

**ANALISIS PERBANDINGAN PERFORMA *PID* CONTROLLER DAN
FUZZY-PID CONTROLLER PADA MICROGRID DALAM MENJAGA
KESTABILAN FREKUENSI AKIBAT FLUKTUASI BEBAN DAN
PEMBANGKIT INTERMITEN**

(Skripsi)

**Oleh
Aymanul Fadillah
2015031011**



**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik
Universitas Lampung
Bandar Lampung
2024**

ABSTRAK

ANALISIS PERBANDINGAN PERFORMA *PID* CONTROLLER DAN *FUZZY-PID* CONTROLLER PADA MICROGRID DALAM MENJAGA KESTABILAN FREKUENSI AKIBAT FLUKTUASI BEBAN DAN PEMBANGKIT INTERMITEN

Oleh

AYMANUL FADILLAH

Kemampuan mempertahankan (*Robustness*) nilai frekuensi nominal pada sistem tenaga listrik sangat penting untuk operasi yang aman dan andal. Sistem tenaga listrik harus mampu mengatasi perubahan beban dan mempertahankan frekuensi dalam batas yang diizinkan, serta mencapai nilai frekuensi nominal dengan cepat saat terjadi perubahan pembebanan. Pengaruh Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber daya yang bersifat intermiten dan meningkatnya penetrasi energi terbarukan dalam sistem tenaga listrik menambah tantangan tersendiri dalam menjaga osilasi frekuensi serendah mungkin. PLTS, dengan sifatnya yang fluktuatif, dapat menyebabkan variasi daya yang signifikan dan mempengaruhi nilai frekuensi sistem. *Load Frequency Control (LFC)* berperan dalam menjaga nilai referensi frekuensi pada *set point* tertentu dalam menghadapi fluktuasi beban serta pengaruh dari pembangkit intermiten. Berbagai metode telah diusulkan untuk menyelesaikan tantangan ini, dari pendekatan konvensional hingga teknik *modern*. Penelitian ini mengusulkan penggabungan kontrol *PID* konvensional dengan *Fuzzy-PID* sebagai kontrol *modern* untuk meningkatkan respons terhadap perubahan beban. Hal ini dapat dilihat dari parameter seperti peningkatan nilai *rise time* yang cepat dalam merespons fluktuasi frekuensi serta minimnya nilai *undershoot* dan *overshoot*. *Fuzzy-PID* dapat menyesuaikan parameter *PID* secara dinamis berdasarkan kondisi operasional yang berubah, sehingga diharapkan dapat memperbaiki waktu pemulihan frekuensi saat terjadi perubahan beban yang signifikan.

Kata kunci: *Fuzzy-PID Controller*, Intermiten, *Load Frequency Control*, Fluktuasi Beban.

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF *PID* CONTROLLER AND *FUZZY-PID* CONTROLLER ON MICROGRID IN MAINTAINING FREQUENCY STABILITY DUE TO LOAD FLUCTUATIONS AND INTERMITTENT GENERATION

By

AYMANUL FADILLAH

The ability to maintain (Robustness) the nominal frequency value in an electric power system is very important for safe and reliable operation. The electric power system must be able to cope with changes in load and maintain the frequency within permitted limits, as well as reach the nominal frequency value quickly when changes in load occur. The influence of Solar Power Plants (PV) as an intermittent resource and the increasing penetration of renewable energy in the electric power system adds challenges in maintaining the lowest possible frequency oscillations. PV, with its fluctuating nature, can cause significant power variations and affect the system frequency value. Load Frequency Control (LFC) plays a role in maintaining the frequency reference value at a certain set point in the face of load fluctuations and the influence of intermittent generators. Various methods have been proposed to solve this challenge, from conventional approaches to modern techniques. This research proposes combining conventional PID control with Fuzzy-PID as a modern control to improve response to load changes. This can be seen from parameters such as a PID increase in rise time values in response to frequency fluctuations as well as minimal undershoot and overshoot values. Fuzzy-PID can adjust PID parameters dynamically based on changing operational conditions, so it is hoped that it can improve frequency recovery times when significant load changes occur.

Keywords: Fuzzy-PID Controller, Intermittent, Load Frequency Control, Load Fluctuation.

**ANALISIS PERBANDINGAN PERFORMA *PID CONTROLLER* DAN
FUZZY-PID CONTROLLER PADA *MICROGRID* DALAM MENJAGA
KESTABILAN FREKUENSI AKIBAT FLUKTUASI BEBAN DAN
PEMBANGKIT INTERMITEN**

Oleh

Aymanul Fadillah

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

Judul Skripsi

: **ANALISIS PERBANDINGAN PERFORMA
PID CONTROLLER DAN FUZZY-PID
CONTROLLER PADA MICROGRID DALAM
MENJAGA KESTABILAN FREKUENSI
AKIBAT FLUKTUASI BEBAN DAN
PEMBANGKIT INTERMITEN**

Nama Mahasiswa

: **Aymanul Fadillah**

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2015031011

Jurusan

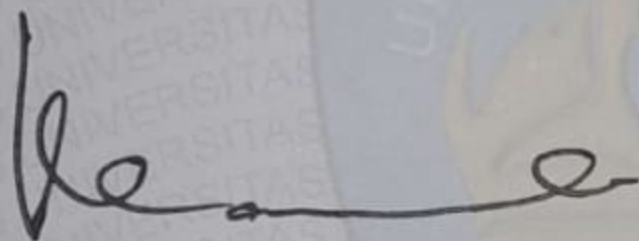
: Teknik Elektro

Fakultas

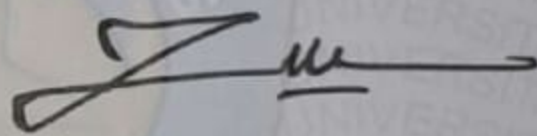
: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



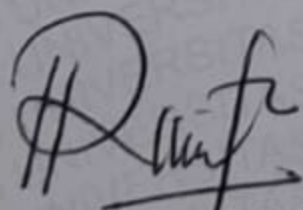
Ir. Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D. Eng
NIP. 19700719 200012 1 001



Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng.
NIP. 19880624 201903 1 015

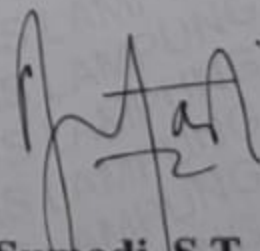
2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro



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

Ketua Program Studi S1 Teknik
Elektro



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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: **Ir. Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D. Eng.**

Sekretaris

: **Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng.**

Penguji

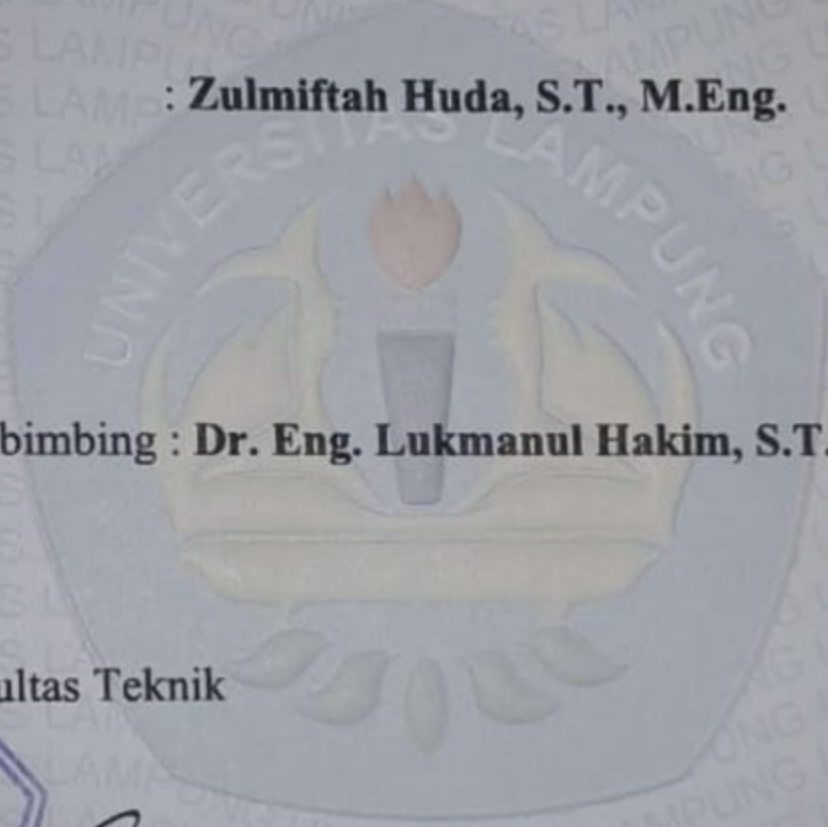
Bukan Pembimbing : **Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.**

2. Dekan Fakultas Teknik

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

NIP. 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **19 Juni 2024**



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, 15 Juli 2024



Aymanul Fadillah
NPM 2015031011

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Mataram Baru, Lampung Timur pada tanggal 28 Juli 2002, sebagai anak pertama dari satu bersaudara, dari bapak Didit Ajiyanto, S.T. dan Ibu Wardah.

Riwayat pendidikan penulis dimulai dari Sekolah Dasar Negeri (SDN) Srimenanti, pada tahun 2008 hingga tahun 2014, Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 1 Metro, pada tahun 2014 hingga tahun 2017, dan Sekolah Menengah Atas Negeri (SMAN) 7 Bandar Lampung pada tahun 2017 hingga tahun 2020.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2020 melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis berkesempatan menjadi asisten dosen mata kuliah Menggambar Teknik dan Praktikum Analisa Sistem Tenaga tahun 2023 dan tergabung dalam keanggotaan asisten Laboratorium Sistem Tenaga Listrik dari tahun 2022. Selain itu, penulis juga tergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) sebagai anggota Departemen Pengembangan Keteknikan Divisi Pengembangan Masyarakat tahun 2021 hingga 2023. Penulis melaksanakan kerja praktik di ULPLTD Teluk Betung yang tergabung dalam divisi Operasi dan Pemeliharaan dan melanjutkan membuat laporan yang berjudul “Analisa Respons Sistem Terhadap Fluktuasi Beban Menggunakan Kontrol Proporsional-Integral (PI) Pada Genset CEM 1-Wdp 5 MW PLTD Teluk Betung”.

**Kupersembahkan
karya ini untuk**

Papah dan Mamah:

Didit Ajiyanto dan Wardah

Serta

Keluarga Besar,

Dosen, Teman dan Almamater

MOTTO

“Dan bersabarlah kamu, sesungguhnya janji ALLAH
adalah benar”

(Ar-Rum: 60)

“Ketahuilah bahwa kemenangan bersama
kesabaran, kelapangan bersama kesempitan, dan
kesulitan bersama kemudahan”

(HR. Tirmidzi)

SANWACANA

Segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Analisis Perbandingan Performa *PID Controller* Dan *Fuzzy-PID Controller* Pada *Microgrid* Dalam Menjaga Kestabilan Frekuensi Akibat Fluktuasi Beban Dan Pembangkit Intermiten” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A. IPM., ASEAN.Eng., selaku Rektor Universitas Lampung
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung
4. Bapak Sumadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung
5. Bapak Ir. Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D. Eng., selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, arahan, motivasi, dan pandangan hidup kepada penulis disetiap kesempatan dengan baik dan ramah.
6. Bapak Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan bimbingan, arahan, nasihat dan motivasi kepada penulis disetiap kesempatan dengan baik dan ramah.
7. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc., selaku dosen penguji yang memberikan kritik, masukan, saran serta motivasi dan pandangan kehidupan kepada penulis disetiap kesempatan dengan baik dan ramah.

