

**TESIS**

**PENGEMBANGAN SISTEM KONTROL PEMBANGKIT  
LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO MENGGUNAKAN  
METODE *HYSTERESIS CURRENT CONTROL*  
MEMANFAATKAN BATERAI**

*Development Of Micro Hydro Power Plant Control System Using  
Hysteresis Current Control Method Utilizing Batteries*

**KEYS PATRIOT MALIMONGAN  
D032211016**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**

**PENGAJUAN TESIS**

**PENGEMBANGAN SISTEM KONTROL PEMBANGKIT  
LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO MENGGUNAKAN  
METODE *HYSTERESIS CURRENT CONTROL*  
MEMANFAATKAN BATERAI**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister  
Program Studi Ilmu Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

**KEYS PATRIOT MALIMONGAN  
D032211016**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**

## TESIS

# PENGEMBANGAN SISTEM KONTROL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO MENGUNAKAN METODE *HYSTERESIS CURRENT* *CONTROL* MEMANFAATKAN BATERAI

**KEYS PATRIOT MALIMONGAN  
D032211016**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada Tanggal 12 Agustus 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Prof. Dr.Ir. Andani, MT.  
NIP. 19601231 198703 1 022

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Ir. Syafruddin Syarif, MT.  
NIP. 19611125 198802 1 001

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T.,M.T.,IPM.  
NIP. 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi S2 Teknik Elektro



Dr. Eng. Ir. Wardi, S.T., M.Eng.  
NIP. 19720828 199903 1 003

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA


Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Keys Patriot Malimongan  
Nomor mahasiswa : D032211016  
Program studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “PENGEMBANGAN SISTEM KONTROL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO MENGGUNAKAN METODE HYSTERESIS CURRENT CONTROL MEMANFAATKAN BATERAI” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Prof. Dr.Ir. Andani, MT sebagai Pembimbing Utama dan Prof. Dr. Ir. Syafruddin Syarif, MT sebagai Pembimbing Pendamping. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Prosiding 25th International Seminar on Intelligent Technology and its Application (ISITIA 2024) sebagai artikel dengan judul “Development Of Micro Hydro Power Plant Control System Using Hysteresis Current Control Method Utilizing Batteries”. Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 20 Agustus 2024

Yang menyatakan



Keys Patriot Malimongan

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan segala berkat, anugerah dan hikmat sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “**Pengembangan Sistem Kontrol Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Menggunakan Metode *Hysteresis Current Control* Memanfaatkan Baterai**” dengan baik. Selanjutnya, saya ingin menyatakan terimakasih yang tulus atas semua sumbangan dan sumber daya yang telah diberikan sebagai aset berharga bagi tercapainya kesuksesan tesis dan tujuan akademik ini kepada:

1. Istri tercinta Desti Palimbunga dan Anak-anakku tersayang Gracivya Malimongan, Blesshiny Malimongan, Chrisky Brillians Malimongan. Tiada kata yang dapat mengungkapkan rasa terima kasih atas dukungan dan cinta yang tak ternilai selama proses penyusunan tesis ini. Istri dan Anak-anakku adalah sumber inspirasi dan kekuatan untuk selalu semangat dan terus maju.
2. Mama dan mama Mertua terkasih, Ritha Lukas Pong’ramma’ dan Lusia Padang, atas doa, dukungan, dan cinta tanpa batas yang telah diberikan selama perjalanan ini. Semangat dari kedua mama menjadi pendorong terbesar bagi kesuksesan dalam menyelesaikan tesis ini. Harapan untuk Almarhum Bapak dan Almarhum Bapak Mertua boleh dengan bangga meskipun sudah tiada.
3. Prof. Dr. Ir. Andani, MT sebagai Pembimbing Utama dan Prof. Dr. Ir. Syafruddin Syarif, MT sebagai Pembimbing Kedua, beserta tim penguji atas bimbingan, dukungan, dan bantuan yang telah diberikan selama proses penyusunan tesis ini. Ilmu dan pengalaman yang diberikan sangat berharga bagi perjalanan akademik saya, serta akan membantu saya untuk mengembangkan pemahaman dan keterampilan penelitian yang lebih baik.
4. Rektor Universitas Hasanuddin, Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan Ketua Prodi Pascasarjana Teknik Elektro serta para dosen dan staff Pascasarjana Teknik Elektro Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program magister di Departemen Teknik Elektro.

5. Kakak dan adik perempuan serta saudara/saudari istri (ipar) yang selalu support dalam segala hal. Saya merasa sangat beruntung memiliki keluarga yang selalu ada di samping saya dalam setiap langkah perjalanan hidup ini.
6. Keluarga besar PLTMH Sengkaling 1 Kota Malang yang telah bekerja sama dan memfasilitasi saya dalam pengambilan data penelitian.
7. Rekan-rekan tim Oreflow System Control PT.Freeport Indonesia terkhusus buat Anang Baskoro, Jatmiko Kusumo dan Fikri Ramadhan yang banyak memberi masukan serta selalu membackup pekerjaan selama dalam tahap penyusunan tesis ini.
8. Bapak, ibu, dan teman-teman seperjuangan Program Magister Teknik Elektro Universitas Hasanuddin angkatan 2021-1 khususnya Dianti Utamidewi selaku ketua angkatan yang banyak membantu baik dalam bangku perkuliahan, pengurusan dokumen-dokumen bahkan dorongan semangat untuk menyelesaikan tesis ini. Kepada adik angkatan secara khusus kepada Figghi Surya Permadi yang telah banyak membantu dalam pembuatan simulasi bahkan berbagi ilmu program. Terima kasih kepada semua teman-teman yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu karena telah memberikan persahabatan yang sangat berarti.

Akhir kata, dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan permohonan maaf yang tulus atas segala kekurangan dan kesalahan yang mungkin terdapat dalam tesis ini. Penulis menyadari bahwa karya ini tidaklah sempurna dan masih memiliki ruang untuk perbaikan. Namun demikian, semoga karya ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi positif di bidang energi terbarukan dan menjadi berkat ilmu bagi setiap pembaca, Amin.

Penulis  
Keys Patriot Malimongan

## ABSTRAK

**KEYS PATRIOT MALIMONGAN.** *Pengembangan Sistem Kontrol Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Menggunakan Metode Hysteresis Current Control Memanfaatkan Baterai* (dibimbing oleh **Andani, Syafruddin Syarif**)

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem kontrol frekuensi PLTMH dari data acuan penggunaan *Electronic Load Controllers* (ELC) pada PLTMH Sengkaling 1, Kota Malang. Penelitian ini menggunakan metode *Hysteresis Current Control* (HCC) dengan memanfaatkan sistem penyimpanan energi baterai (BESS), sehingga kestabilan sistem tenaga listrik tetap terjaga dan lebih efisien. Kontrol yang diusulkan menggunakan gabungan jaringan syaraf tiruan dan fuzzy dalam *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) serta menggunakan kontrol *Artificial Neural Network* (ANN) secara penuh. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ELC dapat meneruskan daya yang tidak terpakai di sisi konsumen ke penyimpanan energi baterai dengan daya rata-rata baterai 96,83 kW pada penggunaan pengontrol ANFIS dan 96,96 kW pada penggunaan pengontrol ANN sehingga dapat digunakan kembali untuk beban lain dengan tetap menjaga frekuensi sistem PLTMH tetap konstan dengan rata-rata 49,97 Hz. Dengan kontrol baru menggunakan dengan metode HCC, harga pokok produksi (HPP) dapat dihasilkan lebih kecil dari Rp. 2.995,03 per kWh menjadi Rp. 2.760,81 per kWh. Dengan memanfaatkan baterai, terjadi penghematan energy (efisiensi) ideal sebesar 90,8% per tahun pada PLTMH Sengkaling 1.

**Kata kunci** : pembangkit listrik mikro hidro, kontrol, *hysteresis current control*, baterai

## ABSTRACT

**KEYS PATRIOT MALIMONGAN.** *Development of Micro Hydro Power Plant Control System Using Hysteresis Current Control Method Utilizing Batteries* (supervised by **Andani, Syafruddin Syarif**)

This study aims to develop an MHPP frequency control system from reference data on the use of Electronic Load Controllers (ELC) at PLTMH Sengkaling 1, Malang City. This research uses the Hysteresis Current Control (HCC) method by utilizing a battery energy storage system (BESS) so that the stability of the electric power system is maintained and more efficient. The proposed control uses a combination of artificial and fuzzy neural networks in the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) and uses full Artificial Neural Network (ANN) control. The simulation results show that ELC can pass unused power on the consumer side to battery energy storage with an average battery power of 96.83 kW on ANFIS controller use and 96.96 kW on ANN controller use so that it can be reused for other loads while keeping the frequency of the MHP system constant with an average of 49.97 Hz. With the new control using the HCC method, the cost of energy (COE) produced can be smaller from Rp. 2.995,03 per kWh to Rp. 2.760,81 per kWh. By utilizing batteries, there is an ideal energy saving (efficiency) of 90,8% per year at PLTMH Sengkaling 1.

**Keywords:** micro hydro power plant, control, hysteresis current control, battery



## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>SAMPUL TESIS</b> .....	<b>i</b>
<b>PENGAJUAN TESIS</b> .....	<b>ii</b>
<b>LEMBAR PERSETUJUAN TESIS</b> .....	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TESIS</b> .....	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR ISTILAH &amp; SINGKATAN</b> .....	<b>xvi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3 Tujuan Penelitian</b> .....	<b>4</b>
<b>1.4 Manfaat Penelitian</b> .....	<b>5</b>
<b>1.5 Batasan Masalah</b> .....	<b>5</b>
<b>BAB II LANDASAN TEORI</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1.1 Konsep dasar dan komponen PLTMH</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1.1.1 Air sebagai sumber energi</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1.1.2 Turbin</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1.1.3 Generator</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1.2 Perkembangan teknologi sistem kontrol PLTMH</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1.2.1 Sistem kontrol mekanik</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1.2.2 Sistem kontrol elektronik</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1.3 Efisiensi PLTMH</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2 Penyimpanan Energi</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2.1 Jenis-jenis penyimpanan energi</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.2 Sistem penyimpanan energi baterai</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2.3 Kapasitas dan efisiensi baterai</b> .....	<b>22</b>

2.3	Simulasi MATLAB/Simulink.....	23
2.3.1	Pemodelan sistem PLTMH pada MATLAB/simulink .....	24
2.3.2	Pengembangan kontrol frekuensi beban dengan ANFIS .....	25
2.3.3	Pengembangan kontrol frekuensi beban dengan ANN.....	26
2.3.4	Kontrol <i>charge/discharge</i> baterai dengan logika <i>fuzzy</i> .....	29
2.4	Metode Hysteresis Current Control .....	30
2.5	Kalkulasi Ekonomi Energi PLTMH.....	32
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>		<b>36</b>
3.1.	Tahapan Penelitian.....	36
3.2.	Tempat dan Waktu Penelitian.....	38
3.3.	Jenis Penelitian .....	38
3.4.	Rancangan Penelitian .....	38
3.4.1	Pengambilan data.....	38
3.4.2	Pemodelan sistem .....	41
3.4.3	Konfigurasi komponen sistem PLTMH .....	42
3.4.3.1	Konfigurasi generator.....	42
3.4.3.2	Konfigurasi beban.....	43
3.4.3.3	Konfigurasi kontrol beban elektronik.....	44
3.4.3.4	Konfigurasi kontrol pengisian dan pengosongan baterai.....	52
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>55</b>
4.1	Simulasi Proportional Integral (PI) Sebagai Kontrol Referensi.....	55
4.1.1	Hasil simulasi kalkulasi Pdump.....	57
4.1.2	Hasil simulasi training ANFIS dan ANN .....	59
4.1.3	Hasil simulasi ELC pada perubahan beban .....	60
4.2	Hasil perbandingan PI dengan ANFIS dan ANN .....	63
4.3	Analisa Ekonomi Energi PLTMH.....	68
4.3.1	Analisa Harga Pokok Produksi Energi Tahunan.....	68
4.3.2	Analisa Pendapatan dan Pengeluaran Biaya Energi.....	70
4.3.3	Analisa Kelayakan Ekonomi PLTMH .....	77
4.4	Analisa Efisiensi.....	85
4.4.1	Analisa efisiensi PLTMH.....	85
4.4.2	Analisa efisiensi Energi .....	86
4.5	Validasi Hasil Penelitian .....	86
4.5.1	Validasi Tegangan, Arus dan Daya Keluaran Simulasi.....	86

4.5.2 Validasi hasil training ANFIS dan ANN .....	86
4.5.3 Validasi Keluaran <i>Hysteresis Band</i> Fasa.....	8690
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	<b>91</b>
5.1 Kesimpulan .....	91
5.2 Saran-Saran .....	91
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>92</b>
<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>98</b>

## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 1</b> Klasifikasi PLTA berdasarkan kapasitas pembangkitan .....	6
<b>Tabel 2</b> Konsumsi energi konsumen per hari .....	39
<b>Tabel 3</b> Spesifikasi generator.....	40
<b>Tabel 4</b> Parameter generator .....	43
<b>Tabel 5</b> Parameter beban.....	43
<b>Tabel 6</b> Parameter switching.....	44
<b>Tabel 7</b> Basis aturan fuzzy .....	53
<b>Tabel 8</b> Perbandingan hasil data penggunaan ELC .....	62
<b>Tabel 9</b> Proyeksi Pendapatan Kontrol saat ini .....	71
<b>Tabel 10</b> Proyeksi Pendapatan Kontrol Baru.....	71
<b>Tabel 11</b> Biaya O & M Kontrol Lama .....	72
<b>Tabel 12</b> Biaya O & M Kontrol Baru .....	72
<b>Tabel 13</b> Biaya penyusutan kontrol lama .....	73
<b>Tabel 14</b> Biaya penyusutan kontrol baru .....	73
<b>Tabel 15</b> Life Cycle Cost PLTMH dengan Kontrol Saat ini.....	74
<b>Tabel 16</b> Perkiraan Life Cycle Cost PLTMH dengan Kontrol Baru.....	74
<b>Tabel 17</b> Cash Flow PLTMH selama 16 Tahun .....	75
<b>Tabel 18</b> Cash Flow PLTMH dengan kontrol baru.....	76
<b>Tabel 19</b> Proyeksi NPV Kontrol saat ini .....	77
<b>Tabel 20</b> Proyeksi NPV Kontrol Baru .....	78
<b>Tabel 21</b> Proyeksi IRR pada NPV Positif Kontrol saat ini.....	79
<b>Tabel 22</b> Proyeksi IRR pada NPV Negatif Kontrol saat ini .....	80
<b>Tabel 23</b> Proyeksi IRR pada NPV Positif Kontrol Baru.....	81
<b>Tabel 24</b> Proyeksi IRR pada NPV Negatif Kontrol Baru.....	81
<b>Tabel 25</b> Cash Flow penggunaan 2 kontrol .....	84

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 1</b> Skema PLTMH .....	7
<b>Gambar 2</b> Jenis turbin impuls .....	10
<b>Gambar 3</b> Jenis turbin reaksi .....	10
<b>Gambar 4</b> Konstruksi generator sinkron (Prasetya, 2021) .....	11
<b>Gambar 5</b> Pemodelan generator dengan MATLAB simulink .....	12
<b>Gambar 6</b> Pemodelan sistem governor .....	14
<b>Gambar 7</b> Diagram blok PLTMH dengan kontrol beban elektronik .....	16
<b>Gambar 8</b> Pengisian dan pengosongan baterai .....	21
<b>Gambar 9</b> Diagram status pengisian daya baterai .....	23
<b>Gambar 10</b> Pemodelan PLTMH sederhana .....	25
<b>Gambar 11</b> Struktur ANFIS .....	26
<b>Gambar 12</b> Struktur ANN .....	27
<b>Gambar 13</b> Model fuzzy sugeno pada PLTMH .....	29
<b>Gambar 14</b> FIS model sugeno .....	30
<b>Gambar 15</b> Diagram blok hysteresis current control .....	30
<b>Gambar 16</b> Prinsip kerja hysteresis current control .....	31
<b>Gambar 17</b> Konsep hysteresis current control .....	32
<b>Gambar 18</b> Flowchart penelitian .....	37
<b>Gambar 19</b> Peta lokasi pengambilan data .....	38
<b>Gambar 20</b> Grafik profil beban .....	39
<b>Gambar 21</b> Gambaran sistem PLTMH, baterai, kontrol beban .....	41
<b>Gambar 22</b> Rancangan simulasi pembangkit mikro hidro .....	42
<b>Gambar 23</b> Desain beban konsumen .....	44
<b>Gambar 24</b> Kalkulasi Pdump dengan PI controller .....	45
<b>Gambar 25</b> Model fungsi transfer data PI ke ANFIS .....	45
<b>Gambar 26</b> Pengaturan parameter ANFIS .....	46
<b>Gambar 27</b> Struktur model ANFIS .....	46
<b>Gambar 28</b> Kalkulasi Pdump dengan ANFIS controller .....	46
<b>Gambar 29</b> Flow chart pembuatan kontrol ANFIS .....	47
<b>Gambar 30</b> Model fungsi transfer data PI ke ANN .....	48
<b>Gambar 31</b> Tampilan import data input dan target pada ANN .....	48
<b>Gambar 32</b> Struktur model ANN .....	49
<b>Gambar 33</b> Kalkulasi Pdump dengan Kontrol ANN .....	49
<b>Gambar 34</b> Flow chart pembuatan kontrol ANN .....	50
<b>Gambar 35</b> Pemodelan metode hysteresis current control .....	51
<b>Gambar 36</b> Pemodelan three phase control rectifier .....	52
<b>Gambar 37</b> Tampilan input variabel error .....	52
<b>Gambar 38</b> Tampilan output fuzzy .....	53
<b>Gambar 39</b> Rangkaian charge dan discharge baterai .....	54
<b>Gambar 40</b> Flow chart kontrol PLTMH .....	56

