

**IMPLEMENTASI KENDALI STABILITAS TEGANGAN DENGAN PID
ZIEGLER NICHOLS – TUNING FUZZY MAMDANI PADA HASIL
TEGANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PIKOHIDRO**

(Skripsi)

Oleh :

**ANANDA SAPUTRI
NPM 2115031005**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

**IMPLEMENTASI KENDALI STABILITAS TEGANGAN DENGAN PID
ZIEGLER NICHOLS – TUNING FUZZY MAMDANI PADA HASIL
TEGANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PIKOHIDRO**

Oleh:

ANANDA SAPUTRI

Skripsi

**Sebagai salah satu syarat mendapat gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIBVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

IMPLEMENTASI KENDALI STABILITAS TEGANGAN DENGAN PID *ZIEGLER NICHOLS – TUNING FUZZY* MAMDANI PADA HASIL TEGANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PIKOHIDRO

Oleh

ANANDA SAPUTRI

Permasalahan kestabilan tegangan pada sistem pembangkit listrik skala kecil seperti Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) menjadi tantangan dalam menjamin keandalan suplai energi di daerah terpencil. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem kendali tegangan berbasis kombinasi PID yang dituning menggunakan metode Ziegler-Nichols dan logika fuzzy Mamdani sebagai tuning adaptif terhadap parameter K_p , K_i , dan K_d . Metode osilasi berkelanjutan digunakan untuk memperoleh parameter awal PID, yaitu $K_p = 1,05$, $K_i = 1,05$, dan $K_d = 0,255$. Sistem diuji dalam kondisi tanpa beban dan dengan beban bertingkat (5W, 10W, dan 15W) untuk mengevaluasi respons sistem terhadap perubahan beban mendadak. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan tegangan output mendekati setpoint 12V dengan waktu pemulihan maksimum 1,1 detik dan tanpa overshoot. Waktu naik (rise time) berada pada rentang 1,15–1,21 detik. Selain itu, sistem menunjukkan respons servo yang proporsional terhadap variasi beban, serta penyesuaian parameter PID secara real-time untuk menghindari ketidakaturan tegangan. Kesimpulannya, kombinasi PID dan fuzzy Mamdani mampu meningkatkan performa sistem kendali tegangan PLTPH secara signifikan, dengan karakteristik yang cepat, stabil, dan adaptif. Sistem ini berpotensi besar untuk diimplementasikan pada pembangkit listrik skala kecil di wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik utama.

Kata kunci: Kendali PID, Fuzzy Mamdani, Ziegler-Nichols, Tegangan Stabil, PLTPH

ABSTRACT

IMPLEMENTASI KENDALI STABILITAS TEGANGAN DENGAN PID ZIEGLER NICHOLS – TUNING FUZZY MAMDANI PADA HASIL TEGANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PIKOHIDRO

By

ANANDA SAPUTRI

Voltage stability in small-scale power generation systems such as Pico-Hydro Power Plants (PLTPH) remains a challenge in ensuring reliable energy supply in remote areas. This study aims to design and implement a voltage control system based on a combination of PID controller tuned using the Ziegler-Nichols method and an adaptive Mamdani fuzzy logic controller for adjusting the PID parameters (K_p , K_i , K_d) in real time. The continuous oscillation method was used to obtain the initial PID parameters: $K_p = 1.05$, $K_i = 1.05$, and $K_d = 0.255$. The system was tested under no-load and various load conditions (5W, 10W, and 15W) to evaluate its dynamic response. The results showed that the system successfully maintained output voltage near the 12V setpoint with a maximum recovery time of 1.1 seconds and no overshoot. The rise time ranged from 1.15 to 1.21 seconds. The servo motor responded proportionally to load variations, and the PID parameters were adjusted adaptively to prevent instability. In conclusion, the integration of classical PID control with Mamdani fuzzy logic significantly improved the control system's performance by delivering fast, stable, and adaptive voltage regulation. This control strategy demonstrates strong potential for application in small-scale renewable energy systems, particularly in areas beyond the reach of national grid infrastructure.

Keywords: *PID Control, Mamdani Fuzzy, Ziegler-Nichols, Voltage Stability, PLTPH*

Judul Skripsi

**: IMPLEMENTASI KENDALI STABILITAS
TEGANGAN DENGAN PID ZIEGLER
NICHOLS – TUNING FUZZY MAMDANI
PADA HASIL TEGANGAN PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA PIKOHIDRO**

Nama Mahasiswa

: ANANDA SAPUTRI

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2115031005

Jurusan

: Teknik Elektro

Fakultas

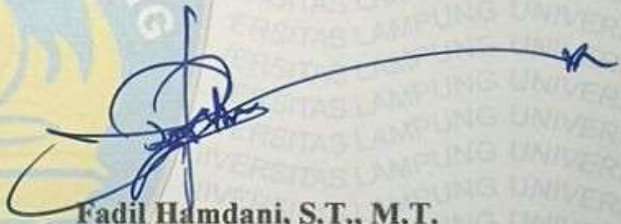
: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



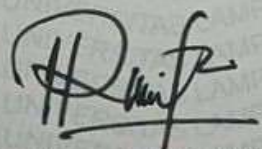

Ir. Noer Soedjarwanto, M.T.
NIP. 19631114 199903 1 001

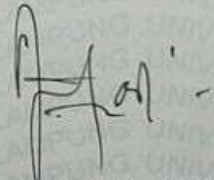

Fadil Hamdani, S.T., M.T.
NIP. 19870726 202203 1 003

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

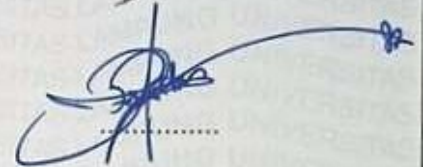
MENGESAHKAN

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 pengetahuan 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 pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi akademik sesuai dengan hukum yang berlaku

Bandar Lampung, 12 Juni 2025



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ananda Saputri'.

Ananda Saputri
NPM 2115031005

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Abung Semuli pada tanggal 24 Januari 2003, sebagai anak ke-2 dari 2 bersaudara, dari pasangan Bapak Anton Sugiarto dan Ibu Poniasih. Riwayat Pendidikan penulis dimulai dari TK Abung Semuli pada Tahun 2008 hingga 2009. SDN 1 Abung Semuli pada tahun 2009 hingga 2015. SMPN 1 Abung Semuli pada tahun 2015 hingga 2018. Kemudian SMAN 1 Abung Semuli pada 2018 hingga 2021. Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung pada tahun 2021 melalui jalur SNMPTN (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri). Selama menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam keanggotaan asisten Laboratorium Konversi Energi Elektrik dari tahun 2023 dan berkesempatan menjadi asisten Praktikum Dasar Tenaga Listrik, Mesin – Mesin Listrik dan Elektronika Daya pada Tahun 2024. Selain itu, penulis juga tergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) sebagai anggota Departemen Pengembangan Keteknikan pada tahun 2022 dan anggota Departemen Komunikasi dan Informasi pada tahun 2023. Penulis melaksanakan kerja praktik di PT. Semen Baturaja (Persero) Tbk, Kecamatan Baturaja Timur, Ogan Komering Ulu yang tergabung dalam *Unit of Elect, Instr & Control Maint* dan melanjutkan membuat laporan yang berjudul “ANALISIS KINERJA VARIABLE SPEED DRIVE MOTOR COOLER 55FN06 PADA GRATE COOLER CLINKER PT SEMEN BATURAJA TBK PLANT II” tahun 2024.

**“Saya Persembahkan dan Saya dedikasikan
Skripsi ini untuk Kedua Orang Tua saya,
Ayahanda Anton Sugiarto dan Ibunda Poniasih
yang memberikan semua hal terbaik demi
anaknya untuk mencapai kesuksesan”**

Serta

Keluarga Besar, Dosen, Teman dan Almamater

MOTTO

**“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan,
sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan. Maka
apabila engkau telah selesai, tetaplah bekerja keras, dan
hanya kepada Tuhanmulah engkau berharap”**

(QS.Al-Insyirah)

“Mamah sama Ayah pasti doain yang terbaik buat adek”

(Mamah Ayah)

SANWACANA

Segala puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas limpahan nikmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Implementasi Kendali Stabilitas Tegangan Dengan Pid Ziegler Nichols – Tuning Fuzzy Mamdani Pada Hasil Tegangan Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan semua hal yang bermanfaat sehingga mampu melaksanakan penelitian ini hingga terselesainya Skripsi ini.
2. Keluarga Kecil penulis, Ayah, Mamah, Kakak Aldi, Mba Atika, Adek Zayn, serta Ibu. Terimakasih banyak sudah mendoakan hal – hal baik untuk setiap langkah perjalanan penulis. Terimakasih sudah mau melewati banyak kesulitan untuk mengusahakan penulis mendapat gelar sarjana. Terimakasih banyak sudah memberikan banyak motivasi serta dukungan sehingga penulis bisa sampai di tahap ini. Semoga kita semua selalu sehat dan banyak kebahagiaan lain yang akan datang.
3. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A. IPM., ASEAN.Eng., selaku Rektor Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
5. Ibu Herlinawati, S.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
6. Bapak Sumadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung.
7. Bapak Ir. Noer Soedjarwanto, M.T., selaku dosen pembimbing utama, yang dengan penuh kesabaran dan ketulusan telah membimbing, mengarahkan, serta

memberikan motivasi dan nasihat berharga sepanjang proses penyusunan tugas akhir ini. Terima kasih atas segala ilmu, pengalaman, serta kemudahan yang Bapak berikan, yang tidak hanya membantu penulis dalam menyelesaikan karya ini, tetapi juga memberikan pelajaran berharga untuk menghadapi tantangan di masa depan. Semoga segala kebaikan Bapak menjadi amal jariyah yang tak terputus, serta senantiasa di berikan Kesehatan, kebahagiaan, dan keberkahan dalam setiap waktu.

8. Bapak Fadil Hamdani, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing kedua, yang dengan penuh kesabaran dan kerendahan hati telah memberikan bimbingan, arahan. Terima kasih atas ilmu baru yang Bapak bagikan dalam setiap kesempatan, Semoga segala kebaikan Bapak senantiasa mendapatkan balasan terbaik dari Tuhan Yang Maha Esa baik dalam kesehatan maupun segala kebaikan yang akan datang.
9. Bapak Osea Zebua, S.T., M.T., selaku dosen penguji, yang telah memberikan kritik, masukan, saran, serta motivasi yang membangun dengan penuh keramahan. Terima kasih atas waktu, pemikiran, serta arahan yang Bapak berikan, sehingga penulis dapat memperbaiki dan menyempurnakan tugas akhir ini menjadi lebih baik dan bermakna. Semoga bapak selalu dilimpahkan kesehatan serta keberkahan dalam setiap waktu, serta segala kebaikan hadir untuk membalas kebaikan yang telah bapak berikan.
10. Bapak F.X. Arinto Setyawan, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan, bimbingan dengan baik dan tulus kepada penulis selama perkuliahan.
11. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan pengajaran dan pandangan hidup selama perkuliahan.
12. Staf administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
13. Teruntuk Dona Eliza, Jefri Prayoga, dan Luki Nurmalik, rekan dalam penyusunan skripsi. Terima kasih atas semangat, kerja keras, dan kebersamaan yang telah terjalin selama proses panjang ini. Terima kasih telah saling mengingatkan, mengarahkan, serta bekerja sama dengan penuh tanggung

jawab, mulai dari pelaksanaan kerja praktik hingga penyelesaian skripsi ini. Semoga segala usaha dan perjuangan kita membuahkan hasil yang terbaik, serta menjadi cerita yang menyenangkan.

14. Teruntuk Serly Ulya Wardani, Eikel Suranta Bangun, Mahendra Panca Haganta S.M. dan Fawwaz Islam Madani, teman – teman terdekat sejak awal perkuliahan. Terima kasih atas persahabatan, kebersamaan, dan segala kebaikan yang telah terjalin hingga terasa seperti saudara sendiri. Terima kasih telah menjadi teman yang selalu ada, membantu dalam berbagai hal, serta menciptakan begitu banyak kenangan indah yang mewarnai perjalanan penulis selama masa kuliah. Semoga persahabatan ini tetap terjaga, dan semoga kita semua senantiasa diberikan kesuksesan, kesehatan, serta mampu menjadi pribadi yang bermanfaat di lingkungan baru kita masing-masing di masa depan.
15. Teruntuk Putri Della Puspita dan Dinda Aliunnisa, teman sejak masa SMA. Terima kasih atas segala bantuan, dukungan, dan doa yang telah diberikan hingga saat ini. Kehadiran kalian memberi semangat baru di setiap langkah, meskipun perjalanan kita sudah berbeda arah. Semoga persahabatan ini tetap terjaga, dan kita semua diberikan kelancaran, kesuksesan, serta kebahagiaan dalam meraih cita-cita di masa depan.
16. Segenap Keluarga Besar Laboratorium Konversi Energi Elektrik, Kak Saka, Jefri, Benyamin, Daniel, Dona, Ruli, Siti, Luki, Alex, Marhadi, Bimo, Deni, Dina, Alfiza, dan lain – lain. Serta Adik – Adik asisten Lab KEE 2022, Septa, Awan, Aditio, Fina, Muti, Emil, Bani, Novian, Ayu, Humam, Krisna, dan Jopen. Terima kasih atas ilmu, bantuan, dan kerja samanya selama penulis menjadi asisten laboratorium.
17. Rekan – Rekan selama Perkuliahan , Rijal Mahmud Wahyudi, Rika Septi Riani, Bagus Alfariq, Unedo Simanjuntak, Imam Ghozali Fernanda, M. Fikri Pangestu, Rizky Firmansyah, Jamed Crishtian Yoga P., M. Rachman Wijaya, Elika Dwi Utami, Bella Amelia, Dinda Armelia, Rizky Febian, dan lain – lain yang telah menjadi pendukung bagi penulis dalam berbagai hal selama perkuliahan.
18. Segenap Keluarga Besar Angkatan EXCALTO 2021, dan teman – teman yang telah menjadi keluarga bagi penulis.

19. Rekan – Rekan HIMATRO UNILA serta kakak – kakak dan adik – adik tingkat di Jurusan Teknik Elektro.
20. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
21. Terakhir, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada sosok yang selama ini telah berjuang tanpa henti — seorang perempuan sederhana dengan impian yang tinggi. Terima kasih kepada diri sendiri, Ananda Saputri, si anak bungsu yang masih terus mengejar mimpi sebelum waktu habis. Terima kasih karena telah berusaha semaksimal mungkin, tidak hanya demi diri sendiri, tetapi juga untuk kebaikan orang-orang di sekitar. Terima kasih telah memilih untuk tetap bertahan, belajar dari setiap kegagalan, dan terus melangkah meski hasilnya tak selalu sejalan dengan harapan. Tetaplah berusaha, tetaplah belajar, dan jangan lelah untuk menjadi bermanfaat di manapun kaki ini berpijak. Rayakan setiap pencapaian, sekecil apapun itu, karena semua adalah bagian dari perjalanan besar menuju impian. Aku berdoa, semoga setiap langkah kecilmu senantiasa diperkuat, dikelilingi oleh orang-orang yang baik dan hebat, serta satu per satu mimpi itu akan terwujud pada waktu yang indah.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Penulis menerima kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak demi kemajuan bersama. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, 12 Juni 2025

Ananda Saputri

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Hipotesis.....	5
1.7 Sistematika Penulisan	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Penelitian Terdahulu.....	7
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hidro.....	10
2.2.1 Motor Dc (Sebagai Generator).....	12
2.2.2 Turbin	15
2.2.3 Pulley Dan V – Belt	18
2.3 Komponen Pendukung Penstabil Tegangan.....	19
2.3.1 Arduino Mega 2560	19
2.3.2 Arduino Ide	19
2.3.3 Sensor Tegangan	20
2.3.4 Sensor Flowmeter	21
2.3.5 Motor Servo	22
2.3.6 Valve.....	23
2.4 Sistem Kendali <i>Closed – Loop</i>	24
2.4.1 Definisi Sistem <i>Closed – Loop</i>	24
2.4.2 Kontrol PID (<i>Proportional Integral Derivative</i>).....	26

2.4.3	Logika Fuzzy.....	31
III.	METODOLOGI PENELITIAN	40
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	40
3.2	Alat dan Bahan	40
3.3	Tahapan Penelitian	41
3.4	Desain Penelitian.....	42
3.4.1	Spesifikasi Alat	42
3.4.2	Diagram Alir Keseluruhan	42
3.4.3	Diagram Alir Kendali Sistem.....	43
3.4.4	Perancangan Sistem Kendali.....	45
3.5	Desain Pengujian.....	50
IV.	PEMBAHASAN	52
4.1	Kalibrasi Alat	52
4.2	Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH)	54
4.2.1	Box Control System	56
4.3	Pegujian Sistem Kendali Fuzzy PID	57
4.3.1	Perancangan Sistem PID	57
4.3.2	Perancangan Sistem Fuzzy.....	59
4.4	Percobaan pada Sistem Kendali Fuzzy PID.....	72
4.4.1	Pengujian Tanpa Beban.....	72
4.4.2	Pengujian sistem dengan beban lampu 5 watt.....	78
4.4.3	Pengujian Sistem dengan Beban Lampu 10 watt.....	80
4.4.4	Pengujian Sistem dengan Beban Lampu 15 Watt	82
4.4.5	Perbandingan Sistem Dalam Menjaga Stabilitas Sistem	84
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	88
5.1.	Kesimpulan	88
5.2.	Saran.....	89
	LAMPIRAN.....	93