8. Bapak Dr. Eng. Ageng Sadnowo Repelianto., S.T., M.T., selaku dosen pembimbing akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan, bimbingan dengan baik dan tulus kepada penulis selama perkuliahan.
9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan pengajaran dan pandangan hidup selama perkuliahan.
10. Staff administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
11. Keluarga Besar HIMATRO Unila serta Hellios 2020
12. Segenap Keluarga Besar Laboratorium Sistem Tenaga Listrik; Pak Rachman atas ilmu dan kerjasamanya selama penulis menjadi asisten laboratorium, Kakak-kakak asisten Lab STL 2018 dan 2019 atas ilmu, bantuan serta pengalamannya; Arnes, Rizki, Ipna dan Syawaludin atas semangat, kerjasama dan bantuannya selama ini; Serta adik-adik 2021, Frisa, Nadia, Desta, Imam, Rasyid, Rasel, Jerry, Tegar, dan Eikel.
13. Rachma Lingga Maulidya selaku teman baik penulis yang selalu memberikan *support* dan selalu menjadi *partner* perkuliahan penulis selama masa perkuliahan
14. Elektrowatie Rachma, Adhiva, Anna, Anisa, dan Anita serta Arnes, Tegar, Ferro, dan Bagus.
15. Keluarga Besar Bapak Muhammad Said, terutama Papah Hilal, Mutama Alwiah, dan Umi Ruqiyah serta Keluarga Besar Bapak Satiman
16. Teman SMA penulis Rizki Lutfiani dan Khairunnisa Lubis yang selalu memberikan semangat kepada penulis
17. Sepupu penulis Aliza, Salma, Qayana, dan Mitha yang selalu memberikan semangat kepada penulis
18. Keluarga Besar SRE Unila
19. Bapak Adam Agustian selaku mentor penulis selama melaksanakan kerja praktik di ULPLTD Teluk Betung yang telah berbagi ilmu kepada penulis

20. Teman-teman KKN Desa Lakaran tahun 2023 serta Bapak dan Ibu kepala
Pekon Lakaran

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

Bandar Lampung, Juli 2024

Aymanul Fadillah

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	ii
SANWACANA.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Rumusan Masalah	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
1.6. Hipotesis.....	4
1.7. Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Penelitian Terdahulu	6
2.2. Stabilitas Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.2.1. Stabilitas Frekuensi Pada Sistem Tenaga Listrik	8
2.2.2. Stabilitas Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik.....	8
2.3. <i>Load Frequency Control (LFC)</i> Multi-Area	8
2.3.1. <i>Load Frequency Control (LFC)</i> dengan mempertimbangkan sumber <i>Renewable Energy</i>	10

2.3.2. <i>Area Control Error</i>	10
2.4. <i>Governor</i>	11
2.5. <i>Diesel Engine</i>	11
2.5.1. <i>Komponen Sistem Utama Pada Diesel Engine</i>	12
2.6. <i>Thermal Turbine</i>	13
2.6.1. <i>Proses Konversi Energi Pada PLTU</i>	13
2.7. <i>PLTS On-Grid</i>	14
2.8. <i>PID Controller</i>	16
2.8.1. <i>Kontrol Proporsional</i>	16
2.8.2. <i>Kontrol Integral</i>	17
2.8.3. <i>Kontrol Derivatif</i>	17
2.9. <i>Fuzzy Logic Controller</i>	18
III. <i>METODOLOGI PENELITIAN</i>	20
3.1. <i>Waktu dan Tempat</i>	20
3.2. <i>Alat Dan Bahan</i>	21
3.3. <i>Metodologi Penelitian</i>	21
3.4. <i>Diagram Pelaksanaan Penelitian</i>	23
3.5. <i>Skema Diagram Load Frequency Control Muli Area</i>	24
3.6. <i>Pemodelan Blok Diagram Load Frequency Control (LFC)</i>	25
3.6.1 <i>Pemodelan Generator</i>	25
3.6.2 <i>Pemodelan Beban</i>	26
3.6.3 <i>Pemodelan Prime Mover</i>	27
3.6.4 <i>Pemodelan Governor</i>	28
3.7. <i>Blok Diagram Load Frequency Control Multi-Area</i>	29
3.7.1. <i>Pemodelan LFC Multi-Area menggunakan PID Controller</i>	29

3.7.2. Pemodelan <i>LFC Multi-Area</i> menggunakan <i>Fuzzy-PID Controller</i>	30
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1. Pengujian Sistem.....	34
4.1.1 Pemodelan Blok Diagram <i>Load Frequency Control PID</i>	35
4.1.2 Pemodelan Blok Diagram <i>Load Frequency Control Fuzzy-PID</i>	38
4.2. Analisis Perbandingan.....	44
4.2.1 Kondisi Ketika terjadi Injeksi PLTS sebagai intermiten dan terjadi perubahan nilai beban.....	44
4.2.1.1 Kondisi Ketika terjadi Injeksi PLTS sebagai intermiten dan terjadi perubahan nilai beban sebesar 10%	44
4.2.1.2 Kondisi Ketika terjadi Injeksi PLTS sebagai intermiten dan terjadi perubahan nilai beban sebesar 20%	47
4.2.1.3 Kondisi Ketika terjadi Injeksi PLTS sebagai intermiten dan terjadi perubahan nilai beban sebesar 30%	50
4.2.2 Kondisi Ketika terjadi Injeksi PLTS sebagai intermiten dan tidak terjadi perubahan nilai beban.....	53
V. KESIMPULAN DAN SARAN	56
5.1. Kesimpulan	56
5.2 Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik.....	7
Gambar 2. 2 <i>Diagram Block Load Frequency Control Multi-Area</i>	9
Gambar 2. 3 <i>Governor Woodward Ug-40</i>	11
Gambar 2. 4 Proses Konversi Energi Pada PLTU	14
Gambar 2. 5 Diagram Blok Sistem PLTS On-Grid	15
Gambar 2. 6 Respon Kontrol <i>PID</i>	16
Gambar 2. 7 Proses <i>Fuzzy Inference System</i>	18
Gambar 3. 1 Diagram Pelaksanaan Penelitian.....	23
Gambar 3. 2 Skema Diagram <i>LFC Multi-Area</i>	24
Gambar 3. 3 Diagram <i>LFC Multi-Area</i>	24
Gambar 3.4 Blok diagram pemodelan <i>Load Frequency Control(LFC)</i>	25
Gambar 3.5 Blok diagram pemodelan generator	26
Gambar 3.6 Blok diagram pemodelan beban.....	27
Gambar 3.7 Blok diagram pemodelan <i>Prime Mover</i>	28
Gambar 3.8 Blok diagram pemodelan <i>governor</i>	28
Gambar 3.9 Pemodelan <i>LFC Multi-Area</i> menggunakan <i>PID Controller</i>	30
Gambar 3. 10 <i>Membership function</i> Input 1	31
Gambar 3. 11 <i>Membership function</i> Input 2	31
Gambar 3. 12 <i>Membership function</i> Output.....	32
Gambar 3. 13 Pemodelan <i>LFC Multi-Area</i> menggunakan <i>Fuzzy-PID Controller</i>	33
Gambar 3. 14 Pemodelan <i>Fuzzy-PID Controller</i>	33
Gambar 4. 1 Simulasi <i>LFC</i> menggunakan <i>PID Controller</i>	37
Gambar 4. 2 Simulasi <i>LFC</i> menggunakan <i>Fuzzy-PID Controller</i>	39
Gambar 4.3 <i>Membership function</i> Input 1	40
Gambar 4. 4 <i>Membership function</i> Input 2	40
Gambar 4.5 <i>Membership function</i> Output.....	41
Gambar 4. 6 Simulasi <i>LFC</i> tanpa pengendali (<i>No Controller</i>)	43
Gambar 4. 7 Grafik perbandingan pada kondisi perubahan beban 10%.....	44

Gambar 4. 8 Grafik perbandingan pada kondisi perubahan beban 20%.....	47
Gambar 4. 9 Grafik perbandingan pada kondisi perubahan beban 30%.....	50
Gambar 4. 10 Grafik perbandingan pada kondisi tidak terjadi perubahan beban.	53

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian.....	20
Tabel 3. 2 Parameter simulasi	29
Tabel 3. 3 Karakteristik <i>Droop</i> Pembangkit	29
Tabel 3. 4 <i>Rule Base Fuzzy-PID</i> pada <i>Load Frequency Control Multi-Area</i>	32
Tabel 4. 1 Parameter Variabel Nilai Input.....	34
Tabel 4. 2 Parameter Nilai <i>PID Controller</i>	36
Tabel 4. 3 <i>Rule Base Fuzzy-PID</i> pada <i>Load Frequency Control Multi-Area</i>	41
Tabel 4. 4 Perbandingan hasil analisis <i>PID Controller</i> , <i>Fuzzy-PID Controller</i> , dan Tanpa <i>Controller</i> ketika terjadi perubahan beban sebesar 0.01p.u.....	46
Tabel 4. 5 Perbandingan hasil analisis <i>PID Controller</i> , <i>Fuzzy-PID Controller</i> , dan Tanpa <i>Controller</i> ketika terjadi perubahan beban sebesar 0.02p.u.....	49
Tabel 4. 6 Perbandingan hasil analisis <i>PID Controller</i> , <i>Fuzzy-PID Controller</i> , dan Tanpa <i>Controller</i> ketika terjadi perubahan beban sebesar 0.03p.u.....	52
Tabel 4. 7 Perbandingan hasil analisis <i>PID Controller</i> , <i>Fuzzy-PID Controller</i> , dan Tanpa <i>Controller</i> ketika tidak terjadi perubahan nilai pembebanan atau <i>No Load Change</i>	55

I. PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang

Dalam sistem tenaga listrik, stabilitas dan kinerja sistem merupakan aspek yang sangat penting untuk pengoperasian yang efisien dan andal. Sistem tenaga listrik harus mampu melayani beban secara terus menerus dengan kualitas pelayanan yang baik seperti tegangan dan frekuensi yang konstan serta mampu mencapai kestabilan dalam waktu yang singkat ketika terjadi perubahan beban [1] Semua sub-sistem yang terhubung ke dalam keseluruhan sistem tenaga listrik harus stabil secara internal dan keseluruhan frekuensi sistem yang dapat dikontrol satu sama lain. Diperlukan sejumlah pengaturan dan penyesuaian dalam menghubungkan sistem tenaga listrik yang saling berhubungan baik dalam suatu sub-sistem tersebut [2]

Salah satu tantangan dalam sistem tenaga listrik adalah perubahan beban yang seringkali tidak dapat diprediksi. Variasi beban dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti fluktuasi permintaan beban ataupun perubahan kondisi lingkungan[3]. Dalam keadaan normal, perbedaan antara daya keluaran dan perubahan beban sesaat pada sistem akan menyebabkan perubahan frekuensi nominal. Jika jumlah daya yang dihasilkan dalam sistem tenaga lebih besar dari jumlah daya yang dibutuhkan, maka kecepatan operasi generator akan meningkat, dimana hal ini akan mempengaruhi nilai frekuensi sistem. Demikian pula, jika jumlah daya dalam sistem berkurang dari kapasitas yang dibutuhkan, frekuensi sistem juga akan berkurang. Jika dilakukan pengendalian pada sistem, frekuensi generator akan dikontrol kembali untuk mengembalikan frekuensi ke level yang diinginkan. Untuk melakukan hal ini, daya dan frekuensi yang dihasilkan dalam

sistem tenaga listrik harus disesuaikan setiap saat, berdasarkan perubahan fluktuasi beban, dimana hal ini disebut dengan *Load Frequency Control (LFC)*[2]

Saat ini telah dilakukan berbagai macam upaya untuk menjaga kestabilan khususnya mengenai masalah variasi pembebanan yang mempengaruhi fluktuasi frekuensi. Berbagai upaya tersebut bermula dari metode konvensional yaitu merancang pengontrol untuk mengendalikan frekuensi beban. Menggunakan metode konvensional untuk mengendalikan frekuensi beban dapat menambahkan pengontrol P (*Proporsional*), I (*Integral*) dan D (*derivative*) ke dalam sistem. Perkembangan pemodelan *modern* meliputi metode kecerdasan buatan atau *artificial intelligence (AI)*, metode tersebut antara lain *Fuzzy-PID logic*, jaringan saraf tiruan, algoritma genetika, dll.[4].