<b>Gambar 41</b> Hasil tegangan fasa ke tanah.....	57
<b>Gambar 42</b> Hasil arus fasa ke tanah .....	57
<b>Gambar 43</b> Hasil daya PLTMH menggunakan ELC .....	58
<b>Gambar 44</b> Perbandingan kecepatan generator dengan kecepatan referensi.....	58
<b>Gambar 45</b> Kalkulasi daya error (Pdump).....	58
<b>Gambar 46</b> Hasil training ANFIS .....	59
<b>Gambar 47</b> Training regresi dari ANN .....	60
<b>Gambar 48</b> Hasil validasi terbaik dari training ANN .....	60
<b>Gambar 49</b> Perbandingan daya output.....	61
<b>Gambar 50</b> Hasil output frekuensi.....	61
<b>Gambar 51</b> Hasil keluaran baterai pada beban maksimum sistem .....	62
<b>Gambar 52</b> Hasil keluaran baterai pada beban maksimum konsumen .....	63
<b>Gambar 53</b> Hasil keluaran baterai pada beban minimum konsumen .....	63
<b>Gambar 54</b> Hasil baterai menggunakan kontrol PI .....	64
<b>Gambar 55</b> Hasil baterai menggunakan kontrol ANFIS.....	64
<b>Gambar 56</b> Hasil baterai menggunakan kontrol ANN.....	64
<b>Gambar 57</b> Perbandingan undershoot arus .....	65
<b>Gambar 58</b> Perbandingan overshoot tegangan .....	65
<b>Gambar 59</b> Perbandingan arus puncak baterai .....	66
<b>Gambar 60</b> Perbandingan tegangan puncak baterai .....	66
<b>Gambar 61</b> Perbandingan waktu respon puncak arus baterai.....	67
<b>Gambar 62</b> Perbandingan waktu respon puncak tegangan baterai .....	67
<b>Gambar 63</b> Perbandingan daya total penggunaan kontrol.....	68
<b>Gambar 64</b> Perbandingan harga pokok produksi.....	70
<b>Gambar 65</b> Grafik Cash Flow dengan Kontrol saat ini .....	75
<b>Gambar 66</b> Grafik Cash Flow dengan Kontrol Baru.....	76
<b>Gambar 67</b> Grafik perbandingan NPV penggunaan dua kontrol.....	79
<b>Gambar 68</b> Grafik IRR penggunaan kontrol PLTMH .....	82
<b>Gambar 69</b> Grafik BCR PLTMH pada 2 kontrol.....	83
<b>Gambar 70</b> Payback Period Penggunaan 2 Kontrol .....	84
<b>Gambar 71</b> Efisiensi PLTMH pada 3 kontrol .....	85
<b>Gambar 72</b> Grafik hubungan daya dan efisiensi .....	85
<b>Gambar 73</b> Validasi hasil tegangan fasa ke tanah.....	87
<b>Gambar 74</b> Validasi hasil arus fasa ke tanah .....	87
<b>Gambar 75</b> Validasi daya keluaran ELC.....	88
<b>Gambar 76</b> Validasi hasil pelatihan ANFIS .....	89
<b>Gambar 77</b> Validasi regresi hasil pelatihan ANN .....	89
<b>Gambar 78</b> Validasi nilai mean square error (MSE) ANN .....	90
<b>Gambar 79</b> Validasi keluaran Hysteresis Band Fasa .....	90

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
<b>Lampiran 1</b> Data teknis PLTMH sengkaling 1 .....	98
<b>Lampiran 2</b> Detail spesifikasi generator.....	99
<b>Lampiran 3</b> Instruksi perintah MATLAB.....	100
<b>Lampiran 4</b> Editor fuzzy error pengisian baterai.....	103
<b>Lampiran 5</b> Editor program ANFIS .....	104
<b>Lampiran 6</b> Hasil training ANN .....	105
<b>Lampiran 7</b> Data beban PLTMH sengkaling 1 .....	106
<b>Lampiran 8</b> Hasil data simulasi PI .....	107
<b>Lampiran 9</b> Hasil data simulasi ANFIS.....	108
<b>Lampiran 10</b> Hasil data simulasi ANN .....	109
<b>Lampiran 11</b> Rincian investasi .....	110
<b>Lampiran 12</b> Rincian biaya operasional dan pemeliharaan PLTMH .....	111
<b>Lampiran 13</b> Rincian harga kontrol baru dan pipa pesat.....	113
<b>Lampiran 14</b> Harga satuan generator PLTMH .....	114
<b>Lampiran 15</b> Harga paket PLTMH.....	115
<b>Lampiran 16</b> Harga komponen kontrol baru .....	116
<b>Lampiran 17</b> Harga satuan baterai lithium .....	117
<b>Lampiran 18</b> Rincian paket PLTMH .....	118
<b>Lampiran 19</b> Harga satuan motor TECO.....	119
<b>Lampiran 20</b> Kontrol PLTMH sengkaling 1 .....	120
<b>Lampiran 21</b> Dummy (ballast) udara dan air .....	121
<b>Lampiran 22</b> Tampilan keseluruhan sistem PLTMH sengkaling 1 .....	122
<b>Lampiran 23</b> Proses aliran air dari sungai brantas .....	123

## DAFTAR ISTILAH & SINGKATAN

Istilah / Singkatan	Arti / Penjelasan
PLTMH	Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro
ELC	Electronic Load Controllers
BESS	Battery Energy Storage System
PI	Proporsional Integral
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
ANN	Artificial Neural Network
HCC	Hysteresis Current Control
DLC	Dummy Load Controllers
FLC	Fuzzy Logic Controller
m	meter
kW	kilowatt
kV	kilovolt
A	Ampere
Hz	Hertz
PSO	Particle Swarm Optimization
MATLAB	Matrix Laboratory
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
MHPP	Micro Hydro Power Plant
PID	Proportional Integral Derivative
PC	Personal Computer
$\eta$	efisiensi
Pb	plumbum
Ni-Cd	Nickel – Cadmium
Ni-MH	Nickel-metal hydride
Ah	Ampere hour
DoD	Depth of Discharge
SoC	State of Charge
SOH	State of Health



Istilah / Singkatan	Arti / Penjelasan
p.u	per unit
RMSE	Root Means Squared Error
BC	Battery Charge
BDC	Battery Discharge
LE	Low Error
HE	High Error
PWM	pulse with modulation
off-grid	Daerah terpencil yang tidak dialiri arus listrik pusat
HPP	Harga pokok produksi
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
O&M	Operation & Maintenance
FIS	fuzzy inference sistem
MSE	Mean Square Error
ReLU	Rectified Linear Unit
$\omega_{ref}$	kecepatan putar referensi
Pdump	daya error
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PF	Power Factor

## **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini merupakan bab pendahuluan yang menyajikan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan ruang lingkup mengenai judul tesis ini.

### **1.1 Latar Belakang**

Energi Listrik merupakan salah satu kebutuhan pokok manusia, baik di kota besar maupun di daerah terpencil. Hal ini dapat dilihat dari peran energi listrik dalam meningkatkan kualitas hidup di beberapa bidang seperti ekonomi, pendidikan dan kesehatan. Selain itu, energi listrik juga dapat mengurangi angka kemiskinan dan membawa negara-negara berkembang menuju pembangunan yang berkelanjutan (Córdoba et al., 2021). Akan tetapi, masalah akses terhadap energi listrik menjadi tantangan besar di banyak daerah pedesaan di seluruh dunia. Oleh karena itu, pendekatan yang tepat dan terintegrasi perlu dipertimbangkan dalam merancang solusi energi alternatif yang sesuai dengan kebutuhan lokal dan keberlanjutan lingkungan (Riaz et al., 2018). Dalam hal ini, diperlukan pembangkit listrik terbarukan yang lebih baik dari pembangkit listrik konvensional untuk menghasilkan energi listrik karena lebih ramah lingkungan dan lebih murah (Triasdian et al., 2020). Pembangkit listrik tenaga air mikro (PLTMH) sangat cocok sebagai sumber energi listrik untuk menjangkau daerah pedesaan atau terpencil karena tidak memerlukan bendungan dan waduk seperti pada pembangkit listrik tenaga air konvensional (Singh et al., 2018).

Beberapa keuntungan memilih pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMH) sebagai sumber energi listrik adalah PLTMH tidak memerlukan instalasi penyimpanan air yang luas seperti pembangkit listrik tenaga hidro skala besar. Aliran air yang ada di sungai kecil atau saluran air lainnya digunakan untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan energi listrik sehingga lebih fleksibel dalam pilihan lokasi dan tidak memerlukan pembangunan bendungan besar. Selain itu, pembangkit listrik tenaga mikro hidro cenderung lebih ramah lingkungan

dibandingkan dengan sumber energi fosil karena tidak menghasilkan emisi karbon atau polusi udara yang signifikan, sehingga membantu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Secara ekonomis, biaya operasional dan pemeliharaan pembangkit listrik tenaga mikro hidro juga cenderung lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga fosil, seperti pembangkit listrik tenaga batu bara. PLTMH dapat mengurangi ketergantungan pada pasokan listrik dari jaringan umum, sehingga mengurangi tagihan listrik dan meningkatkan kemandirian energi (Andrik et al., 2018). Namun, pembangunan waduk dan bendungan dapat memiliki dampak lingkungan, seperti perubahan aliran sungai, kehilangan habitat alami, dan perubahan suhu air di daerah sekitarnya. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian yang matang sebelum membangun pembangkit listrik tenaga air untuk meminimalkan dampak negatifnya (Melkior et al., 2018). Dengan mengambil langkah-langkah yang tepat, potensi penggunaan sumber daya air untuk pembangkit listrik di daerah terpencil di Indonesia dapat ditingkatkan. Ini akan membantu memaksimalkan penggunaan sumber daya air yang tersedia dan mendukung pembangunan energi terbarukan yang berkelanjutan (Hadi et al., 2020)

Dalam perencanaan pembangkit mikro hidro, stabilitas merupakan salah satu faktor utama yang perlu diperhatikan. Stabilitas mengacu pada kemampuan sistem untuk menjaga kecepatan rotasi generator dalam keadaan konstan, sehingga frekuensi listrik yang dihasilkan tetap stabil. Fluktuasi beban merupakan salah satu faktor yang memengaruhi frekuensi yang dihasilkan oleh generator mikrohidro. Pada malam hari, daya beban cenderung berkurang, yang dapat menyebabkan roda turbin berputar lebih cepat. Hal ini dapat mengakibatkan peningkatan frekuensi listrik yang dihasilkan. Jika kenaikan frekuensi melebihi batas standar yang ditetapkan, dapat merugikan konsumen dan peralatan yang terhubung ke jaringan listrik. Untuk mengatasi fluktuasi beban dan menjaga stabilitas sistem, pengaturan atau pengendalian frekuensi menjadi penting (Ali et al., 2018) (Ur Rehman & Riaz, 2018).

Beberapa penelitian telah memperkenalkan sistem dan pengontrol pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Penggunaan sistem gubernur adalah salah satunya. Pengendalian aliran air dilakukan dengan membuka pintu gerbang pada penstock dengan menggunakan motor servo. Sistem gubernur cenderung

mempunyai respons yang lambat terhadap perubahan beban yang signifikan sehingga sistem ini kurang disukai. Sistem kendali sisi generator yang menggunakan dummy resistor, pengontrol beban elektronik (ELC), atau pengontrol beban buang (DLC) merupakan pendekatan efektif untuk mengatur tegangan dan frekuensi generator selama variasi beban. Dalam sistem ini, pengontrol elektronik mengontrol jumlah daya yang dikirim ke rangkaian disipasi melalui resistor dummy (Singh et al., 2018). Untuk mengoptimalkan kinerja ELC, sistem pemantauan berbasis mikrokontroler memungkinkan pengontrol mengidentifikasi kelebihan daya secara akurat dan mengarahkannya ke beban dummy dengan cepat dan efisien (Kamble & Akolkar, 2018). Namun, penggunaan dummy membuang-buang energi berharga yang dapat digunakan secara efisien (Win Aung, 2015)]. Oleh karena itu diganti dengan sistem penyimpanan energi baterai (BESS) untuk memperoleh kestabilan sistem tenaga listrik yang lebih efisien (Zhao et al., 2023). Seiring berjalannya waktu, efisiensi baterai secara bertahap menurun. Untuk mencapai efisiensi maksimum, baterai dengan masa pakai lebih lama dapat digunakan. Dengan demikian, baterai dapat mempertahankan tingkat efisiensi yang tinggi dalam jangka waktu pengoperasian yang lebih lama sebelum perlu diisi ulang atau diganti. Namun pemilihan baterai dengan jangka waktu yang lama juga harus mempertimbangkan faktor lain seperti ukuran, berat, biaya, dan kebutuhan energi sistem, sehingga perlu dilakukan perhitungan yang cermat untuk memilih baterai yang paling sesuai untuk dicapai (Naz et al., 2021).

Dalam perkembangannya, penelitian tentang ELC difokuskan pada penggunaan pengontrol PI tradisional. Namun penelitian lebih lanjut menunjukkan beberapa teknik pengaturan alternatif yang memberikan kinerja lebih baik. Salah satu perkembangan tersebut adalah penggunaan teknik kendali fuzzy-PI pada kendali penyearah. Selain itu, pengontrol PI berbasis PSO (Particle Swarm Optimization) juga telah dikembangkan dalam konteks ELC. Secara keseluruhan, penelitian tentang ELC telah menunjukkan kemajuan dalam pengembangan teknik pengaturan fuzzy yang lebih baik dibandingkan dengan pengontrol PI tradisional (Has et al., 2018) dan telah terbukti efektif dalam memastikan pengendalian PLTMH yang baik (Tiomo & Wamkeue, 2019). Namun fuzzy masih dilakukan secara manual dalam menentukan model inferensi dan belum dapat melakukan

prediksi (Has et al., 2018). Oleh karena itu pada penelitian ini mencoba mengembangkan sistem kendali dengan menggabungkan jaringan saraf tiruan dan fuzzy pada *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS). Selain itu dilakukan juga penelitian dengan menggunakan sistem kendali pada *Artificial Neural Network* (ANN) secara penuh sehingga menghasilkan daya error yang kemudian menghasilkan arus referensi dengan menggunakan metode *Hysteresis Current Control* (HCC). Fungsi utama dari metode ini adalah untuk membatasi toleransi atas dan bawah di sekitar arus referensi sehingga arus dapat berayun tanpa melewati batas pita kendali. Metode ini banyak digunakan dalam aplikasi industri karena kesederhanaannya dan fitur stabilitasnya yang lebih baik. Selain itu, metode ini juga dapat memberikan respons transien dan kondisi waktu yang cepat terhadap variasi kondisi beban (Pierfederici et al., 2017).

Dari penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan sistem PLTMH dengan sistem kontrol yang lebih yang lebih baik dan memperoleh stabilitas sistem tenaga listrik yang lebih efisien melalui sistem penyimpanan energi baterai (BESS).

