke *pulley*. Generator DC sebagai penghasil energi mekanik ke listrik yang *ouput* tegangan akan di pasang ke beban, berupa lampu DC. Terdapat sensor tegangan sebagai umpan balik yang akan mengukur tegangan keluaran yang akan masuk ke *input* Arduino Uno yang sudah terprogram dengan pengaturan set point yang sudah ditentukan.



Gambar 3. 2 Diagram Blok Sistem Kendali *Fuzzy*

3.6 Diagram Blok Kontrol

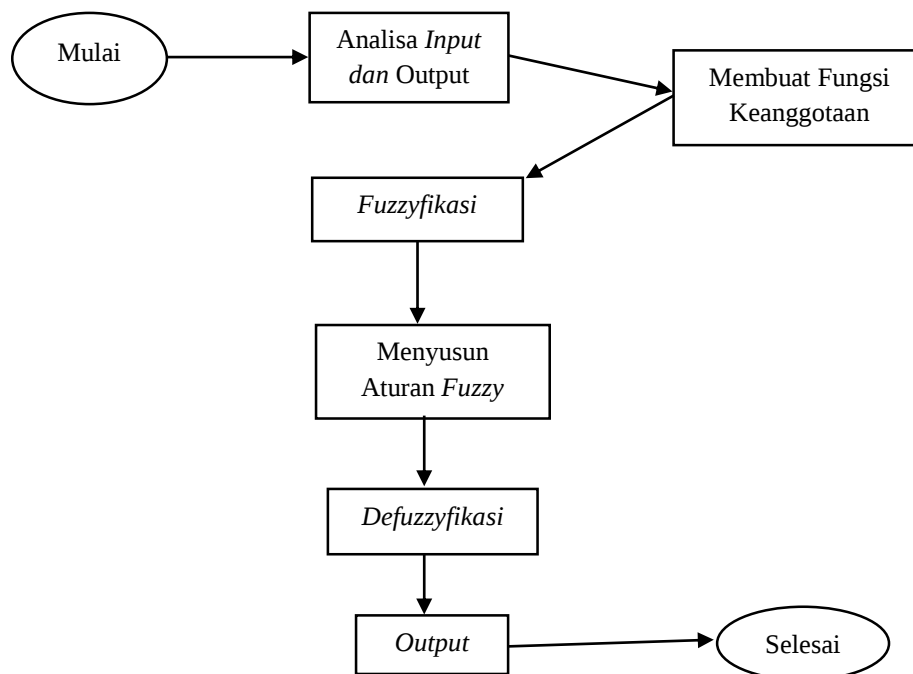
Pada diagram blok kontrol yang telah diubah, penelitian ini menggunakan kendali *close-loop* berbasis *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Kendali ini memanfaatkan umpan balik dari sensor tegangan untuk membaca keluaran dari generator DC. Dengan adanya kendali FLC, sistem mampu menyesuaikan parameter kontrol terhadap perubahan internal maupun eksternal, sehingga tetap mempertahankan tegangan keluaran mendekati set poin. Diagram blok kontrol ditunjukkan pada gambar sebagai berikut:



Gambar 3. 3 Diagram Blok Kontrol *Close Loop* FLC

3.7 Perancangan Kontrol Logika Fuzzy

Tahap perancangan pengendali logika *fuzzy* bertujuan untuk menentukan keluaran berupa nilai tegas (*crisp*) berdasarkan hasil pembacaan sensor yang mengukur tegangan keluaran generator DC. Dalam penelitian ini, logika *fuzzy* dirancang menggunakan metode Mamdani, di mana masukan dan keluaran dispesifikasikan melalui pemodelan matematika. Pengendali logika *fuzzy* dirancang untuk bekerja pada sistem kendali tertutup dengan dua variabel masukan, yaitu error (E) dan perubahan error (ΔE), serta satu variabel keluaran, yaitu sudut motor servo yang mengatur katup (valve) pengendali aliran air. Diagram blok sistem kendali *fuzzy logic* ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Blok Diagram FLC