Dalam penelitian ini, penulis akan menggunakan penggabungan antara metode konvensional yaitu menggunakan kontrol *PID* dan juga salah satu pengembangan metode *modern* yaitu *Fuzzy-PID*. Dengan menggunakan metode *Fuzzy-PID* tersebut parameter *PID* dibuat lebih mudah beradaptasi terhadap perubahan beban. Hal tersebut dirancang untuk dapat mengetahui *range error* yang relatif lebih besar. Metode *Fuzzy-PID* berperan sebagai suatu sistem *self tuning* yang memiliki keluaran nilai parameter yang akan digunakan dalam kontrol *PID* sebagai kontrol utama dalam penelitian ini. Diharapkan dengan teknik *tuning* yang digunakan ini dapat dapat meningkatkan waktu pemulihan frekuensi ketika terjadi perubahan beban yang relatif signifikan [5].

1.2.Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan metode *PID Controller*, *Fuzzy-PID Controller*, dan tanpa pengendali (*No Controller*) dalam menjaga nilai frekuensi sesuai dengan nilai *set point* pada sistem *microgrid* yang mencakup pembangkit tenaga uap (PLTU), mesin diesel (PLTD), dan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Serta mengetahui pengaruh perubahan beban dan injeksi pembangkit intermiten terhadap pengaturan nilai *Fuzzy-PID Controller* dan *PID Controller*.

1.3.Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat permasalahan yang harus dipecahkan antara lain perancangan sistem kendali frekuensi menggunakan *PID Controller*, *Fuzzy-PID Controller*, dan tanpa pengendali (*No Controller*) yang dapat diterapkan pada sistem *microgrid* yang mencakup pembangkit tenaga uap (PLTU), mesin diesel (PLTD), dan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Kemudian, bagaimana hasil perbandingan pada nilai osilasi frekuensi akibat perubahan beban dan injeksi pembangkit intermiten menggunakan *PID Controller* dan metode *Fuzzy-PID Controller*.

1.4.Batasan Masalah

Penelitian ini akan membatasi perancangan sistem kendali frekuensi menggunakan *PID Controller*, *Fuzzy-PID Controller*, dan tanpa pengendali (*No Controller*). Batasan ini mencakup pengembangan metode kendali frekuensi yang akan diterapkan pada sistem *microgrid* yang terdiri dari pembangkit tenaga uap (PLTU), mesin diesel (PLTD), dan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Kemudian, penelitian hanya menganalisis pengukuran osilasi frekuensi sebagai parameter evaluasi kinerja sistem kendali frekuensi. Nilai osilasi frekuensi akan digunakan sebagai ukuran efektivitas kedua metode pengendalian.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan pemahaman tentang pengendalian daya aktif dan frekuensi pada sistem tenaga listrik. Penelitian ini menggunakan metode *Fuzzy-PID Controller* dan *PID Controller* untuk menjaga kestabilan sistem tenaga listrik. Dimana dengan menggunakan metode tersebut dapat meningkatkan efisiensi operasi pembangkit listrik dengan cara melakukan pengaturan nilai kontroler yang digunakan. Pengaturan tersebut dilakukan dengan mengatur putaran turbin oleh *governor* sehingga dapat menjaga kestabilan sistem keseluruhan terhadap variasi beban atau gangguan sistem.

1.6 Hipotesis

Metode penggabungan metode konvensional menggunakan kontrol *PID* dengan pengembangan metode *modern* yaitu *Fuzzy-PID* dalam sistem *Load Frequency Control (LFC)* akan menghasilkan peningkatan waktu pemulihan frekuensi sistem ketika terjadi perubahan beban yang signifikan. Penggunaan metode *Fuzzy-PID* digunakan untuk meminimalisasi fluktuasi, memungkinkan parameter *PID* untuk lebih mudah beradaptasi terhadap fluktuasi beban yang lebih besar dan akhirnya akan menghasilkan sistem *LFC* yang lebih efisien dan responsif.

1.7 Sistematika Penulisan

BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan latar belakang, tujuan penelitian, manfaat penelitian, rumusan masalah, hipotesis dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini memaparkan beberapa teori pendukung yang dijadikan sebagai referensi dalam penelitian yang bersumber dari buku manual, jurnal ilmiah dan artikel internet.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan waktu dan tempat, alat dan bahan, pelaksanaan serta pengamatan dalam pengerjaan penelitian tugas akhir.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan hasil data simulasi dan pembahasan dari penelitian tugas akhir ini.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini menjelaskan kesimpulan dari hasil pembahasan masalah yang dikaji dalam penelitian tugas akhir dan berisi saran penulis untuk meningkatkan wawasan bagi pembaca.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Kompleksitas yang semakin meningkat dari sistem tenaga listrik *modern* akibat integrasi sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin. Kompleksitas ini menimbulkan tantangan terkait stabilitas dan kontrol sistem, menjadikan isu penting yang memerlukan peningkatan terus-menerus untuk memastikan tujuan pengontrolan suatu sistem. Sistem tenaga yang terinterkoneksi bertujuan untuk mempertahankan frekuensi dan aliran daya *tie-line* yang stabil pada nilai nominal.

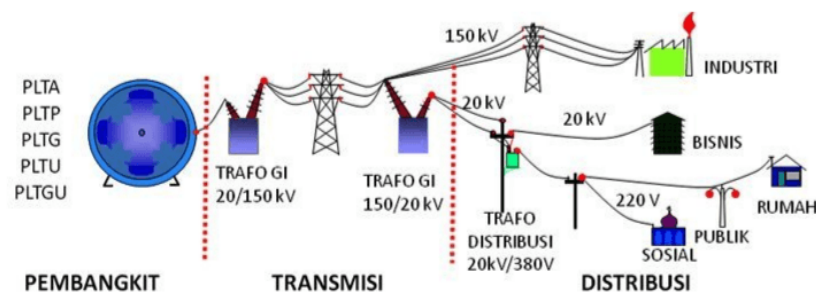
Diem-Vuong Doan *et al.* [6], dalam penelitian “*Load-Frequency Control of Three-Area Interconnected Power Systems with Renewable Energy Sources Using Novel PSO~PID-Like Fuzzy Logic Controllers*” , studi ini membahas strategi *Load Frequency Control (LFC)* menggunakan *Fuzzy Logic Controller* berbasis *Particle Swarm Optimization (PSO) ~ PID*, yang dibandingkan dengan *controller* yang sudah ada seperti *Genetic Algorithm (GA)*, *Bacteria Foraging Optimization Algorithm (BFOA)*, *Fractional Order-PID (FPID)*, dan *PI controller* berbasis *Fuzzy logic*. Penelitian ini bertujuan untuk mendemonstrasikan kelayakan strategi kontrol yang diusulkan melalui hasil simulasi yang diimplementasikan di *Simulink*.

Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah penggunaan algoritma *Particle Swarm Optimization (PSO)* untuk menemukan koefisien optimal K_1 , K_2 , K_3 , K_4 untuk *Fuzzy logic controller* berbasis *PI*. Setelah itu, metode yang diusulkan dibandingkan dengan hasil dari metode dengan *GA-PI*, *BFOA-PI*, *FPID*, dan *Fuzzy PI* untuk memverifikasi kualitas dan kelayakan. Studi kasus dilakukan dengan mempertimbangkan perubahan beban dalam tiga area yang

berbeda. *Controller* yang digunakan menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan solusi yang sudah ada dalam hal kinerja kontrol, waktu penyelesaian, dan waktu puncak deviasi frekuensi. Selain itu, *controller* yang diusulkan juga layak dan dapat diterapkan dalam jaringan tenaga listrik praktis.

2.2. Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Sistem kelistrikan *modern* adalah sistem kompleks yang terdiri dari pembangkit, saluran transmisi dan jaringan distribusi yang beroperasi mentransfer daya dari pusat pembangkit ke pusat beban. Untuk memenuhi tujuan operasional sistem tenaga dibagi menjadi tiga bagian yaitu pembangkit, transmisi dan distribusi yang satu sama lain tidak mungkin terpisah seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

Stabilitas sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai keadaan sistem kembali ke keadaan normal atau stabil setelah terjadi gangguan[7]. Gangguan pada sistem kelistrikan dapat menyebabkan fluktuasi tegangan, frekuensi, dan daya. Suatu sistem tenaga listrik dikatakan stabil apabila memenuhi syarat diantaranya yaitu:

1. Keandalan (*reliability*) yaitu kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus-menerus.
2. Kualitas (*quality*) yaitu kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang diterapkan untuk tegangan dan frekuensi.
3. Kestabilan (*stability*) yaitu kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan.

Untuk jaringan yang sangat kompleks dimana banyak pembangkit saling terhubung, tegangan dan frekuensi harus diperhitungkan agar tidak ada pembangkit yang kelebihan beban sementara pada pembangkit yang lain memiliki beban rendah[8].

2.2.1. Stabilitas Frekuensi Pada Sistem Tenaga Listrik

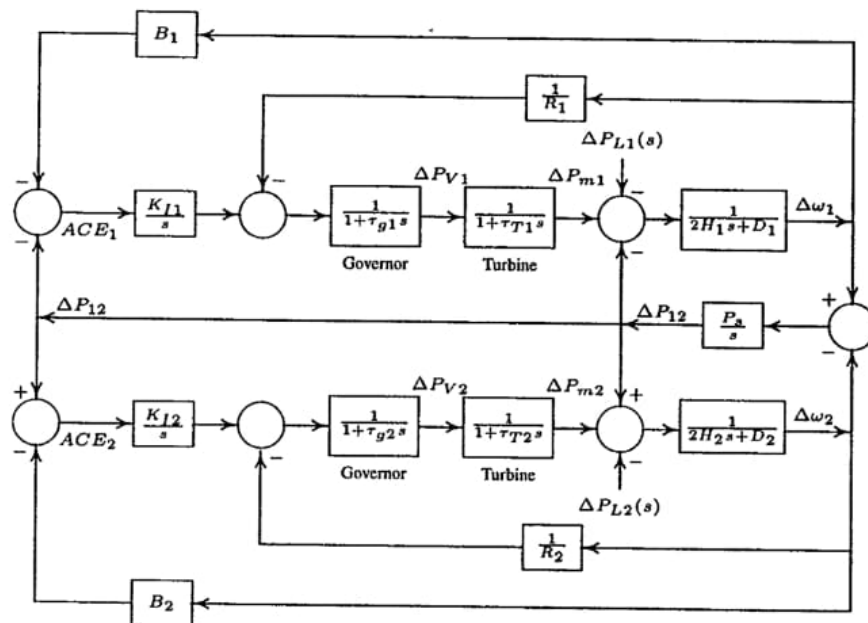
Stabilitas frekuensi mengacu pada kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan frekuensi operasi listrik dalam batas yang ditentukan. Dalam jaringan listrik, frekuensi pengoperasian biasanya diukur dalam hertz (Hz), dan frekuensi ini harus tetap berada dalam rentang yang telah ditentukan untuk menjaga keandalan dan kualitas pasokan listrik. Fluktuasi frekuensi yang besar dapat menyebabkan gangguan pada peralatan listrik dan perangkat yang menggunakan listrik seperti mesin-mesin pabrik dan perangkat elektronika yang sering digunakan dalam rumah tangga. Stabilitas frekuensi dijaga melalui pengendalian pembangkitan yang tepat, pengaturan beban dan pengendalian seluruh jaringan[9]. Ketidakseimbangan antara daya keluaran dan daya yang dikonsumsi beban dapat menyebabkan fluktuasi frekuensi. Oleh karena itu, menjaga stabilitas frekuensi merupakan aspek penting dari pengoperasian jaringan yang andal.