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari uraian latar belakang yang telah disajikan sebelumnya, maka dapat disusun beberapa rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana mengembangkan sebuah sistem pengontrolan PLTMH dengan memanfaatkan penyimpanan energi baterai?
2. Bagaimana meningkatkan efisiensi pembangkit listrik tenaga mikro hidro menggunakan metode *Hysteresis Current Control* (HCC)?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan penjabaran rumusan masalah di atas, maka tujuan yang akan dicapai dari kegiatan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan sebuah sistem pengontrolan PLTMH dengan pemanfaatan sistem penyimpanan energi baterai melalui simulasi MATLAB Simulink.
2. Meningkatkan efisiensi PLTMH dengan menggunakan metode *Hysteresis Current Control* (HCC) melalui simulasi MATLAB Simulink.

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan segala berkat, anugerah dan hikmat sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “**Pengembangan Sistem Kontrol Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Menggunakan Metode *Hysteresis Current Control* Memanfaatkan Baterai**” dengan baik. Selanjutnya, saya ingin menyatakan terimakasih yang tulus atas semua sumbangan dan sumber daya yang telah diberikan sebagai aset berharga bagi tercapainya kesuksesan tesis dan tujuan akademik ini kepada:

1. Istri tercinta Desti Palimbunga dan Anak-anakku tersayang Gracivya Malimongan, Blesshiny Malimongan, Chrisky Brillians Malimongan. Tiada kata yang dapat mengungkapkan rasa terima kasih atas dukungan dan cinta yang tak ternilai selama proses penyusunan tesis ini. Istri dan Anak-anakku adalah sumber inspirasi dan kekuatan untuk selalu semangat dan terus maju.
2. Mama dan mama Mertua terkasih, Ritha Lukas Pong’ramma’ dan Lusia Padang, atas doa, dukungan, dan cinta tanpa batas yang telah diberikan selama perjalanan ini. Semangat dari kedua mama menjadi pendorong terbesar bagi kesuksesan dalam menyelesaikan tesis ini. Harapan untuk Almarhum Bapak dan Almarhum Bapak Mertua boleh dengan bangga meskipun sudah tiada.
3. Prof. Dr. Ir. Andani, MT sebagai Pembimbing Utama dan Prof. Dr. Ir. Syafruddin Syarif, MT sebagai Pembimbing Kedua, beserta tim penguji atas bimbingan, dukungan, dan bantuan yang telah diberikan selama proses penyusunan tesis ini. Ilmu dan pengalaman yang diberikan sangat berharga bagi perjalanan akademik saya, serta akan membantu saya untuk mengembangkan pemahaman dan keterampilan penelitian yang lebih baik.
4. Rektor Universitas Hasanuddin, Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan Ketua Prodi Pascasarjana Teknik Elektro serta para dosen dan staff Pascasarjana Teknik Elektro Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program magister di Departemen Teknik Elektro.

5. Kakak dan adik perempuan serta saudara/saudari istri (ipar) yang selalu support dalam segala hal. Saya merasa sangat beruntung memiliki keluarga yang selalu ada di samping saya dalam setiap langkah perjalanan hidup ini.
6. Keluarga besar PLTMH Sengkaling 1 Kota Malang yang telah bekerja sama dan memfasilitasi saya dalam pengambilan data penelitian.
7. Rekan-rekan tim Oreflow System Control PT.Freeport Indonesia terkhusus buat Anang Baskoro, Jatmiko Kusumo dan Fikri Ramadhan yang banyak memberi masukan serta selalu membackup pekerjaan selama dalam tahap penyusunan tesis ini.
8. Bapak, ibu, dan teman-teman seperjuangan Program Magister Teknik Elektro Universitas Hasanuddin angkatan 2021-1 khususnya Dianti Utamidewi selaku ketua angkatan yang banyak membantu baik dalam bangku perkuliahan, pengurusan dokumen-dokumen bahkan dorongan semangat untuk menyelesaikan tesis ini. Kepada adik angkatan secara khusus kepada Figghi Surya Permadi yang telah banyak membantu dalam pembuatan simulasi bahkan berbagi ilmu program. Terima kasih kepada semua teman-teman yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu karena telah memberikan persahabatan yang sangat berarti.

Akhir kata, dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan permohonan maaf yang tulus atas segala kekurangan dan kesalahan yang mungkin terdapat dalam tesis ini. Penulis menyadari bahwa karya ini tidaklah sempurna dan masih memiliki ruang untuk perbaikan. Namun demikian, semoga karya ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi positif di bidang energi terbarukan dan menjadi berkat ilmu bagi setiap pembaca, Amin.

Penulis  
Keys Patriot Malimongan

## ABSTRAK

**KEYS PATRIOT MALIMONGAN.** *Pengembangan Sistem Kontrol Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Menggunakan Metode Hysteresis Current Control Memanfaatkan Baterai* (dibimbing oleh **Andani, Syafruddin Syarif**)

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem kontrol frekuensi PLTMH dari data acuan penggunaan *Electronic Load Controllers* (ELC) pada PLTMH Sengkaling 1, Kota Malang. Penelitian ini menggunakan metode *Hysteresis Current Control* (HCC) dengan memanfaatkan sistem penyimpanan energi baterai (BESS), sehingga kestabilan sistem tenaga listrik tetap terjaga dan lebih efisien. Kontrol yang diusulkan menggunakan gabungan jaringan syaraf tiruan dan fuzzy dalam *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) serta menggunakan kontrol *Artificial Neural Network* (ANN) secara penuh. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ELC dapat meneruskan daya yang tidak terpakai di sisi konsumen ke penyimpanan energi baterai dengan daya rata-rata baterai 96,83 kW pada penggunaan pengontrol ANFIS dan 96,96 kW pada penggunaan pengontrol ANN sehingga dapat digunakan kembali untuk beban lain dengan tetap menjaga frekuensi sistem PLTMH tetap konstan dengan rata-rata 49,97 Hz. Dengan kontrol baru menggunakan dengan metode HCC, harga pokok produksi (HPP) dapat dihasilkan lebih kecil dari Rp. 2.995,03 per kWh menjadi Rp. 2.760,81 per kWh. Dengan memanfaatkan baterai, terjadi penghematan energy (efisiensi) ideal sebesar 90,8% per tahun pada PLTMH Sengkaling 1.

**Kata kunci** : pembangkit listrik mikro hidro, kontrol, *hysteresis current control*, baterai



## ABSTRACT

**KEYS PATRIOT MALIMONGAN.** *Development of Micro Hydro Power Plant Control System Using Hysteresis Current Control Method Utilizing Batteries* (supervised by **Andani, Syafruddin Syarif**)

This study aims to develop an MHPP frequency control system from reference data on the use of Electronic Load Controllers (ELC) at PLTMH Sengkaling 1, Malang City. This research uses the Hysteresis Current Control (HCC) method by utilizing a battery energy storage system (BESS) so that the stability of the electric power system is maintained and more efficient. The proposed control uses a combination of artificial and fuzzy neural networks in the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) and uses full Artificial Neural Network (ANN) control. The simulation results show that ELC can pass unused power on the consumer side to battery energy storage with an average battery power of 96.83 kW on ANFIS controller use and 96.96 kW on ANN controller use so that it can be reused for other loads while keeping the frequency of the MHP system constant with an average of 49.97 Hz. With the new control using the HCC method, the cost of energy (COE) produced can be smaller from Rp. 2.995,03 per kWh to Rp. 2.760,81 per kWh. By utilizing batteries, there is an ideal energy saving (efficiency) of 90,8% per year at PLTMH Sengkaling 1.

**Keywords:** micro hydro power plant, control, hysteresis current control, battery

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>SAMPUL TESIS.....</b>	<b>i</b>
<b>PENGAJUAN TESIS.....</b>	<b>ii</b>
<b>LEMBAR PERSETUJUAN TESIS.....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR ISTILAH &amp; SINGKATAN.....</b>	<b>xvi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Rumusan Masalah.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Tujuan Penelitian.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Manfaat Penelitian .....</b>	<b>5</b>
<b>1.5 Batasan Masalah.....</b>	<b>5</b>
<b>BAB II LANDASAN TEORI .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH).....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.1 Konsep dasar dan komponen PLTMH .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.1.1 Air sebagai sumber energi .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.1.2 Turbin .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.1.3 Generator .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.2 Perkembangan teknologi sistem kontrol PLTMH .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.2.1 Sistem kontrol mekanik.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.2.2 Sistem kontrol elektronik .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.3 Efisiensi PLTMH.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Penyimpanan Energi .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.1 Jenis-jenis penyimpanan energi.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.2 Sistem penyimpanan energi baterai .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.3 Kapasitas dan efisiensi baterai.....</b>	<b>22</b>

2.3	Simulasi MATLAB/Simulink.....	23
2.3.1	Pemodelan sistem PLTMH pada MATLAB/simulink .....	24
2.3.2	Pengembangan kontrol frekuensi beban dengan ANFIS .....	25
2.3.3	Pengembangan kontrol frekuensi beban dengan ANN.....	26
2.3.4	Kontrol <i>charge/discharge</i> baterai dengan logika <i>fuzzy</i> .....	29
2.4	Metode Hysteresis Current Control.....	30
2.5	Kalkulasi Ekonomi Energi PLTMH.....	32
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>		<b>36</b>
3.1.	Tahapan Penelitian.....	36
3.2.	Tempat dan Waktu Penelitian.....	38
3.3.	Jenis Penelitian .....	38
3.4.	Rancangan Penelitian .....	38
3.4.1	Pengambilan data.....	38
3.4.2	Pemodelan sistem .....	41
3.4.3	Konfigurasi komponen sistem PLTMH .....	42
3.4.3.1	Konfigurasi generator.....	42
3.4.3.2	Konfigurasi beban.....	43
3.4.3.3	Konfigurasi kontrol beban elektronik.....	44
3.4.3.4	Konfigurasi kontrol pengisian dan pengosongan baterai.....	52
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>55</b>
4.1	Simulasi Proportional Integral (PI) Sebagai Kontrol Referensi .....	55
4.1.1	Hasil simulasi kalkulasi Pdump.....	57
4.1.2	Hasil simulasi training ANFIS dan ANN .....	59
4.1.3	Hasil simulasi ELC pada perubahan beban .....	60
4.2	Hasil perbandingan PI dengan ANFIS dan ANN.....	63
4.3	Analisa Ekonomi Energi PLTMH.....	68
4.3.1	Analisa Harga Pokok Produksi Energi Tahunan.....	68
4.3.2	Analisa Pendapatan dan Pengeluaran Biaya Energi.....	70
4.3.3	Analisa Kelayakan Ekonomi PLTMH .....	77
4.4	Analisa Efisiensi.....	85
4.4.1	Analisa efisiensi PLTMH.....	85
4.4.2	Analisa efisiensi Energi .....	86
4.5	Validasi Hasil Penelitian .....	86
4.5.1	Validasi Tegangan, Arus dan Daya Keluaran Simulasi.....	86

4.5.2 Validasi hasil training ANFIS dan ANN .....	86
4.5.3 Validasi Keluaran <i>Hysteresis Band</i> Fasa.....	8690
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>91</b>
5.1 Kesimpulan .....	91
5.2 Saran-Saran .....	91
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>92</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>98</b>

## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 1</b> Klasifikasi PLTA berdasarkan kapasitas pembangkitan .....	6
<b>Tabel 2</b> Konsumsi energi konsumen per hari .....	39
<b>Tabel 3</b> Spesifikasi generator .....	40
<b>Tabel 4</b> Parameter generator .....	43
<b>Tabel 5</b> Parameter beban .....	43
<b>Tabel 6</b> Parameter switching .....	44
<b>Tabel 7</b> Basis aturan fuzzy .....	53
<b>Tabel 8</b> Perbandingan hasil data penggunaan ELC .....	62
<b>Tabel 9</b> Proyeksi Pendapatan Kontrol saat ini .....	71
<b>Tabel 10</b> Proyeksi Pendapatan Kontrol Baru .....	71
<b>Tabel 11</b> Biaya O & M Kontrol Lama .....	72
<b>Tabel 12</b> Biaya O & M Kontrol Baru .....	72
<b>Tabel 13</b> Biaya penyusutan kontrol lama .....	73
<b>Tabel 14</b> Biaya penyusutan kontrol baru .....	73
<b>Tabel 15</b> Life Cycle Cost PLTMH dengan Kontrol Saat ini .....	74
<b>Tabel 16</b> Perkiraan Life Cycle Cost PLTMH dengan Kontrol Baru .....	74
<b>Tabel 17</b> Cash Flow PLTMH selama 16 Tahun .....	75
<b>Tabel 18</b> Cash Flow PLTMH dengan kontrol baru .....	76
<b>Tabel 19</b> Proyeksi NPV Kontrol saat ini .....	77
<b>Tabel 20</b> Proyeksi NPV Kontrol Baru .....	78
<b>Tabel 21</b> Proyeksi IRR pada NPV Positif Kontrol saat ini .....	79
<b>Tabel 22</b> Proyeksi IRR pada NPV Negatif Kontrol saat ini .....	80
<b>Tabel 23</b> Proyeksi IRR pada NPV Positif Kontrol Baru .....	81
<b>Tabel 24</b> Proyeksi IRR pada NPV Negatif Kontrol Baru .....	81
<b>Tabel 25</b> Cash Flow penggunaan 2 kontrol .....	84

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 1</b> Skema PLTMH .....	7
<b>Gambar 2</b> Jenis turbin impuls .....	10
<b>Gambar 3</b> Jenis turbin reaksi .....	10
<b>Gambar 4</b> Konstruksi generator sinkron (Prasetya, 2021) .....	11
<b>Gambar 5</b> Pemodelan generator dengan MATLAB simulink .....	12
<b>Gambar 6</b> Pemodelan sistem governor .....	14
<b>Gambar 7</b> Diagram blok PLTMH dengan kontrol beban elektronik .....	16
<b>Gambar 8</b> Pengisian dan pengosongan baterai .....	21
<b>Gambar 9</b> Diagram status pengisian daya baterai .....	23
<b>Gambar 10</b> Pemodelan PLTMH sederhana .....	25
<b>Gambar 11</b> Struktur ANFIS .....	26
<b>Gambar 12</b> Struktur ANN .....	27
<b>Gambar 13</b> Model fuzzy sugeno pada PLTMH .....	29
<b>Gambar 14</b> FIS model sugeno .....	30
<b>Gambar 15</b> Diagram blok hysteresis current control .....	30
<b>Gambar 16</b> Prinsip kerja hysteresis current control .....	31
<b>Gambar 17</b> Konsep hysteresis current control .....	32
<b>Gambar 18</b> Flowchart penelitian .....	37
<b>Gambar 19</b> Peta lokasi pengambilan data .....	38
<b>Gambar 20</b> Grafik profil beban .....	39
<b>Gambar 21</b> Gambaran sistem PLTMH, baterai, kontrol beban .....	41
<b>Gambar 22</b> Rancangan simulasi pembangkit mikro hidro .....	42
<b>Gambar 23</b> Desain beban konsumen .....	44
<b>Gambar 24</b> Kalkulasi Pdump dengan PI controller .....	45
<b>Gambar 25</b> Model fungsi transfer data PI ke ANFIS .....	45
<b>Gambar 26</b> Pengaturan parameter ANFIS .....	46
<b>Gambar 27</b> Struktur model ANFIS .....	46
<b>Gambar 28</b> Kalkulasi Pdump dengan ANFIS controller .....	46
<b>Gambar 29</b> Flow chart pembuatan kontrol ANFIS .....	47
<b>Gambar 30</b> Model fungsi transfer data PI ke ANN .....	48
<b>Gambar 31</b> Tampilan import data input dan target pada ANN .....	48
<b>Gambar 32</b> Struktur model ANN .....	49
<b>Gambar 33</b> Kalkulasi Pdump dengan Kontrol ANN .....	49
<b>Gambar 34</b> Flow chart pembuatan kontrol ANN .....	50
<b>Gambar 35</b> Pemodelan metode hysteresis current control .....	51
<b>Gambar 36</b> Pemodelan three phase control rectifier .....	52
<b>Gambar 37</b> Tampilan input variabel error .....	52
<b>Gambar 38</b> Tampilan output fuzzy .....	53
<b>Gambar 39</b> Rangkaian charge dan discharge baterai .....	54
<b>Gambar 40</b> Flow chart kontrol PLTMH .....	56