Masukan error (E) dihitung berdasarkan selisih antara tegangan set point (V_{sp}) dimana pada penelitian ini set point yang ditentukan adalah 12V dan tegangan aktual keluaran generator (V_a) dengan rumus:

$$E(t) = V_{sp} - V_a \quad (3.1)$$

Keterangan:

$E(t)$ = Nilai eror pada waktu ke- t

V_{sp} = Tegangan Set Point

V_a = Tegangan aktual keluaran generator pada waktu ke- t

Perubahan error ($\Delta E(t)$) dihitung dari selisih antara error saat ini dan error sebelumnya, dirumuskan sebagai:

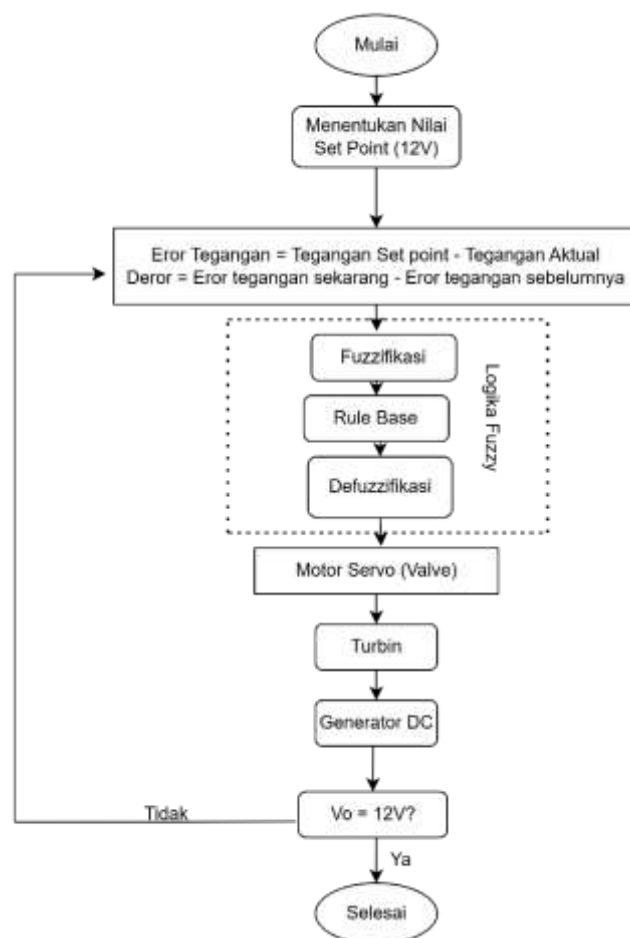
$$\Delta E(t) = E(t) - E(t - 1) \quad (3.2)$$

Keterangan

$\Delta E(t)$ = Perubahan error pada waktu ke- t

$E(t)$ = Nilai error pada waktu ke- t .

$E(t - 1)$ = Nilai error pada waktu sebelumnya ($t-1$)

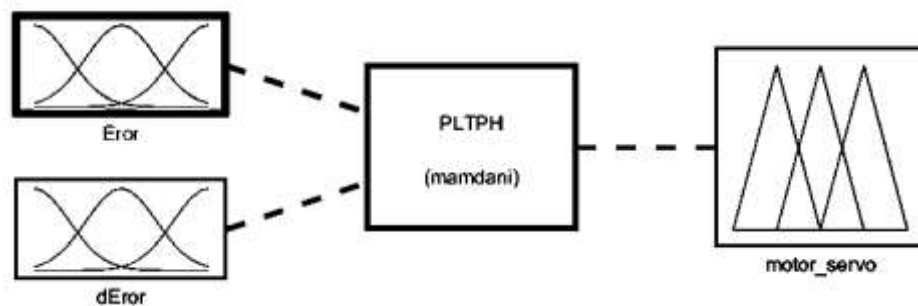


Gambar 3. 5 Flowchart Sistem FLC

Tahapan perancangan dimulai dengan menganalisis variabel masukan dan keluaran, lalu membangun fungsi keanggotaan untuk setiap variabel. Dasar utama desain *fuzzy logic controller* adalah mengatur parameter fungsi keanggotaan dan menentukan aturan logika fuzzy (*rule base*). Setelah itu, dilakukan proses