2.2.2. Stabilitas Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan tegangan merujuk pada kemampuan sistem kelistrikan untuk menjaga tegangan operasi dalam batas yang ditentukan, sehingga tegangan yang diberikan kepada peralatan listrik dan beban tetap sesuai dengan nilai yang diinginkan. Stabilitas tegangan sangat penting dalam menjaga keandalan dan kualitas pasokan listrik[7]. Fluktuasi atau ketidakstabilan tegangan dapat berdampak negatif pada peralatan listrik dan perangkat yang terhubung ke jaringan listrik. Dalam beberapa kasus, fluktuasi tegangan yang signifikan dapat mengakibatkan kerusakan peralatan dan gangguan beban. Oleh karena itu, menjaga stabilitas tegangan merupakan aspek penting dari pengoperasian jaringan yang andal.

2.3. Load Frequency Control (LFC) Multi-Area

Load Frequency Control (LFC) multi-area adalah jaringan listrik memiliki banyak area terpisah dengan beban dan kemampuan pembangkit listrik yang berbeda. Tujuan dari *Load Frequency Control (LFC)* adalah untuk memastikan bahwa setiap area dapat mempertahankan frekuensi operasinya dalam batas yang ditetapkan. Sistem *Load Frequency Control (LFC) multi-area* beroperasi dengan mengkoordinasikan aktivitas pembangkitan di beberapa wilayah[9]. Hal ini melibatkan pengumpulan data tentang frekuensi operasi dan beban di setiap area, setelah itu sistem *LFC* mengambil tindakan untuk memastikan keseimbangan antara pasokan dan permintaan listrik. Tindakan ini dapat mencakup penyesuaian keluaran daya pembangkit listrik, pengaturan beban, atau transmisi daya antar wilayah. *Load Frequency Control (LFC) multi-area* merupakan elemen penting dalam menjaga stabilitas dan keandalan jaringan tenaga listrik yang kompleks, terutama pada sistem tenaga listrik yang tersebar di berbagai wilayah. Melalui koordinasi yang lancar antar wilayah, *Load Frequency Control (LFC) multi-area* membantu mencegah fluktuasi frekuensi yang berlebih dan menjaga kestabilan daya pada pembangkit listrik yang saling terhubung.



Gambar 2. 2 Diagram Block Load Frequency Control Multi-Area

2.3.1. Load Frequency Control (LFC) dengan mempertimbangkan sumber Renewable Energy

Dalam energi terbarukan terdapat berbagai konfigurasi sistem tenaga listrik yang dapat diklasifikasikan menjadi sistem ketenagalistrikan *single area* dan *multi-area*. Sistem kelistrikan *single area* adalah sistem terisolasi, sedangkan sistem *multi-area* adalah sistem yang terhubung satu sama lain. Ketidaklinearitas lingkungan dapat mengganggu pengoperasian sistem interkoneksi energi terbarukan yang menyebabkan transisi dan penyimpangan frekuensi[9]. Penggunaan teknologi *modern* dalam produksi, transmisi dan distribusi tenaga listrik membuat pengoperasian sistem kelistrikan menjadi lebih kompleks. Pengendalian kualitas daya dan pengembangan sistem tenaga yang kompleks dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Load Frequency Control (LFC)*. Berbagai strategi pengendalian dan algoritma optimasi telah diusulkan untuk meningkatkan kualitas daya dan respon sistem terhadap gangguan.

Metode pengendalian dalam pengembangan *Load Frequency Control (LFC)*, meliputi pengendalian klasik, pengendalian optimal, pengendalian adaptif, pengendalian struktur variabel, dan pengendalian robust. Restrukturisasi aturan dan regulasi oleh pemerintah telah memperkenalkan deregulasi dalam sistem tenaga, sehingga listrik sekarang diperdagangkan sebagai komoditas, yang menyebabkan masalah gangguan transmisi. Sistem deregulasi *multi-area* menimbulkan masalah gangguan pada transmisi, sehingga diperlukan struktur sistem *Load Frequency Control (LFC)* yang lebih kompeten[10]. Dengan semakin banyak konsumen memasang sistem energi terbarukan di rumah, konsep pembangkitan listrik terdistribusi semakin menjadi hal yang harus diperhatikan. Pembangkitan di berbagai lokasi terisolasi menciptakan masalah kualitas daya yang dapat diatasi dengan menggunakan *Load Frequency Control (LFC)* yang dirancang lebih baik.

2.3.2. Area Control Error

Area Control Error (ACE) dalam *Load Frequency Control* (LFC) adalah suatu ukuran yang menggambarkan ketidakseimbangan antara pembangkitan daya dan konsumsi daya dalam suatu area kontrol pada suatu sistem tenaga listrik. ACE mengindikasikan perbedaan antara pembangkitan daya aktual dan daya beban aktual, termasuk pengaruh perubahan daya antara area kontrol yang berbeda.

Load Frequency Control didasarkan pada *Tie-line Bias Control*, dimana setiap area cenderung mengurangi kesalahan kontrol area (ACE) hingga nol. Kesalahan kontrol untuk setiap area terdiri dari kombinasi linear antara frekuensi dan *tie-line error* [11].

$$ACE_i = \sum_{j=1}^n \Delta P_{ij} + K_i \Delta f \quad (2.1)$$

2.4. Governor

Governor adalah perangkat yang berfungsi untuk menjaga kecepatan putaran mesin pada tingkat tertentu, biasanya diukur dalam *rotating per minute (rpm)* dalam konteks jaringan listrik. Tujuannya adalah untuk menjaga kecepatan putaran mesin agar tetap dalam putaran yang konstan meskipun terjadi fluktuasi beban yang dapat mengubah kecepatan putaran mesin. Kecepatan mesin yang stabil dan andal sangat penting dalam banyak industri dan aplikasi, serta sistem kendali adalah salah satu perangkat utama yang menjaga stabilitas pada sistem tenaga listrik [1].



Gambar 2. 3 Governor Woodward UG-40

2.5. Diesel Engine

Mesin diesel adalah salah satu jenis mesin pembakaran dalam yang secara khusus adalah mesin pemicu pembakaran yang bahan bakarnya dinyalakan oleh suhu tinggi dari udara bertekanan. Mesin diesel ditemukan pada tahun 1892 oleh Rudolf Diesel dari Jerman, yang menerima paten pada tanggal 23 februari 1893. Prinsip kerja mesin diesel adalah mengubah energi kimia menjadi energi mekanik. Energi kimia diperoleh melalui reaksi kimia (pembakaran) dari bahan bakar (solar) dan oksidator (udara) di dalam silinder (ruang bakar). Pembakaran pada mesin diesel terjadi karena temperatur campuran udara dan bahan bakar meningkat akibat adanya kompresi piston hingga mencapai temperatur penyalaan. Motor diesel memiliki perbandingan kompresi sekitar 11:1 hingga 26:1, jauh lebih tinggi dibandingkan motor bakar bensin yang hanya berkisar 6:1 sampai 9:1. Konsumsi bahan bakar spesifik mesin diesel lebih rendah (kira-kira 25%) dibanding mesin bensin namun perbandingan kompresinya yang lebih tinggi menjadikan tekanan kerjanya juga tinggi [12].

2.5.1. Komponen Sistem Utama Pada *Diesel Engine*

- Sistem bahan bakar utama
Sistem ini berfungsi sebagai penyaluran bahan bakar untuk setiap bagian silinder.
- Sistem udara masuk
Pada sistem ini penyaluran aliran udara akan diatur yang akan digunakan sebagai pendingin temperatur mesin.
- Sistem pendinginan (*cooling system*)
Sistem pendinginan ini berfungsi untuk mengurangi temperature mesin.
- Sistem penggerak awal (*prime mover*)
Pada sistem ini memungkinkan mesin berputar dan berjalan sampai terjadi pembakaran.
- Sistem pelumasan
Sistem ini berfungsi untuk mengurangi gesekan dan panas pada mesin.

- Sistem pembuangan gas

Sistem ini berfungsi sebagai saluran gas buang dan udara panas hasil pembakaran yang terjadi di mesin [13].

2.6. Thermal Turbine

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang menggunakan uap sebagai bahan utama untuk menghasilkan energi mekanik. Proses yang melibatkan perubahan energi panas menjadi energi mekanik dengan memanaskan air untuk menghasilkan uap. Uap yang dihasilkan kemudian digunakan untuk memutar turbin, yang selanjutnya memutar generator untuk menghasilkan energi listrik[14].

PLTU memiliki beberapa komponen utama antara lain tungku, boiler, turbin, dan generator. Tungku adalah tempat terjadinya pembakaran bahan bakar fosil sehingga menghasilkan panas yang tinggi. Panas ini kemudian digunakan untuk memanaskan air di dalam boiler. Uap yang dihasilkan dari air panas dikirim ke turbin untuk diubah menjadi energi mekanik dengan memutar generator. Generator menghasilkan energi listrik yang kemudian didistribusikan melalui jaringan listrik.

2.6.1. Proses Konversi Energi Pada PLTU

Proses konversi energi pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) melibatkan serangkaian langkah untuk mengubah energi panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar menjadi energi listrik.

- Pembakaran bahan bakar

Proses dimulai dengan pembakaran bahan bakar, seperti batu bara, minyak, atau gas alam, dalam tungku pembakaran atau *boiler*. Pembakaran ini menghasilkan panas tinggi dan gas buang, termasuk karbon dioksida (CO₂) dan uap air.

- Pemanasan air

Panas yang dihasilkan dari pembakaran digunakan untuk memanaskan air dalam *boiler*. Air dipanaskan hingga membentuk uap yang memiliki tekanan dan suhu tinggi.

- Penggerak turbin

Uap yang dihasilkan dari air panas dialirkan ke turbin.

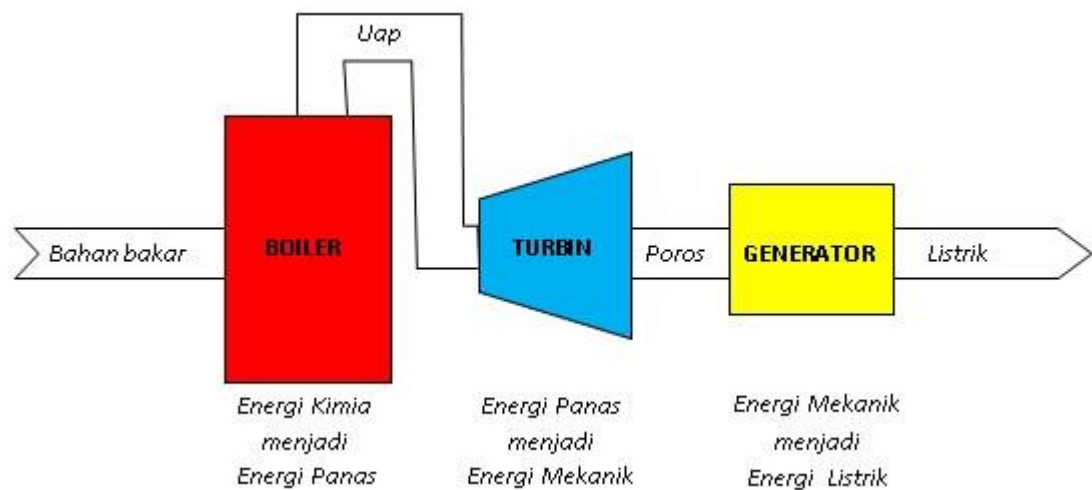
- Pemutar generator

Uap yang mengalir melalui turbin menyebabkan pemutaran generator. Pemutaran generator menghasilkan energi mekanik.