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2. 1 Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hidro	11
Gambar 2. 2 Prinsip kerja penggunaan komutator.....	14
Gambar 2. 3 Gelombang tegangan rotor yang dihasilkan oleh cincin-seret dan komutator	15
Gambar 2. 4 Gambar turbin pelton	16
Gambar 2. 5 Gambar turbin turgo	16
Gambar 2. 6 Gambar turbin crossflow	17
Gambar 2. 7 Gambar turbin francis.....	18
Gambar 2. 8 Pulley dan v-belt.....	18
Gambar 2. 9 Arduino Mega.....	19
Gambar 2. 10 Arduino IDE	20
Gambar 2. 11 Sensor tegangan.....	21
Gambar 2. 12 Sensor flowmeter.....	22
Gambar 2. 13 Motor servo	23
Gambar 2. 14 Valve.....	24
Gambar 2. 15 Blok diagram <i>Closed – Loop System</i>	25
Gambar 2. 16 <i>Closed - Loop System</i>	25
Gambar 2. 17 blok diagram dari kendali PID	28
Gambar 2. 18 <i>unit step response</i> dan <i>S-shaped response curve</i>	28
Gambar 2. 19 sistem tertutup dengan kendali proposional.....	30
Gambar 2. 20 Osilasi berkelanjutan dengan periode (diukur dalam detik).....	30
Gambar 2. 21 sistem logika fuzzy	31
Gambar 2. 22 Output Fuzzy mamdani	35
Gambar 2. 23 Kurva Linear (a) Naik (b) Turun	37
Gambar 2. 24 Kurva Segitiga.....	38
Gambar 2. 25 Kurva Trapesium	38
Gambar 2. 26 Kurva Sigmoid	39
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitiitian	41
Gambar 3. 2 Diagram alir kerja keseluruhan dari sistem.....	43
Gambar 3. 3 Diagram alir sistem	43
Gambar 3. 4 Diagram Blok <i>Closed - Loop</i>	45
Gambar 3. 5 Diagram Blok kendali <i>Fuzzy - PID</i>	46
Gambar 3. 6 Osilasi berkelanjutan dengan periode (diukur dalam detik).....	47
Gambar 3. 7 Fungsi keanggotaan input fuzzy	49
Gambar 4. 1. Lokasi pengujian sistem Pembangkit Listrik Tenaga Piko hidro	55
Gambar 4. 2. Wiring Sistem Kendali pada PLTPH.....	56
Gambar 4. 3. Osilasi pada sistem	58
Gambar 4. 4. Fungsi Keanggotaan Variabel Error	61
Gambar 4. 5. Fungsi Keanggotaan Variabel Delta Error	63

Gambar 4. 6. Fungsi Keanggotaan Variabel K_p	64
Gambar 4. 7. Fungsi Keanggotaan Variabel K_i	66
Gambar 4. 8. Fungsi Keanggotaan Variabel K_d	68
Gambar 4. 9. Grafik Perbandingan antara tara tegangan aktual dengan setpoint saat kondisi sistem tanpa beban.....	73
Gambar 4. 10. Error dan Delta Error Sistem Kendali Fuzzy PID Stabilitas Tegangan Keluaran PLTPH	74
Gambar 4. 11. Perubahan Nilai Parameter K_p , K_i , dan K_d Sistem Kendali Fuzzy	77
Gambar 4. 12. Tegangan keluaran pltph pada saat pembebanan 5 watt.....	78
Gambar 4. 13. Error dan Delta Error Sistem Kendali Fuzzy PID Stabilitas Tegangan Keluaran PLTPH	79
Gambar 4. 14. Perubahan nilai parameter K_p , K_i , dan K_d pada saat pembebanan lampu 5 watt.....	79
Gambar 4. 15. perbandingan tegangan actual saat dipasang beban 10 watt	80
Gambar 4. 16. Nilai error dan delta error pada pengujian beban 10 watt.....	81
Gambar 4. 17. perubahan nilai K_p , K_i , dan K_d saat pembebanan 10 watt	82
Gambar 4. 18. Perubahan tegangan ketika pembebanan dengan lampu 15 watt ..	83
Gambar 4. 19. Perubahan error dan delta error ketika pembebanan 15 watt	83
Gambar 4. 20. Perbandingan nilai tegangan ketika pengujian berbeban	85
Gambar 4. 21. Perbandingan perubahan nilai error dan derror ketika pengujian berbeban	85
Gambar 4. 22. Perbandingan perubahan nilai K_p , K_i , dan K_d ketika pengujian berbeban	86

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 1. 1. Klasifikasi PLTA	1
Tabel 2. 1. Pengaruh konstanta K_p , K_i , dan K_d terhadap respon sistem	26
Tabel 2. 2. Peraturan dasar tuning ziegler – Nichols pada step response dari sebuah	29
Tabel 2. 3. Peraturan dasar tuning dengan Ziegler Nichols ada K_{cr} dan P_{cr} (Metode	30
Tabel 2. 4. Contoh variabel input dan output dalam metode Tsukamoto	36
Tabel 2. 5. Perbandingan metode Tsukamoto, Mamdani, dan Sugeno	37
Tabel 4. 1. Data Hasil Kalibrasi Sensor Tegangan	52
Tabel 4. 2. Data Hasil Kalibrasi Motor Servo	54
Tabel 4. 3. Data hasil tegangan PLTPH deH dengan bukaan valve yang berubah	55
Tabel 4. 4. Fuzzy Rules Parameter K_p	69
Tabel 4. 5. Fuzzy Rules Parameter K_i	69
Tabel 4. 6. Fuzzy Rules Parameter K_d	69
Tabel 4. 7. Respon Sistem Stabilitas Tegangan Keluaran PLTPH dengan Kendali	74
Tabel 4. 8. Perubahan Nilai Parameter K_p Sistem Kendali Fuzzy PID dengan Set Point 12	75
Tabel 4. 9. Perubahan Nilai Parameter K_i Sistem Kendali Fuzzy PID dengan Set Point	75
Tabel 4. 10. Perubahan Nilai Parameter K_d Sistem Kendali Fuzzy PID dengan Set Point	76
Tabel 4. 11. Perbandingan respon sistem pengujian sistem Kendali Stabilitas.....	86

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada daerah terpencil dengan tingkat pendidikan yang rendah serta ekonomi yang masih lemah, menyebabkan sebagian penduduk Indonesia kesulitan untuk mendapatkan akses energi listrik. Tidak hanya menunjuk pada suatu daerah terpencil, namun beberapa daerah persawahan yang luas masih kurang adanya penerangan jalan. Hal ini karena listrik sulit masuk ke daerah tersebut. Kondisi ini mendorong perlunya solusi alternatif guna menghasilkan energi listrik yang terjangkau, berkelanjutan, dan sesuai dengan karakteristik lokal dari suatu daerah. Melihat karakteristik dari setiap daerah di Indonesia yang terdiri atas perairan seperti sungai atau irigasi di sekitar persawahan. Maka solusi yang bisa ditawarkan adalah dengan Pembangunan pembangkit listrik tenaga air.[1]

Pembangkit listrik tenaga air merupakan salah satu sumber penghasil listrik yang memanfaatkan aliran air. Dengan memanfaatkan energi kinetik dari aliran air yang digunakan untuk memutar turbin yang terhubung dengan generator sehingga menghasilkan listrik. Selain itu juga, PLTA juga terbukti menjadi salah satu pembangkit listrik yang ramah lingkungan. Jenis – jenis energi yang dihasilkan terbagi menjadi beberapa macam, seperti yang ditunjukkan pada tabel 1 [2].

Tabel 1. 1. Klasifikasi PLTA

No	Jenis PLTA	Kapasitas
1	PLTA Besar	>100 MW
2	PLTA Menengah	(15 – 100) MW
3	PLTA Kecil	(1 – 15) MW
4	PLTM (mini hidro)	100 Kw – 1 MW
5	PLTMH (mikro hidro)	(5 – 100) kW
6	Piko Hidro	<5 kW

Pembangkit listrik pikohidro umumnya digunakan pada daerah terpencil yang memiliki debit aliran serta tinggi jatuh air yang rendah. Sistem ini memanfaatkan debit aliran air dan tinggi jatuh (*head*) yang rendah, sehingga cocok untuk wilayah dengan sumber daya air terbatas tetapi berkelanjutan, seperti sungai kecil atau saluran irigasi. Oleh karena itu juga, daya yang dihasilkan oleh PLTPH kurang dari 5 kW. Karena daya yang dihasilkan kecil, maka komponen seperti generator dan turbin yang digunakan juga dalam skala yang kecil. Hal ini membuat biaya instalasi dan perawatan lebih terjangkau dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga air skala besar. Meskipun kapasitasnya kecil, pembangkit ini mampu menyediakan listrik yang cukup untuk kebutuhan rumah tangga atau komunitas kecil, seperti penerangan, pengisian daya perangkat elektronik, dan kebutuhan dasar lainnya. [3]

Kelemahan dari jenis pembangkit listrik tenaga air adalah debit air yang berubah – ubah sepanjang waktu, yang diakibatkan oleh musim, intensitas hujan, atau aktivitas manusia disekitar sumber air. Perubahan debit air ini memengaruhi putaran turbin yang terhubung dengan generator sehingga tegangan yang dihasilkan tidak stabil. Disisi lain, perangkat elektronik membutuhkan suplai daya yang konsisten atau konstan. Ketidakstabilan ini membawa dampak buruk untuk kinerja sistem, dimana kinerja yang dihasilkan menjadi tidak optimal sehingga berpotensi menjadi penyebab kerusakan pada perangkat elektronik.

Berdasarkan penelitian Perancangan dan Simulasi Penerapan Pengendali PID Pada Sistem Kendali Tegangan Keluaran Generator Pesawat N219 di PT. Dirgantara Indonesia pada [4] dijelaskan mengenai kendali tegangan keluaran generator DC yang dikendalikan melalui pengendali *Proportional Integral* dan *Derivatif* (PID). Penelitian dengan menggunakan metode ini ternyata dapat mengurangi *overshoot*, *error steady state*, mempercepat *settling time* dan dapat membalikan keadaan ketika diberikan beban. Metode penalaan kontroler menggunakan penala PIDF – pidTuner, diperoleh nilai parameter $K_p = 0,19425$, $K_i = 0,11098$, $K_d = 0,045014$, $T_f = 0,0047665$. Setelah diterapkan didapatkan *settling time* menjadi 4 detik dan menghilangkan *overshoot*. Namun ketika sistem diberikan beban terjadi undervoltage namun pengendali mampu memperbaiki nilai error yang terjadi

sehingga tidak terdapat error lagi dengan catatan semakin besar beban maka semakin lama waktu memperbaiki.

Melalui penelitian Simulasi dan Analisa Respon Fuzzy Logic Controller pada Sistem Suspensi [5] didapatkan bahwa respon sistem suspensi mekanik saat loop terbuka sering menghasilkan osilasi yang berlebihan. Setelah penelitian terbukti bahwa dengan pengendalian ini dihasilkan 49 aturan menunjukkan performansi sistem yang berbeda. Hasil performansinya yaitu *settling time* = 1.05 sekon, *overshoot* = 2.78%, *peak time* = 0.51, *rise time* = 0.4 sekon. Karakteristik respon ketika dicoba dengan kendali PID didapatkan *settling time* = 1.7 detik, dengan *overshoot* = 2.09%, *peak time* = 1.02, *rise time* = 0.304 sekon. Dari hasil percobaan disimpulkan bahwa ketika menggunakan FLC parameter *settling time* dan *peak time* lebih baik dibandingkan dengan kendali PID. Sementara pada pengendalian PID parameter *overshoot* yang dihasilkan lebih kecil dan nilai *rise time* lebih cepat.

Dengan latar belakang dari kedua penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan mengombinasikan metode kendali *Proportional Integral Derivative* (PID) dengan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) untuk mengatur stabilitas tegangan keluaran generator. Pendekatan ini diharapkan dapat menggabungkan keunggulan dari kedua metode, yaitu kemampuan PID dalam mengurangi *steady-state error* dan *overshoot*, serta keunggulan FLC dalam meningkatkan performansi respons sistem seperti *settling time* dan *peak time*. Penelitian ini juga akan membandingkan performansi sistem menggunakan kendali PID-Fuzzy dengan masing-masing metode secara terpisah. Evaluasi akan dilakukan menggunakan parameter kunci seperti *settling time*, *rise time*, *overshoot*, *steady-state error*, serta kemampuan pemulihan sistem dari gangguan. Selain itu, penelitian ini akan mengidentifikasi skenario optimal untuk implementasi kontrol PID-Fuzzy dalam sistem generator pikohidro, termasuk kondisi perubahan beban mendadak dan fluktuasi debit air [6]. Dengan menghasilkan sistem kendali yang lebih stabil dan efisien, penelitian ini diharapkan mampu mendorong pemanfaatan energi terbarukan secara lebih luas, terutama pada wilayah dengan keterbatasan akses listrik. Implementasi sistem ini diharapkan tidak hanya meningkatkan keandalan pasokan listrik, tetapi juga berkontribusi dalam upaya keberlanjutan energi dan pengurangan emisi karbon.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana merancang kendali kombinasi PID dan Fuzzy – Logic untuk mengoptimalkan tegangan keluaran generator pada pembangkit listrik tenaga pikohidro pada daerah terpencil dengan potensi sumber daya air terbatas.
2. Parameter optimal apa saja pada kendali PID-Fuzzy yang diperlukan untuk meningkatkan performansi sistem kendali tegangan pada Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro.
3. Bagaimana karakteristik respons sistem (*settling time*, *steady-state error*, dan *overshoot*) setelah diterapkannya kendali PID-Fuzzy dalam menghadapi perubahan beban pada Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini difokuskan pada daerah terpencil dengan potensi sumber daya air terbatas, seperti sungai kecil atau saluran irigasi.
2. Sistem kendali yang diterapkan adalah kombinasi Propotional Integral Derivative (PID) dengan metode Ziegler – Nichols dan Fuzzy Logic Controller (FLC) Mamdani.
3. Evaluasi performansi sistem mencakup parameter settling time, steady-state error, overshoot, rise time, dan respons sistem terhadap perubahan beban. Analisis terbatas pada kestabilan tegangan keluaran generator tanpa mempertimbangkan aspek lain seperti efisiensi mekanis atau kerugian daya.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk memberikan solusi terhadap permasalahan kestabilan tegangan pada (PLTPH) di daerah terpencil dengan potensi sumber daya air yang terbatas. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk merancang, mengoptimalkan, dan mengevaluasi sistem kendali berbasis kombinasi PID dan Fuzzy Logic Controller (FLC) untuk meningkatkan performansi sistem secara menyeluruh. Spesifik, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang sistem kendali kombinasi PID dan Fuzzy Logic Controller (FLC) untuk mengoptimalkan kestabilan tegangan keluaran generator pada (PLTPH) di daerah terpencil dengan potensi sumber daya air terbatas.
2. Menentukan parameter optimal kendali PID-Fuzzy, yang meliputi konstanta PID (K_p , K_i , K_d) dan aturan logika fuzzy, untuk meningkatkan kinerja sistem kendali tegangan pada PLTPH.
3. Menganalisis karakteristik respons sistem, yang meliputi settling time, steady-state error, overshoot, dan rise time, setelah penerapan kendali PID-Fuzzy dalam menghadapi fluktuasi debit air dan perubahan beban pada PLTPH.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

1. Memberikan solusi praktis untuk mengoptimalkan kestabilan tegangan pada PLTPH yang dapat diterapkan pada daerah terpencil dengan potensi sumber daya air terbatas.
2. Memberikan wawasan baru dalam pengembangan teknik kendali berbasis kombinasi PID dan Fuzzy Logic Controller (FLC) untuk sistem pembangkit listrik tenaga air berskala kecil, khususnya pada Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro .
3. Meningkatkan keandalan sistem PLTPH dalam menghadapi fluktuasi debit air dan perubahan beban, sehingga menghasilkan energi yang lebih stabil dan sistem yang efisien.