fuzzifikasi untuk mengubah nilai masukan menjadi nilai *fuzzy*. Aturan *fuzzy* yang dirancang didasarkan pada sistem dan percobaan, yang memetakan hubungan antara E , ΔE , dan keluaran sudut motor servo. Tahap akhir adalah proses defuzzifikasi untuk mengonversi nilai *fuzzy* menjadi nilai tegas yang akan digunakan oleh motor servo untuk mengatur sudut katup, sehingga dapat menjaga stabilitas tegangan keluaran generator DC sesuai set point.

Penelitian ini terlebih dahulu dilakukan simulasi perancangan sistem *fuzzy logic* dengan Matlab. *Software* Matlab digunakan untuk membuat dan menjalankan simulasi dari sistem kendali PLTPH dengan menggunakan kendali *fuzzy logic* sebagai metodenya. Perancangan kontrol *fuzzy* dengan matlab dapat dilihat pada gambar 3.6 yang menampilkan dua variabel masukan dan satu variabel keluaran dengan menggunakan metode Mamdani.



Gambar 3. 6 *Input dan Output Pada FLC*

Tahap terakhir adalah defuzzifikasi, di mana himpunan *fuzzy* hasil komposisi aturan dikonversi kembali menjadi nilai tegas (*crisp*) menggunakan metode *Centroid*. Metode ini menentukan solusi dengan menghitung titik pusat (*centroid*) dari daerah *fuzzy*. Pada penelitian ini, metode *Centroid* diterapkan untuk menghasilkan nilai *crisp* yang digunakan dalam pengaturan sudut motor servo untuk mengontrol aliran air.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis sistem pengendalian tegangan keluaran Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro berbasis logika fuzzy menggunakan mikrokontroler Arduino Uno, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan analisa dan percobaan yang telah dilakukan penggunaan metode kontrol logika fuzzy terbukti efektif dalam membantu PLTPH menjaga kestabilan tegangan keluaran mendekati *set-point* 12 V dengan cara mengatur debit air melalui kontrol sudut motor servo.
2. Sistem kontrol logika fuzzy menghasilkan performa dinamis yang baik dengan nilai rata-rata *rise time* sebesar 0.773 detik, rata-rata *overshoot* sebesar 3.47%, rata-rata settling time sebesar 2.39 detik dan *steady state error* yang sangat kecil yaitu 0.0475%, serta tegangan keluaran yang stabil pada rata-rata 11.99 V untuk seluruh kondisi pembebanan.
3. Sistem bekerja dengan prinsip pengaturan sudut servo berdasarkan nilai error. Ketika tegangan lebih kecil dari set-point, sudut servo diperbesar untuk menambah debit air, sedangkan ketika tegangan melebihi set-point, sudut servo dikurangi untuk mengurangi debit air, sehingga kestabilan tegangan tetap terjaga.
4. Saat beban dilepas, sistem mengalami lonjakan tegangan (tegangan lonjak), namun dapat kembali stabil dalam waktu 2 detik. Tegangan lonjakan tercatat sebesar 14.23 V (5 W), 14.75 V (10 W), dan 15.01 V (15 W), yang menunjukkan peningkatan sesuai besarnya beban yang dilepas.