- Konversi energi mekanik ke listrik

Energi mekanik yang dihasilkan oleh pemutaran generator diubah menjadi energi listrik. Proses ini memanfaatkan prinsip elektromagnetik untuk menghasilkan arus listrik bolak-balik (AC).

Proses ini akan menghasilkan suatu sistem yang efisien dalam mengonversi energi paas menjadi energi listrik yang dapat digunakan [15].

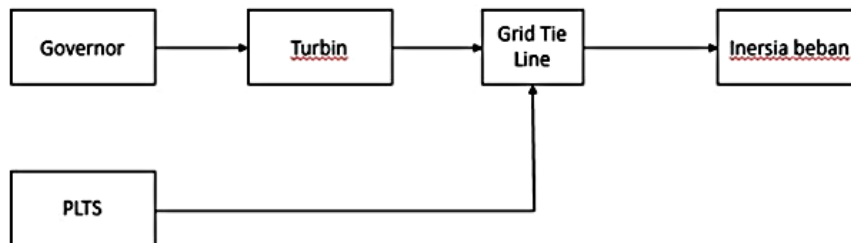


Gambar 2. 4 Proses Konversi Energi Pada PLTU

2.7. PLTS On-Grid

PLTS *on-grid* merupakan pembangkit listrik tenaga surya yang terhubung ke jaringan listrik, dalam hal ini jaringan listrik pln. Sistem pembangkit listrik tenaga

surya yang terhubung mencakup modul panel surya, *inverter*, baterai (opsional) dan kwh meter *impor/ekspor*. Output sistem PLTS sangat bergantung pada radiasi matahari dan suhu [16].



Gambar 2. 5 Diagram Blok Sistem PLTS On-Grid

Adapun tujuan dari PLTS *on-grid* dalam mempertahankan kestabilan frekuensi dsalam jaringa antara lain:

- Dinamika frekuensi

PLTS *on-grid* harus mampu merespons perubahan dalam produksi atau konsumsi daya untuk menjaga frekuensi jaringan agar tetap stabil. Perubahan dalam beban listrik atau produksi PLTS dapat memengaruhi frekuensi jaringan.

- Inverter sebagai pusat pengendalian

Inverter pada PLTS berperan penting dalam *Load Frequency Control (LFC)*. Inverter harus dapat mengontrol aliran daya yang disalurkan ke jaringan sesuai dengan kebutuhan.

- Koordinasi dengan grid

PLTS *on-grid* harus dapat berkoordinasi dengan operasi jaringan listrik umum. Ini mencakup komunikasi dua arah di antara PLTS dan penyedia listrik lokal untuk memastikan keseimbangan energi.

- Adaptasi terhadap variabilitas surya

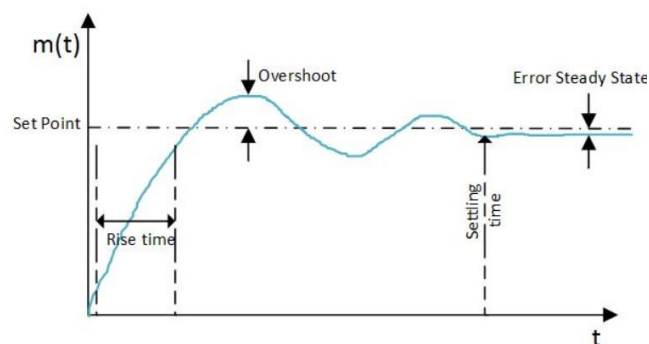
PLTS *on-grid* harus dapat mengatasi variabilitas dalam produksi energi surya, seperti perubahan mendadak dalam intensitas cahaya matahari. Ini memerlukan

pengaturan yang cerdas untuk mengoptimalkan penggunaan energi dan menjaga keseimbangan jaringan.

2.8. *PID Controller*

Sistem kendali *PID* (*Proportional, Integral, Derivative*) adalah *controller* untuk menentukan akurasi sistem peralatan dengan karakteristik adanya umpan balik pada sistem. Sistem kontrol *PID* mencakup tiga mode penalaan, yaitu kontrol P (proporsional), D (turunan) dan I (integral), masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Saat diterapkan, setiap saluran dapat bekerja secara mandiri atau kombinasi.

Controller PID adalah salah satu metode kontrol yang paling umum digunakan di industri dan diterima secara luas di industri. *Controller PID* sangat populer karena kinerjanya yang baik dan kuat di bawah kondisi pengoperasian yang berbeda dan juga karena pengoperasiannya yang sederhana yang memungkinkan operator untuk mengoperasikannya secara sederhana dan mudah. *Controller PID* sangat cocok digunakan pada kontrol dengan konfigurasi input tunggal dan *output* tunggal, namun bukan berarti *controller PID* tidak dapat digunakan pada konfigurasi lain dimana ada cara penanganannya. Pengontrol dalam konfigurasi lain.



Gambar 2. 6 Respon Kontrol *PID*

2.8.1. Kontrol Proporsional

Kontrol proporsional adalah pengontrol yang *output*nya sebanding dengan kesalahan input secara sederhana, *output* dari kontrol proporsional adalah produk

dari input sebagai kesalahan dengan konstanta/parameter skala. Kontrol proporsional memiliki persamaan berikut:

$$P(t) = k_p e(t) \quad (2.2)$$

Dimana:

$P(t)$: *output* kontrol proporsional,

K_p : konstanta/ parameter proporsional, dan

$E(t)$: error yang merupakan selisih antara setpoint dan nilai aktualnya.

2.8.2. Kontrol Integral

Kontrol integral digunakan untuk menghilangkan kesalahan keadaan tunak yang tidak dapat dihilangkan oleh *controller* proporsional, kontrol integral tidak dapat berdiri untuk bekerja sendiri karna karakteristiknya yang lambat. Prinsip pengontrol ini mirip dengan subjek integral yang mengalami perubahan kuat. Keluaran dari pengontrol ini adalah jumlah masukan yang kontinu sebagai kesalahan. Jika sinyal *error* pada input tidak berubah, *output* akan tetap dalam keadaan yang sama seperti sebelum input diubah. Persamaan dari *controller* integral adalah sebagai berikut:

$$I_{out} = k_i \int_0^t e(t) d\tau \quad (2.3)$$

Dimana:

K_i : konstanta integral, dan

E : input yang berupa *error*.

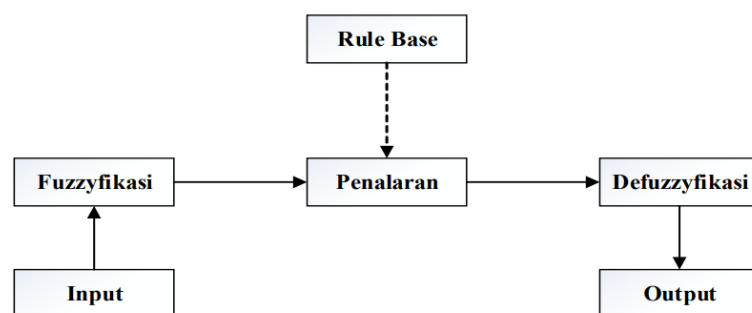
2.8.3. Kontrol Derivatif

Kontrol derivatif adalah jenis kontrol dengan sifat seperti operasi turunan, perubahan input kontrol yang tiba-tiba akan menyebabkan perubahan yang sangat besar dan cepat, jika sinyal input tiba-tiba berubah dan meningkat (dalam bentuk fungsi langkah), *output*nya menghasilkan sinyal pulsa. Sedangkan jika sinyal input tumbuh perlahan seperti sinyal ramp, *output*nya seperti fungsi step, amplitudonya dipengaruhi oleh laju kenaikan fungsi ramp dan setting konstanta/diferensialnya. Kontrol turunan hanya mengubah nilai keluarannya ketika terjadi perubahan kesalahan sehingga dengan tidak adanya perubahan kesalahan kontrol sulit bereaksi. Dalam kasus ini, pengontrol ini tidak dapat berfungsi sebagai pengontrol yang

berdiri sendiri karena bersifat prediktif dan berubah ketika sinyal kesalahan input berubah.

2.9. Fuzzy Logic Controller

Fuzzy Logic adalah metode pemecahan masalah dengan operasi *rule base* yang dapat memproses sejumlah input dan *output* pada sistem *non-linier* dan sistem yang kompleks[17].



Gambar 2. 7 Proses *Fuzzy Inference System*

Rule base dalam *Fuzzy logic* adalah komponen dasar yang menentukan hubungan antara variabel masukan (*input*) dan variabel keluaran (*output*) yang sesuai. Ini terdiri dari sejumlah aturan. Setiap aturan biasanya mengikuti struktur "*if-else*," menyatakan pernyataan linguistik tentang hubungan antara himpunan *Fuzzy* masukan dan himpunan *output Fuzzy*.

- *Rule base*

Basis aturan terdiri dari kumpulan aturan seperti itu. Beberapa aturan dalam basis aturan secara kolektif menentukan perilaku sistem *Fuzzy logic*.

- *Rule evaluation*

Ketika sistem *Fuzzy logic* menerima nilai masukan, aturan dalam basis aturan dievaluasi berdasarkan derajat keanggotaan nilai masukan ke himpunan *Fuzzy*.

- *Aggregation of rule*

Nilai keluaran *Fuzzy* dari beberapa aturan diagregasi untuk membentuk keluaran *Fuzzy* yang dikombinasikan.

- *Deffuzification*

Keluaran *Fuzzy* yang diagregasi kemudian didefuzzifikasi untuk mendapatkan keluaran yang jelas dan dapat diimplementasikan

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian tugas akhir ini dimulai sejak Oktober 2023 dan selesai pada Mei 2024, bertempat di laboratorium Sistem Tenaga Listrik (STL) jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Adapun jadwal penelitian seperti pada table 3.1

Tabel 3. 1 Jadwal Penelitian

[illegible]

3.2. Alat Dan Bahan

Penelitian tugas akhir ini menggunakan satu unit laptop dengan spesifikasi; *processor intel (r) core i7-4700mq cpu @2.40 ghz* (8 cpus), memori sebesar 16384 mb ram, dengan *operating system windows 10 64-bit*; perangkat lunak *matlab r2020a* untuk melakukan simulasi; dan *single line diagram Load Frequency Control (LFC) multi-area power system* sebagai data masukan.

2.5 Metodologi Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan dan mempelajari serta mengkaji literatur yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir, yaitu mengenai *Load Frequency Control (LFC) multi-area* menggunakan *PID Controller* dan *Fuzzy-PID Controller*. Literatur tersebut diambil dari berbagai sumber, seperti jurnal ilmiah dan laporan-laporan penelitian terdahulu.

2. Studi Bimbingan

Studi bimbingan dilakukan dengan diskusi untuk menyelesaikan persoalan-persoalan selama penelitian bersama dosen pembimbing mengenai *Load Frequency Control (LFC) multi-area* menggunakan *PID Controller* dan *Fuzzy-PID Controller*.