1.6 Hipotesis

Implementasi sistem kendali PID-fuzzy menghasilkan kinerja yang lebih baik dalam memperbaiki respon sistem settling time, overshoot, dan steady error serta menjaga kestabilan tegangan keluaran PLTPH dengan sumber daya air yang kecil.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada penelitian ini disusun untuk memberikan gambaran yang jelas dan terstruktur mengenai alur penelitian yang dilakukan. Adapun sistematika penulisan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, hipotesis, serta sistematika penulisan yang akan diikuti dalam penelitian ini.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas teori-teori yang relevan dengan topik penelitian, termasuk kajian penelitian terdahulu yang dapat mendukung pemahaman mengenai kendali PID dan Fuzzy Logic pada sistem pembangkit listrik tenaga pikohidro, serta penerapan kedua metode tersebut dalam pengendalian sistem tegangan.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai pendekatan dan metode yang digunakan dalam penelitian, termasuk desain eksperimen atau simulasi, alat dan bahan yang digunakan, serta prosedur yang ditempuh untuk mencapai tujuan penelitian. Metode analisis yang digunakan untuk mengolah data juga akan dibahas di bab ini.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil eksperimen atau simulasi yang dilakukan, diikuti dengan pembahasan mengenai interpretasi hasil tersebut. Hasil akan dibandingkan antara pengendalian PID, Fuzzy Logic, dan kombinasi PID-Fuzzy untuk menilai performansi sistem kendali tegangan pada PLTPH.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menyimpulkan hasil penelitian berdasarkan tujuan yang telah ditetapkan, serta memberikan saran untuk penelitian selanjutnya atau penerapan praktis dari hasil penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam bab ini, penulis akan memaparkan beberapa penelitian terdahulu yang telah dilakukan dan memiliki relevansi dengan topik penelitian ini. Kajian terhadap penelitian-penelitian sebelumnya bertujuan untuk memberikan dasar teori, memahami pendekatan yang telah diterapkan, serta mengidentifikasi celah penelitian yang dapat menjadi landasan untuk pengembangan lebih lanjut pada penelitian ini.

Penelitian yang dilakukan Simulasi Dan Analisis Respon *Fuzzy Logic Controller* Pada Sistem Suspensi pada [5] dijelaskan berfokus pada hasil osilasi yang berlebihan dari respon keluaran sistem suspense mekanik pada loop terbuka. Hasil dari pengujian didapatkan 49 aturan fuzzy untuk mendapatkan hasil yang optimal. Hasil ini ditandai dengan nilai karakteristik respon keluarannya dari *settling time* selama 1,05 sekon, *overshoot* sebesar 2.78%, *peak time* sebesar 0.51, *rise time* selama 0.4 sekon, dan tidak ada *steady state error*. Selain itu penulis juga melakukan pengujian dengan kendali PID tuning secara berulang kali sehingga didapatkan nilai K_p , K_i , dan K_d dengan hasil performansi dari sistem yaitu dengan nilai *settling time* selama 1.7 sekon, *overshoot* sebesar 2.09%, *peak time* sebesar 1.02, dan *rise time* selama 0.304 sekon.

Penelitian kedua dengan judul Perancangan Dan Simulasi Penerapan Pengendali PID Pada Sistem Kendali Tegangan Keluaran Generator Pesawat N219 Di PT Dirgantara Indonesia pada [4] penelitian ini berfokus pada pengujian kestabilan generator pada pesawat N219 sebelum dipasangkan ke badan pesawat. Setelah dilakukan penelitian didapatkan bahwa generator DC memiliki *error steady state* sebesar 3,5174%, *settling time* kurang dari 5 detik, dan *overshoot* kurang dari 12,5%. Hasil ini sudah sesuai dengan yang diharapkan oleh peneliti namun peneliti

juga berharap diterapkannya sistem untuk mempermudah menentukan parameter dari pengendali secara cepat, mudah, dan akurat.

Penelitian ketiga berjudul Simulasi Kendali PID Dan Logika Fuzzy Pada Sistem Eksitasi *Automatic Voltage Regulator* Dengan Simulink Matlab pada [7] yang menjelaskan suatu alat dalam menjaga kestabilan generator yaitu *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dengan kendali PID dan Fuzzy. PID yang digunakan di tuning dengan metode Ziegler-Nichols dan Tyreus-Luyben sedangkan kendali fuzzy dirancang dengan dua input dan 1 variable output yang masing – masing terdiri dari 7 himpunan fuzzy sehingga diperoleh 49 aturan. Hasil yang didapatkan yaitu ketika kendali PID yang digunakan dengan metode TL Didapatkan *rise time* selama 0.21 sekon, *peak time* selama 1.42 sekon, *settling time* selama 1.88 sekon, *overshoot* sebesar 7.78%, dan *steady state error* sebesar 0%. Sementara kendali fuzzy menghasilkan *rise time* selama 2.47 sekon, *peak time* selama 20.0 sekon, *settling time* selama 4.52 sekon, *overshoot* sebesar 0% dan nilai *steady state error* sebesar 0%. Kendali PID lebih unggul pada parameter *rise time*, *peak time*, dan *settling time* sedangkan kendali fuzzy lebih baik pada tingkat *overshoot*.

Pada penelitian Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro dengan Jenis Turbin Vertikal pada Saluran Terbuka dengan Hambatan difokuskan kepada masalah peningkatan permintaan listrik secara efisien dan solusi yang ditawarkan oleh penulis adalah menggunakan pembangkit listrik pikohidro[1]. Selain itu tujuan penelitian ini untuk mengetahui kinerja pembangkit listrik tenaga pikohidro dengan turbin vertikal. Pengujian dilakukan dengan merancang PLTPH kemudian dilakukan pengujian ketika pltph tanpa beban dan berbeban. Hasil dari pengujian adalah generator PLTPH menunjukkan variasi tegangan antara 6,5 V dan 7 V dengan kecepatan rotor tetap konstan pada 284 rpm. Sedangkan pengujian sistem PLTPH dengan beban mengalami fluktuasi tegangan pada fase awal walaupun putaran rotor tetap stabil berada pada 284 rpm.

Penelitian dengan judul Design and Analysis of PID and Fuzzy-PID Controller for Voltage Control Of DC Microgrid membahas mengenai rancangan serta analisa

pengendali PID dan Fuzzy – PID untuk pengendalian tegangan pada microgrid DC [8]. Penelitian ini dilakukan dengan simulasi pada software matlab. Microgrid ini terdiri dari 4 rumah dengan PLTS dan PU. Masing – masing rumah memiliki kapasitas sebesar 5 kW, 4,5 kW, 4,75 kW, dan 6,5 kW yang dipasang di rumah-1, rumah-2, rumah-3, dan rumah-4 secara berturut-turut. Permintaan maksimum dari rumah-1, rumah-2, rumah-3, dan rumah-4 secara berturut – turut adalah 10,32 kW, 10,88 kW, 10,13 kW, dan 6,49 kW. Perancangan kendali PID – Fuzzy menggunakan 2 input serta 3 output. Inputnya terdiri dari error serta integral dari tegangan error. Nilai outputnya berupa parameter dari PID. Pengujian dilakukan dengan simulasi secara real time dengan beban yang bervariasi selama 30 menit. Tegangan yang dikendalikan mendekati tegangan yang diinginkan yaitu sebesar 124 volt. Didapatkan kesimpulan bahwa nilai rise time untuk kendali FL – PID lebih tinggi dibandingkan dengan PID. Sedangkan steady state error untuk FL – PID lebih kecil dibandingkan nilai PID. Hal ini menandakan bahwa kendali FL – PID lebih baik dibandingkan dengan kendali PID. Overshoot pada kasus FL-PID sangat kecil. Pada persentase overshoot lebih kecil pada FL – PID dibandingkan PID kontrol. Ini membuktikan bahwa FL – PID lebih stabil dibandingkan dengan PID. Selanjutnya pada nilai peak time dari FL – PID lebih cepat dibandingkan dengan kendali PID. Ini mengartikan bahwa respon dari FL – PID mencapai maksimum overshoot lebih cepat dibandingkan dengan respon dari PID.

Pada penelitian berjudul Fuzzy Self – Adapting PID Control of PMSM Servo System berisi mengenai pengembangan kendali PID adaptif berbasis logika fuzzy untuk sistem servo motor sinkron magnet permanen (PMSM) [9]. Tujuan paling utama yaitu untuk membandingkan keandalan sistem dengan pengendali PI tradisional dalam menghadapi sifat non – linear, kompleks, dan bervariasi waktu dari PMSM. Dalam design fuzzy nilai error yang digunakan berasal dari kecepatan error, sementara $e_c(k)$ berasal dari perubahan kecepatan error sebagai input fuzzy dan parameter K_p , K_i , K_d . Pengujian ini dilakukan dengan pensimulasian pada Simulink matlab mengikuti parameter dari PMSM yaitu tegangan terukur $V = 220\text{ V}$, kecepatan terukur $n = 1500\text{ rpm}$, induktansi pada sumbu $L_d = 0.027\text{ H}$, $L_q = 0.067\text{ H}$, resistansi stator $R = 4.495\text{ }\Omega$, momen inersia $J =$

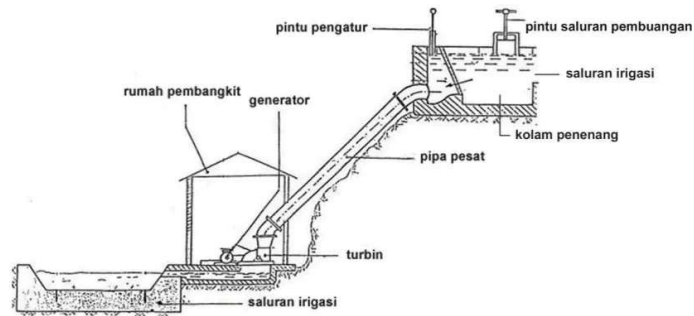
0.00179 kg/cpm^2 , jumlah pasangan kutub $p = 2$ motor dijalankan pada kecepatan terukur $n = 1500 rpm$ dan torsi beban terukur. Setelah dilakukan pengujian didapatkan kesimpulan bahwa dengan sistem yang kompleks, non – linear, dan bervariasi terhadap waktu, pengendali PID tidak mampu untuk meningkatkan keakurasian sistem. Sementara pengendalian fuzzy lebih unggul dalam mengatasi sistem yang kompleks, *time lag*, *time – varying*, dan sistem nonlinear dan juga tidak membutuhkan model matematika dari sistem yang dikendalikan.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hidro

Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hidro merupakan salah satu jenis pembangkit energi listrik yang memanfaatkan aliran air untuk memutar turbin. Sesuai dengan namanya, piko hidro menghasilkan energi listrik dengan kapasitas kurang dari 5 kW. Karena kapasitasnya yang relatif kecil, pembangkit listrik jenis ini cocok diterapkan pada sungai kecil atau saluran irigasi dengan debit aliran air rendah dan tinggi jatuh air yang tidak terlalu besar. Keunggulannya adalah biaya instalasi yang relatif murah, desain yang sederhana, serta kemampuan untuk menyediakan energi listrik secara berkelanjutan di daerah terpencil.

Komponen utama dari sistem pembangkit listrik tenaga piko hidro ini terdiri dari generator dc, turbin, serta pulley. Cara kerjanya yaitu ketika air yang mengalir atau jatuh diarahkan ke turbin melalui pipa penstock atau saluran. Debit air dan tinggi jatuh (head) menentukan energi kinetik yang dihasilkan. Air yang mengenai permukaan turbin menyebabkan turbin berputar. Kecepatan putaran turbin bergantung pada debit dan tekanan air yang tersedia. Turbin dihubungkan ke generator DC melalui pulley dan V-belt untuk mentransmisikan putaran. Ketika rotor generator berputar, medan magnet pada generator terpotong, sehingga menghasilkan energi listrik berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Energi listrik yang dihasilkan kemudian diatur menggunakan sistem pengatur tegangan agar sesuai dengan kebutuhan beban. Listrik yang dihasilkan dapat langsung

digunakan untuk menerangi rumah, mengisi baterai, atau menggerakkan perangkat elektronik lainnya.



Gambar 2. 1 Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hidro
(Sumber : [10])

Daya yang dihasilkan dari pembangkit listrik tenaga piko hidro ini dihitung berdasarkan rumus :

$$P = 9.8 \times H_n \times Q \times \eta_{\text{turbine}} \times \eta_{\text{generator}} \quad (1)$$

Dengan :

P = daya (kW)

H_n = *head net* (m)

Q = debit aliran (m^3/s)

η_{turbine} = efisiensi turbin

$\eta_{\text{generator}}$ = efisiensi generator

Berdasarkan rumus di atas, daya yang dihasilkan bergantung pada perkalian konstanta gravitasi bumi, ketinggian jatuhnya air, debit aliran, efisiensi turbin, dan efisiensi generator.[3] Oleh karena itu, untuk menghasilkan daya yang besar, diperlukan ketinggian jatuhnya air yang tinggi serta debit aliran yang besar. Debit aliran suatu sungai atau saluran irigasi dapat dihitung menggunakan rumus:

$$Q = A \times V \quad (2)$$

Dimana :

Q = Debit aliran, m^3/s

V = Kecepatan air, m/s

A = Luas Penampang, m^2

Komponen penyusunan PLTPH meliputi motor DC, turbin, pulley, dan V – belt.

2.2.1 Motor Dc (Sebagai Generator)

Motor DC adalah salah satu mesin listrik yang telah lama digunakan sebagai penghasil energi mekanik. Pada dasarnya motor listrik ini bekerja dengan cara mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik yang dihasilkan akan digunakan untuk memutar impeller pompa, fan atau blower. Motor listrik banyak digunakan di rumah maupun di industri. Oleh karena itu, mesin listrik ini memiliki sebutan lain sebagai “kuda kerja”-nya industri yang diperkirakan mengonsumsi sekitar 70% beban listrik industri [11].

Motor DC dapat bekerja sebagai generator juga apabila motor DC mendapatkan putaran mekanik pada bagian rotornya. Hal ini karena putaran yang dilakukan pada rotor akan menghasilkan ggl induksi karena kumparan rotor berputar pada magnet permanen di stator motor DC. Namun keadaan sebaliknya, apabila motor DC mendapatkan suplai tegangan sebesar tegangan pada nameplate maka motor DC akan menghasilkan tenaga mekanik berupa putaran poros [8].

Motor DC yang bisa digunakan juga sebagai generator ini terdiri dari beberapa bagian, diantaranya:

1. Badan Mesin

Badan mesin menjadi bagian yang akan mengalirkan fluks magnet yang dihasilkan kutub magnet, sehingga harus terbuat dari bahan ferromagnetik. Selain itu, badan mesin juga bertugas untuk melindungi bagian dalam motor DC.

2. Inti Kutub Magnet Dan Belitan Penguat Magnet

Pada generator DC, inti kutub magnet dan belitan penguat magnet merupakan komponen utama yang berfungsi untuk menghasilkan medan magnet yang diperlukan dalam proses induksi elektromagnetik. Inti kutub magnet dibuat dari bahan ferromagnetik seperti baja laminasi, yang dirancang untuk memfokuskan fluks magnetik dan mengurangi kerugian akibat arus eddy.

Medan magnet ini membentuk fluks yang mengalir dari kutub utara ke kutub selatan melalui celah udara, jangkar, dan badan mesin, menciptakan sirkuit

magnetik tertutup. Saat rotor (jangkar) berputar akibat tenaga mekanis, kumparan jangkar memotong fluks magnetik, sehingga menghasilkan tegangan induksi (GGL) sesuai dengan Hukum Faraday. Tegangan ini diubah oleh komutator menjadi arus searah sebelum disalurkan ke rangkaian eksternal.

3. Sikat – Sikat

Sikat-sikat (biasanya terbuat dari grafit atau tembaga-karbon) ditempatkan padaudukan sikat sehingga bersentuhan dengan permukaan segmen komutator. Sikat bertindak sebagai penghubung antara sumber daya listrik eksternal dengan kumparan jangkar melalui komutator.

4. Komutator

Komutator adalah rangkaian cincin tembaga tersegmentasi yang dipasang pada poros jangkar motor DC. Setiap segmen komutator terhubung dengan ujung lilitan kumparan jangkar. Komutator bertindak sebagai penyearah mekanik yang mengubah arus bolak-balik (AC) yang dihasilkan pada kumparan jangkar menjadi arus searah (DC) pada sisi terminal eksternal motor. Tanpa komutator, arah arus dalam kumparan akan terus berubah akibat perubahan polaritas medan magnet, menyebabkan torsi motor juga berubah arah, sehingga motor tidak dapat berputar secara stabil.

5. Jangkar

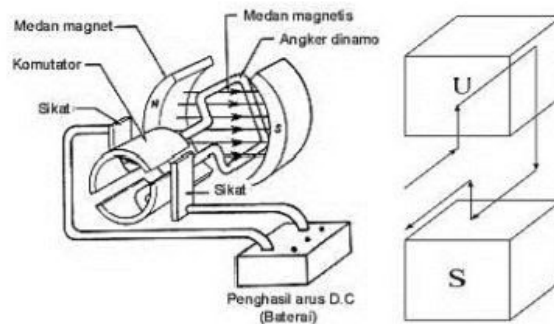
Jangkar (Armature) pada motor DC adalah bagian yang berfungsi untuk menghasilkan atau menerima arus listrik akibat interaksi dengan medan magnet. Pada motor DC, jangkar terletak di dalam stator (medan magnet) dan biasanya terdiri dari kumparan kawat tembaga yang dililitkan di sekitar inti besi. Dalam generator DC, jangkar bertindak sebagai elemen induksi di mana tegangan (GGL) dihasilkan akibat perubahan fluks magnetik selama rotasi.