<b>Gambar 41</b> Hasil tegangan fasa ke tanah.....	57
<b>Gambar 42</b> Hasil arus fasa ke tanah .....	57
<b>Gambar 43</b> Hasil daya PLTMH menggunakan ELC .....	58
<b>Gambar 44</b> Perbandingan kecepatan generator dengan kecepatan referensi.....	58
<b>Gambar 45</b> Kalkulasi daya error (Pdum).....	58
<b>Gambar 46</b> Hasil training ANFIS .....	59
<b>Gambar 47</b> Training regresi dari ANN .....	60
<b>Gambar 48</b> Hasil validasi terbaik dari training ANN .....	60
<b>Gambar 49</b> Perbandingan daya output.....	61
<b>Gambar 50</b> Hasil output frekuensi.....	61
<b>Gambar 51</b> Hasil keluaran baterai pada beban maksimum sistem .....	62
<b>Gambar 52</b> Hasil keluaran baterai pada beban maksimum konsumen.....	63
<b>Gambar 53</b> Hasil keluaran baterai pada beban minimum konsumen .....	63
<b>Gambar 54</b> Hasil baterai menggunakan kontrol PI .....	64
<b>Gambar 55</b> Hasil baterai menggunakan kontrol ANFIS.....	64
<b>Gambar 56</b> Hasil baterai menggunakan kontrol ANN.....	64
<b>Gambar 57</b> Perbandingan undershoot arus .....	65
<b>Gambar 58</b> Perbandingan overshoot tegangan .....	65
<b>Gambar 59</b> Perbandingan arus puncak baterai .....	66
<b>Gambar 60</b> Perbandingan tegangan puncak baterai .....	66
<b>Gambar 61</b> Perbandingan waktu respon puncak arus baterai.....	67
<b>Gambar 62</b> Perbandingan waktu respon puncak tegangan baterai .....	67
<b>Gambar 63</b> Perbandingan daya total penggunaan kontrol.....	68
<b>Gambar 64</b> Perbandingan harga pokok produksi.....	70
<b>Gambar 65</b> Grafik Cash Flow dengan Kontrol saat ini .....	75
<b>Gambar 66</b> Grafik Cash Flow dengan Kontrol Baru.....	76
<b>Gambar 67</b> Grafik perbandingan NPV penggunaan dua kontrol.....	79
<b>Gambar 68</b> Grafik IRR penggunaan kontrol PLTMH .....	82
<b>Gambar 69</b> Grafik BCR PLTMH pada 2 kontrol.....	83
<b>Gambar 70</b> Payback Period Penggunaan 2 Kontrol .....	84
<b>Gambar 71</b> Efisiensi PLTMH pada 3 kontrol .....	85
<b>Gambar 72</b> Grafik hubungan daya dan efisiensi .....	85
<b>Gambar 73</b> Validasi hasil tegangan fasa ke tanah.....	87
<b>Gambar 74</b> Validasi hasil arus fasa ke tanah .....	87
<b>Gambar 75</b> Validasi daya keluaran ELC.....	88
<b>Gambar 76</b> Validasi hasil pelatihan ANFIS .....	89
<b>Gambar 77</b> Validasi regresi hasil pelatihan ANN .....	89
<b>Gambar 78</b> Validasi nilai mean square error (MSE) ANN .....	90
<b>Gambar 79</b> Validasi keluaran Hysteresis Band Fasa .....	90

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
<b>Lampiran 1</b> Data teknis PLTMH sengkaling 1 .....	98
<b>Lampiran 2</b> Detail spesifikasi generator .....	99
<b>Lampiran 3</b> Instruksi perintah MATLAB .....	100
<b>Lampiran 4</b> Editor fuzzy error pengisian baterai .....	103
<b>Lampiran 5</b> Editor program ANFIS .....	104
<b>Lampiran 6</b> Hasil training ANN .....	105
<b>Lampiran 7</b> Data beban PLTMH sengkaling 1 .....	106
<b>Lampiran 8</b> Hasil data simulasi PI .....	107
<b>Lampiran 9</b> Hasil data simulasi ANFIS .....	108
<b>Lampiran 10</b> Hasil data simulasi ANN .....	109
<b>Lampiran 11</b> Rincian investasi .....	110
<b>Lampiran 12</b> Rincian biaya operasional dan pemeliharaan PLTMH .....	111
<b>Lampiran 13</b> Rincian harga kontrol baru dan pipa pesat .....	113
<b>Lampiran 14</b> Harga satuan generator PLTMH .....	114
<b>Lampiran 15</b> Harga paket PLTMH .....	115
<b>Lampiran 16</b> Harga komponen kontrol baru .....	116
<b>Lampiran 17</b> Harga satuan baterai lithium .....	117
<b>Lampiran 18</b> Rincian paket PLTMH .....	118
<b>Lampiran 19</b> Harga satuan motor TECO .....	119
<b>Lampiran 20</b> Kontrol PLTMH sengkaling 1 .....	120
<b>Lampiran 21</b> Dummy (ballast) udara dan air .....	121
<b>Lampiran 22</b> Tampilan keseluruhan sistem PLTMH sengkaling 1 .....	122
<b>Lampiran 23</b> Proses aliran air dari sungai brantas .....	123



## DAFTAR ISTILAH & SINGKATAN

Istilah / Singkatan	Arti / Penjelasan
PLTMH	Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro
ELC	Electronic Load Controllers
BESS	Battery Energy Storage System
PI	Proporsional Integral
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
ANN	Artificial Neural Network
HCC	Hysteresis Current Control
DLC	Dummy Load Controllers
FLC	Fuzzy Logic Controller
m	meter
kW	kilowatt
kV	kilovolt
A	Ampere
Hz	Hertz
PSO	Particle Swarm Optimization
MATLAB	Matrix Laboratory
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
MHPP	Micro Hydro Power Plant
PID	Proportional Integral Derivative
PC	Personal Computer
$\eta$	efisiensi
Pb	plumbum
Ni-Cd	Nickel – Cadmium
Ni-MH	Nickel-metal hydride
Ah	Ampere hour
DoD	Depth of Discharge
SoC	State of Charge
SOH	State of Health

Istilah / Singkatan	Arti / Penjelasan
p.u	per unit
RMSE	Root Means Squared Error
BC	Battery Charge
BDC	Battery Discharge
LE	Low Error
HE	High Error
PWM	pulse with modulation
off-grid	Daerah terpencil yang tidak dialiri arus listrik pusat
HPP	Harga pokok produksi
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
O&M	Operation & Maintenance
FIS	fuzzy inference sistem
MSE	Mean Square Error
ReLU	Rectified Linear Unit
$\omega_{ref}$	kecepatan putar referensi
Pdump	daya error
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PF	Power Factor

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

Bab ini merupakan bab pendahuluan yang menyajikan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan ruang lingkup mengenai judul tesis ini.

### **1.1 Latar Belakang**

Energi Listrik merupakan salah satu kebutuhan pokok manusia, baik di kota besar maupun di daerah terpencil. Hal ini dapat dilihat dari peran energi listrik dalam meningkatkan kualitas hidup di beberapa bidang seperti ekonomi, pendidikan dan kesehatan. Selain itu, energi listrik juga dapat mengurangi angka kemiskinan dan membawa negara-negara berkembang menuju pembangunan yang berkelanjutan (Córdoba et al., 2021). Akan tetapi, masalah akses terhadap energi listrik menjadi tantangan besar di banyak daerah pedesaan di seluruh dunia. Oleh karena itu, pendekatan yang tepat dan terintegrasi perlu dipertimbangkan dalam merancang solusi energi alternatif yang sesuai dengan kebutuhan lokal dan keberlanjutan lingkungan (Riaz et al., 2018). Dalam hal ini, diperlukan pembangkit listrik terbarukan yang lebih baik dari pembangkit listrik konvensional untuk menghasilkan energi listrik karena lebih ramah lingkungan dan lebih murah (Triasdian et al., 2020). Pembangkit listrik tenaga air mikro (PLTMH) sangat cocok sebagai sumber energi listrik untuk menjangkau daerah pedesaan atau terpencil karena tidak memerlukan bendungan dan waduk seperti pada pembangkit listrik tenaga air konvensional (Singh et al., 2018).

Beberapa keuntungan memilih pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMH) sebagai sumber energi listrik adalah PLTMH tidak memerlukan instalasi penyimpanan air yang luas seperti pembangkit listrik tenaga hidro skala besar. Aliran air yang ada di sungai kecil atau saluran air lainnya digunakan untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan energi listrik sehingga lebih fleksibel dalam pilihan lokasi dan tidak memerlukan pembangunan bendungan besar. Selain itu, pembangkit listrik tenaga mikro hidro cenderung lebih ramah lingkungan

dibandingkan dengan sumber energi fosil karena tidak menghasilkan emisi karbon atau polusi udara yang signifikan, sehingga membantu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Secara ekonomis, biaya operasional dan pemeliharaan pembangkit listrik tenaga mikro hidro juga cenderung lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga fosil, seperti pembangkit listrik tenaga batu bara. PLTMH dapat mengurangi ketergantungan pada pasokan listrik dari jaringan umum, sehingga mengurangi tagihan listrik dan meningkatkan kemandirian energi (Andrik et al., 2018). Namun, pembangunan waduk dan bendungan dapat memiliki dampak lingkungan, seperti perubahan aliran sungai, kehilangan habitat alami, dan perubahan suhu air di daerah sekitarnya. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian yang matang sebelum membangun pembangkit listrik tenaga air untuk meminimalkan dampak negatifnya (Melkior et al., 2018). Dengan mengambil langkah-langkah yang tepat, potensi penggunaan sumber daya air untuk pembangkit listrik di daerah terpencil di Indonesia dapat ditingkatkan. Ini akan membantu memaksimalkan penggunaan sumber daya air yang tersedia dan mendukung pembangunan energi terbarukan yang berkelanjutan (Hadi et al., 2020)

Dalam perencanaan pembangkit mikro hidro, stabilitas merupakan salah satu faktor utama yang perlu diperhatikan. Stabilitas mengacu pada kemampuan sistem untuk menjaga kecepatan rotasi generator dalam keadaan konstan, sehingga frekuensi listrik yang dihasilkan tetap stabil. Fluktuasi beban merupakan salah satu faktor yang memengaruhi frekuensi yang dihasilkan oleh generator mikrohidro. Pada malam hari, daya beban cenderung berkurang, yang dapat menyebabkan roda turbin berputar lebih cepat. Hal ini dapat mengakibatkan peningkatan frekuensi listrik yang dihasilkan. Jika kenaikan frekuensi melebihi batas standar yang ditetapkan, dapat merugikan konsumen dan peralatan yang terhubung ke jaringan listrik. Untuk mengatasi fluktuasi beban dan menjaga stabilitas sistem, pengaturan atau pengendalian frekuensi menjadi penting (Ali et al., 2018) (Ur Rehman & Riaz, 2018).

Beberapa penelitian telah memperkenalkan sistem dan pengontrol pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Penggunaan sistem gubernur adalah salah satunya. Pengendalian aliran air dilakukan dengan membuka pintu gerbang pada penstock dengan menggunakan motor servo. Sistem gubernur cenderung

mempunyai respons yang lambat terhadap perubahan beban yang signifikan sehingga sistem ini kurang disukai. Sistem kendali sisi generator yang menggunakan dummy resistor, pengontrol beban elektronik (ELC), atau pengontrol beban buang (DLC) merupakan pendekatan efektif untuk mengatur tegangan dan frekuensi generator selama variasi beban. Dalam sistem ini, pengontrol elektronik mengontrol jumlah daya yang dikirim ke rangkaian disipasi melalui resistor dummy (Singh et al., 2018). Untuk mengoptimalkan kinerja ELC, sistem pemantauan berbasis mikrokontroler memungkinkan pengontrol mengidentifikasi kelebihan daya secara akurat dan mengarahkannya ke beban dummy dengan cepat dan efisien (Kamble & Akolkar, 2018). Namun, penggunaan dummy membuang-buang energi berharga yang dapat digunakan secara efisien (Win Aung, 2015)]. Oleh karena itu diganti dengan sistem penyimpanan energi baterai (BESS) untuk memperoleh kestabilan sistem tenaga listrik yang lebih efisien (Zhao et al., 2023). Seiring berjalannya waktu, efisiensi baterai secara bertahap menurun. Untuk mencapai efisiensi maksimum, baterai dengan masa pakai lebih lama dapat digunakan. Dengan demikian, baterai dapat mempertahankan tingkat efisiensi yang tinggi dalam jangka waktu pengoperasian yang lebih lama sebelum perlu diisi ulang atau diganti. Namun pemilihan baterai dengan jangka waktu yang lama juga harus mempertimbangkan faktor lain seperti ukuran, berat, biaya, dan kebutuhan energi sistem, sehingga perlu dilakukan perhitungan yang cermat untuk memilih baterai yang paling sesuai untuk dicapai (Naz et al., 2021).

Dalam perkembangannya, penelitian tentang ELC difokuskan pada penggunaan pengontrol PI tradisional. Namun penelitian lebih lanjut menunjukkan beberapa teknik pengaturan alternatif yang memberikan kinerja lebih baik. Salah satu perkembangan tersebut adalah penggunaan teknik kendali fuzzy-PI pada kendali penyearah. Selain itu, pengontrol PI berbasis PSO (Particle Swarm Optimization) juga telah dikembangkan dalam konteks ELC. Secara keseluruhan, penelitian tentang ELC telah menunjukkan kemajuan dalam pengembangan teknik pengaturan fuzzy yang lebih baik dibandingkan dengan pengontrol PI tradisional (Has et al., 2018) dan telah terbukti efektif dalam memastikan pengendalian PLTMH yang baik (Tiomo & Wamkeue, 2019). Namun fuzzy masih dilakukan secara manual dalam menentukan model inferensi dan belum dapat melakukan

prediksi (Has et al., 2018). Oleh karena itu pada penelitian ini mencoba mengembangkan sistem kendali dengan menggabungkan jaringan saraf tiruan dan fuzzy pada *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS). Selain itu dilakukan juga penelitian dengan menggunakan sistem kendali pada *Artificial Neural Network* (ANN) secara penuh sehingga menghasilkan daya error yang kemudian menghasilkan arus referensi dengan menggunakan metode *Hysteresis Current Control* (HCC). Fungsi utama dari metode ini adalah untuk membatasi toleransi atas dan bawah di sekitar arus referensi sehingga arus dapat berayun tanpa melewati batas pita kendali. Metode ini banyak digunakan dalam aplikasi industri karena kesederhanaannya dan fitur stabilitasnya yang lebih baik. Selain itu, metode ini juga dapat memberikan respons transien dan kondisi waktu yang cepat terhadap variasi kondisi beban (Pierfederici et al., 2017).

Dari penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan sistem PLTMH dengan sistem kontrol yang lebih baik dan memperoleh stabilitas sistem tenaga listrik yang lebih efisien melalui sistem penyimpanan energi baterai (BESS).

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari uraian latar belakang yang telah disajikan sebelumnya, maka dapat disusun beberapa rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana mengembangkan sebuah sistem pengontrolan PLTMH dengan memanfaatkan penyimpanan energi baterai?
2. Bagaimana meningkatkan efisiensi pembangkit listrik tenaga mikro hidro menggunakan metode *Hysteresis Current Control* (HCC)?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan penjabaran rumusan masalah di atas, maka tujuan yang akan dicapai dari kegiatan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan sebuah sistem pengontrolan PLTMH dengan pemanfaatan sistem penyimpanan energi baterai melalui simulasi MATLAB Simulink.
2. Meningkatkan efisiensi PLTMH dengan menggunakan metode *Hysteresis Current Control* (HCC) melalui simulasi MATLAB Simulink.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Dari pemaparan masalah dan tujuan di atas, maka diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan solusi untuk sistem sistem pengontrolan daya generator PLTMH pada kondisi beban di sisi konsumen yang selalu berubah-ubah sehingga energi listrik dapat digunakan dengan efisien. Selain itu, dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi atau acuan bagi peneliti lain dalam mengembangkan metode penelitian yang sama maupun berbeda.

## 1.5 Batasan Masalah

Agar tidak menyimpang dari tujuan yang diharapkan, penulis menetapkan batasan pada penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Penelitian ini bersifat simulasi pada program MATLAB bagian Simulink sehingga rancangan pada penelitian ini telah optimal dan telah divalidasi berdasarkan hasil penelitian sebelumnya.
2. Simulasi baterai pada penelitian ini tidak terhubung untuk melayani transien interkoneksi beban di jaringan PLTMH tetapi baterai hanya untuk menyimpan kelebihan daya di sisi konsumen sehingga dapat digunakan untuk beban lain di luar beban yang dilayani oleh PLTMH.
3. Data awal yang digunakan merupakan data aktual yang diambil pada PLTMH Sengkaling 1, Kota Malang yang masih menggunakan beban dummy.
4. Metode *Hysteresis Current Control* (HCC) menggunakan kontrol *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) dan *Artificial Neural Network* (ANN) serta *Proporsional Integral* (PI) sebagai kontrol referensi untuk memperoleh arus pembanding dengan arus beban konsumen.
5. Simulasi menggunakan jenis baterai Lithium-Ion dengan kapasitas sedang 100 AH, 24 Volt, menyesuaikan dengan kebutuhan yang akan dilayani.
6. Analisis yang dilakukan hanya pada keluaran simulasi baterai yang digunakan. Selain itu, analisis efisiensi yang dilakukan hanya pada efisiensi PLTMH, efisiensi energi dan efisiensi biaya energi yang dihasilkan.