3. Metodologi

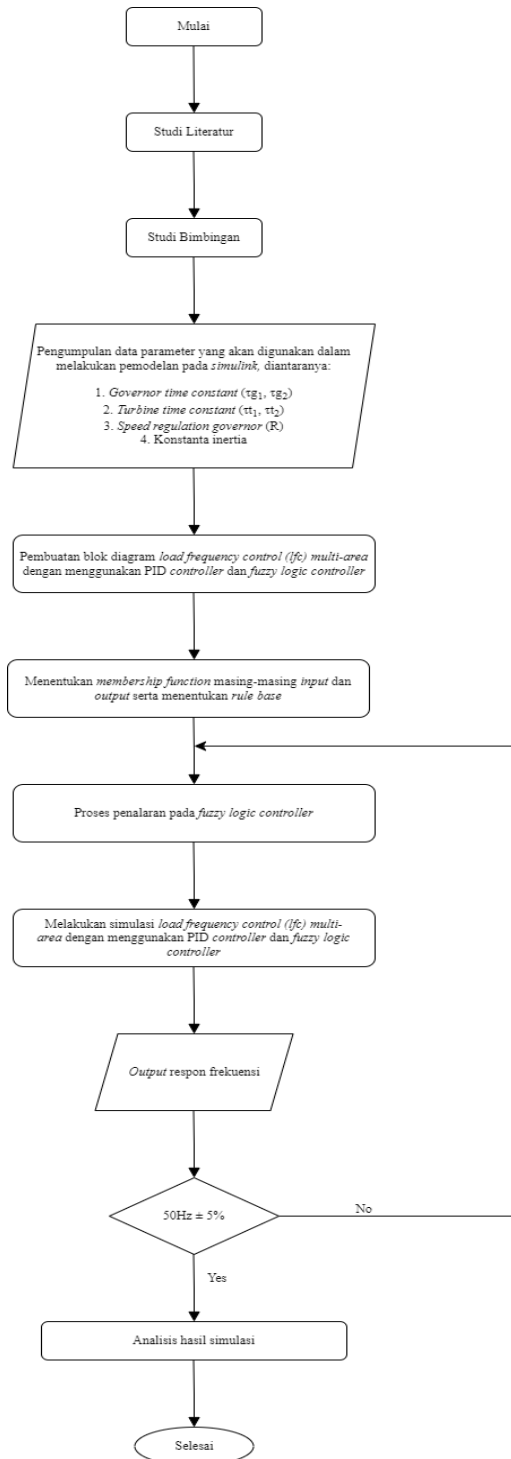
Metodologi yang diusulkan dalam penelitian ini yaitu menggabungkan beberapa pembangkit listrik diantaranya pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD), dan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Hasil simulasi yang akan diukur yaitu osilasi frekuensi. Kontrol sistem yang digunakan yaitu *PID Controller* dan *Fuzzy-PID Controller*, sehingga efektivitas dari metodologi yang diusulkan dapat meningkatkan stabilitas dan efisiensi dari sistem *microgrid* tersebut.

4. Penulisan Laporan

Perancangan penelitian ini dituangkan kedalam sebuah laporan proposal penelitian. Lalu, hasil penelitian ini dituangkan kedalam sebuah laporan akhir penelitian/ skripsi. Laporan ini merupakan dokumentasi pengerjaan penelitian tugas akhir dan dapat dipertanggungjawabkan sebagaimana mestinya.

3.4. Diagram Pelaksanaan Penelitian

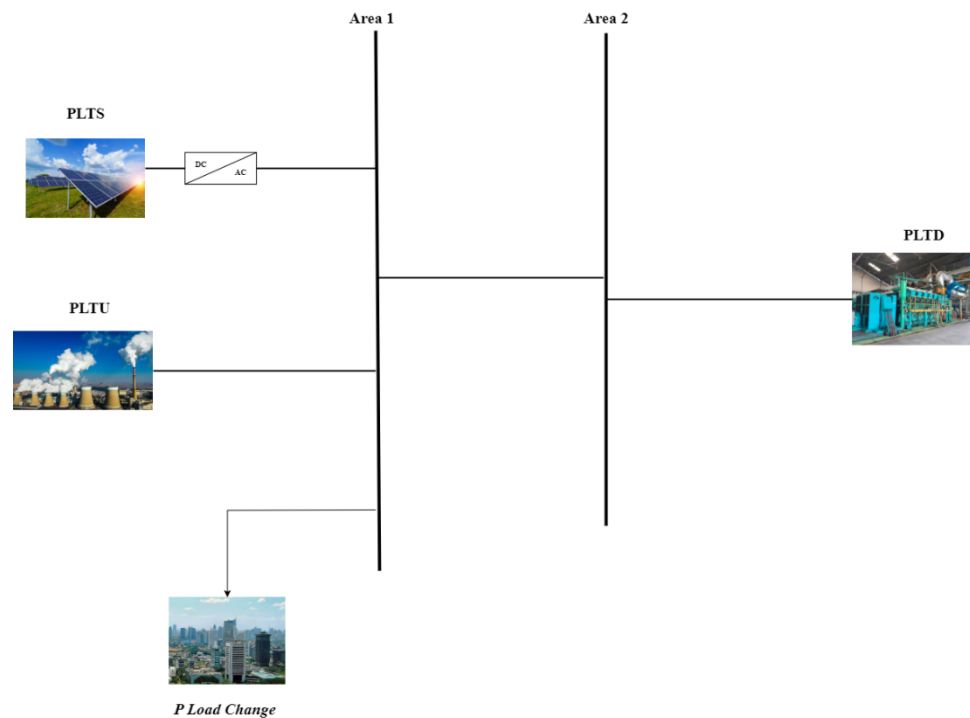
Tahap-tahap pelaksanaan penelitian tugas akhir ini seperti pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram Pelaksanaan Penelitian

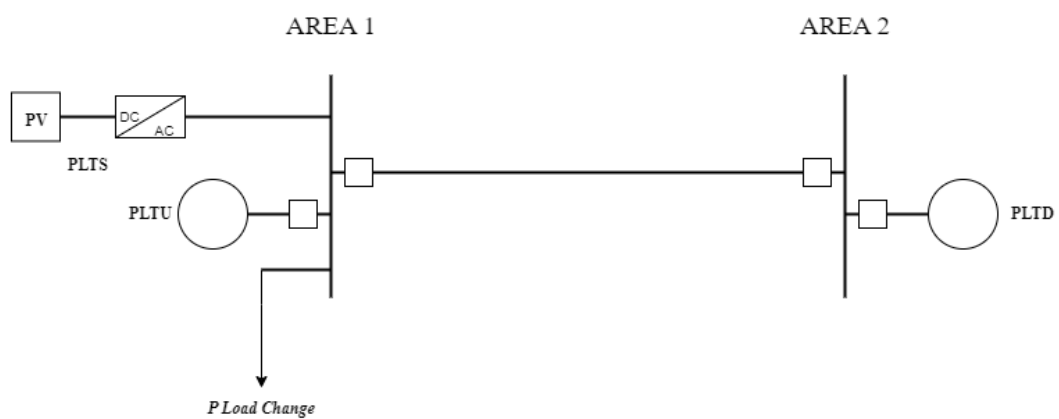
3.5 Skema Diagram Load Frequency Control Multi-Area

Pada penelitian tugas akhir ini, pemodelan dan simulasi yang akan digunakan adalah sebagai berikut



Gambar 3. 2 Skema Diagram LFC Multi-Area

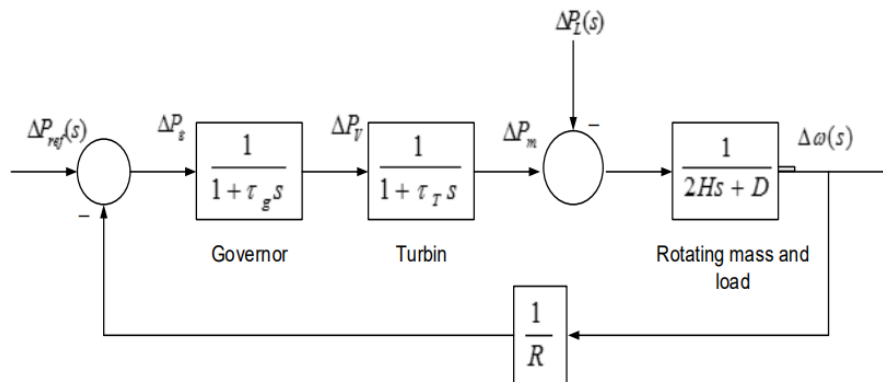
Berikut adalah *one line diagram LFC Multi-Area* yang dapat dilihat pada gambar 3.3 berikut



Gambar 3.3 One Line Diagram LFC Multi-Area

3.6 Pemodelan Blok Diagram *Load Frequency Control (LFC)*

Load Frequency Control (LFC) merupakan suatu sistem yang digunakan untuk menjaga fluktuasi yang ditimbulkan oleh perubahan beban. *Load Frequency Control (LFC)* memiliki tujuan yang harus dicapai dalam pengoperasian sistem tenaga, terutama untuk menjaga variasi frekuensi sistem dalam pembagian beban yang harus dipikul oleh tiap generator selama proses pertukaran daya untuk memenuhi kebutuhan beban.

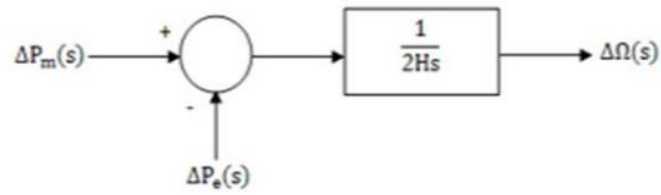


Gambar 3.4 Blok Diagram *Load Frequency Control (LFC)*

Frekuensi merupakan faktor umum yang terdapat pada seluruh sistem, perubahan permintaan di dalam daya aktif pada satu titik akan berakibat terhadap perubahan frekuensi. Oleh karena terdapat banyak generator yang mensuplai daya ke sistem, maka pada pembangkit harus disediakan alokasi perubahan pada permintaan terhadap generator.

3.6.1 Pemodelan Generator

Generator adalah alat pembangkit listrik listrik yang mengubah energi mekanik sebagai input menjadi masukan energi listrik sebagai *output*. Generator terdiri dari dua bagian yaitu bagian yang berputar disebut rotor dan bagian yang tetap disebut stator. Gambar 3.5 merupakan pemodelan blok diagram dari generator



Gambar 3.5 Blok diagram pemodelan generator

Persamaan transfer function untuk blok diagram generator di atas adalah:

$$\frac{2H}{\omega s} = \frac{\varphi^2 \Delta \delta}{\varphi t} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (3.1)$$

Dalam keadaan deviasi kecepatan kecil

$$\frac{\varphi \Delta \frac{\omega}{\omega s}}{\varphi t} = \frac{1}{2H} (\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (3.2)$$

Jika persamaan diatas ditransformasikan ke dalam laplace menjadi:

$$\Delta \Omega (s) = \frac{1}{2Hs} [\Delta P_m (s) - \Delta P_e(s)] \quad (3.3)$$

Dimana:

$\Delta \Omega (s)$:perubahan kecepatan (rad/s)

H :konstanta inersia

$\Delta P_m (s)$:perubahan daya mekanik (Watt)

$\Delta P_e(s)$:perubahan daya akibat beban (Watt)

3.6.2 Pemodelan Beban

Beban pada sistem tenaga listrik terdiri dari gabungan peralatan listrik yang dipasang pada sistem. Untuk beban resistif, seperti pencahayaan dan beban pemanasan, daya listrik tidak bergantung pada frekuensi. Dalam kasus beban motor daya listrik sangat tergantung pada perubahan frekuensi.