6. Belitan Jangkar

Belitan Jangkar pada mesin arus searah (motor DC atau generator DC) adalah bagian yang sangat penting karena merupakan tempat terjadinya konversi energi elektromagnetik. Belitan ini terbuat dari kawat tembaga yang dililitkan di sekitar inti jangkar, yang biasanya berbahan ferromagnetik, untuk memaksimalkan induksi magnetik. Pada generator DC, ketika rotor diputar oleh tenaga mekanis,

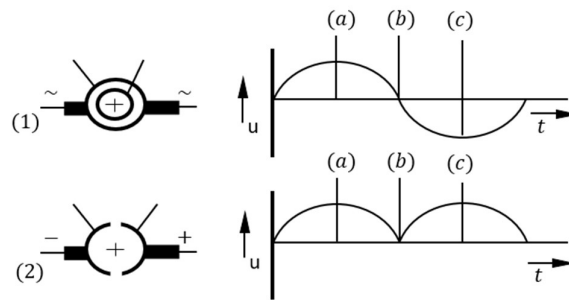
belitan jangkar memotong fluks magnetik, menghasilkan tegangan induksi (GGL). Tegangan ini kemudian diteruskan ke komutator untuk menghasilkan arus searah. Pembangkitan tegangan pada motor DC yang bekerja sebagai generator DC melalui dua cara, yaitu :

- Penggunaan cincin – seret, menghasilkan tegangan induksi bolak – balik.
- Penggunaan komutator, menghasilkan tegangan DC. Melalui gambar berikut dapat dilihat proses terbentuknya tegangan DC.



Gambar 2. 2 Prinsip kerja penggunaan komutator
(sumber : [12])

Komutator secara tidak langsung berfungsi sebagai saklar yang menghubungkan dengan kumparan jangkar. Komutator berupa cincin belah yang dipasang pada ujung dari rotor. Bila rotor ini berputar, maka cincin belah akan ikut otomatis berputar. Karena kumparan berada dalam medan magnet, akan timbul tegangan bolak balik sinusoidal. Bila kumparan berputar setengah putaran, sikat akan berada pada celah cincin sehingga tegangan nilainya nol. Ketika cincin berputar lagi, maka tegangan akan timbul kembali. Bila periode tegangan sama dengan periode perputaran dari cincin, maka tegangan yang timbul adalah arus gelombang searah.



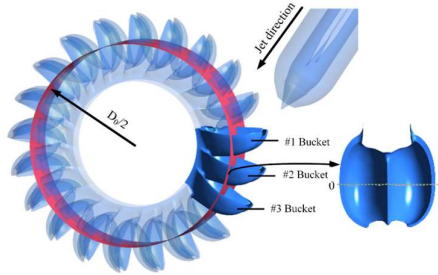
Gambar 2. 3 Gelombang tegangan rotor yang dihasilkan oleh cincin-seret dan komutator

2.2.2 Turbin

Turbin adalah salah satu alat yang digunakan untuk mengubah energi potensial yang terdapat didalam air menjadi energi mekanik saat mengenai turbin. Aliran air akan jatuh mengenai turbin, memberikan gaya pada penggerak (*runner*) dari turbin sehingga terjadi perputaran. Turbin yang sudah terkopel oleh rotor generator akan secara otomatis berputar dan menghasilkan energi listrik. Turbin yang biasanya digunakan dalam pembangkitan listrik tenaga air ini banyak macamnya, diantaranya :

a. Turbin Pleton

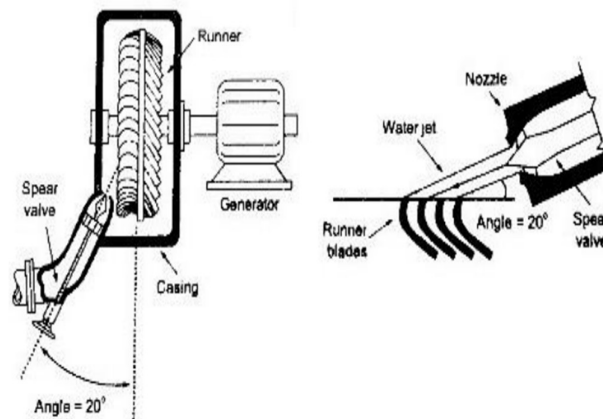
Turbin Pelton adalah jenis turbin impuls yang dirancang untuk memanfaatkan energi kinetik dari aliran air bertekanan tinggi. Air dialirkan melalui pipa besar yang disebut penstock, yang mengarahkan air ke sebuah nozzle menjadi jet air berkecepatan tinggi. Jet air diarahkan ke mangkuk berbentuk cekung yang disebut bucket atau sudu, yang terpasang di sepanjang rotor turbin. Bentuk bucket dirancang khusus agar jet air terpecah menjadi dua aliran, mengurangi kecepatan air hingga hampir nol sambil mentransfer energinya ke rotor. Proses ini memungkinkan turbin Pelton memiliki efisiensi tinggi dalam mengubah energi kinetik air menjadi energi mekanik, bahkan pada aliran air dengan volume kecil tetapi tekanan tinggi. Karena desainnya yang sederhana dan kemampuan beradaptasi terhadap kondisi tekanan tinggi, turbin Pelton sangat cocok digunakan di pembangkit listrik tenaga air di daerah perairan kecil hingga menengah.



Gambar 2. 4 Gambar turbin pelton
(Sumber : [13])

b. Turbin Turgo

Turbin Turgo adalah jenis turbin impuls yang mirip dengan Turbin Pelton, tetapi memiliki desain yang lebih sederhana dan fleksibel. Turbin ini dirancang untuk mengubah energi kinetik dari air bertekanan tinggi menjadi energi mekanik dengan efisiensi tinggi. Salah satu perbedaan utama dengan Turbin Pelton adalah sudut masuk air ke sudu [1]. Pada Turbin Turgo, jet air diarahkan ke sudu dengan sudut sekitar 20° , sehingga air langsung melewati sudu tanpa memantul kembali, berbeda dengan Pelton yang membagi jet air menjadi dua aliran.

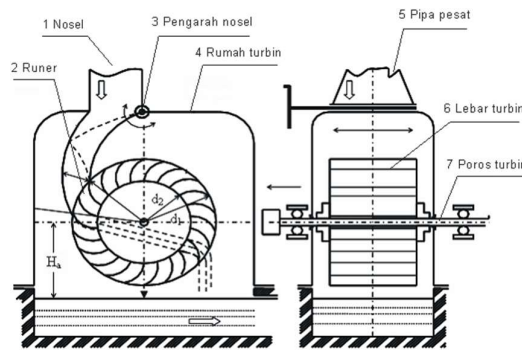


Gambar 2. 5 Gambar turbin turgo
(Sumber : [14])

c. Turbin *Crossflow*

Turbin Crossflow adalah jenis turbin air yang dirancang untuk bekerja dengan aliran air yang melewati sudu turbin secara melintang (*crossflow*). Berbeda dengan turbin impuls seperti Pelton atau Turgo, turbin ini termasuk dalam kategori turbin

aliran transversal, di mana air mengalir melalui rotor dua kali—sekali saat masuk dan sekali lagi saat keluar. Hal ini meningkatkan efisiensi energi yang dihasilkan. Turbin ini memiliki rotor berbentuk silinder dengan bilah atau sudu melengkung, yang tersusun sejajar seperti roda sirip. Air diarahkan ke turbin melalui nozzle berbentuk persegi panjang, yang mengontrol aliran air. Ketika air mengenai sudu, energi kinetiknya dikonversi menjadi energi mekanik, menggerakkan rotor dan menghasilkan tenaga.

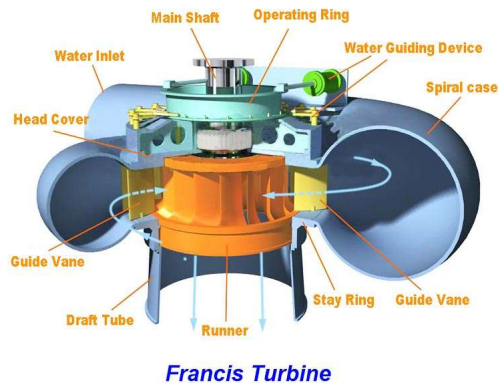


Gambar 2. 6 Gambar turbin crossflow
(Sumber : [15])

d. Turbin *Francis*

Turbin Francis adalah jenis turbin reaksi yang dirancang untuk mengubah energi potensial dan kinetik air menjadi energi mekanik secara efisien. Turbin ini bekerja dengan memanfaatkan aliran air yang mengalir melewati sudu turbin secara radial dan aksial. Turbin Francis banyak digunakan di PLTA skala besar karena kemampuannya bekerja pada berbagai ketinggian air (*head*) dan debit.

Di dalam turbin, air pertama-tama melewati komponen yang disebut guide vane atau sudu pengarah, yang mengarahkan aliran air ke sudu-sudu rotor (*runner*) dengan sudut optimal. Ketika air melewati sudu *runner*, energi potensial dan tekanan air dikonversi menjadi energi mekanik, memutar rotor turbin. Setelah melewati sudu runner, air keluar melalui pipa ekor (*draft tube*) dengan tekanan rendah untuk mengurangi kehilangan energi.

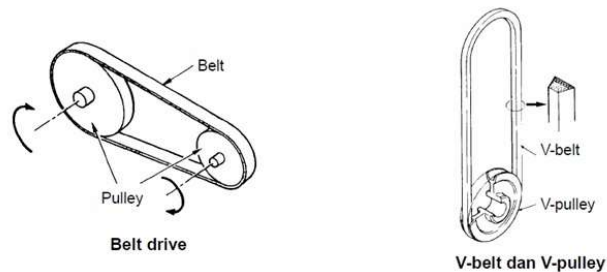


Gambar 2. 7 Gambar turbin francis
(Sumber : [16])

2.2.3 Pulley Dan V – Belt

Pulley adalah salah satu komponen mekanis yang berfungsi sebagai alat untuk mentransmisikan tenaga dari satu poros ke poros lainnya melalui perantara sabuk (belt). Dalam sistem pembangkit listrik tenaga piko hidro, pulley digunakan untuk menghubungkan turbin dengan generator, sehingga energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin dapat diteruskan ke generator untuk menghasilkan energi listrik. Pulley bekerja dengan prinsip perbedaan diameter antara pulley penggerak (driver) dan pulley yang digerakkan (driven), sehingga dapat mengatur kecepatan putaran.

Dalam aplikasi piko hidro, pulley sering kali dipadukan dengan sabuk berbentuk V (V-belt) untuk meningkatkan efisiensi transmisi daya. Diameter pulley yang dipilih harus disesuaikan agar generator dapat beroperasi pada kecepatan yang optimal untuk menghasilkan listrik secara efektif.



Gambar 2. 8 Pulley dan v-belt
(sumber : [17])

2.3 Komponen Pendukung Penstabil Tegangan

2.3.1 Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 adalah papan mikrokontroler berbasis ATmega2560 yang dirancang untuk proyek yang memerlukan banyak input/output dan kapasitas memori besar. Papan ini memiliki 54 pin digital I/O (15 PWM), 16 pin analog, serta 4 port UART, menjadikannya ideal untuk aplikasi kompleks seperti robotika, otomasi, dan monitoring.

Beroperasi pada tegangan 5V, Arduino Mega dapat diberi daya melalui USB atau adaptor eksternal (7–12V). Dengan memori flash 256 KB dan dukungan komunikasi SPI, I2C, serta UART, papan ini kompatibel dengan Arduino IDE dan mendukung pemrograman berbasis C/C++. Fleksibilitas dan skalabilitasnya menjadikannya pilihan utama untuk proyek berskala besar.



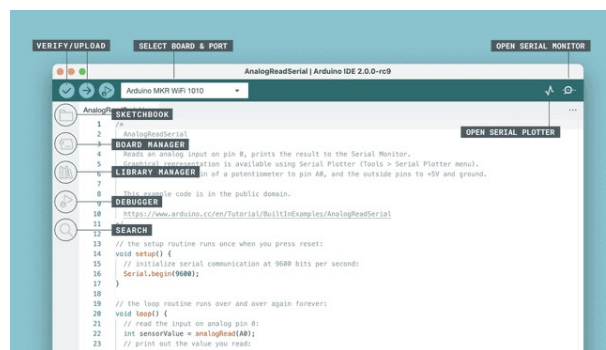
Gambar 2. 9 Arduino Mega
(Sumber : <https://www.arduino.cc>)

2.3.2 Arduino Ide

Arduino IDE (Integrated Development Environment) adalah lingkungan pemrograman perangkat lunak yang digunakan untuk menulis dan mengunggah kode ke papan mikrokontroler Arduino. Kode yang ditulis dalam IDE ini disebut sketsa. Sketsa tersebut biasanya terdiri dari dua bagian utama: `setup()` dan `loop()`. Fungsi `setup()` dipanggil sekali saat perangkat pertama kali dihidupkan atau direset, dan digunakan untuk mengatur konfigurasi awal, seperti mendefinisikan pin input/output. Fungsi `loop()` dijalankan berulang kali selama perangkat beroperasi, dan berisi logika yang mengatur perilaku perangkat.[18] Di dalam IDE, pengguna dapat menulis kode, memverifikasi (kompilasi) program untuk memeriksa

kesalahan, serta mengunggah program tersebut ke papan Arduino melalui koneksi USB. Proses ini mengubah kode menjadi instruksi yang dapat dipahami oleh mikrokontroler, sehingga perangkat dapat menjalankan tugas yang diinginkan.

Selain itu, Arduino IDE juga dilengkapi dengan library yang menyediakan fungsi tambahan untuk berbagai sensor, aktuator, dan modul komunikasi yang sering digunakan dalam proyek Arduino. Dengan menggunakan library ini, pengguna tidak perlu menulis kode dari nol, sehingga mempercepat proses pengembangan proyek. Fitur lain dari Arduino IDE adalah Serial Monitor, yang memungkinkan komunikasi antara papan Arduino dan komputer untuk melihat data yang dikirim atau diterima oleh papan, seperti hasil pembacaan sensor atau pesan debug. Ini sangat berguna untuk pemecahan masalah dan pengujian kode secara langsung [19].



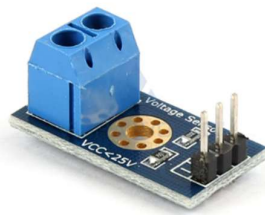
Gambar 2. 10 Arduino IDE
(sumber : <https://www.arduino.cc>)

2.3.3 Sensor Tegangan

Sensor tegangan DC ini dirancang khusus untuk memantau tegangan hingga 25V DC dalam berbagai aplikasi berbasis mikrokontroler, seperti Arduino atau MCU lainnya. Sensor ini bekerja menggunakan prinsip *voltage divider* (pembagi tegangan), yang secara aman mengurangi tegangan input menjadi seperlima dari nilai aslinya, sehingga dapat dibaca oleh pin analog pada Arduino. Tegangan keluaran sensor dapat langsung dihubungkan ke pin *analog read* Arduino melalui pin output (S), sementara pin VCC dan GND masing-masing terhubung ke sumber daya 5V dan ground pada Arduino. Tegangan yang diukur dihitung menggunakan persamaan:

$$V = \frac{\text{analogread}}{40.96} \quad (3)$$

Dimana *analogRead* adalah nilai digital hasil pembacaan pin analog. Sebagai contoh, jika *analogRead* bernilai 512, maka tegangan yang terbaca adalah 12,5V DC. Sensor ini sangat mudah digunakan dan tidak memerlukan sirkuit tambahan untuk integrasi dengan Arduino. Namun, penting untuk diperhatikan bahwa sensor ini tidak direkomendasikan untuk mengukur tegangan di atas 25V DC, karena hal tersebut dapat merusak sensor maupun mikrokontroler.



Gambar 2. 11 Sensor tegangan
(Sumber : [20])

2.3.4 Sensor Flowmeter

Sensor flowmeter ini dirancang untuk mengukur laju aliran air dengan akurasi tinggi, cocok untuk berbagai aplikasi seperti pemantauan sistem irigasi, kontrol aliran air pada pompa, atau pengukuran konsumsi air. Sensor ini berbahan dasar kuningan (brass) yang tahan lama, memiliki ukuran fisik 58 mm x 39 mm x 39 mm, serta dilengkapi kabel sepanjang 300 mm untuk memudahkan pemasangan. Sensor ini bekerja pada tegangan 5V DC dengan arus maksimum 10 mA, sehingga kompatibel dengan sistem berbasis mikrokontroler seperti Arduino.

Sensor ini mampu mengukur laju aliran air dalam rentang 2 hingga 50 liter per menit (L/min) dengan tekanan maksimum hingga 1.75 MPa, dan mendukung suhu cairan hingga 60°C. Outputnya berupa sinyal pulsa frekuensi yang berbanding lurus dengan laju aliran air, yang dihitung menggunakan rumus

$$F = (8 \times Q - 4) \pm 5\% \quad (4)$$

Di mana:

F : frekuensi (Hz)

Q : laju aliran air dalam liter per menit (L/min).

Sensor ini dilengkapi dengan konektor *Male SM-3P* dan ulir eksternal berdiameter G1 untuk memudahkan integrasi dengan pipa standar. Dengan tingkat perlindungan IP65, sensor ini tahan terhadap debu dan percikan air, sehingga cocok digunakan di lingkungan luar ruangan atau kondisi kerja yang menantang. Berat bersihnya adalah 228 gram, menjadikannya cukup ringan untuk dipasang pada berbagai aplikasi tanpa membebani sistem.