5. Penurunan dan lonjakan tegangan menunjukkan pola yang sebanding dengan besar kecilnya beban. Semakin besar beban, semakin besar pula tegangan drop dan tegangan lonjak yang terjadi. Namun demikian, sistem tetap menunjukkan kemampuan pemulihan yang cepat dan stabil, menandakan bahwa logika fuzzy mampu menghadapi perubahan beban dengan responsif dan efisien.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis selama pengembangan sistem, beberapa saran untuk pengembangan dan penyempurnaan sistem PLTPH berbasis logika fuzzy untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Melakukan pengujian jangka panjang (*long-term testing*) untuk mengevaluasi keandalan sistem dalam berbagai kondisi musim yang mempengaruhi debit air dan stabilitas suplai listrik.
2. Melakukan pengujian dengan algoritma kendali alternatif seperti *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) dan membandingkannya dengan metode fuzzy logic yang telah diimplementasikan untuk mengetahui metode yang paling optimal.
3. Perlu dikembangkan sistem monitoring berbasis IoT agar data performa PLTPH dan sistem fuzzy dapat dimonitor secara real-time dari jarak jauh, terutama untuk wilayah terpencil yang menjadi target penggunaan PLTPH.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kusnadi, A. Mulyono, G. Pakki, and G. Gunarko, “Rancang Bangun Dan Uji Performansi Turbin Air Jenis,” *J. Tek. Mesin Univ.*, vol. 7, no. 2, p. 207, 2018.
- [2] H. Haripuddin, A. Zauqi, M. Yusuf Mappeasse, and M. Massikki, “the Development of Pico Hydro Power Plant By Utilizing Irrigation Flow in Kasambang Village of Mamuju Regency,” *J. Media Elektr.*, vol. 21, no. 1, pp. 10–19, 2023, doi: 10.59562/metrik.v21i1.1135.
- [3] B. Bono and S. Suwarti, “Variasi Jumlah Sudu Dan Modifikasi Bentuk Nosel Pada Turbin Turgo Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro,” *Eksergi*, vol. 15, no. 2, p. 81, 2019, doi: 10.32497/eksergi.v15i2.1510.
- [4] T. J. Erinle, S. O. Ejiko, and D. H. Oladebeye, “Design of Micro Hydro Turbine for Domestic Energy Generation,” *Iarjset*, vol. 7, no. 4, pp. 85–93, 2020, doi: 10.17148/iarjset.2020.7414.
- [5] I. Hermawan, M. Idris, I. Iswandi, and R. Syah, “Design and Comparative Analysis of Vortex and Whirlpool Type Turbines in Assessing the Performance of Micro Hydro Power Plant,” *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 119, no. 2, pp. 13–22, 2024, doi: 10.37934/arfmts.119.2.1322.
- [6] M. Nadhif and Suryono, “Aplikasi Fuzzy Logic untuk Pengendali Motor DC Berbasis Mikrokontroler ATmega8535 dengan Sensor Photodiode,” *J. Tek. Elektro*, vol. 7, no. 2, pp. 81–85, 2015.
- [7] E. A. Hakim and N. Setyawan, “Hybrid fuzzy-PID design based on flower pollination algorithm for frequency control of micro-hydro power plant,”

vol. 4, no. 2, 2024.

- [8] S. Praptodiyono, H. Maghfiroh, M. Nizam, C. Hermanu, and A. Wibowo, "Design and Prototyping of Electronic Load Controller for Pico Hydropower System," *J. Ilm. Tek. Elektro Komput. dan Inform.*, vol. 7, no. 3, p. 461, 2021, doi: 10.26555/jiteki.v7i3.22271.
- [9] G. A. Madrigal *et al.*, "Fuzzy Logic-Based Voltage Controller for Hybrid Off-Grid Pico-Hydropower and Solar Power Generation Systems," *2019 IEEE 11th Int. Conf. Humanoid, Nanotechnology, Inf. Technol. Commun. Control. Environ. Manag. HNICEM 2019*, pp. 22–27, 2019, doi: 10.1109/HNICEM48295.2019.9072762.
- [10] D. S. KUMAR and D. R. V SUJATHA, "Hydro Power Station Load Frequency Control Using Fuzzy Logic Controller," *Periodicodimineralogia.It*, vol. 91, no. 5, pp. 1022–1029, 2022, [Online]. Available: <https://periodicodimineralogia.it/wp-content/uploads/2022/11/202291573.pdf>
- [11] A. L. Shuraiji and S. W. Shneen, "Fuzzy Logic Control and PID Controller for Brushless Permanent Magnetic Direct Current Motor: A Comparative Study," *J. Robot. Control*, vol. 3, no. 6, pp. 762–768, 2022, doi: 10.18196/jrc.v3i6.15974.
- [12] D. A. Asoh, E. N. Mbinkar, and A. N. Moutlen, "Load Frequency Control of Small Hydropower Plants Using One-Input Fuzzy PI Controller with Linear and Non-Linear Plant Model," *Smart Grid Renew. Energy*, vol. 13, no. 01, pp. 1–16, 2022, doi: 10.4236/sgre.2022.131001.
- [13] H. R. Setiyawan, W. Hadi, and T. Hardianto, "Sistem Kontrol Fuzzy Logic pada Generator DC Penguatan Terpisah Berbasis Arduino UNO R3 (Fuzzy Logic Control System on The Separately Excited DC Generator Based," *Berk. Sainstek*, vol. 3, no. 2017-09–22, pp. 55–60, 2016, [Online]. Available: <https://jurnal.unej.ac.id/index.php/BST/article/view/5377>
- [14] Y. Zhu, Z. Ma, and Z. Wang, "An improved fuzzy logic based DC-link