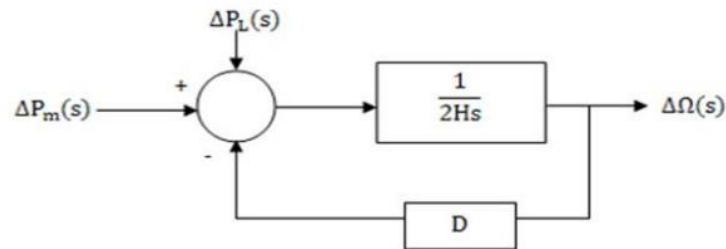
Komponen $\Delta P_e(s)$ merupakan penjumlahan antara komponen frekuensi sensitive ($D\Delta\omega$) dan non-frekuensi sensitive (ΔP_L), seperti pada

$$\Delta P_e(s) = \Delta P_L + D\Delta\omega \quad (3.4)$$

persamaan berikut ini.

Dimana:

- ΔP_L : perubahan *nonfrequency-sensitive load*
 $D\Delta\omega$: perubahan *frequency-sensitive load*
 D : konstanta redaman beban



Gambar 3.6 Blok diagram pemodelan beban

ΔP_m adalah daya mekanis yang disebabkan karena adanya perputaran turbin, ΔP_e merupakan daya elektrik yang dihasilkan oleh adanya perubahan beban. Sedangkan D (redaman) merupakan perubahan beban yang mempengaruhi perubahan frekuensi. Diagram blok beban (*Load*) dapat juga disederhanakan dalam bentuk *gain* dan *time constant* dalam bentuk persamaan sebagai berikut.

$$K = \frac{1}{D} \text{ dan } T = \frac{H}{f(D)} \quad (3.5)$$

Dimana:

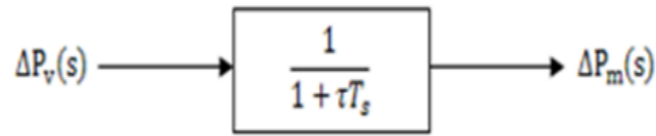
- K : *power system gain (Hz/pu MW)*
 T : *area equivalent generating unit time constant (sec)*
 H : *inertia constant (sec)*

3.6.3 Pemodelan *Prime Mover*

Pemodelan *prime mover* adalah untuk melihat adanya hubungan antara daya mekanik ΔP_m dan perubahan posisi dari katup (*valve*) ΔP_v . Model matematis *prime mover* dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut.

$$G_T = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{1}{1 + \tau Ts} \quad (3.6)$$

Blok diagram *prime mover* dengan persamaan diatas dapat dilihat pada gambar 3.7

Gambar 3.7 Blok diagram pemodelan *Prime Mover*

3.6.4 Pemodelan *Governor*

Model matematis untuk suatu *governor* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta P_g(s) = \Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R} \Delta \Omega(s) \quad (3.7)$$

Dimana:

ΔP_g : daya output governor (Watt)

ΔP_{ref} : daya referensi/acuan (Watt)

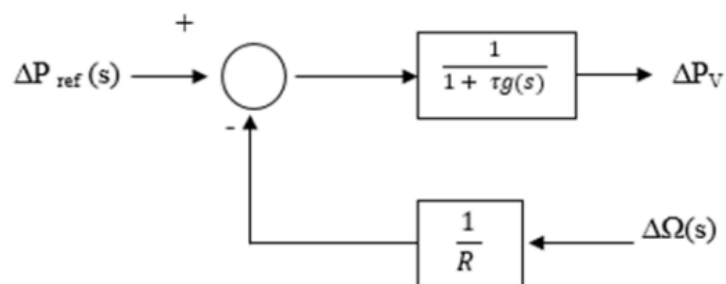
R : speed regulation

$\Delta \Omega(s)$: perubahan kecepatan (rad/s)

Daya output governor ΔP_g tersebut diubah dari penguat hidrolik ke sinyal input posisi katup (*valve*) ΔP_v , sehingga hubungan antara keduanya menjadi persamaan berikut:

$$\Delta P_v(s) = \frac{1}{1 + \tau g} \Delta P_g(s) \quad (3.8)$$

Persamaan diatas dengan τg merupakan konstanta waktu *governor*. Sehingga dapat dari persamaan tersebut dapat digambarkan dalam bentuk digram blok [1], seperti gambar 3.8

Gambar 3.8 Blok diagram pemodelan *governor*

3.7 Blok Diagram Load Frequency Control Multi-Area

Adapun parameter simulasi dapat dilihat pada tabel 3.2 berikut:

Tabel 3. 2 Parameter simulasi

Parameter	Nilai
<i>Power Base</i>	1000 MVA
<i>Max P1</i>	45.5 MVA
<i>Max P2</i>	100 MVA
<i>Max P3</i>	2 MVA
<i>Frequency</i>	50Hz
<i>Load Condition</i>	118.4 MW

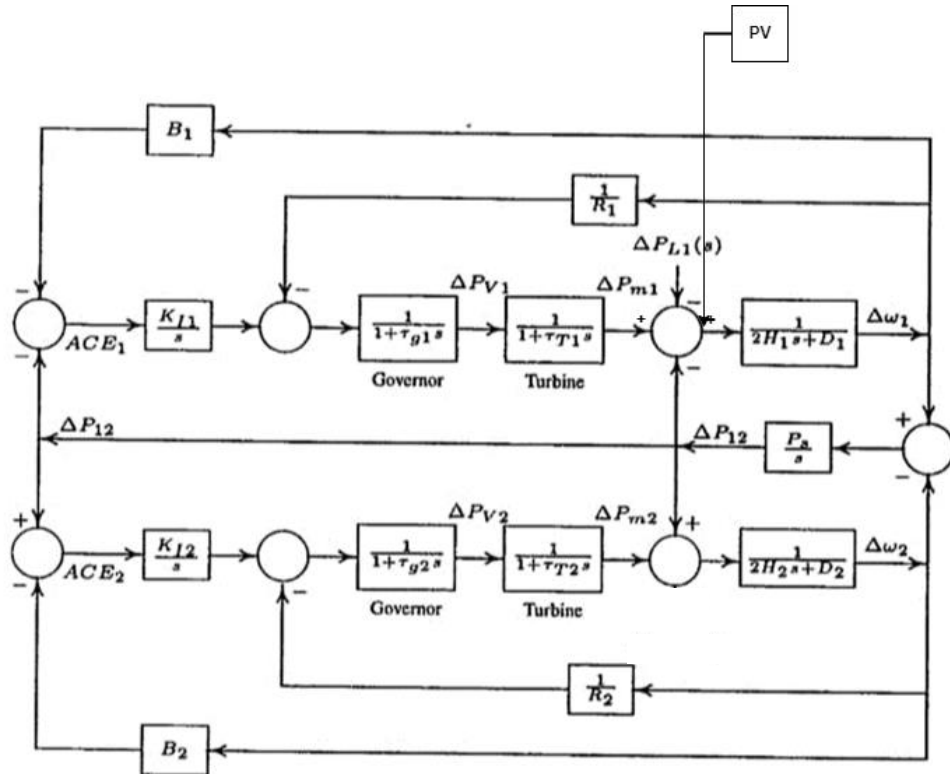
Pada *primary loop control* memiliki parameter karakteristik *droop* (R). Nilai tersebut merupakan perbandingan antara perubahan frekuensi saat *steady state* terhadap perubahan keluaran daya pembangkit.

Tabel 3. 3 Karakteristik *Droop* Pembangkit

Karakteristik <i>Droop</i>	R (p.u Hz/p.u MW)
R1	0.05
R2	0.0625

3.7.1 Pemodelan LFC Multi-Area menggunakan PID Controller

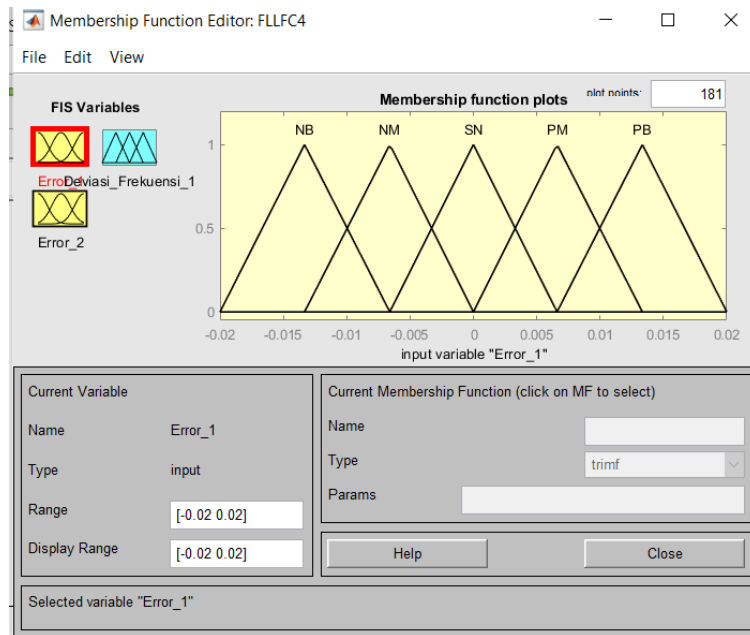
Pemodelan dan simulasi sistem *microgrid* sebagai *Load Frequency Control* menggunakan metode *PID Controller* dilakukan dengan bantuan perangkat lunak (*software*) Matlab. Pada gambar 3.3 merupakan pemodelan sistem yang terdiri dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), mesin diesel, dan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS).



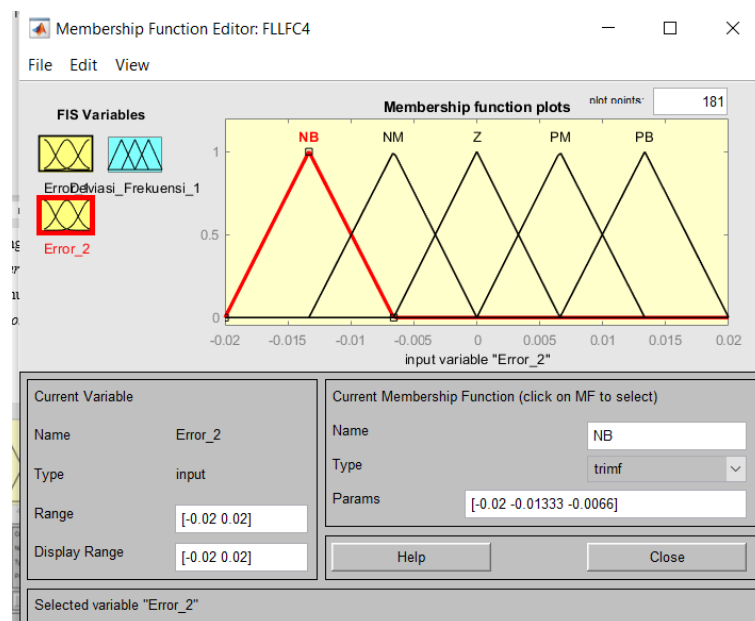
Gambar 3. 9 Pemodelan LFC Multi-Area menggunakan PID Controller

3.7.2 Pemodelan LFC Multi-Area menggunakan Fuzzy-PID Controller

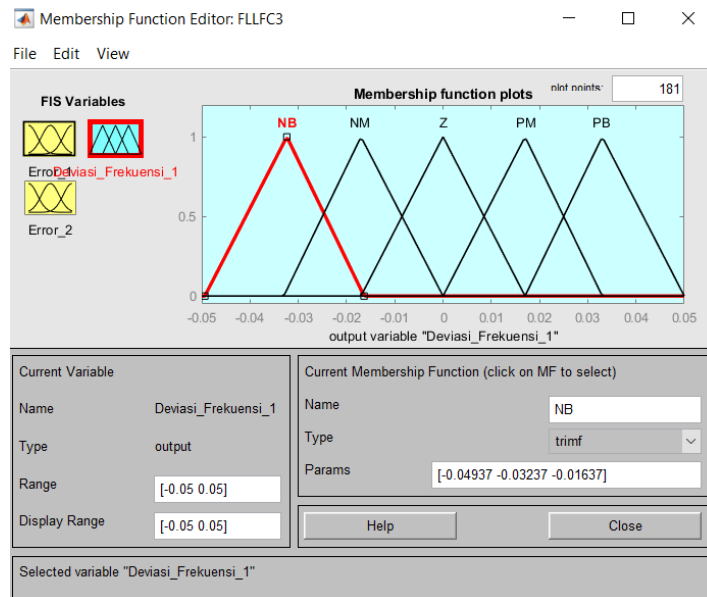
Untuk dapat membuat pemodelan sistem *microgrid* sebagai *Load Frequency Control* menggunakan *Fuzzy-PID Controller*, data yang diperlukan adalah *area control error (ACE)* sebagai input 1, *deviasi area control error (ΔACE)* sebagai input 2 dan batas nilai frekuensi yang diizinkan sebagai output. Sehingga dengan data tersebut dapat disusun *membership function* serta *rule base* dari metode *Fuzzy-PID*. Pada penelitian ini penulis menggunakan 5 *membership function*. Berikut adalah *membership function* masing-masing input dan output yang digunakan.