## BAB II LANDASAN TEORI

Untuk menghasilkan energi listrik yang lebih efisien, pembangkit listrik tenaga mikro hidro memerlukan sistem kontrol yang lebih baik dari berbagai referensi yang ada. Pada bab ini menyajikan literatur studi dari berbagai referensi yang relevan dan akurat mengenai sistem pembangkit listrik tenaga mikro hidro, sistem penyimpanan energi, sistem simulasi MATLAB simulink, Metode *Hysteresis Current Control (HCC)* dan kalkulasi ekonomi energi pada pembangkit listrik tenaga mikro hidro.

### 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)

Pusat listrik tenaga hidro diklasifikasikan berdasarkan daya yang dihasilkan sebagai berikut :

**Tabel 1** Klasifikasi PLTA berdasarkan kapasitas pembangkitan

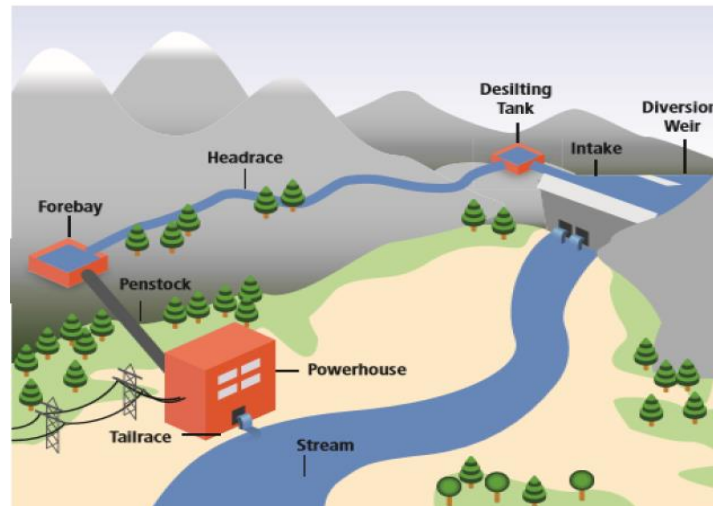
No	Nama	Kapasitas Pembangkitan
1	PLTA Picohydro	< 0,5 KW
2	PLTA Microhydro	0,5 sampai 100 KW
3	PLTA Minihydro	100 sampai 1000 KW
4	PLTA Skala Kecil	1 sampai 10 MW
5	PLTA Skala Besar	>10 MW

Berdasarkan tabel di atas, penelitian ini mengambil studi kasus pada Mikrohidro. Istilah Mikrohidro berasal dari dua kata, mikro artinya kecil sedangkan hidro artinya air. Dalam penggunaannya, istilah ini tidak merupakan sesuatu yang baku namun dapat dibayangkan bahwa mikrohidro pasti menggunakan air sebagai sumber energinya. Adapun yang membedakan antara istilah Mikrohidro dengan Minihidro adalah output daya yang dihasilkan oleh keduanya. Mikrohidro mempunyai tiga komponen utama yaitu air sumber energi, turbin dan generator (Yuniarti & Aji, 2019). Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) termasuk dalam suatu pembangkit listrik skala kecil dengan mengubah energi potensial air menjadi energi mekanis yang memutar turbin kemudian menggerakkan generator agar dapat menghasilkan daya listrik (Rimbawati, 2022; Mahendra & Multi, 2015).



### 2.1.1 Konsep dasar dan komponen PLTMH

Secara umum terdapat tiga komponen utama dari PLTMH yaitu air sebagai sumber energi, turbin dan generator ( Ulum, M., dkk., 2015; Rimbawati, 2022).



**Gambar 1** Skema PLTMH (H. Mahendra, 2018)

Inti dari Prinsip kerja PLTMH adalah perubahan tenaga potensial menjadi tenaga listrik. PLTMH pada prinsipnya memanfaatkan beda ketinggian (m) dan jumlah debit air ( $\text{m}^3/\text{det}$ ). Beda ketinggian dapat diukur, tetapi debit air tidak demikian, karena debit bisa berubah setiap saat bergantung kepada musim. Pada musim hujan debit air besar dan debit air kecil pada musim kemarau (Almanda & Lubis, 2018).

Skema kerja PLTMH (**Gambar 1** Skema PLTMH) didasarkan pada transformasi energi potensial dari aliran air alami menjadi energi listrik. Berikut adalah skema kerja PLTMH:

#### 1) Bendungan

Aliran air alami diarahkan dan dikumpulkan menggunakan bendungan kecil. Bendungan ini bertujuan untuk mengatur aliran air dan menciptakan perbedaan ketinggian yang diperlukan untuk memanfaatkan energinya.

#### 2) Penstock

Air yang terkumpul di bendungan dialirkan melalui pipa yang disebut penstock. Penstock terdiri dari sejumlah segmen pipa yang terhubung satu sama lain

menggunakan siku atau sambungan lainnya. Penstock ini memungkinkan air mengalir secara terkendali dan mengarahkannya ke turbin.

### 3) Turbin

Di dalam bangunan kecil yang disebut pembangkit listrik, terdapat turbin air. Air yang mengalir melalui penstock diarahkan menuju turbin. Turbin ini berputar akibat tekanan air dan mengubah energi kinetik air menjadi energi mekanik.

### 4) Generator

Energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin digunakan untuk memutar generator. Generator ini mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Dalam generator, prinsip elektromagnetik digunakan dengan menggunakan medan magnet dan kumparan-kumparan yang berputar.

### 5) Transformator

Transformator berfungsi untuk menaikkan tegangan yang dihasilkan oleh generator. Umumnya 6,3 kilovolt (kV) hingga 11 kilovolt (kV) yang dinaikkan menjadi 20 kV atau 150 kV lalu disalurkan ke jaringan listrik.

### 6) Jaringan Listrik

Energi listrik yang dihasilkan oleh generator dialirkan melalui sistem jaringan listrik untuk didistribusikan ke konsumen atau disimpan dalam sistem baterai.

### 7) Kembali ke Aliran Air Alam

Setelah air melewati turbin, aliran air dikembalikan ke jalur alami, seperti sungai atau sungai kecil, untuk menjaga kelangsungan ekosistem alami.

Dengan menggunakan skema kerja di atas, PLTMH dapat menghasilkan energi listrik yang bersih dan terbarukan dari sumber daya air alami. PLTMH biasanya digunakan untuk pembangkit listrik skala kecil, seperti di daerah pedesaan, yang memiliki akses ke aliran air yang cukup untuk memenuhi kebutuhan energi lokal (Yuniarti & Aji, 2019).

#### **2.1.1.1 Air sebagai sumber energi**

Air yang mengalir dengan debit tertentu dialirkan dari ketinggian tertentu melalui pipa penstock menuju rumah instalasi (*power house*). Di dalam rumah

instalasi, air akan menabrak turbin sehingga menghasilkan energi mekanik berupa putaran poros turbin. Putaran inilah yang memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik (Rimbawati, 2022). Pipa penstock terdiri dari sejumlah segmen pipa yang dihubungkan satu sama lain menggunakan siku, menerima mengambil air dari bendungan kecil dan kemudian menyuntikkannya ke dalam turbin di dalam bangunan kecil bernama pembangkit tenaga listrik, di mana peralatan pembangkitan dipasang. Aliran air dikembalikan ke jalur alaminya setelah keluar dari turbin (Córdoba et al., 2021).

PLTMH memanfaatkan perbedaan tinggi muka air dari aliran sungai (Has et al., 2018). Perubahan tenaga air dari ketinggian dengan debit tertentu menggerakkan turbin air untuk memutar generator (Prasetya, 2021). Oleh karena itu, sangat penting untuk mempertimbangkan faktor ketinggian dan debit air dalam perancangan sebuah PLTMH. Semakin tinggi ketinggian air yang jatuh dari suatu titik tertentu, semakin besar energi potensial yang dimiliki air tersebut dan Semakin banyak air yang mengalir, semakin cepat putaran turbin, dan semakin besar daya listrik yang dihasilkan. Sehingga berdasarkan kedua faktor tersebut, perhitungan teknis potensi daya mikrohidro dapat diperoleh melalui persamaan ( Ulum, M., dkk, 2015):

$$P = g \cdot Q \cdot H_n \cdot \eta \quad (1)$$

dimana P merupakan daya (Watt), Q adalah debit aliran (m<sup>3</sup>/s), H<sub>n</sub> adalah beda ketinggian (m), g adalah percepatan gravitasi ( 9.8 m/s<sup>2</sup>) dan η adalah efisiensi keseluruhan.

### **2.1.1.2 Turbin**

Turbin merupakan bagian penting dari sistem mikrohidro yang menerima energi potensial dari air dan mengubahnya menjadi energi putaran (mekanik). Turbin air berfungsi untuk mengubah energi air (energi potensial, tekanan dan energi kinetik) menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros. Kemudian putaran poros turbin tersebut akan diubah oleh generator menjadi tenaga listrik. Berdasarkan prinsip kerjanya, turbin air dibagi menjadi dua kelompok (Rimbawati, 2022):

a. Turbin impuls (cross -flow, pelton & turgo)

Untuk jenis ini merupakan jenis turbin yang bekerja karena aliran air. Turbin ini terdiri dari suatu rangkaian sudu-sudu yang diputar oleh aliran air. Air dipancarkan dari alat yang bernama nozzle. Turbin jenis ini yang paling efisien dan sesuai untuk digunakan pada pembangkit dengan *head* yang tinggi (Yuniarti & Aji, 2019).



**Gambar 2** Jenis turbin impuls (Yuniarti & Aji, 2019)

b. Turbin reaksi ( francis, kaplan propeller)

Turbin jenis ini merupakan turbin yang berjenis baling-baling atau *propeler*. Umumnya digunakan pada kondisi head yang rendah namun dengan debit air yang tinggi (Yuniarti & Aji, 2019).



**Gambar 3** Jenis turbin reaksi (Yuniarti & Aji, 2019)

Dalam merencanakan sebuah turbin harus memenuhi 2 parameter dasar yaitu kecepatan spesifik turbin ( $N_s$ ) dan kecepatan putar/sinkron ( $n$ ) dimana kedua parameter tersebut dihitung dengan persamaan (Rimbawati, 2022):

$$N_s = n \frac{\sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (2)$$

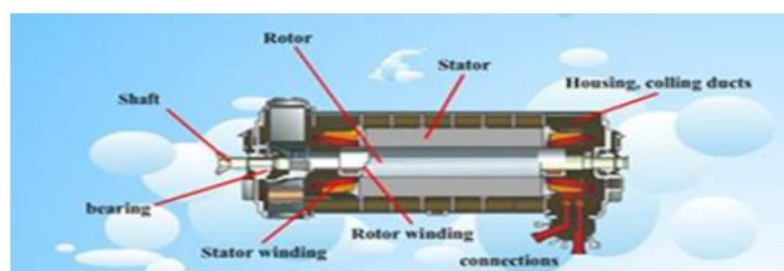
$$n = \frac{120f}{p} \quad (3)$$

dimana  $N_s$  merupakan kecepatan spesifik turbin (mkW),  $n$  adalah kecepatan putaran/sinkron (rpm),  $P$  merupakan daya (kW),  $f$  adalah frekuensi generator (Hz),  $H$  adalah tinggi jatuh efektif (m), dan  $p$  merupakan jumlah kutub generator.

Dalam sebuah sistem PLTMH, turbin yang menjalankan generator akan mendapatkan tenaga mekaniknya dari air yang mengalir melalui penstock (Riaz et al., 2018).

### 2.1.1.3 Generator

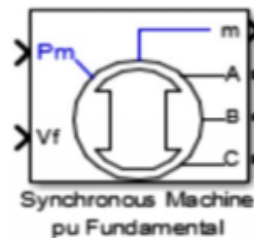
Generator ialah suatu alat yang mampu mengubah energi mekanis untuk dirubah menjadi energi Listrik. Energi mekanis bisa didapatkan dari panas, air, uap, batubara, dan lain-lain. Energi listrik yang bisa dihasilkan dari keluaran generator bisa berupa listrik AC (bolak-balik) ataupun listrik DC (searah). Generator dapat menghasilkan arus DC dikarenakan konstruksi dari generator dilengkapi dengan komutator dan sedangkan pada generator arus bolak-balik dapat menghasilkan arus listrik AC dikarenakan konstruksi generator yang menyebabkan arah arus berbalik pada setiap setengah putarannya (Prasetya, 2021). Pada PLTMH Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanik yang disalurkan oleh turbin menjadi energi listrik. Tegangan yang dihasilkan adalah tegangan bolak-balik dengan besar nilai tegangan dan nilai frekuensi yang disesuaikan dengan spesifikasi ketenagalistrikan di setiap negara (Yuniarti & Aji, 2019).



**Gambar 4** Konstruksi generator sinkron (Prasetya, 2021)

Penelitian ini menggunakan generator sinkron dengan arus bolak-balik (AC) yang dibuat dalam sebuah pemodelan menggunakan aplikasi MATLAB bagian Simulink. Untuk membuat sistem cocok untuk semua generator pemodelan yang disimulasikan adalah model per unit.  $P_m$  dan  $V_f$  dihubungkan ke konstanta

dengan nilai 1 karena asumsi inputnya konstan dan fase A, B, C selanjutnya dihubungkan ke sistem (Ur Rehman & Riaz, 2018).



**Gambar 5** Pemodelan generator dengan MATLAB simulink (Ur Rehman & Riaz, 2018)

### 2.1.2 Perkembangan teknologi sistem kontrol PLTMH

Secara teknis Pembangkit Listrik Pedesaan tidak jauh berbeda dengan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hydro (PLTMH). Pembangkit Listrik Pedesaan sangat mirip dengan wujud dari PLTMH, yaitu sama-sama pembangkit listrik dengan sistem run-off river, tanpa waduk (dam) dan umumnya berkapasitas pembangkit skala kecil. Karena kapasitasnya kecil, maka dalam bahasa Inggris disebut Micro Hydro Power Plant (MHPP) yang di diterjemahkan langsung menjadi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH). Terjemahan ini masih kurang tepat, namun terlanjur populer dikalangan masyarakat (Almanda & Lubis, 2018). Di daerah pedesaan, sangat menarik perhatian untuk mengembangkan lebih lanjut operasi mandiri karena tidak memerlukan biaya tinggi dan terlepas dari sistem jaringan transmisi. Sistem pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) menjadi pilihan menarik di antara sumber-sumber terbarukan lainnya, karena teknologinya yang matang, pekerjaan sipil yang minimal, dan biaya pemasangan yang murah. Di banyak negara berkembang, sistem PLTMH terletak di daerah perbukitan dan dioperasikan dalam mode yang berdiri sendiri. Hal ini menuntut diperlukannya teknologi yang tangguh dan andal yang dapat dikelola oleh masyarakat setempat, dengan pilihan teknologi pengontrol, generator, dan turbin (Gyawali, 2016).