Gambar 2. 12 Sensor flowmeter
(Sumber : [21])

2.3.5 Motor Servo

Servo DS3235SG PRO 35kg High Torque Coreless adalah servo digital berkinerja tinggi yang dirancang untuk aplikasi yang memerlukan kekuatan besar, kecepatan responsif, dan daya tahan tinggi. Dengan motor *coreless* yang efisien dan gear berbahan baja tahan karat, servo ini mampu menghasilkan torsi hingga 45 kg/cm pada tegangan 8.4V, menjadikannya ideal untuk kendaraan RC, robotik, atau kontrol aktuator. Servo ini memiliki kecepatan operasional bervariasi, mulai dari 0.14 detik/60° pada 5.0V hingga 0.08 detik/60° pada 8.4V, serta mendukung perjalanan sudut hingga 180° dan 360°. Dimensinya yang kompak (40 x 20 x 38.5 mm) dan kompatibilitas *teeth count* 25T membuatnya mudah diintegrasikan ke berbagai aplikasi. Dengan tingkat frekuensi kerja 50-333Hz dan perlindungan tahan air, servo ini dapat diandalkan di berbagai kondisi, termasuk lingkungan yang



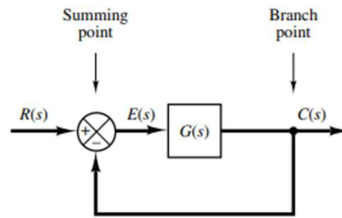
Gambar 2. 14 Valve
(Sumber : [23])

2.4 Sistem Kendali *Closed – Loop*

2.4.1 Definisi Sistem *Closed – Loop*

Sebuah sistem yang dibentuk memiliki hubungan antara keluaran serta referensi input berdasarkan membandingkan keduanya dan menggunakan perbedaannya dinamakan sebagai kendali sistem umpan balik. Sistem kendali ini dibagi menjadi dua yaitu *closed – loop control systems* dan *open – loop control systems*. [24] Dalam sistem kendali *closed – loop*, kesalahan sistem aktuasi, yang merupakan perbedaan antara sinyal input dengan sinyal umpan balik yang mungkin merupakan sinyal output itu sendiri atau fungsi dari sinyal output dan turunan dan/atau integralnya), diumpankan kembali ke pengontrol untuk mengurangi kesalahan dan membawa output sistem ke nilai yang diinginkan. Istilah *closed – loop* diartikan sebagai penggunaan Tindakan kendali umpan balik yang berguna untuk mengurangi kesalahan sistem.

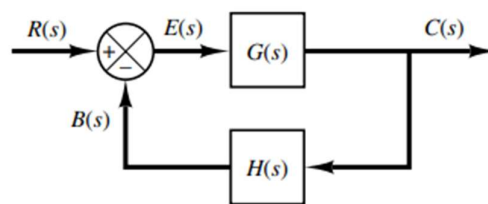
Keuntungan untuk sistem loop tertutup adalah respon sistem yang relative sensitive terhadap gangguan dari luar dan dalam variasi parameter sistem. Berdasarkan kestabilan, kendali sistem dengan loop terbuka lebih mudah dibentuk karena kestabilan sistem bukan menjadi masalah yang besar. Sementara kestabilan sistem menjadi masalah besar pada sistem loop tertutup, yang mana cenderung mengoreksi kesalahan secara berlebihan dan dengan demikian dapat menyebabkan osilasi amplitudo konstan atau berubah [25]. Sistem *closed – loop* ini digunakan hanya jika adanya gangguan yang tidak terdeteksi atau adanya variasi tidak terduga dari komponen yang ada. Untuk memperjelas mengenai *closed-loop systems* maka digambarkan sebuah block diagram seperti gambar berikut ini.



Gambar 2. 15 Blok diagram *Closed – Loop System*
(Sumber : Katsuhiko Ogata., 2010)

Dari gambar block diagram diatas dapat dilihat bahwa output dari sistem dilambangkan dengan $C(s)$. $C(s)$ diperoleh dengan mengalikan fungsi transfer $G(s)$ dengan input ke blok $E(s)$. [25] Output ini menjadi umpan balik bagi *summing point*. Dimana *summing point* merupakan tempat terjadinya penjumlahan atau pengurangan. Sehingga tanda plus atau minus di *summing point* menunjukkan apakah sinyal harus ditambah atau dikurang.

Ketika sinyal keluaran adalah umpan balik untuk *summing point* sebagai perbandingan dengan input, maka di perlukan pengubahan dari sinyal output menjadi sinyal input. Konversi ini biasanya dilakukan oleh elemen umpan balik yang fungsi transfernya adalah $H(s)$. Peran elemen umpan balik ini sebagai modifikasi output sebelum dibandingkan dengan input. Pada umumnya elemen umpan balik ini biasanya adalah sebuah sensor [26].



Gambar 2. 16 *Closed - Loop System*
(Sumber : Katsuhiko Ogata., 2010)

Pada contoh diatas, sinyal umpan balik adalah pengumpanan balik ke *summing point* sebagai perbandingan dengan input :

$$B(s) = H(s)C(s) \quad (5)$$

Closed – loop system ini memiliki fungsi transfer sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 C(s) &= G(s)E(s) \\
 E(s) &= R(s) - B(s) \\
 &= R(s) - H(s)C(s)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Sehingga untuk mengeliminasi $E(s)$ dari persamaan ini diperlukan :

$$\begin{aligned}
 C(s) &= G(s)[R(s) - H(s)C(s)] \\
 \frac{C(s)}{R(s)} &= \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Sehingga, $C(s)$ diberikan oleh

$$C(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} R(s)
 \tag{8}$$

2.4.2 Kontrol PID (*Proportional Integral Derivative*)

PID (*Proportional Integral Derivative*) adalah salah satu jenis kontroler dalam sistem kontrol otomatis yang digunakan untuk mengatur variabel proses agar sesuai dengan nilai yang diinginkan (*setpoint*). Sekarang ini PID banyak digunakan sebagai modul kontrol sederhana seperti mengatur temperatur, mengatur tekanan, dan lain sebagainya. Kontroler ini terbagi menjadi tiga parameter kendali yaitu *proportional* (K_p), *Integral* (K_i), dan *derivative* (K_d) [8]. setiap parameter ini memiliki pencapaian performansi sistem yang berbeda. Adapun setiap performansi yang dihasilkan adalah sebagai berikut :

Tabel 2. 1. Pengaruh konstanta K_p , K_i , dan K_d terhadap respon sistem
 Sumber : www.researchgate.com

Respon Loop Tertutup	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady-State Error	Stability
Meningkatkan nilai K_p	Berkurang	Bertambah	Sedikit Berkurang	Berkurang	Memburuk
Meningkatkan nilai K_i	Sedikit Berkurang	Bertambah	Bertambah	Berkurang secara besar	Memburuk
Meningkatkan nilai K_D	Sedikit Berkurang	Berkurang	Berkurang	Sedikit Berkurang	Meningkat

Persamaan untuk kontroler dengan kombinasi ini diberikan sebagai berikut :

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

Dari persamaan kontrol PID diatas terdiri dari tiga komponen:

- **Proporsional** $(K_p e(t))$:

Menghasilkan sinyal kontrol yang proporsional terhadap error $e(t)$, yaitu perbedaan antara setpoint dan nilai aktual.

- **Integral** $(\frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt)$:

Mengintegrasikan error terhadap waktu untuk mengurangi kesalahan steady-state (error yang tersisa dalam sistem setelah stabil).

- **Derivative** $(K_p T_d \frac{de(t)}{dt})$:

Merespons perubahan error dengan cepat, memberikan aksi prediktif untuk mencegah overshoot.

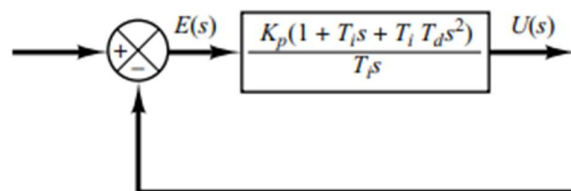
Atau dalam domain transformasi Laplace (fungsi transfer):

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (10)$$

Dimana :

- K_p adalah gain proporsional,
- T_i adalah waktu integral
- T_d adalah waktu derivatif

Dari fungsi transfer PID mengubah sinyal error $E(s)$ menjadi sinyal kontrol $U(s)$ dalam domain Laplace. Blok diagram dari kendali PID ditunjukkan pada gambar berikut :

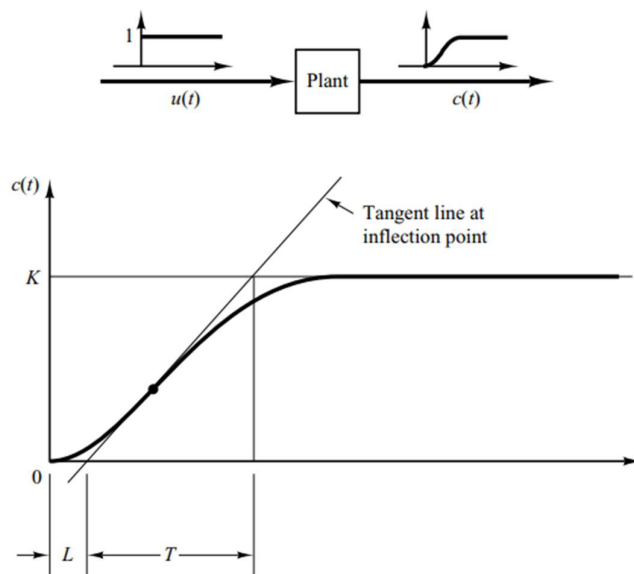


Gambar 2. 17 blok diagram dari kendali PID

(Sumber : Katsuhiko Ogata., 2010)

PID adalah kontroler yang menggabungkan keunggulan dari tiga metode kontrol (P, I, D) untuk menghasilkan sistem yang stabil, cepat, dan presisi. Kombinasi ini memungkinkan kontroler untuk menangani berbagai kondisi sistem seperti perubahan setpoint, gangguan, dan karakteristik dinamis. Dalam implementasinya, terdapat beberapa metode tuning PID yang digunakan untuk menentukan parameter K_p , T_i , T_d , secara optimal, salah satunya adalah metode Ziegler-Nichols.[6]

Ziegler Nichols ini menyarankan untuk penyetelan pengontrol PID (artinya menetapkan nilai K_p , T_i , T_d) berdasarkan respons Langkah eksperimental atau berdasarkan nilai K , yang menghasilkan stabilitas marjinal ketika hanya tindakan kontrol proposional yang digunakan. Aturan tersebut menyarankan serangkaian nilai K_p , T_i , T_d yang akan memberikan operasi sistem yang stabil. Namun nilai overshoot maksimum yang besar. Aturan ini mengusulkan aturan yang diajukan untuk menentukan nilai gain proposional K_p , waktu integral T_i , waktu turunan T_d berdasarkan respon karakteristik sistem. ada dua metode dalam ziegler Nichols yaitu :

Gambar 2. 18 *unit step response* dan *S-shaped response curve*

(Sumber : Katsuhiko Ogata., 2010)

Metode pertama. Secara eksperimental memperoleh respon dari sitem terhadap masukan unit-step. Jika sistem tersebut tidak melibatkan integral. Metode ini berlaku jika respon terhadap masukan step menunjukkan kurva berbentuk S. kurva respon step ini dihasilkan dari eksperimental. Kurva berbentuk S ini dapat dicirikan oleh dua konstanta, yaitu waktu tunda (delay time, L) dan konstanta waktu (T). Waktu tunda dan konstanta waktu ditentukan dengan menggambar garis singgung pada titik belok (inflection point) dari kurva berbentuk S dan menentukan titik perpotongan garis singgung tersebut dengan sumbu waktu serta garis $c(t) = K$.

Tabel 2. 2. Peraturan dasar tuning ziegler – Nichols pada step response dari sebuah sistem (metode pertama) (Sumber : Katsuhiko Ogata., 2010)

Jenis dari Kontrol	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	0.5L

Jika respons sistem terhadap masukan step menunjukkan kurva berbentuk S, maka -fungsi transfer antara keluaran $C(s)$ dan masukan $U(s)$ dapat diaproksimasi sebagai sistem orde pertama dengan *transport lag*. Bentuk umum fungsi transfernya adalah:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (11)$$

Ziegler and Nichols menentukan nilai K_p , T_i , dan T_d berdasarkan formula di atas.

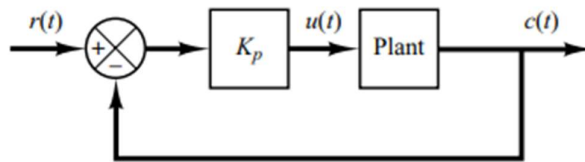
Dengan tuning kontrol PID dengan metode pertama menghasilkan peraturan :

$$G_c = K_p \left(1 + \left(\frac{1}{T_i s} \right) + T_d s \right)$$

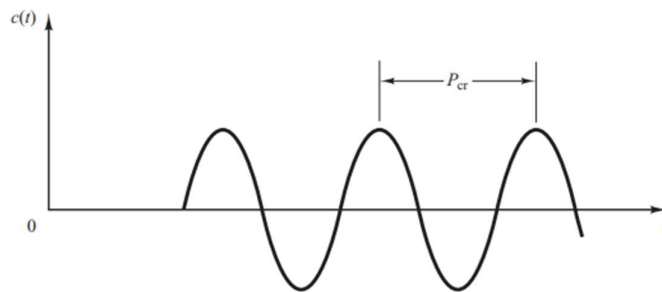
$$G_c = 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right)$$

$$G_c = \frac{0.6T \left(\left(s + \frac{1}{T} \right)^2 \right)}{s} \quad (12)$$

Metode kedua. Setting nilai $T_i = \infty$ dan $T_d = 0$. Hanya menggunakan kendali proposional, Tingkatkan nilai K_p (gain proportional) dari 0 hingga mencapai suatu nilai kritis K_{cr} , di mana keluaran sistem pertama kali menunjukkan osilasi berkelanjutan. Jika sistem tidak menunjukkan osilasi berkelanjutan untuk nilai K_p maka metode ini tidak dapat diterapkan. Dimana nilai gain kritis K_{cr} dan periode yang sesuai P_{cr} yang sesuai ditentukan secara eksperimental.



Gambar 2. 19 sistem tertutup dengan kendali proposional
(Sumber : Katsuhiko Ogata., 2010)



Gambar 2. 20 Osilasi berkelanjutan dengan periode (diukur dalam detik)
(Sumber : Katsuhiko Ogata., 2010)

Ziegler dan Nichols menyarankan agar kita menetapkan nilai parameter K_p , T_i , dan T_d sesuai dengan persamaan yang ditunjukkan pada table berikut .

Tabel 2. 3. Peraturan dasar tuning dengan Ziegler Nichols ada K_{cr} dan P_{cr} (Metode kedua) (Sumber : Katsuhiko Ogata., 2010)

Type Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0

PID	0,6 K_{cr}	0,5 P_{cr}	0,125 P_{cr}
-----	--------------	--------------	----------------

Dengan menggunakan Ziegler – Nichols sebagai tuning dalam penentuan parameter kendali PID memberikan peraturan sebagai berikut :

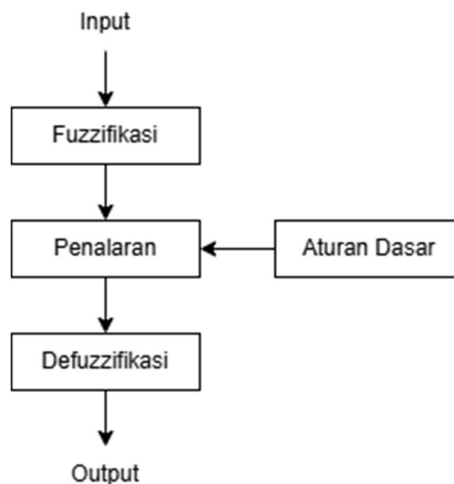
$$G_c = K_p \left(1 + \left(\frac{1}{T_i s} \right) + T_d s \right) \quad (13)$$

$$G_c = 0.6K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0.5P_{cr}s} + 0.125P_{cr}s \right)$$

$$G_c = 0.075K_{cr}P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s}$$

2.4.3 Logika Fuzzy

Logika Fuzzy adalah metode komputasi berbasis logika yang meniru cara berpikir manusia, memungkinkan pemrosesan informasi yang tidak pasti, ambigu, atau "kabur". Tidak seperti logika klasik yang hanya mengenal nilai benar atau salah secara mutlak (0 atau 1), logika fuzzy memungkinkan derajat kebenaran berada dalam rentang antara 0 sampai 1, sehingga lebih fleksibel untuk menangani ketidakpastian atau kompleksitas suatu sistem.[24] Logika fuzzy juga dianggap sebagai kebalikan dari logika crisp, yang hanya memiliki nilai benar atau salah secara tegas. Untuk mendapatkan hubungan atau pemetaan antara input dan output, terdapat beberapa tahapan dalam logika fuzzy yang dapat dijelaskan melalui diagram berikut.



Gambar 2. 21 sistem logika fuzzy

Adapun maksud dari setiap bagian gambar 2.21 adalah sebagai berikut :

1. Fuzzifikasi (Fuzzification)

Bertujuan untuk mengubah input tegas (crisp input) menjadi nilai fuzzy berdasarkan derajat keanggotaan dalam himpunan fuzzy. Pada proses ini dilakukan penentuan variabel fuzzy dan nilai himpunannya.