Gambar 3. 10 Membership function Input 1



Gambar 3. 11 Membership function Input 2



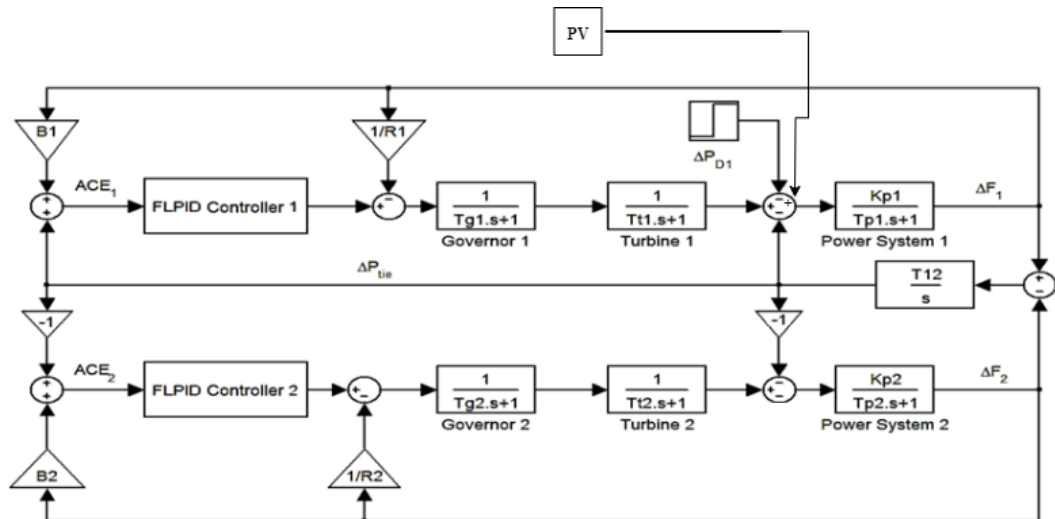
Gambar 3.12 Membership function Output

Setelah menentukan *membership function* tahap berikutnya adalah membuat *rule base* yang menampilkan hubungan antara input 1, input 2 dan *output* yang disebut *interfancing*. Hubungan antara *membership function* tersebut menghasilkan 25 *rule base* yang dapat dilihat pada Tabel 3.2

Tabel 3. 4 Rule Base Fuzzy-PID pada Load Frequency Control Multi-Area

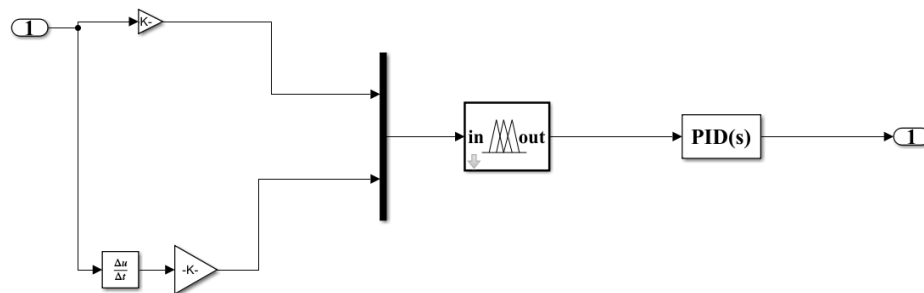
ACE/ Δ ACE	Negative Big (NB)	Negative Medium (NM)	Zero (Z)	Positive Medium (PM)	Positive Big (PB)
Negative Big (NB)	NB	NB	NM	NM	Z
Negative Medium (NM)	NB	NB	NM	Z	PM
Zero (Z)	NB	NM	Z	PM	PM
Positive Medium (PM)	NM	Z	PM	PB	PB
Positive Big (PB)	Z	PM	PM	PB	PB

Kemudian berikutnya adalah membuat pemodelan sistem *microgrid* sebagai *Load Frequency Control* menggunakan *Fuzzy-PID Controller*. Pemodelan tersebut dapat dilihat pada gambar 3.7



Gambar 3. 13 Pemodelan *LFC Multi-Area* menggunakan *Fuzzy-PID Controller*

Dan berikut adalah pemodelan *Fuzzy-PID Controller* pada *Load Frequency Control multi-area* menggunakan *block subsystem* pada *Simulink*.



Gambar 3. 14 Pemodelan *Fuzzy-PID Controller*

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dua skenario yang berbeda, penggunaan *Fuzzy-PID Controller* efektif dalam menjaga nilai frekuensi sesuai dengan nilai *set point* pada sistem tenaga listrik. Ketika terjadi perubahan beban dan injeksi daya dari PLTS, kontrol ini mampu mengembalikan frekuensi secara cepat ke nilai referensi, dan dapat meredam osilasi frekuensi dengan lebih baik dibandingkan dengan *PID Controller* dan kondisi tanpa pengendali (*No Controller*). Skenario kedua yaitu tanpa adanya perubahan beban dan injeksi PLTS, hal ini juga menunjukkan keefektifan *Fuzzy-PID Controller* yang adaptif dan presisi. Kemudian, *PID Controller* menunjukkan keterbatasan dalam meredam osilasi dengan waktu respons yang lebih lambat. Hal ini dapat diamati dari parameter yang digunakan yaitu nilai *overshoot max.*, *undershoot max.*, dan *rise time*. Oleh karena itu, implementasi *Fuzzy-PID Controller* dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan keamanan dan keandalan operasional sistem tenaga listrik.

5.2 Saran

Pada penelitian selanjutnya, diharapkan menggunakan metode pengendalian yang menerapkan jaringan syaraf tiruan, termasuk prediksi saat terjadi perubahan cuaca pada PLTS dengan menggunakan data *real* atau tidak menggunakan asumsi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. M. N. C. Aryanata, I. N. Suweden, Dan I. M. Mataram, “Studi Analisis Governor Sebagai *Load Frequency Control* Pada PLTG Menggunakan *Fuzzy Logic Controller*,” *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, Vol. 17, No. 1, Hlm. 107, Mei 2018.
- [2] M. Rida, ‘Pengendalian Frekuensi Beban Sistem Tenaga Listrik Dua Area Yang Terinterkoneksi Menggunakan Kontrol *Fuzzy Logika* Dan Pengontrol *PID*’ , 2020.
- [3] R. Humamuddin, D. Darmawan, S. Si, R. F. Iskandar, Dan S. Pd, “Kontrol Frekuensi Menggunakan Metode Kontrol Beban Elektronik Dengan Sistem Kontrol *Fuzzy-PI* Pada Pembangkit Listrik Tenaga *Pikohidro*”
- [4] M. D. Noviantara, I. N. Suweden, Dan I. M. Mataram, “Analisis Stabilitas Sistem Tenaga Listrik Dengan *Automatic Generation Control (AGC)* Dua Area Menggunakan *Fuzzy Logic Controller*,” *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, Vol. 17, No. 2, Hlm. 263, Sep 2018.
- [5] A. Zanuvar Rosyidi, I. Pakaya, N. Alif Mardiyah, Dan M. Effendy, “Pengaturan Frekuensi PLTMH Menggunakan *Flow Valve Control* Berbasis *Fuzzy-PI*,” 2018.
- [6] D.-V. Doan, K. Nguyen, F. Kontrol, Dan D. Otomasi, “Kontrol Frekuensi Beban Sistem Tenaga Listrik Yang Terinterkoneksi Tiga Area Dengan Sumber Energi Terbarukan Menggunakan Novel *PSO~PID-Like Fuzzy* Pengontrol Logika,” 2022.
- [7] M. F. Nur, I. C. Gunadin, Dan Z. Muslimin, “Studi Optimalisasi Kinerja PLTB Melalui Pemilihan *Type Generator* Terhadap Stabilitas Sistem Tenaga Listrik (Stabilitas Frekuensi Dan Tegangan) Sulbagsel.”
- [8] M. Ihsan, “*Circle Archive* Sinkronisasi Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Dengan Pembangkit Listrik Tenaga Uap Di PT. Indomas Mitra Teknik.”
- [9] A. Iswahyudi Dan A. T. Alamsyah, “Pemodelan Kendali Frekuensi Beban Pada Pembangkit Tenaga Listrik Surya *On Grid*.”

- [10] Elfizon, E., 2017. Sistem Kendali Governor Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Berbasis Mikrokontroller.
- [11] Haddin, M., Soebagio, S., Soeprijanto, A. And Purnomo, M.H., 2013. *Modeling And Control Of Excitation And Governor Based On Particle Swarm Optimization For Micro Hydro Power Plant. Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics And Control)*, 11(2), Pp.297-304.
- [12] Azadani, H. N., & Torkzadeh, R. (2013, August). Design of GA optimized fuzzy logic-based *PID Controller* for the two area non-reheat thermal power system. In *2013 13th Iranian Conference on Fuzzy Systems (IFSC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [13] Karim, N.A., Purwito, P. And Hamdani, H., 2021, October. Analisis Pengoperasian Governor Sebagai Pengatur Kestabilan Frekuensi Pada Pltu Mamuju 2 X 25 Mw. In Seminar Nasional Teknik Elektro Dan Informatika (Sntei) (Pp. 147-151).
- [14] Kundur, P. (2007). *Power system stability. Power System Stability and Control*, 10, 7-1.
- [15] SAADAT, Hadi. *Power System Control. Power System Analysis*, 1999, 527-569.
- [16] Suharto, S., Robandi, I. And Priyadi, A., 2015. Penalaan *Power System Stabilizer (PSS)* Untuk Perbaikan Stabilitas Dinamik Pada Sistem Tenaga Listrik Menggunakan *Bat Algorithm (BA)*. *Jurnal Teknik ITS*, 4(1), Pp.B4-B9.
- [17] Tran, T.A., Yan, X. And Yuan, Y., 2017, August. *Marine Engine Rotational Speed Control Automatic System Based On Fuzzy PID Logic Controller*. In *2017 4th International Conference On Transportation Information And Safety (ICTIS)* (Pp. 1099-1104). IEEE.