Perubahan beban pada PLTMH akan terhubung langsung dengan generator. Jika torsi turbin tidak diubah saat terjadi perubahan beban, maka frekuensi dan tegangan listrik yang dihasilkan akan berubah dan dapat mengakibatkan kerusakan baik pada generator maupun di sisi beban yang akan mempengaruhi kualitas daya listrik (Rimbawati, 2022). Variasi beban di sisi konsumen menimbulkan beberapa

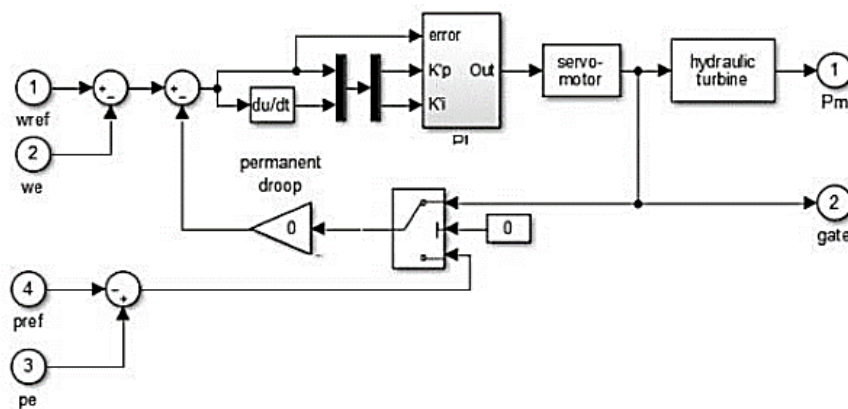
masalah yang terkait dengan PLTMH. Karena variasi ini, kecepatan generator bervariasi yang berarti frekuensi listrik berubah-ubah. Variasi frekuensi yang diperbolehkan adalah 1 persen di atas dan di bawah dengan frekuensi standar tegangan listrik adalah 50Hz. Masalah lain yang timbul adalah variasi aliran air yang menuju turbin. Jika debit aliran air meningkat, kecepatan generator akan meningkat menyebabkan frekuensi juga akan meningkat. Demikian pula jika debit aliran air berkurang, hal ini akan menyebabkan generator mengurangi kecepatannya sehingga menyebabkan frekuensi bergerak turun. Solusi yang disarankan dari dua permasalahan yang timbul adalah melalui sistem kontrol. Sistem kontrol yang pertama adalah sistem kontrol elektronik yang menyesuaikan beban pada generator untuk mempertahankan frekuensi konstan. Sistem kontrol yang kedua adalah sistem kontrol mekanik yang menyesuaikan aliran air untuk mempertahankan frekuensi yang konstan (Riaz et al., 2018).

Sistem kontrol yang mampu menstabilkan sistem kerja PLTMH terdiri dari beberapa komponen yang membantu agar sistem kontrol tersebut bekerja secara maksimal (Rimbawati, 2022). Namun untuk merancang sebuah sistem kontrol dengan mengaplikasikan secara langsung membutuhkan biaya yang cukup tinggi dan kemungkinan kerusakan komponen yang tidak dapat dihindari. Untuk itu diperlukan sebuah pemodelan dengan merancang sebuah sistem yang umumnya dilakukan dengan melakukan banyak penyederhanaan, memperhatikan masukan, keluaran dan juga gangguan yang ada. Tujuan dari pemodelan yaitu untuk mengetahui perilaku sebuah sistem. Pemodelan terbagi atas pemodelan skala dan pemodelan dengan menggunakan simulasi komputer/PC. Pemodelan dari sistem yang sederhana dapat dinyatakan dalam bentuk rumusan Matematik. Pada model matematik biasa diselesaikan menggunakan simulasi komputer dikarenakan melibatkan cukup banyak perhitungan yang perlu dilakukan (Prasetya, 2021).

#### **2.1.2.1 Sistem kontrol mekanik**

Teknik umum yang banyak digunakan dalam menjaga kestabilan frekuensi sistem PLTMH adalah dengan menggunakan sistem governor. Governor bekerja dengan mengatur aliran air yang masuk ke turbin untuk memutar generator. Frekuensi yang dihasilkan generator berbanding lurus dengan kecepatan putar

turbin. Pengendalian aliran air dilakukan dengan membuka pintu gerbang pada penstock menggunakan motor servo. Studi paling awal yang dirancang untuk mengatur sistem governor didasarkan pada pengontrol PID. Namun pada hasil keluaran masih ditemukan kelemahan, seperti terjadinya osilasi yang cukup lama pada keluaran sebelum menuju ke daerah steady state. Untuk mengatasi permasalahan tersebut dikembangkan teknik kontrol governor berbasis Fuzzy Logic Controller (FLC). Metode ini dapat mengurangi osilasi, tetapi dengan respons yang sangat lambat. Upaya lain yang telah dilakukan adalah dengan menggabungkan metode fuzzy dengan kontroler Proportional Integral (PI) konvensional untuk memberikan peningkatan respon sistem. Dengan adanya fuzzy, parameter PID dibuat agar lebih mampu beradaptasi dengan perubahan beban (Has et al., 2018).



**Gambar 6** Pemodelan sistem governor (Has et al., 2018)

Beban mekanis terdiri dari katup pada saluran masuk turbin. Aliran air ke turbin dikendalikan oleh katup yang dapat membatasi aliran dan karenanya menghasilkan pengendalian beban listrik yang dihasilkan. Sistem kontrol umpan balik dapat digunakan untuk mengontrol katup secara otomatis dengan motor servo. Sistem ini mahal karena motor dan katup yang digunakan dalam sistem tersebut. Selain itu, perawatan yang tepat diperlukan dalam sistem seperti itu karena bagian-bagian sistem yang berputar. Sistem mekanis juga kurang diminati karena waktu responsnya. Karena mengontrol aliran air ke saluran masuk, dibutuhkan waktu yang lebih cepat untuk merespons variasi beban (Riaz et al., 2018). Selain itu, sistem governor membutuhkan biaya yang mahal dan perawatan yang berat, membuat



penggunaannya di pembangkit tenaga mikro hidro tidak ekonomis apabila digunakan di daerah terpencil (Rimbawati, 2022).

### 2.1.2.2 Sistem kontrol elektronik

Teknik yang digunakan untuk mengontrol frekuensi generator berdasarkan pada mekanisme kontrol elektronik. Variasi frekuensi pada dasarnya disebabkan oleh variasi beban konsumen yang dilihat oleh generator. Jadi, ide dasar dari pengontrol adalah bekerja dengan teknik sedemikian rupa sehingga variasi pada konsumen yang dilihat oleh generator, dapat diiadakan. Hal ini dilakukan dengan menggunakan beban dummy yang dihubungkan secara paralel dengan beban konsumen. Nilai beban dummy diatur sedemikian rupa sehingga persamaan ini terpenuhi sepanjang waktu (Riaz et al., 2018).

Untuk menjaga daya generator tetap konstan maka diperlukan daya beban yang sama dengan daya generator, karena generator memiliki beban tiruan dan beban pemakai maka :

$$P_G = P_L + P_{DL} \quad (4)$$

dimana  $P_G$  adalah daya generator (W),  $P_L$  adalah daya beban (W) dan  $P_{DL}$  adalah daya beban *dummy* (W).

Berdasarkan rumus dari daya aktif, yakni :

$$P = V_{LN} \cdot I \cos \varphi \quad (5)$$

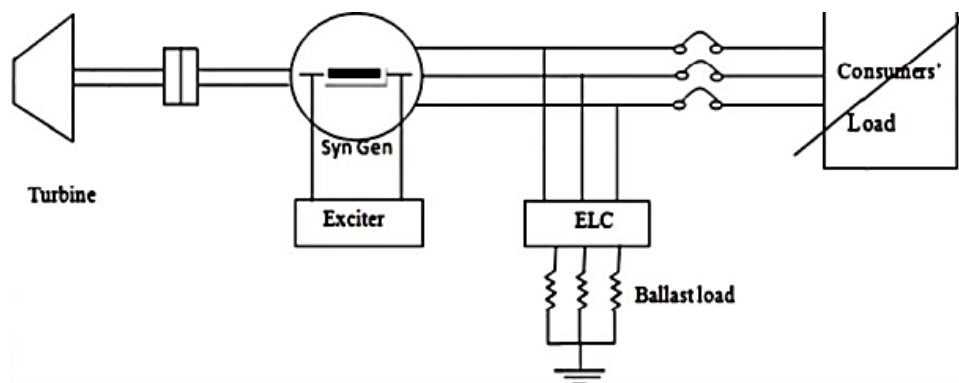
dengan beban resistif murni maka nilai  $\cos \varphi = 1$  maka :

$$V_{LN} I_G = V_{LN} I_L + V_{LN} I_{DL} \quad (6)$$

$$I_G = I_L + I_{DL} \quad (7)$$

dimana  $I_G$  adalah arus generator (W),  $I_L$  adalah arus beban (W) dan  $I_{DL}$  adalah arus beban *dummy* (W).

Kontrol beban elektronik (ELC) bekerja dengan membaca arus keluaran dari pembangkit yakni  $I_L$  yang akan berubah sesuai dengan perubahan beban pemakai. Apabila  $I_G$  bernilai sama dengan  $I_L$ , maka beban menyerap semua daya generator dan ELC tidak akan mengaktifkan dummy load sehingga  $I_{DL}$  bernilai nol. Namun apabila nilai  $I_G$  lebih besar dari nilai  $I_L$ , maka beban tidak menyerap semua daya yang dihasilkan oleh generator sehingga terjadi ketidakseimbangan beban. Oleh karena itu, ELC akan mengaktifkan dummy load. Jadi  $I_{DL}$  bernilai lebih dari nol sesuai dengan perbedaan arus antara  $I_G$  dan  $I_L$  (Nurittta, 2013).



**Gambar 7** Diagram blok PLTMH dengan kontrol beban elektronik (Ur Rehman & Riaz, 2018)

Sistem kontrol beban elektronik (ELC) tidak memerlukan bagian yang bergerak dan waktu responnya juga sangat singkat. ELC terbuat dari komponen elektronik yang murah dan mudah diperoleh karena tersedia di mana-mana. Sistem ini juga tidak memerlukan perawatan apa pun karena tidak adanya bagian yang bergerak sehingga membuat sistem ini lebih murah dan dapat diaplikasikan di daerah terpencil (Riaz et al., 2018). Akan tetapi, jika diperhatikan lebih lanjut, daya yang masuk ke beban *dummy* tidak terpakai dan hanya terbuang percuma. Penelitian ini mencoba mengembangkan sebuah ide agar daya yang terbuang tersebut dapat dimanfaatkan kembali untuk beban lain. Dengan menggunakan sistem penyimpanan energi, daya yang terbuang ke beban *dummy* tersebut dapat diambil dan dimanfaatkan kembali untuk beban lain. Sistem penyimpanan energi memungkinkan menyimpan energi yang tidak terpakai dan menggunakan energi tersebut saat dibutuhkan di masa depan.

### 2.1.3 Efisiensi PLTMH

Efisiensi sistem ( $\eta$  PLTMH) merupakan kemampuan peralatan pembangkit untuk mengubah energi kinetik dari air yang mengalir menjadi energi listrik. Perhitungan efisiensi diperoleh dari daya *output* dibagi dengan daya *input* (I. G. W. Putra et al., 2018). Perhitungan efisiensi dilakukan untuk mengetahui hasil yang telah didapatkan oleh sistem pembangkit. Adapun parameter yang akan digunakan untuk menghitung efisiensi yaitu terhadap daya hidrolis dengan daya generator (Setiawan et al., 2021). PLTMH dikatakan efisien apabila besar persentase efisiensi lebih dari 70% (Al Bawani & Sudarti, 2022). Pembangkit listrik tenaga mikrohidro memiliki efisiensi sebesar 70-90 % sehingga apabila PLTMH memiliki efisiensi kurang dari 70% maka PLTMH tersebut dikatakan tidak efisien (Murni & Suryanto, 2021).

Melalui efisiensi daya PLTMH, dapat diketahui berapa persentase kinerja PLTMH dan seberapa efisien suatu sistem PLTMH. Nilai efisiensi dipengaruhi nilai variabel yaitu debit air, efisiensi turbin dan efisiensi generator. Semakin besar debit air maka efisiensi PLTMH semakin baik, begitu sebaliknya semakin kecil debit air (musim kemarau) maka efisiensi semakin turun. (Murni & Suryanto, 2021). Efisiensi turbin ditentukan oleh perbandingan daya hidraulik dengan daya poros turbin (Sriwijaya & Kinetika, 2019). Namun pada penelitian ini, pemodelan turbin dalam satuan per unit dengan nilai masukan sama dengan 1. Efisiensi Generator, yang dihasilkan generator adalah perbandingan daya masukan ke generator ( $P_{in}$ ) berbanding dengan daya keluaran ( $P_{out}$ ) yang dihasilkan generator (Sukusno, 2022).

$$\eta_{PLTMH} = \frac{P_{out \text{ maksimal}}}{P_{input \text{ yang dibangkitkan}}} \times 100\% \quad (8)$$

dimana  $\eta$  merupakan Efisiensi PLTMH (%),  $P_{out}$  maksimal adalah daya keluaran generator dan  $P_{input}$  yang dibangkitkan adalah data sheet generator.

## 2.2 Penyimpanan Energi

Kebutuhan energi yang meningkat mengakibatkan terjadinya pemanasan global yang disebabkan oleh emisi gas rumah kaca. Cara utama untuk mengurangi

emisi adalah dengan menghasilkan energi dari sumber terbarukan dan mengurangi konsumsi energi dengan menggunakan berbagai teknologi hemat energi (Song et al., 2023). Penyimpanan energi adalah kunci untuk mengatasi keberagaman dan peningkatan sumber energi terbarukan (Orth et al., 2023). Dengan memanfaatkan beberapa teknologi penyimpanan energi dapat memberikan keunggulan dari masing-masing teknologi sekaligus meminimalkan kelemahan untuk mendapatkan penyimpanan energi yang lebih efektif dan dapat diandalkan (Rekioua, 2023).

Sistem penyimpanan energi merupakan sebuah sistem penyimpanan kelebihan energi ketika permintaan tidak mencukupi dan melepaskan energi ketika permintaan terpenuhi. Tujuan utama dari penyimpanan energi adalah untuk mengimbangi permintaan dan pasokan energi. Sistem elektrokimia, mekanik, listrik, dan hibrida umumnya digunakan sebagai sistem penyimpanan energi untuk sumber energi terbarukan (Rekioua, 2023). Sistem penyimpanan energi dapat mendukung energi terbarukan dengan memberikan kestabilan tegangan, memperlancar fluktuasi output, menyeimbangkan aliran daya dalam jaringan, serta mengimbangi antara pasokan dan permintaan (Song et al., 2023).

### **2.2.1 Jenis-jenis penyimpanan energi**

Beberapa teknologi penyimpanan energi telah dikembangkan dengan karakteristik dan keunggulan yang berbeda-beda. Antara lain :

- 1) Penyimpanan Elektrokimia: Penyimpanan elektrokimia merujuk pada jenis sistem penyimpanan energi yang melibatkan konversi energi kimia menjadi energi listrik dan sebaliknya melalui reaksi elektrokimia. Beberapa contoh diantaranya adalah baterai dan sel bahan bakar (fuel cell).
- 2) Penyimpanan Mekanikal: Jenis penyimpanan ini melibatkan pemanfaatan energi mekanikal untuk menyimpan dan mengeluarkan energi. Contoh dari teknologi ini adalah pompa hidro, flywheel, gravitasi, dan kompresi udara.
- 3) Penyimpanan Listrik: Proses penyimpanan energi listrik melibatkan perubahan energi listrik menjadi bentuk kimia, potensial, kinetik, atau magnetik, yang dapat dilepaskan kembali sebagai energi listrik saat diperlukan. Contoh penyimpanan ini adalah kapasitor super, kapasitor elektrolit padat, dan termal. (Rekioua, 2023).

## 2.2.2 Sistem penyimpanan energi baterai

Sistem penyimpanan energi baterai menjadi pilihan terbaik dalam sistem tenaga modern karena ketidakseimbangan antara pasokan dan permintaan listrik. Sistem tenaga listrik terdiri dari semakin banyak sumber daya listrik yang terdistribusi dan terputus-putus. Pelayanan jaringan sistem penyimpanan energi baterai, melibatkan penggunaan baterai dalam sistem tenaga untuk berbagai tujuan, seperti pengaturan frekuensi, menstabilkan tegangan, penyimpanan energi terbarukan, dan lain sebagainya. Layanan kontrol frekuensi adalah salah satu aplikasi yang paling disukai untuk Sistem penyimpanan energi baterai, yang digunakan untuk memulihkan frekuensi jaringan jika terjadi gangguan dengan mengekstraksi atau menyuntikkan daya yang bergantung pada frekuensi (Zhao et al., 2023). Baterai adalah penyimpanan energi elektrokimia yang paling dikenal dan umum. Baterai bekerja berdasarkan reaksi elektrokimia antara dua elektroda yang terendapkan dalam elektrolit. Ketika baterai diisi, energi listrik diubah menjadi energi kimia dengan menggerakkan ion-ion di antara elektroda dan elektrolit. Saat baterai diperlukan untuk menyediakan daya, energi kimia ini diubah kembali menjadi energi listrik (Rekioua, 2023).

Terdapat beberapa jenis baterai yang sering digunakan pada umumnya, antara lain :

### 1) Baterai Asam Timbal (*Lead Acid*)

Elektroda baterai asam terdiri atas pelat timah oksida sebagai anoda (elektroda positif) dan timbal murni Pb (spon timah) sebagai katoda (elektroda negatif) (Elektro et al., 2020). Baterai asam timbal digunakan dalam salah satu eksperimen penyimpanan energi paling awal. Meskipun memiliki kondisi pengisian/pengosongan stabil yang patut dipuji, baterai asam timbal terlalu besar dan berat untuk digunakan pada peralatan listrik portabel dan ringan (Hossain et al., 2023).