2. Penalaran (Inference)

Penalaran adalah melakukan penalaran berbasis aturan untuk menghasilkan keluaran fuzzy. Pada tahap ini, sistem menggunakan aturan dasar (Rule Base) yang berbentuk logika linguistik *IF-THEN* untuk mengambil keputusan. Sistem menggunakan operator fuzzy, seperti AND, OR, atau NOT, untuk menggabungkan derajat keanggotaan input yang sesuai dengan aturan.

3. Defuzzifikasi (Defuzzification)

Penegasan (defuzzifikasi) mendapatkan input dari aturan – aturan fuzzy, sementara outputnya merupakan suatu boilangan dari domain himpunan fuzzy. Keluaran fuzzy diproses menggunakan metode defuzzifikasi, seperti:

- *Centroid Method* (Pusat Massa): Menghitung rata-rata pusat massa dari keluaran fuzzy.

Dirumuskan :

$$z^* = \frac{\int_z z\mu(z)dz}{\int_z \mu(z)dz} \quad z^* = \frac{\sum_{j=1}^n zj\mu(zj)}{\sum_{j=1}^n \mu(zj)} \quad (14)$$

- *Mean of Maximum* (MOM): Mengambil rata-rata dari nilai maksimum.
- *Large of Maximum* (LOM) : Mengambil nilai *crisp* dari nilai terbesar pada derajat keanggotaan maksimum.
- *Smallest of Maximum* (SOM) : mengambil nilai crisp dari nilai terkecil pada derajat keanggotaan.
- *Bisector*: Membagi area fuzzy menjadi dua bagian dengan luas yang sama.

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan dalam penerapan kendali logika fuzzy, antara lain:

1. Metode Sugeno

Sugeno adalah metode inferensi fuzzy yang lebih sederhana dan lebih efisien dibandingkan Mamdani dalam beberapa kasus.[27] Metode ini menghasilkan

output crisp secara langsung tanpa memerlukan defuzzifikasi. Dalam metode sugeno terdapat dua model yang digunakan, yaitu :

a. Model Fuzzy Sugeno Orde – Nol

Aturan dalam model ini dinyatakan dalam format berikut :

$$IF (x_1 \text{ is } A_1), (x_2 \text{ is } A_2), (x_3 \text{ is } A_3) \dots (x - n \text{ is } A - n) \text{ Then } z = k \quad (15)$$

Dimana :

- $x_1, x_2, \dots, x_n$: Variabel input.
- $A_1, A_2, \dots, A_n$: Himpunan fuzzy yang mendefinisikan kondisi input (anteseden).
- z : Output sistem fuzzy.
- k : Konstanta numerik yang menjadi keluaran sistem untuk aturan tertentu (konsekuen).

b. Model Fuzzy Sugeno Orde – Satu

Aturan dalam model ini dinyatakan dalam format berikut ini :

$$IF (x_1 \text{ is } A_1), (x_2 \text{ is } A_2), (x_3 \text{ is } A_3) \dots (x - n \text{ is } A - n) \quad (16) \\ \text{Then } z = (p_1 * x_1) + (p_n * x_n) + q$$

Dimana :

- $x_1, x_2, \dots, x_n$: Variabel input.
- $A_1, A_2, \dots, A_n$: Himpunan fuzzy untuk setiap variabel input (anteseden).
- $p_1, p_2, \dots, p_n$: Konstanta yang mengalikan setiap input ($x_1, x_2, \dots, x_n$).
- q : Konstanta tambahan dalam konsekuen.
- k : Output yang merupakan fungsi linear dari input.

2. Metode Mamdani

Metode Mamdani adalah salah satu pendekatan dalam sistem inferensi fuzzy yang menghasilkan output berupa himpunan fuzzy. Hasil akhir dari metode Mamdani adalah himpunan fuzzy yang memerlukan proses defuzzifikasi untuk menghasilkan nilai crisp (tegas). Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975 dan sangat populer karena intuitif, menyerupai cara berpikir

manusia, serta menggunakan aturan linguistik yang mudah dipahami.[28] Metode fuzzy mamdani ini output yang dihasilkan dalam bentuk nilai domain fuzzy dengan pengkategorian ke dalam komponen linguistik. Pada metode ini biasanya digunakan fungsi keanggotaan trapesium, segitiga, dan bahu kiri atau bahu kanan. Fungsi keanggotaan trapesium digunakan untuk dua titik dari himpunan fuzzy yang nilai keanggotaannya satu. Sementara untuk keanggotaan segitiga digunakan untuk keanggotaan yang memiliki satu titik dari himpunan fuzzy. Dan untuk bahu kiri atau bahu kanan digunakan untuk keanggotaan himpunan yang akan mengawali atau mengakhiri. Proses dalam fuzzy mamdani ini terbagi menjadi 4 tahapan :

- Pembentukan himpunan fuzzy. Pada proses fuzzifikasi langkah yang pertama adalah menentukan variable fuzzy dan himpunan fuzzinya. Kemudian tentukan derajat kesepadanan (degree of match) antara data masukan fuzzy dengan himpunan fuzzy yang telah didefinisikan untuk setiap variabel masukan sistem dari setiap aturan fuzzy. Pada metode mamdani, baik variabel input maupun variabel output dibagi menjadi satu atau lebih himpunan fuzzy[29].
- Aplikasi fungsi implikasi. Fungsi implikasi yang digunakan adalah min. Lakukan implikasi fuzzy berdasar pada kuat penyulutan dan himpunan fuzzy terdefinisi untuk setiap variabel keluaran di dalam bagian konsekuensi dari setiap aturan. Hasil implikasi fuzzy dari setiap aturan ini kemudian digabungkan untuk menghasilkan keluaran infrensi fuzzy[30].
- Komposisi Aturan. Tidak seperti penalaran monoton, apabila sistem terdiri dari beberapa aturan, maka infrensi diperoleh dari kumpulan dan korelasi antar aturan. Ada 3 metode yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem fuzzy, yaitu: max, additive dan probabilistik OR.
 - a. Metode Max (*Maximum*)
 - ♦ Pada metode ini, solusi himpunan fuzzy diperoleh dengan cara mengambil nilai maksimum aturan, kemudian menggunakannya untuk memodifikasi daerah fuzzy, dan mengaplikasikannya ke output dengan menggunakan operator OR(union).
 - ♦ Jika semua proposisi telah dievaluasi, maka output akan berisi suatu himpunan fuzzy yang merefleksikan kontribusi dari tiap-tiap proposisi.

♦ Secara umum dapat dituliskan:

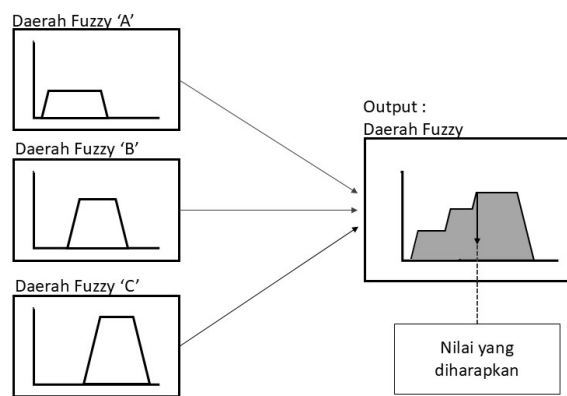
$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow \max(\mu_{sf}[x_i], \mu_{kf}[x_i]) \quad (17)$$

dengan:

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

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

- Penegasan (defuzzifikasi). Input dari proses defuzzifikasi adalah suatu himpunan fuzzy yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan fuzzy, sedangkan output yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada domain himpunan fuzzy. Jika diberikan suatu himpunan fuzzy dalam range tertentu, maka harus dapat di ambil suatu nilai crisp tertentu sebagai output[31].



Gambar 2. 22 Output Fuzzy mamdani
(Sumber : Altien J. Rindengan dan Yohanes A.R. Langi)

3. Metode Tsukamoto

Metode yang ditemukan oleh Tsukamoto ini memiliki konsekuen (kesimpulan) untuk setiap aturan IF-THEN yang harus direpresentasikan dengan suatu himpunan fuzzy fungsi keanggotaan monoton. Sehingga outputnya dari setiap aturan diberikan secara tegas (*crisp*) berdasarkan *a-predikat*, kemudian menghitung rata – rata terbobot. Misalnya diberikan 2 variabel input, Var-1 (x) dan Var-2(x), serta variable output Var-3(z) dengan masing masing variable memiliki dua himpunan. Maka ditunjukkan pada table dibawah[30].

Tabel 2. 4. Contoh variabel input dan output dalam metode Tsukamoto
(Sumber : Altien J. Rindengan dan Yohanes A.R. Langi)

Fungsi	Variabel	Himpunan
Input	Var-1 (x)	A1
		A2
	Var-2 (x)	B1
		B2
Output	Var-3 (z)	C1
		C2

Pada **metode Tsukamoto**, proses inferensi dilakukan dengan menggunakan operator logika kongjungsi (AND) untuk menentukan nilai keanggotaan anteseden dari aturan fuzzy. Sebagai contoh, untuk aturan fuzzy [R1], nilai keanggotaan anteseden dihitung sebagai irisan dari nilai keanggotaan himpunan fuzzy A_1 dan B_1 . Irisan ini direpresentasikan sebagai nilai minimum antara nilai keanggotaan A_1 dan B_1 . Hasil dari perhitungan ini disebut sebagai α_1 , yang merepresentasikan kekuatan *firing* (*firing strength*) aturan tersebut.

Selanjutnya, nilai α_1 digunakan untuk menghitung nilai output tegas (z_1) dengan cara menyubstitusikannya ke dalam fungsi keanggotaan himpunan output fuzzy C_1 , sesuai dengan aturan fuzzy [R1]. Nilai z_1 ini merupakan estimasi tegas yang dihasilkan oleh aturan tersebut.

Setelah semua aturan fuzzy diproses, akan dihasilkan beberapa nilai output tegas ($z_1, z_2, \dots, z_n$). Langkah berikutnya adalah melakukan proses defuzifikasi untuk mendapatkan nilai output akhir (Z). Defuzifikasi adalah proses konversi dari himpunan fuzzy hasil komposisi aturan menjadi satu nilai tegas yang dapat digunakan oleh sistem.

Dalam metode Tsukamoto, defuzifikasi dilakukan menggunakan pendekatan *Center Average Defuzzifier* (CAD). Rumus defuzifikasi ini menghitung nilai Z dengan mempertimbangkan bobot setiap nilai output tegas (z_i) berdasarkan kekuatan *firing* (α_i) dari aturan fuzzy yang relevan.

Tabel 2. 5. Perbandingan metode Tsukamoto, Mamdani, dan Sugeno
(Sumber : Altien J. Rindengan dan Yohanes A.R. Langi)

Metode	Input	Output	Deffuzifikasi
Tsukamoto	Himpunan Fuzzy	Himpunan Fuzzy	Weighted Average
Mamdani	Himpunan Fuzzy	Himpunan Fuzzy	Centroid LOM SOM MOM
Sugeno	Himpunan Fuzzy	- Konstanta - Linear (orde 1)	Bisector Weighted Average

Fungsi keanggotaan dalam fuzzy merupakan pemetaan titik – titik input data ke dalam nilai keanggotaannya yang di gambarkan dalam bentuk kurva. Ada beberapa fungsi yang dapat digunakan, antara lain :

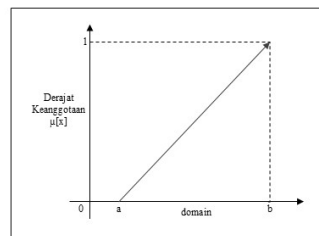
- Kurva Linear

1. Linear Naik

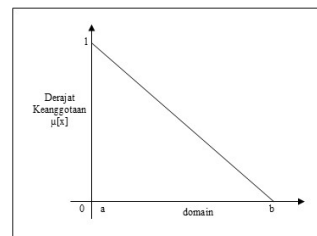
$$\mu[x] = \begin{cases} 0 & , x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & , a < x < b \\ 1 & , x \geq b \end{cases} \quad (18)$$

2. Linear Turun

$$\mu[x] = \begin{cases} 0 & , x \geq a \\ \frac{b-x}{b-a} & , a < x < b \\ 1 & , x \leq a \end{cases} \quad (19)$$



(a)

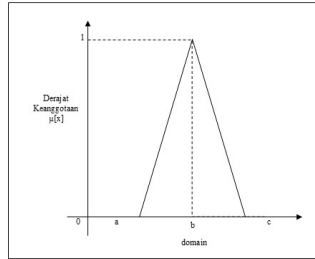


(b)

Gambar 2. 23 Kurva Linear (a) Naik (b) Turun
(Sumber : Altien J. Rindengan dan Yohanes A.R. Langi)

- Kurva Segitiga

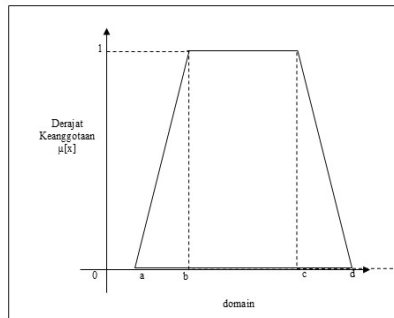
$$\mu[x] = \begin{cases} 0, & x \leq a \cup x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & x = b \\ \frac{(c-x)}{c-b}, & b < x < c \end{cases} \quad (20)$$



Gambar 2. 24 Kurva Segitiga
(Sumber : Altien J. Rindengan dan Yohanes A.R. Langi)

- Kurva Trapezium

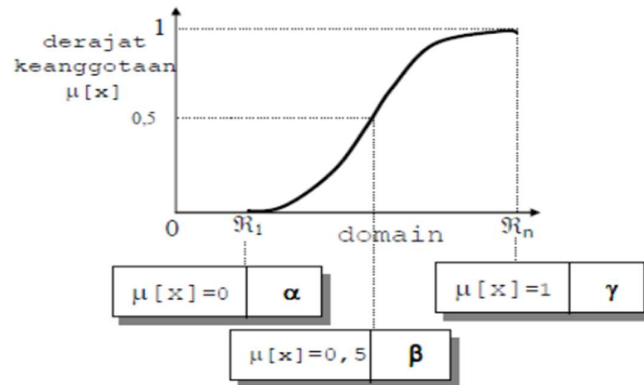
$$\mu[x] = \begin{cases} 0, & x \leq a \cup x \geq d \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{(d-x)}{d-c}, & c < x < d \end{cases} \quad (21)$$



Gambar 2. 25 Kurva Trapezium
(Sumber : Altien J. Rindengan dan Yohanes A.R. Langi)

- Kurva S(Sigmoid)

$$\mu[x] = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 2 \left(\frac{\gamma-a}{\gamma-a} \right)^2, & a < x < \beta \\ 0.5, & x < \beta \\ 1 - 2 \left(\frac{\gamma-a}{\gamma-a} \right)^2, & \beta < x < \gamma \\ 1, & x \geq \gamma \end{cases} \quad (22)$$



Gambar 2. 26 Kurva Sigmoid
(Sumber : Altien J. Rindengan dan Yohanes A.R. Langi)

III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bagian ini akan dibahas mengenai metodologi penelitian mulai dari langkah – langkah penelitian secara sistematis, mulai dari tahap perancangan, simulasi, hingga implementasi sistem kendali. Serta alat dan bahan yang digunakan untuk mendukung pengujian performa sistem

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan mulai Desember 2024 hingga Mei 2025 dan dilaksanakan pada dua tempat yaitu Laboratorium Konversi Energi Elektrik di Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung serta saluran irigasi.

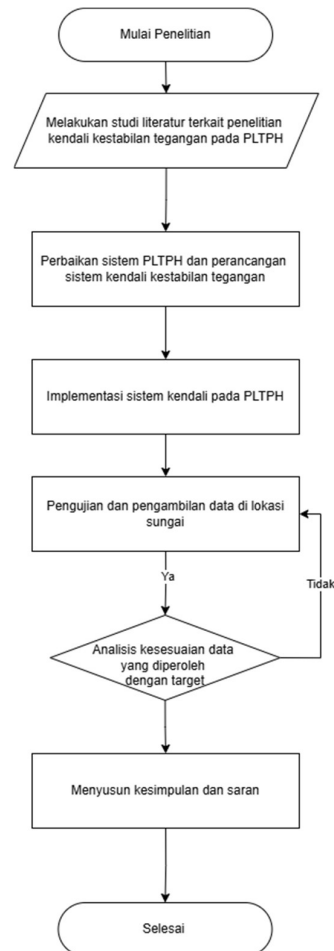
3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

1. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hidro
2. 1 buah Arduino
3. 1 buah Sensor Tegangan 25V
4. 1 buah Sensor Flow Meter
5. 1 buah Box
6. 1 buah Motor Servo 18 Kg
7. Pipa PVC
8. 1 buah Valve
9. Kabel Jumper
10. 1 buah Multimeter
11. 1 buah Tachometer
12. Software IDE 1.18.19
13. Software MATLAB

3.3 Tahapan Penelitian

Tahapan – tahapan dalam penelitian ini sudah disediakan dalam bentuk diagram alir dibawah ini.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

Pada gambar 3.1 ditunjukkan diagram alir dari penelitian. Diagram alir ini menjadi rujukan dalam menjalankan penelitian. Penelitian dimulai dengan melakukan studi literatur guna mengumpulkan banyak informasi mengenai panduan – panduan dalam proses penelitian. Setelahnya dilakukan perancangan alat dan sistem kendali berdasarkan informasi – informasi yang sudah dikumpulkan pada sebelumnya. Kemudian perancangan diimplementasikan hingga menghasilkan sebuah alat yang sesuai. Maka baru setelah itu dilakukan pengujian dan pengaambilan data yang apabila dianalisa data tidak sesuai akan dilakukan pengujian ulang dan jika sudah sesuai dilanjutkan dengan pengambilan kesimpulan dan saran.