- voltage control strategy for smoothing output power of the PMSG-WECS,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 8413–8425, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.06.049.
- [15] A. Rafi Al Tahtawi Jurusan Teknik Elektro, P. Negeri Bandung Jl Gegerkalong Hilir, K. Bandung Barat, and J. Barat, “Kendali Posisi Motor DC Menggunakan Logika Fuzzy Interval Tipe 2 The Position Controlling of DC Motor Using Interval Type-2 Fuzzy Logic,” *Telka*, vol. 7, no. 1, pp. 1–10, 2021.
- [16] W. Dsl, W. Dwiono, and D. N. Kusuma H, “Pemanfaatan Saluran Irigasi Untuk Pembangkit Listrik Pikohidro Dengan Generator DC Shunt,” *Techno (Jurnal Fak. Tek. Univ. Muhammadiyah Purwokerto)*, vol. 22, no. 2, p. 139, 2021, doi: 10.30595/techno.v22i2.11121.
- [17] F. Fitrayadi, S. Salimin, and L. Hasanuddin, “Pengaruh Variasi Diameter Pulley Terhadap Daya Yang Di Hasilkan Dinamo Pada Instalasi Turbin Pelton,” *Enthalpy J. Ilm. Mhs. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 3, p. 98, 2023, doi: 10.55679/enthalpy.v8i3.42884.
- [18] U. Latifa and J. Slamet Saputro, “Perancangan Robot Arm Gripper Berbasis Arduino Uno Menggunakan Antarmuka Labview,” *Barometer*, vol. 3, no. 2, pp. 138–141, 2018, doi: 10.35261/barometer.v3i2.1395.
- [19] L. Lyu, X. Wang, L. Zhang, Z. Zhang, and L. H. Koh, “Fuzzy control based virtual synchronous generator for self-adaptative control in hybrid microgrid,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 12092–12104, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.09.055.
- [20] N. Tri and N. N. Khoat, “Research on a Sugeno Fuzzy Logic Controller Compared to a Mamdani-Based PI-Type Fuzzy Logic Inference Model,” *J. Sci. Technol. Issue Inf. Commun. Technol.*, vol. 20, no. 6, pp. 57–62, 2022, doi: 10.31130/ud-jst.2022.177ict.
- [21] I. H. Usoro, U. T. Itaketo, and M. A. Umoren, “Control of a dc motor using fuzzy logic control algorithm,” *Niger. J. Technol.*, vol. 36, no. 2, p. 594,

2017, doi: 10.4314/njt.v36i2.35.

- [22] S. C. Ndukwe, R. Kannan, and H. T. Wei, “Design and experimentation of a simple fuzzy pi-based ac chopper electronic load controller for pico hydropower system,” *Heliyon*, vol. 10, no. 17, p. e35248, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e35248.
- [23] Ansar, R. Karim, Salim, and E. Khudriah, “Implementasi Fuzzy Inference System Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani Untuk Optimalisasi Produksi Tahu,” *G-Tech J. Teknol. Terap.*, vol. 8, no. 1, pp. 276–285, 2023, doi: 10.33379/gtech.v8i1.3650.