### 2) Baterai *Lithium-Ion*

Pada baterai ini terdapat katoda dan anoda yang terbentuk dari *lithium* oksida dan juga karbon. Elektrolit baterai terdiri dari garam *lithium* yang terlarut oleh pelarut organik (Elektro et al., 2020). Baterai lithium-ion

menggunakan elektrolit polimer padat untuk menghindari kebocoran cairan dari baterai sekunder konvensional. Selain itu, baterai terurai menjadi struktur kecil dan ringan yang berfungsi baik untuk elektronik portabel. Sebagian besar ponsel kontemporer, laptop, dan perangkat elektronik kecil dan ringan lainnya mengandalkan Baterai *lithium ion* untuk penyimpanan daya. Baterai *lithium ion* ramah lingkungan, keamanannya yang menguntungkan, kepadatan daya, dan siklus hidup yang diperpanjang telah menarik perhatian pada penyimpanan energi untuk berbagai aplikasi, misalnya penyimpanan alat tulis, kendaraan listrik, dan perangkat elektronik portabel (Hossain et al., 2023)

3) Baterai alkaline cadmium (Ni-Cd)

Elektrolit dalam baterai alkaline adalah larutan alkali (kalium hidroksida). Baterai alkaline cadmium (Ni-Cd) paling umum digunakan di pembangkit listrik (Elektro et al., 2020). Saat terkena arus tinggi, baterai Ni-Cd memiliki kapasitas yang sangat baik. Namun, karena unsur-unsur penyusunnya, mereka juga menunjukkan masalah toksisitas yang meresahkan dan efek memori tidak menyenangkan yang secara drastis mengurangi masa pakai baterai (Hossain et al., 2023).

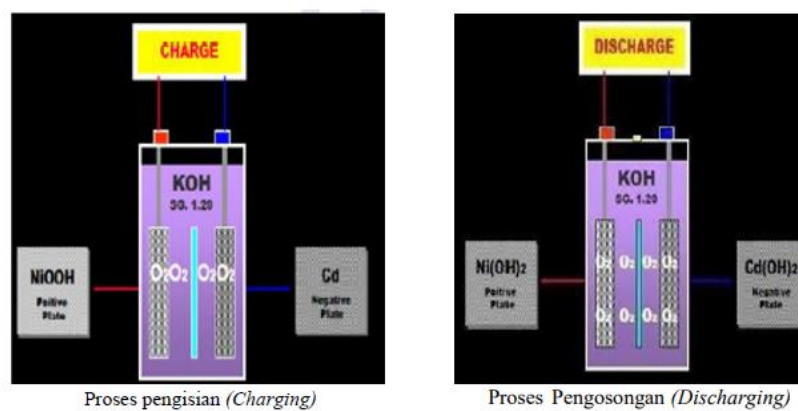
4) Baterai Nikel-metal hidrida (Ni-MH)

Nikel-metal hidrida (Ni-MH) merupakan teknologi penyimpanan energi pertama yang digunakan pada perangkat elektronik portabel, misalnya kamera digital dan telepon. Meskipun baterai Ni-MH lebih tahan lama dan bermanfaat bagi lingkungan namun kebocoran menjadi masalah pada baterai ini (Hossain et al., 2023)

Baterai diklasifikasikan sebagai baterai primer dan sekunder. Kedua klasifikasi tersebut mengubah energi potensial kimia menjadi energi listrik. Untuk baterai primer, reaktan kimianya dikonsumsi dalam proses yang tidak mudah dibalik, sehingga menghasilkan baterai yang hanya dapat dikosongkan satu kali saja. Contoh baterai primer adalah baterai alkaline biasa dan baterai jam tangan. Baterai sekunder juga mengubah energi potensial kimia menjadi energi listrik, namun melalui proses kimia yang dapat dibalik sehingga menghasilkan baterai yang dapat diisi ulang. Penerapan energi listrik dari sumber eksternal seperti

generator atau baterai lain dapat meregenerasi reaktan kimia awal, memulihkan daya baterai, dan memungkinkan siklus pengisian/pengosongan berulang. Karena kemampuannya menyimpan energi, jenis sel ini juga dikenal sebagai baterai penyimpanan. Contoh umum baterai penyimpanan mencakup baterai timbal-asam dan baterai litium-ion (Heth, 2019). Penelitian ini menggunakan baterai sekunder sebagai penyimpanan energi. Baterai timbal-asam dan baterai litium-ion menjadi pilihan untuk digunakan. Dengan membandingkan kedua baterai tersebut, baterai asam timbal adalah sangat cocok untuk digunakan pada sistem mandiri pada daerah terpencil karena baterai Lithium-ion tiga kali lebih mahal daripada baterai asam timbal. Selain itu, baterai Li-ion perlu dioperasikan pada suhu yang jauh lebih rendah dibandingkan baterai asam timbal (Farhana et al., 2021).

Cara kerja suatu baterai terdiri dari 2 (dua) proses, yaitu: proses pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*). Pada saat terjadi proses pengosongan (*discharging*), maka sel baterai yang terkoneksi ke beban akan memperoleh suplai, dan kemudian elektron mengalir dari anoda melalui beban menuju katoda. Dari hasil reaksi tersebut, maka ion positif akan mengalir menuju katoda, sedangkan ion negatif akan mengalir menuju anoda. Ketika sel baterai terhubung ke suplai pada saat proses pengisian (*charging*), maka polaritas elektroda suatu baterai akan berbeda dengan ketika pengosongan (*discharging*). Elektroda negatif akan berubah menjadi katoda, sedangkan elektroda positif akan berubah menjadi anoda, sehingga elektron kemudian mengalir dari anoda menuju ke katoda melewati suplai (Nuril Ihsan, A., 2022).



**Gambar 8** Pengisian dan pengosongan baterai ( Nuril Ihsan, A., 2022)

### 2.2.3 Kapasitas dan efisiensi baterai

Kapasitas baterai merupakan salah satu ukuran kemampuan suatu baterai untuk melewati besar arus selama periode waktu yang telah ditentukan, kapasitas baterai biasanya ditentukan dengan AH (*Ampere Hour*) (Nuril Ihsan, A., 2022). Untuk menjamin kontinuitas suplai energi, diperlukan baterai dengan kapasitas dan spesifikasi tertentu (Mario Roal, 2015). Ukuran baterai ditentukan oleh kapasitas baterai seperti besar kapasitas penyimpanan dan minimum dari kondisi waktu *charge* dan *discharge* baterai (Away et al., 2019). Penyimpanan energi baterai umumnya menggunakan pendekatan SOC, DOD dan SOH untuk memperkirakan kinerja energi dan kapasitas C baterai untuk memperkirakan kinerja daya (Zhao et al., 2023). SOH didefinisikan sebagai total dari kapasitas energi baterai yang dapat digunakan (Away et al., 2019). Perhitungan nilai SOH dilakukan dengan cara membandingkan nilai kapasitas total saat ini (mAh). SOC merupakan gambaran dari berapa banyak energi yang tersedia dalam baterai yang dapat digunakan (Away et al., 2019). SOC merupakan suatu ukuran seberapa penuhnya muatan listrik dalam suatu baterai dalam persen (%). Hubungan antara tegangan dengan SOC sangat bergantung pada temperature baterai. Baterai yang lebih rendah temperaturnya akan memperlihatkan tegangan yang lebih rendah pada kondisi penuh dibanding baterai dengan temperatur lebih tinggi (Mario Roal, 2015). Secara umum, SOC dari sebuah baterai dapat diartikan sebagai rasio perbandingan kapasitas saat ini ( $Q_c$ ) dengan kapasitas nominalnya ( $Q_{max}$ ). Kapasitas nominal merepresentasikan nilai maksimum pengisian yang dapat disimpan oleh baterai (Zhao et al., 2023).

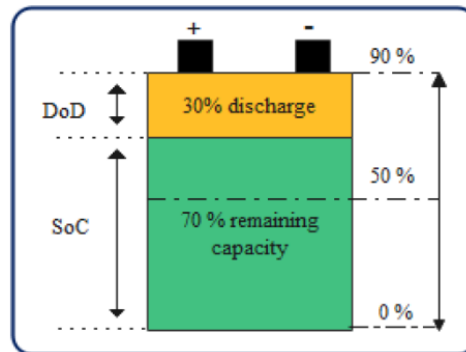
$$SOC = \frac{Q_c}{Q_{max}} \quad (9)$$

DOD adalah kondisi berapa besar persentase kapasitas baterai yang tersisa (Away et al., 2019). DOD merupakan suatu ketentuan yang membatasi tingkat kedalaman *discharge* maksimum yang dapat diberlakukan pada baterai tersebut. Pengaturan DOD berperan dalam menjaga usia pakai (*life time*) dari baterai tersebut. Semakin dalam DOD yang diberlakukan pada suatu baterai, maka semakin pendek pula usia pakai dari baterai tersebut (Mario Roal, 2015). Perhitungan nilai DOD didapatkan dari pengurangan persentase kapasitas penuh baterai dengan nilai SOC (Nasrullah et al., 2022).



$$DOD = 100\% - SOC \quad (10)$$

Ini yang menjadi parameter dalam menentukan berapa besar daya yang dapat disuplai. Jika kondisi baterai 100% dengan DOD 80% dan SOC 20%, maka baterai dapat menyuplai daya sebesar 80% dari kapasitasnya, dan 20%-nya akan tetap tersimpan di baterai (Away et al., 2019).



**Gambar 9** Diagram status pengisian daya baterai (Rekioua, 2023)

Menurut standar dari IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), suatu baterai memiliki :

- 1) Tegangan Minimum ( $V_{min}$ ) adalah sebesar 95 % dari tegangan nominal baterai yang digunakan. Jadi jika tegangan nominal sebesar 110 VDC maka baterai akan memiliki tegangan minimum sebesar 104,5 VDC.
- 2) Tegangan minimum ( $V_{min}$ ) pengosongan adalah sebesar 80% dari tegangan penuh baterai yang digunakan (Nuril Ihsan,A., 2022).

### 2.3 Simulasi MATLAB/Simulink

Perkembangan dari komputer dengan banyaknya inovasi telah memberikan banyak kontribusi yang sangat signifikan bagi kemajuan ilmu pengetahuan yaitu diantaranya adanya *software-software* yang mempermudah dalam membantu peneliti merancang serta mempraktisi lainnya (Prasetiya, 2021). Terdapat ratusan bahkan ribuan program aplikasi komputer atau perangkat lunak yang dapat dimanfaatkan untuk pembelajaran matematika, khususnya Aljabar Linier. Salah satu perangkat lunak bantu yang dapat digunakan dalam pembelajaran Aljabar linier yaitu *Matrix Laboratory* (MATLAB). Program ini dapat dimanfaatkan untuk

meningkatkan kecepatan, dan keakuratan dalam berbagai perhitungan dalam pembelajaran aljabar linier sehingga waktu yang diperlukan untuk mengerjakan lebih efisien dan hasil yang diperoleh lebih akurat dibandingkan dengan perhitungan yang dilakukan secara manual, selain itu juga dapat memvisualisasikan grafik dalam bentuk 2 dimensi maupun 3 dimensi (Cahyono, 2016). MATLAB dirilis oleh sebuah perusahaan yang bernama MATHWORK (Prasetya, 2021). Untuk mempelajari kebenaran algoritma penetapan nilai secara real time, paket perangkat lunak MATLAB mengembangkan model yang sederhana. MATLAB merupakan platform perangkat lunak yang dirancang khusus untuk para insinyur dan ilmuwan. MATLAB memiliki bahasa pemrograman MATLAB sendiri yang berbasis matriks. *Software* ini dapat menganalisis data, mengembangkan algoritma sendiri, dan membuat model serta aplikasi (Majidov et al., 2021).

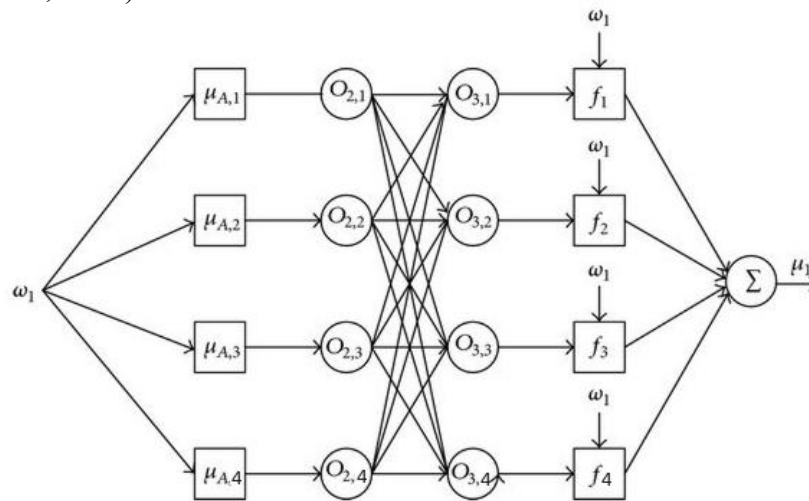
Pada pemrograman MATLAB, terdapat aplikasi model simulink. simulink merupakan lingkungan pemrograman grafis untuk paket perangkat lunak MATLAB dengan pemodelan dan analisis sistem dinamis. elemen utamanya adalah blok grafis yang sudah jadi dan kumpulan pustaka blok yang dapat disesuaikan. salah satu keunggulan utama simulink adalah kemampuannya dalam memodelkan sistem nonlinier. perpustakaan *simscape electrical* menyediakan komponen untuk pemodelan sistem elektronik, mekatronik, dan kelistrikan. ini mencakup model semikonduktor, motor, dan komponen untuk aplikasi seperti jaringan pintar dan sistem energi terbarukan. komponen-komponen ini dapat digunakan untuk mengevaluasi arsitektur rangkaian analog, mengembangkan sistem mekatronik dengan penggerak listrik, dan menganalisis pembangkitan daya, konversi, transmisi, dan konsumsi di tingkat jaringan (majidov et al., 2021). banyak perancangan sistem yang keseluruhan sistemnya telah diimplementasikan pada MATLAB/simulink dan cara kerja berbagai peralatan yang digunakan telah diverifikasi melalui simulasi, dan hasil simulasi tersebut membuktikan bahwa sistem dapat diimplementasikan (Ur Rehman & Riaz, 2018).

### **2.3.1 Pemodelan sistem PLTMH pada MATLAB/simulink**

Tujuan dalam membuat sebuah pemodelan dari PLTMH menggunakan bantuan aplikasi MATLAB/SIMULINK adalah melihat respon dari keluarannya



keanggotaan dan satu keluaran ( $u$ ) seperti digambarkan pada Gambar 3 berikut ini (Nikoo et al., 2016) :



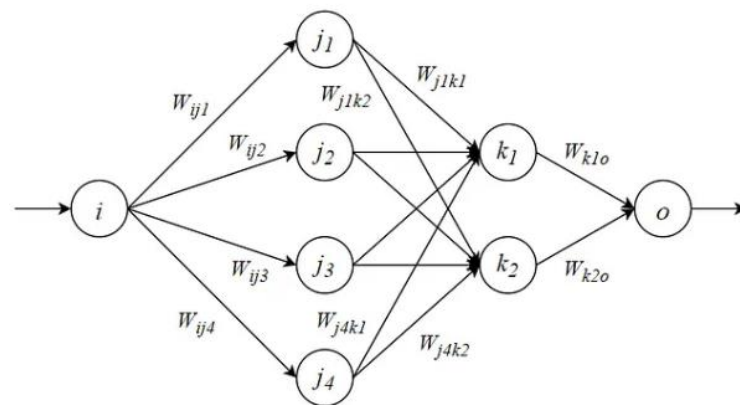
**Gambar 11** Struktur ANFIS (Tapia-Herrera et al., 2013)

Skema kendali ANFIS dibangun menggunakan MATLAB Simulink berdasarkan instruksi “nnstart”. **Gambar 11** Struktur ANFIS menunjukkan desain umum pengontrol ANFIS dengan satu input. Nilai ANFIS bergantung pada nilai PI sebagai acuan kendali (Tapia-Herrera et al., 2013). ANFIS disederhanakan dalam satu input  $\omega I$  yang merupakan kecepatan putaran generator ( $W_{ref}$ ) dalam radian per detik (rad/s) dan satu output  $\mu I$  yang merupakan daya error ( $P_{dump}$ ). Keempat aturan dalam relasi “If-Then” dikonstruksikan menggunakan Takagi\_Sugeno (Has et al., 2018).