3.4 Desain Penelitian

3.4.1 Spesifikasi Alat

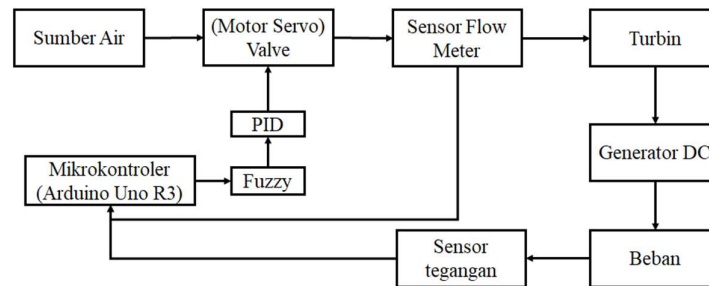
Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro merupakan sistem pembangkit listrik berskala kecil yang memanfaatkan energi aliran air dengan kapasitas daya kurang dari 5 kW. PLTPH terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara terpadu untuk menghasilkan listrik. Sistem pembangkit listrik ini menggunakan motor generator DC satu fasa dengan kapasitas daya sebesar 1,96 kW/s. Generator ini dirancang untuk menghasilkan tegangan keluaran sebesar 9,5 V/1000 rpm dengan toleransi $\pm 10\%$ dan dilengkapi dengan 4 kutub. Kecepatan putaran nominalnya adalah 1300 rpm, dengan tipe seri UTGMEM-06-SB2.

Sebagai penggerak utama, sistem ini memanfaatkan turbin Pelton berukuran 8 inci dengan 12 bilah, yang dirancang untuk menangkap dan mengonversi energi aliran air secara optimal. Energi mekanik dari turbin diteruskan ke generator melalui sistem transmisi yang terdiri dari pulley turbin berdiameter 6 inci dan pulley generator berdiameter 3 inci, yang dihubungkan oleh v-belt sepanjang 36 cm. Rasio diameter pulley ini meningkatkan kecepatan putaran generator, memastikan kinerjanya sesuai dengan spesifikasi teknis.

3.4.2 Diagram Alir Keseluruhan

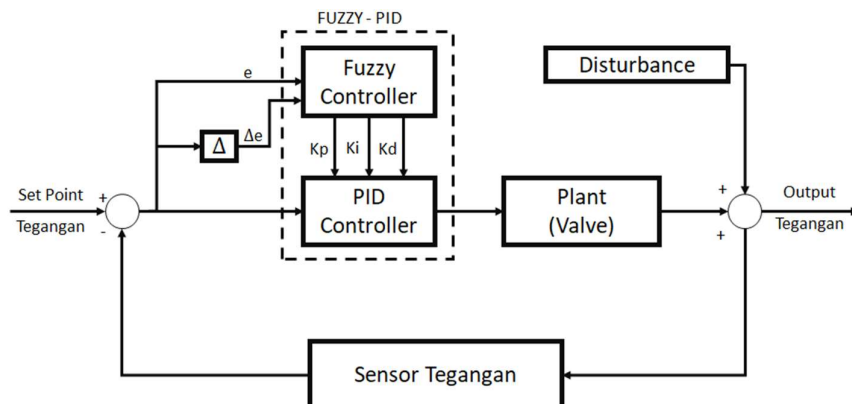
Sistem PLTPH ini dirancang untuk menghasilkan energi listrik yang stabil dengan menggabungkan kendali PID yang dituning menggunakan metode Fuzzy. Air dari sumber dialirkan sebagai energi utama menuju turbin melalui valve yang dikendalikan oleh motor servo. Posisi valve diatur untuk mengontrol besar kecilnya aliran air berdasarkan sinyal kendali dari *PID Controller*. Aliran air yang masuk diukur oleh *sensor flow meter*, dan data ini dikirimkan ke mikrokontroler untuk diproses. Mikrokontroler, dalam hal ini Arduino Uno R3, juga menerima data dari sensor tegangan yang memantau keluaran generator. Sensor tegangan memastikan bahwa tegangan keluaran generator DC sesuai dengan tegangan referensi atau setpoint yang telah ditentukan.

Turbin yang digerakkan oleh aliran air mengubah energi kinetik air menjadi energi mekanik berupa putaran. Putaran ini diteruskan ke generator DC, yang kemudian mengonversinya menjadi energi listrik. Tegangan keluaran generator DC digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban listrik seperti lampu. Jika tegangan keluaran tidak sesuai dengan setpoint, PID Controller yang telah dituning oleh sistem Fuzzy akan menyesuaikan posisi valve untuk mengontrol aliran air yang masuk ke turbin, sehingga tegangan keluaran dapat stabil kembali. Dengan kombinasi sensor flow meter, sensor tegangan, dan pengendalian berbasis Fuzzy-PID, sistem ini mampu menjaga stabilitas tegangan meskipun terjadi perubahan debit air, memastikan keluaran listrik yang konsisten untuk memenuhi kebutuhan beban.



Gambar 3. 2 Diagram alir kerja keseluruhan dari sistem

3.4.3 Diagram Alir Kendali Sistem



Gambar 3. 3 Diagram alir sistem

(Sumber : Pribadi)

Diagram di atas menggambarkan sistem kendali FUZZY-PID yang digunakan untuk mengatur tegangan keluaran dari generator agar tetap stabil meskipun terjadi gangguan atau perubahan kondisi sistem. Berikut adalah penjelasan lengkap setiap komponen dalam diagram.

Sistem dimulai dengan *Set Point* Tegangan, yaitu nilai tegangan referensi yang diinginkan. Nilai tegangan ini dibandingkan dengan tegangan keluaran aktual (V_{actual}), yang diukur menggunakan sensor tegangan, untuk menghasilkan *error* (e), yaitu selisih antara tegangan referensi (V_{setpoint}) dan tegangan aktual. Selain itu, perubahan *error* (Δe), yaitu perubahan nilai *error* dari waktu ke waktu, juga dihitung untuk meningkatkan akurasi sistem.

Error (e) dan perubahan *error* (Δe) kemudian dimasukkan ke dalam *Fuzzy Controller*. *Fuzzy Controller* bertugas menyesuaikan nilai parameter K_p (konstanta proporsional), K_i (konstanta integral), dan K_d (konstanta derivatif) secara adaptif berdasarkan kondisi sistem saat itu. Penyesuaian ini dilakukan melalui aturan fuzzy yang dirancang untuk memastikan sistem tetap responsif terhadap perubahan *error* tanpa menyebabkan osilasi atau ketidakstabilan.

Parameter K_p , K_i , dan K_d yang dihasilkan oleh *Fuzzy Controller* digunakan oleh *PID Controller*. *PID Controller* menghitung sinyal kendali $u(t)$ berdasarkan persamaan PID, yaitu:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot de(t)dt \quad (23)$$

Komponen K_p memberikan respons proporsional terhadap *error*, K_i membantu menghilangkan *error* jangka panjang, sedangkan K_d berfungsi untuk meredam perubahan cepat dan osilasi pada sistem.

Sinyal kendali ($u(t)$) dari *PID Controller* dikirimkan ke *Plant*, yang dalam hal ini adalah valve yang dikendalikan untuk mengatur debit air. Debit air yang diatur oleh valve memengaruhi kecepatan putaran turbin. Turbin ini, pada gilirannya, menggerakkan generator untuk menghasilkan tegangan keluaran. Tegangan keluaran ini dapat terganggu oleh faktor eksternal, seperti perubahan debit air,

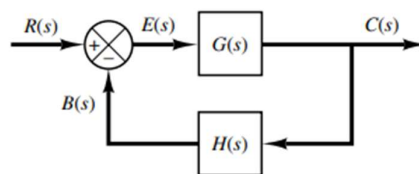
beban listrik yang berubah, atau gangguan mekanis. Gangguan ini disebut sebagai Disturbance.

Sensor Tegangan membaca tegangan keluaran generator secara real-time dan mengirimkannya kembali ke sistem sebagai umpan balik. Informasi ini digunakan untuk terus memperbarui nilai *error* (e) dan perubahan *error* (Δe), sehingga sistem dapat beradaptasi dengan perubahan kondisi.

Secara keseluruhan, sistem FUZZY-PID ini memastikan bahwa tegangan keluaran dari generator tetap stabil dan sesuai dengan set point, bahkan dalam kondisi yang dinamis atau penuh gangguan. Sistem ini menggabungkan kecepatan respons dari PID Controller dengan fleksibilitas adaptif dari Fuzzy Controller, sehingga menghasilkan kinerja yang optimal dan andal.

3.4.4 Perancangan Sistem Kendali

Dalam suatu sistem *closed-loop*, pengendali menjadi salah satu komponen penting yang berfungsi dalam membandingkan sinyal keluaran dan sinyal referensi. Secara umum blok diagram sistem *closed-loop* terdiri dari masukan referensi $R(s)$ dan keluaran $C(s)$. Dimana nilai $C(s)$ didapatkan dari hasil mengalikan nilai error $E(s)$ dengan transfer fungsi $G(s)$. Ketika output dikirim kembali ke titik pejumlahan sebagai perbandingan dengan input. Maka diperlukan perubahan output ini menjadi sinyal yang sama dengan input. Perubahan ini dilakukan oleh komponen umpan balik yang biasanya adalah sebuah sensor dengan transfer fungsi $H(s)$.



Gambar 3. 4 Diagram Blok *Closed - Loop*

Dari gambar diatas menunjukkan bahwa keluaran $C(s)$ dan masukan $R(s)$ saling berkaitan.

$$C(s) = G(s)E(s)$$

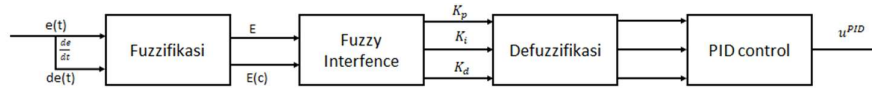
$$E(s) = R(s) - B(s)$$

$$= R(s) - H(s)C(s) \quad (24)$$

Dari persamaan diatas maka untuk mengeliminasi $E(s)$ adalah dengan :

$$\begin{aligned} C(s) &= G(s)[R(s) - H(s)C(s)] \\ \frac{C(s)}{R(s)} &= \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \\ C(s) &= \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} R(s) \end{aligned} \quad (25)$$

Sehingga, dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa nilai keluaran $C(s)$ sangat bergantung pada pengaturan transfer fungsi $G(s)$ agar sesuai dengan kebutuhan. Fungsi transfer $G(s)$ ini dibentuk dengan metode kontrol yang bermacam salah satunya yang akan di bahas di penelitian ini adalah dengan metode Fuzzy-PID. Fuzzy *self-tuning* PID didasarkan pada standar PID dan mekanisme penyetelan fuzzy yang digunakan untuk adaptasi on – line dari parameter PID. Secara blok diagram sistem kontrol kendali Fuzzy – PID dapat digambarkan sebagai berikut,



Gambar 3. 5 Diagram Blok kendali *Fuzzy - PID*

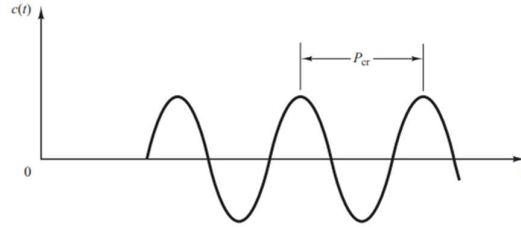
Dengan mempertimbangkan nilai perbandingan antara *input reference* dengan *output* sistem maka akan didapatkan nilai error $e(t)$. Nilai error $e(t)$ dan nilai perubahan error sebelumnya dikurang dengan nilai error saat ini $de(t)$ digunakan sebagai input dari kontrol Fuzzy. Sementara outputnya akan berupa nilai parameter dari PID. Persamaan untuk error serta change error adalah sebagai berikut:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (26)$$

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t - 1) \quad (27)$$

Berdasarkan diagram blok pada 3.5 maka hal pertama yang dilakukan dalam perancangan kendali ini adalah menentukan range nilai dari setiap input dan output variabel fuzzy yang akan digunakan. Termasuk menentukan nilai parameter PID

yang digunakan sebagai output. Penentuan nilai plant dilakukan melalui metode osilasi. Metode ini dimulai dengan mengatur nilai parameter integrator menjadi tak terhingga ($T_i = \infty$) dan parameter derivative diatur nol ($T_d = 0$). Sementara untuk parameter proposional dinaikan secara bertahap sampai respon sistem berosilasi dengan magnitude tetap (*sustain osilation*). Nilai K_p akan terus ditingkatkan sampai didapatkan nilai Kritis K_{cr} dan periode kritis P_{cr} .



Gambar 3. 6 Osilasi berkelanjutan dengan periode (diukur dalam detik)

(Sumber : Katsuhiko Ogata., 2010)

Setelah mendapatkan nilai parameter untuk K_{cr} dan P_{cr} maka dilakukan perhitungan nilai K_p , T_i , T_d , K_i , dan K_d . Dengan,

$$K_p = 0.6K_{cr} \quad (28)$$

$$T_i = 0.5P_{cr} \quad (29)$$

$$T_d = 0.125P_{cr} \quad (30)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (31)$$

$$K_d = K_p \times T_d \quad (32)$$

Nilai parameter yang didapatkan akan menjadi range untuk setiap output parameter PID. Setelah itu, baru bisa dilakukan proses fuzzifikasi yaitu penentuan variabel serta fungsi keanggotaannya. Fungsi keanggotaan untuk input error dan change error dirancang menggunakan kurva berbentuk segitiga dengan semesta pembicaraan atau range antara -12 hingga 12. Input ini dibagi ke dalam lima himpunan fuzzy, yaitu Negatif Besar (NB), Negatif Kecil (NS), Zero (ZE), Positif Kecil (PS), dan Positif Besar (PB). Fungsi keanggotaan NB memiliki semesta pembicaraan [-12 -12 -6]. Fungsi NS memiliki semesta pembicaraan [-12 -6 0].

Selanjutnya, fungsi ZE memiliki semesta pembicaraan $[-6 \ 0 \ 6]$. Fungsi PS memiliki semesta pembicaraan $[0 \ 6 \ 12]$. Terakhir, fungsi PB memiliki semesta pembicaraan $[6 \ 12 \ 12]$. Desain fungsi keanggotaan ini memastikan bahwa setiap nilai error dan change error dapat dipetakan secara tepat ke dalam kategori fuzzy, sehingga sistem dapat menangkap informasi error dan change error dengan detail untuk proses inferensi.

$$\mu[x] = \begin{cases} 0, & x \leq a \cup x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & x = b \\ \frac{(c-x)}{c-b}, & b < x < c \end{cases} \quad (33)$$

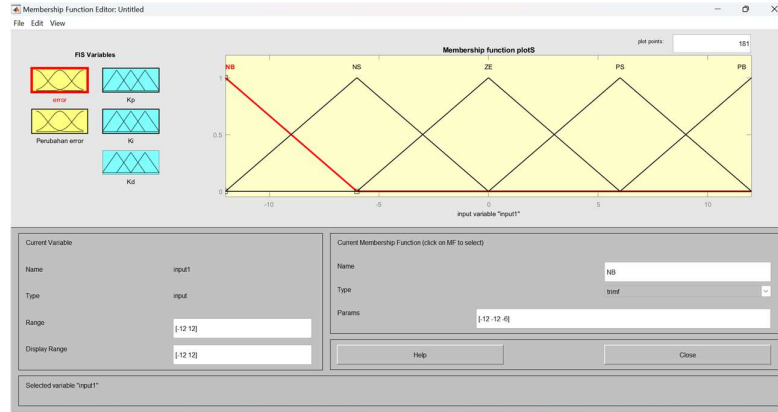
$$\mu[NB] = \begin{cases} 0, & x \geq -6 \\ \frac{b-x}{b-a}, & -12 < x < -6 \\ 1, & x \leq -12 \end{cases}$$

$$\mu[NS] = \begin{cases} 0, & x \leq -12 \cup x \geq 0 \\ \frac{x-a}{b-a}, & -12 < x \leq -6 \\ 1, & x = -6 \\ \frac{(c-x)}{c-b}, & -6 < x < 0 \end{cases}$$

$$\mu[ZE] = \begin{cases} 0, & x \leq -6 \cup x \geq 6 \\ \frac{x-a}{b-a}, & -6 < x < 0 \\ 1, & x = 0 \\ \frac{(c-x)}{c-b}, & 0 < x < 6 \end{cases}$$

$$\mu[PS] = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \cup x \geq 12 \\ \frac{x-a}{b-a}, & 0 < x < 6 \\ 1, & x = 6 \\ \frac{(c-x)}{c-b}, & 6 < x < 12 \end{cases}$$

$$\mu[NB] = \begin{cases} 0, & x \leq 6 \\ \frac{x-a}{b-a}, & 6 < x < 12 \\ 1, & x \geq 12 \end{cases}$$



Gambar 3. 7 Fungsi keanggotaan input fuzzy

Fungsi keanggotaan yang digunakan untuk output dari fuzzy yaitu parameter PID memiliki variabel linguistik berupa Negatif Besar (NB), Negatif Kecil (NS), Zero (ZE), Positif Kecil (PS), dan Positif Besar (PB). Dengan range sesuai parameter $[K_{Pmin}, K_{Pmax}]$, $[K_{Imin}, K_{Imax}]$, $[K_{Dmin}, K_{Dmax}]$. Kemudian akan dikalibrasi dalam interval $[0,1]$:

$$K'_P = \frac{(K_P - K_{Pmin})}{K_{Pmax} - K_{Pmin}} \quad (34)$$

$$K'_I = \frac{(K_I - K_{Imin})}{K_{Imax} - K_{Imin}} \quad (35)$$

$$K'_D = \frac{(K_D - K_{Dmin})}{K_{Dmax} - K_{Dmin}} \quad (36)$$

Dari perancangan sistem ini dihasilkan 25 rules dengan inferensi menggunakan metode mamdani. Sehingga dalam langkah selanjutnya yaitu melakukan implikasi fuzzy yang mana tiap – tiap aturan yang berbasis pengetahuan fuzzy akan saling berhubungan. Bentuk umumnya adalah :

IF x is A THEN y is B

Pada fuzzy mamdani digunakan fungsi implikasi min yaitu fungsi yang memotong output himpunan fuzzy. Misalnya jika e adalah A dan Δe adalah B, maka keluaran adalah C. Maka, derajat keanggotaan keluaran $\mu_C(y)$ dihitung sebagai:

$$\mu_C(y) = \min (\mu_A(e), \mu_B(\Delta e)) \quad (37)$$

Tahapan ketiga dalam pembentukan kontrol fuzzy adalah komposisi aturan yang dilakukan dengan metode max yaitu memilih nilai maksimum dari semua keluaran fuzzy. Setelah itu mengaplikasikannya ke output dengan operator OR(union). Jika semua sudah dievaluasi, maka output akan berisi himpunan fuzzy yang mereflesikan kontribusi dari tiap – tiap proposisi. Secara umum dapat dituliskan :

$$\mu_{sf}[x_i] \leftarrow \max (\mu_{sf}[x_i], \mu_{kf}[x_i]) \quad (38)$$

Dengan :

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

$\mu_{kf}[x_i]$: nilai keanggotaan konsekuen fuzzy aturan ke- i

Proses terakhir defuzzifikasi yaitu pengubahan *variable linguistic* menjadi nilai crisp. Metode defuzzifikasi yang digunakan yaitu metode centroid dengan solusi crisp yang didapatkan dari hasil mengambil titik pusat z^* daerah fuzzy. Dengan menggunakan rumus :

$$z^* = \frac{\int_z z\mu(z)dz}{\int_z \mu(z)dz} \quad z^* = \frac{\sum_{j=1}^n zj\mu(zj)}{\sum_{j=1}^n \mu(zj)} \quad (39)$$

3.5 Desain Pengujian

Pengujian dalam penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi implementasi kendali stabilitas tegangan menggunakan metode PID Ziegler-Nichols yang dituning dengan metode Fuzzy Mamdani pada hasil tegangan pembangkit listrik tenaga piko-hidro. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk menganalisis respon sistem terhadap variasi beban yang diberikan, serta menguji kemampuan sistem kendali dalam menjaga stabilitas tegangan output dari pembangkit listrik piko-hidro dengan rentang beban yang berbeda. Adapun langkah – langkah dalam pengujian adalah sebagai berikut :

Pengujian dimulai dengan persiapan sistem pembangkit listrik tenaga piko-hidro yang terdiri dari generator DC, turbin Pelton, motor servo sebagai pengendali valve, sensor tegangan, sensor debit aliran air, serta sistem kendali PID Ziegler-Nichols yang dituning menggunakan logika fuzzy Mamdani. Variasi beban yang diberikan pada sistem meliputi enam kondisi, yaitu tanpa beban, dengan lampu berdaya 5 watt, 10 watt, dan 15 watt. Setiap pengujian akan mengaktifkan sistem kendali PID yang telah dituning dengan fuzzy Mamdani untuk mengatur valve yang terhubung dengan motor servo, sehingga aliran air yang menggerakkan turbin dapat diatur untuk menjaga kestabilan tegangan. Sistem diuji untuk memeriksa apakah tegangan tetap stabil pada nilai 12V meskipun ada perubahan beban, serta apakah terjadi overshoot (kelebihan tegangan) atau undershoot (tegangan yang lebih rendah dari setpoint) pada setiap variasi beban. Parameter sistem akan diukur dalam bentuk grafik untuk menilai perubahan tegangan dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai tegangan yang stabil. Selain itu, parameter kinerja seperti waktu respons, overshoot, dan steady-state error (kesalahan dalam kondisi stabil) akan dihitung untuk setiap variasi beban. Setelah pengujian, dilakukan analisis hasil untuk mengevaluasi performa sistem kendali dalam menjaga tegangan pada kondisi berbeban dan tanpa beban, dan diakhiri dengan pengambilan kesimpulan penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan terhadap sistem kendali stabilitas tegangan saat berbeban maupun tidak berbeban didapatkan kesimpulan, sebagai berikut :

1. Sistem kendali PID yang dituning menggunakan metode *Ziegler-Nichols* terbukti mampu menghasilkan tegangan yang mendekati nilai referensi (setpoint), yaitu sebesar 12V. Berdasarkan pengujian metode osilasi berkelanjutan, diperoleh nilai *ultimate gain* (Ku) sebesar 1,7 dan *ultimate period* (Pu) sebesar 2. Dari nilai tersebut, diperoleh parameter PID: $K_p = 1,05$, $K_i = 1,05$, dan $K_d = 0,255$. Parameter-parameter ini kemudian digunakan sebagai batas nilai output dari sistem fuzzy dalam proses tuning adaptif.
2. Sistem menunjukkan respons yang cepat dan stabil terhadap perubahan beban. Tegangan drop yang terjadi saat beban dinyalakan berhasil dikoreksi dalam waktu 1,1 detik begitu juga dalam keadaan tegangan melonjak. Selain itu tidak dihasilkan tegangan overshoot dan rise time terjadi dalam waktu yang cepat dan konsisten, yaitu 1,19 detik pada kondisi tanpa beban, 1,18 detik untuk beban 5 watt, 1,15 detik untuk beban 10 watt, dan 1,21 detik pada beban 15 watt. Saat beban diberikan, terjadi penurunan tegangan (tegangan drop) menjadi 10,13V (5W), 9,81V (10W), dan 9,58V (15W), namun sistem mampu memulihkan tegangan ke setpoint 12V dalam waktu 1,1 detik untuk semua kondisi. Setelah beban dilepaskan, terjadi lonjakan tegangan masing-masing sebesar 14,31V, 14,72V, dan 15,07V, yang juga berhasil dipulihkan dalam waktu yang sama yaitu 1,1 detik.
3. Sistem juga menunjukkan respons penyesuaian servo yang proporsional terhadap beban. Sudut servo meningkat dari 61° saat tanpa beban menjadi 71° pada beban 5 watt, 74° pada 10 watt, dan 75° saat beban 15 watt. Selain itu, sistem fuzzy PID secara adaptif menyesuaikan parameter kendali. Saat beban

dipasang, nilai parameter PID meningkat secara bertahap, yaitu Kp: 0,459 (5W), 0,480 (10W), dan 0,496 (15W); Ki: 0,618 (5W), 0,631 (10W), dan 0,641 (15W); serta Kd: 0,135–0,136. Sementara saat beban dilepas, sistem mengurangi nilai Kp untuk menghindari overshoot, yaitu menjadi 0,244 (5W), 0,237 (10W), dan 0,230 (15W); Ki meningkat untuk menjaga kestabilan jangka panjang, yaitu 0,631–0,662; dan Kd sedikit menurun dari 0,118 ke 0,116.

4. Secara keseluruhan, sistem kendali fuzzy PID menunjukkan performa yang cepat, stabil, dan adaptif dalam mempertahankan tegangan output mendekati setpoint 12 volt, meskipun terjadi perubahan beban secara tiba-tiba. Kombinasi antara metode PID klasik dan tuning fuzzy Mamdani terbukti efektif dalam menyesuaikan parameter kontrol secara real-time, menghasilkan sistem yang responsif dan stabil untuk aplikasi pembangkit listrik tenaga pikohidro.

5.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, berikut adalah saran perbaikan dan pengembangan dari sistem kendali stabilitas tegangan pada keluaran PLTPH :

1. Penambahan fitur log data otomatis ke SD Card atau komunikasi ke PC untuk mempermudah evaluasi performa sistem dari waktu ke waktu. Ini akan sangat bermanfaat jika sistem diimplementasikan secara nyata di pembangkit pikohidro jarak jauh.
2. Tambahkan sensor arus untuk memantau daya secara lebih akurat. Ini juga memungkinkan Anda melakukan power control bukan hanya voltage control, terutama jika sistem dikembangkan untuk skala lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. P. Ardiansyah, R. H. B. Ash Siddiq, and N. N. Suryaman, "Pengembangan pembangkit listrik tenaga pikohidro dengan jenis turbin vertikal pada saluran terbuka dengan hambatan," *JITEL (Jurnal Ilm. Telekomun. Elektron. dan List. Tenaga)*, vol. 4, no. 1, pp. 95–104, 2024, doi: 10.35313/jitel.v4.i1.2024.95-104.
- [2] A. Lubis, "Energi Terbarukan Dalam Pembangunan Berkelanjutan," *J. Tek. Ling.*, vol. 8, no. 2, pp. 155–162, 2007.
- [3] I. A. Sunardi, "Pembuatan Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro," 2017, pp. 1–16, 2000.
- [4] M. S. Ummah, "Energi Terbarukan Dalam Pembangunan Berkelanjutan" *Sustain.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–14, 2019, [Online].
- [5] Sunarno and Rohmad, "Simulasi Dan Analisis Respon Fuzzy Logic Controller Pada Sistem Suspensi," *J. Fis.*, vol. 5, no. 2, 2015.
- [6] P. D. Lestari and Abdul Hadi, "Desain PI Controller menggunakan Ziegler Nichols Tuning pada Proses Nonlinier Multivariabel," *Semin. Nas. Teknol. Inf. Komun. dan Ind.* 4, pp. 439–446, 2012.
- [7] P. Jati, J. Fisika, F. Matematika, D. Ilmu, and P. Alam, "Physics Communication Simulasi kendali proportional integral derivative dan logika fuzzy pada sistem eksitasi automatic voltage regulator dengan simulink Matlab Info Artikel," *Phys. Comm*, vol. 1, no. 1, p. 93, 2017, [Online]. Available: <http://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/pc>
- [8] R. K. Chauhan, B. S. Rajpurohit, R. E. Hebner, S. N. Singh, and F. M. G. Longatt, "Design and analysis of PID and fuzzy-PID controller for voltage control of DC microgrid," *Proc. 2015 IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia, ISGT ASIA 2015*, 2015, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2015.7387019.
- [9] L. Wang, M. Tian, and Y. Gao, "Fuzzy self-adapting PID control of PMSM servo system," *Proc. IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2007*, vol. 1, pp. 860–863, 2007, doi: 10.1109/IEMDC.2007.382781.
- [10] C. B. Prasetyo, G. V. Golwa, T. I. Kusuma, and M. A. Jabar, "Rancang Bangun Prototipe Turbin Archimedes Untuk Tangki Air Perumahan Dengan Formulasi Chris Rorres," *J. Teknol. dan Inov. Ind.*, vol. 03, no. 01, pp. 32–039, 2022.
- [11] D. Sulaiman, W. Romadhoni, and P. Purnama, "Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hydro Pada Anak Sungai di Bulungan," *J. Kumparan Fis.*, vol. 4, no. 1, pp. 61–66, 2021, doi: 10.33369/jkf.4.1.61-66.
- [12] R. Birdayansyah, N. Sudjarwanto, and O. Zebua, "Pengendalian Kecepatan Motor DC Menggunakan Perintah Suara Berbasis Mikrokontroler Arduino," *Electr. – J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 9, no. 2, pp. 97–107, 2015.
- [13] J. Li *et al.*, "Study on Sand Wear Testing and Numerical Simulation of a 500 MW Class Pelton Turbine," *Water (Switzerland)*, vol. 17, no. 3, 2025, doi:

- 10.3390/w17030317.
- [14] C. Insani, "Rancang Bangun Turbin Reaksi Pada Sungai Taman Kota 2 Dengan Model Aliran Vortex," *J. Tek. Mesin ITI*, vol. 5, no. 2, p. 79, 2021, doi: 10.31543/jtm.v5i2.587.
 - [15] A. Sugiri, H. Burhanuddin, and E. Trinando, "Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) pada sungai Arter Desa Hurun Kecamatan Padang Cermin Kabupaten Pesawaran Lampung," *J. Mech.*, vol. 4, no. 2, pp. 32–37, 2013.
 - [16] H. H. T. Lukas, Daniel Rohi, "Studi Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) di Daerah Aliran Sungai (DAS) Brantas," *J. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 17–23, 2017, doi: 10.9744/jte.10.1.17-23.
 - [17] S. Gautam Dabale, P. Subhash Mahure, and C. G. Deshmukh, "International Journal of Research Publication and Reviews Belts Drives and its Types," *Int. J. Res. Publ. Rev.*, vol. 2, no. 12, pp. 282–287, 2021, [Online]. Available: www.ijrpr.com
 - [18] "SIMULASI PENGENDALI P. I. D. FUZZY.pdf."
 - [19] K. T. Elektronika, "PENERAPAN METODE KENDALI PID (PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE) PADA ROBOT KESEIMBANGAN BERODA DUA SKRIPSI Disusun Oleh : BAYU WIRAWAN INDARTO ABSTRAK PENERAPAN METODE KENDALI PID (PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE) PADA ROBOT KESEIMBANGAN," 2017.
 - [20] H. W. Fahruri, W. Aribowo, M. Widyartono, and A. C. Hermawan, "Monitoring Arus, Tegangan, Suhu pada Prototype Thermoelectric Generator Berbasis IoT," *J. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 137–144, 2021, [Online]. Available: <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/JTE/article/view/36876%0Ahttps://ejournal.unesa.ac.id/index.php/JTE/article/download/36876/32821>
 - [21] Haryanto, D. Anis Anggraini, M. Ulum, and A. Fiqhi Ibadillah, "Image Processing Based Aquaponics Monitoring System," *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 37–59, 2021, doi: 10.21070/jeeeu.v5i1.1220.
 - [22] A. Hilal and S. Manan, "Pemanfaatan Motor Servo Sebagai Penggerak Cctv Untuk Melihat Alat-Alat Monitor Dan Kondisi Pasien Di Ruang Icu," *Gema Teknol.*, vol. 17, no. 2, pp. 95–99, 2015, doi: 10.14710/gt.v17i2.8924.
 - [23] A. Supendi and M. Fitri, "Pemilihan Spesifikasi Komponen Alat Uji Prestasi Pompa Menggunakan Metode Analisis Persamaan Bernoulli," *J. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 1, p. 42, 2022.
 - [24] Z. Huo and X. Wang, "Position control of servo press system based on fuzzy PID," *Proc. 2012 24th Chinese Control Decis. Conf. CCDC 2012*, pp. 4068–4073, 2012, doi: 10.1109/CCDC.2012.6244649.
 - [25] S. Z. He, S. Tan, F. L. Xu, and P. Z. Wang, "Fuzzy self-tuning of PID controllers," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 56, no. 1, pp. 37–46, 1993, doi: 10.1016/0165-0114(93)90183-I.
 - [26] A. Sebastião, C. Lucena, L. Palma, A. Cardoso, and P. Gil, "Optimal tuning of scaling factors and membership functions for mamdani type PID fuzzy controllers," *Proc. - 2015 Int. Conf. Control. Autom. Robot. ICCAR 2015*, pp. 92–96, 2015, doi: 10.1109/ICCAR.2015.7166009.

- [27] J. Jassbi, S. H. Alavi, P. J. A. Serra, and R. A. Ribeiro, "Transformation of a mamdani FIS to first order sugeno FIS," *IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst.*, vol. 516, 2007, doi: 10.1109/FUZZY.2007.4295331.
- [28] M. Mizumoto, "Realization of PID controls by fuzzy control methods," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 70, no. 2–3, pp. 171–182, 1995, doi: 10.1016/0165-0114(94)00215-S.
- [29] Y. Zhang, J. Chen, C. Bingham, and M. Mahfouf, "A new adaptive Mamdani-type fuzzy modeling strategy for industrial gas turbines," *IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst.*, pp. 1599–1603, 2014, doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2014.6891815.
- [30] J. M. Won, S. Y. Park, and J. S. Lee, "Parameter conditions for monotonic Takagi-Sugeno-Kang fuzzy system," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 132, no. 2, pp. 135–146, 2002, doi: 10.1016/S0165-0114(02)00121-5.
- [31] G. Calcev, "Some remarks on the stability of Mamdani fuzzy control systems," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 6, no. 3, pp. 436–442, 1998, doi: 10.1109/91.705511.