### 2.3.3 Pengembangan kontrol frekuensi beban dengan ANN

*Artificial Neural Network (ANN)* merupakan suatu model yang mencoba meniru struktur dan cara kerja jaringan saraf pada otak manusia. *Neural Network* juga terdiri dari beberapa neuron yang saling berhubungan. Neuron – neuron tersebut mentransformasikan informasi yang berupa input yang diterima melalui sambungan keluarannya menuju kesambungan yang lain. Input tersebut selanjutnya dikirim ke neuron dengan bobot kedatangan tertentu. Input ini akan diproses oleh suatu fungsi perambatan tertentu dengan menjumlahkan semua nilai bobot lalu hasilnya akan dibandingkan dengan suatu nilai ambang (*threshold*) tertentu melalui fungsi aktivasi setiap neuron. Jika input tidak melewati nilai ambang maka neuron tidak diaktifkan, namun jika melewati neuron diaktifkan dan mengirimkan output

melalui bobot keluarannya ke semua neuron yang berhubungan dengannya. (Sitohang et al., 2021). ANN banyak digunakan dalam penambangan data. Metode ini dapat digunakan dalam clustering, regresi, klasifikasi, peramalan deret waktu, dan visualisasi. Metode backpropagation juga termasuk dalam model ANN yang digunakan untuk peramalan; metode ini merupakan bagian dari supervised learning yang biasanya digunakan pada lapisan untuk menentukan bobot yang terhubung dengan neuron pada lapisan tersembunyi (Dwipayana & Sugiartawan, 2023). Jaringan propagasi balik (*backpropagation*) merupakan salah satu algoritma yang sering digunakan dalam menyelesaikan persoalan atau masalah yang rumit.



**Gambar 12** Struktur ANN

Sumber : <https://medium.com/@samuelsena/pengenalan-deep-learning-part-3-backpropagation-algorithm-720be9a5fbb8>

Neural network diatas terdiri dari 2 hidden layer. Hidden layer pertama menggunakan ReLU, hidden layer kedua menggunakan sigmoid dan terakhir output layer menggunakan linear sebagai activation function. Bias pada diagram diatas sebenarnya ada tetapi tidak digambarkan. Algoritma *training artificial neural network* propagasi balik terdiri atas dua langkah, yaitu perambatan/propagasi maju dan perambatan/propagasi mundur. Langkah perambatan maju yang diberikan selama jaringan mengalami pelatihan. Jaringan propagasi balik terdiri atas 3 atau lebih lapisan/*layer*. Perbedaannya hanya pada jumlah lapisan tersembunyi yang dimilikinya, ada yang 1 lapisan dan ada yang lebih dari 1 lapisan. Pada setiap lapisan, tiap unit pengolah melakukan penjumlahan berbobot dan menerapkan fungsi sigmoid untuk menghitung keluarannya. Untuk menghitung nilai penjumlahan berbobot digunakan persamaan :

$$S_j = \sum_{i=0}^n \mu_i \omega_{ij} \quad (11)$$

dengan  $\mu_i$  yang merupakan masukan yang berasal dari unit  $i$  dan  $\omega_{ij}$  merupakan bobot sambungan dari unit  $i$  ke unit  $j$ .

Hasil simulasi diberi label output jaringan yang akan dibandingkan dengan output (target). Perbandingan tersebut dibandingkan kesalahannya dengan Mean Square Error (MSE) (Handayani, 2018).

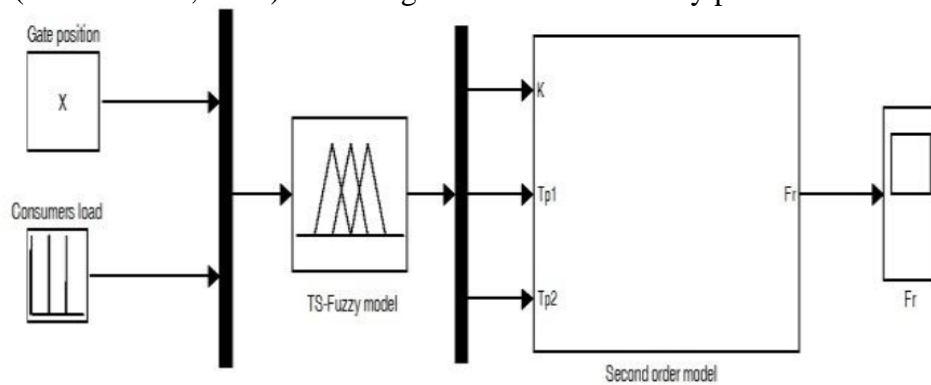
Pada penelitian ini, dilakukan fungsi transfer data dari kontrol referensi ke kontrol baru yang diusulkan. Ada beberapa cara transformasi data yang dilakukan sebelum menerapkan suatu metode, antara lain adalah normalisasi atau *scaling* adalah prosedur mengubah data sehingga berada dalam skala tertentu (Sitohang et al., 2021). Dalam mentransformasikan data ada beberapa fungsi yang dapat digunakan antara lain fungsi sigmoid biner dan fungsi skala min max. Fungsi ini digunakan untuk *Artificial Neural Network* yang dilatih dengan menggunakan metode *backpropagation*. Fungsi sigmoid dan skala min max memiliki nilai pada range 0 sampai 1. Oleh karena itu, fungsi aktivasi yang digunakan untuk mengolah data. Digunakan fungsi sigmoid (biner), maka data harus ditransformasikan dulu karena range keluaran fungsi aktivasi sigmoid adalah [0,1]. Dengan BB (batas bawah) adalah 0 dan BA (batas atas) adalah 1, sehingga data ditransformasikan ke interval yang lebih kecil (Handayani, 2018). Pada Penelitian ini, digunakan metode min max karena lebih sederhana. Persamaan untuk menghitung MinMax *Normalization* dapat dilihat pada persamaan (Permana, 2022) (Dwipayana & Sugiartawan, 2023) (Handayani, 2018) :

$$X' = \frac{X - \min_x}{\max_x - \min_x} \quad (12)$$

dimana  $x$  adalah nilai tertentu yang akan dinormalisasi,  $x'$  adalah nilai hasil normalisasi,  $\min(x)$  adalah nilai minimal dari sebuah atribut dan  $\max(x)$  adalah nilai maksimal dari sebuah atribut

### 2.3.4 Kontrol *charge/discharge* baterai dengan logika *fuzzy*

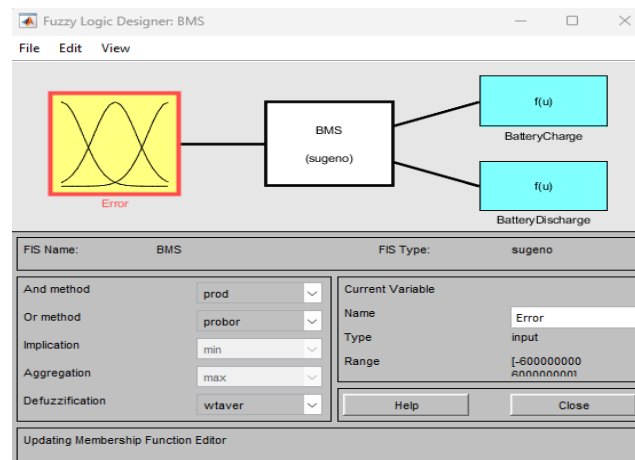
Logika *fuzzy* adalah teknologi penting dan merupakan cabang teori otomasi dan kontrol yang sukses, yang memberikan hasil yang baik dalam pengendalian sistem tenaga. Tujuan utama menggunakan kontrol *fuzzy* adalah untuk memastikan kontrol yang baik pada PLTMH yang terisolasi, mengamati respons frekuensi, menguji kinerja sistem pengontrol *fuzzy* dalam berbagai kondisi pada PLTMH yang melayani beban konsumen yang bervariasi. Untuk menguji pengaruh berbagai beban dan kondisi pada kinerja operasional sistem (Kamble & Akolkar, 2018). Model pengontrol *fuzzy* terbagi atas model kontrol *fuzzy* mamdani dan model kontrol *fuzzy* sugeno. Model *fuzzy* Sugeno menjadi pilihan terbaik untuk sistem ini karena menyajikan alternatif yang baik untuk menentukan model matematis sederhana dari sistem dinamik di sekitar beberapa titik operasi. *Fuzzy* sugeno dianggap sebagai model logika yang menggunakan aturan «If...Then» untuk membangun hubungan kualitatif antara masukan/keluaran model. Selain itu, model *fuzzy* ini juga memiliki struktur matematis yang fleksibel sehingga mampu memperkirakan sejumlah besar sistem nonlinier kompleks dengan akurasi yang baik (Achour et al., 2016). Berikut gambaran kontrol *fuzzy* pada sistem PLTMH :



**Gambar 13** Model *fuzzy* sugeno pada PLTMH (Achour et al., 2016)

Pada penelitian ini, *fuzzy inference sistem* (FIS) hanya mempunyai satu input dari nilai error  $P_{dump}$ , serta dua output output *charge* dan *discharge*. Pada model sugeno orde satu, himpunan aturan menggunakan kombinasi linier dari input yang dapat diekspresikan. Data tersebut dimasukkan kedalam *fuzzy* Sugeno dengan memasukkan data training ke load data, generate FIS. Model *fuzzy* ini kemudian dihubungkan dengan kontrol *charge* dan *discharge* baterai untuk mengoptimalkan

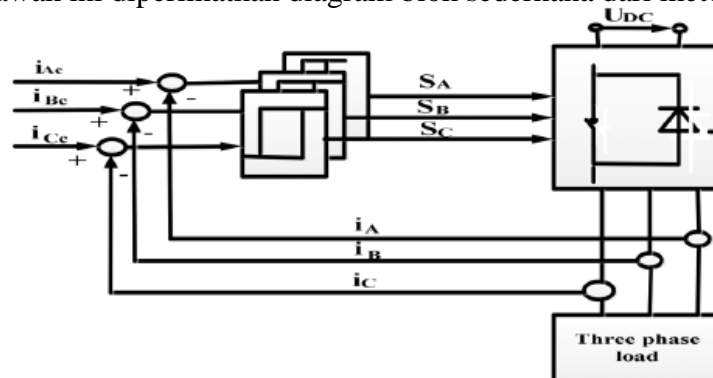
sistem PLTMH (Andrik et al., 2018). Tampilan FIS dari model fuzzy sugeno diperlihatkan pada gambar berikut :



**Gambar 14** FIS model sugeno

## 2.4 Metode Hysteresis Current Control

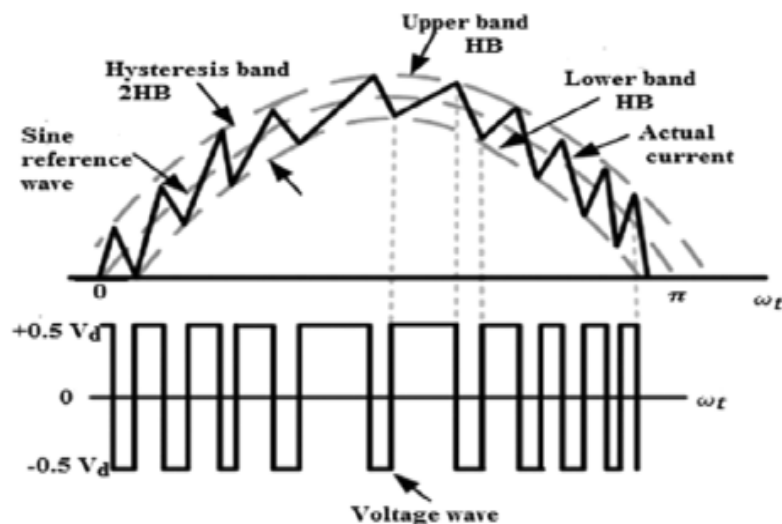
*Hysteresis Current Control* (HCC) adalah suatu metode pengendalian gelombang arus keluaran agar mengikuti bentuk gelombang arus referensi. Pengendalian arus hysteresis merupakan metode pengendalian yang paling mudah untuk diterapkan (Blorfan et al., 2011). *Hysteresis Current Control* (HCC) merupakan metode yang mengatur Ton dan Toff pulsa modulasi (PWM). Dalam metode ini pulsa output PWM diatur berdasarkan perubahan arus referensi dengan arus aktual menggunakan Hysteresis band. HCC bekerja dengan arus referensi, dimana arus referensi ini ( $i_{ref}$ ) dibandingkan dengan arus terukur pada keluaran converter dan errornya dikendalikan dengan hysteresis band, yang akan menentukan lebar pulsa modulasi dari switch konverter (T. Y. Putra & Yuhendri, 2021). Di bawah ini diperlihatkan diagram blok sederhana dari metode HCC.



**Gambar 15** Diagram blok *hysteresis current control* (Dwivedi & Tiwari, 2017)

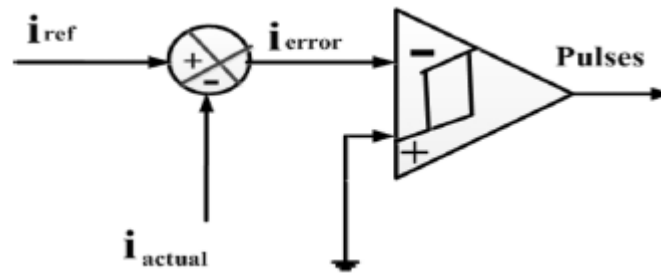


Dalam metode HCC, sebuah pita dibuat di sekitar gelombang arus referensi. Pita adalah batas toleransi atas dan bawah di sekitar arus referensi, di mana arus aktual harus berayun. Jika arus sebenarnya melewati batas pita, arus tersebut dibuat kembali ke dalam pita. Dalam rangkaian elektronika, komparator biasanya digunakan untuk membandingkan sinyal referensi dengan sinyal sebenarnya dan keluaran yang dibandingkan diberikan ke *three phase control rectifier* sebagai sinyal gerbang. *Three phase control rectifier* ini dapat dikontrol dengan batas pita histeresis. HCC banyak digunakan dalam aplikasi industri, karena kesederhanaannya dan fitur stabilitasnya yang menonjol. Kontroler ini memberikan respons transien dan kondisi waktu yang cepat terhadap variasi kondisi beban (Harshitha et al., 2017). Gambar berikut ini merupakan sistem modulasi HCC :



**Gambar 16** Prinsip kerja *hysteresis current control* (Dwivedi & Tiwari, 2017)

HCC pada dasarnya kuat pada penyimpangan parameter beban, menunjukkan efek transien yang sangat cepat dan sesuai untuk aplikasi yang mudah. Pada metode HCC seperti yang dibuktikan pada Gambar 2 Ia (arus saluran nyata) dibandingkan dengan  $I_{ref}$  (arus referensi). Bentuk dan besaran  $i_{ref}$  yang diinginkan diperoleh dari keluaran pengontrol tegangan. Berdasarkan histeresis  $\Delta I$  adalah keluaran komparator histeresis (Dwivedi & Tiwari, 2017). Batas histeresis atas adalah jumlah arus referensi dan error maksimum atau selisih antara batas atas dan arus referensi. Histeresis yang lebih rendah ditentukan oleh pengurangan arus referensi dan kesalahan error. Jika nilai error minimum dan maksimum sama, maka bandwidth histeresis sama dengan dua kali error (Blorfan et al., 2011).



**Gambar 17** Konsep *hysteresis current control* (Dwivedi & Tiwari, 2017)

Metode HCC kuat, akurat dan mudah, serta memberikan respon yang cepat dan dinamis karena kelebihanannya. Ini dikategorikan ke dalam pengontrol histeresis berbasis fasor ruang dan pengontrol histeresis (Dwivedi & Tiwari, 2017).

## 2.5 Kalkulasi Ekonomi Energi PLTMH

Kalkulasi ekonomi energi merupakan kegiatan yang diperlukan untuk melihat dan meninjau seberapa besar nilai energi yang dapat diperoleh per tahunnya. Berdasarkan biaya investasi serta biaya operasional dan biaya pemeliharaan, apakah energi yang dihasilkan dapat menutupi dengan keuntungan yang diperoleh atau sebaliknya yaitu kerugian. Biaya investasi awal untuk perencanaan sistem PLTMH ada dua yakni biaya langsung yang meliputi total biaya yang diperlukan dalam pembangunan konstruksi PLTMH dan biaya tak langsung meliputi biaya tidak terduga untuk pengeluaran yang tidak dapat diperkirakan saat ini (Komang Ogik Parmana Putra et al., 2023).

### 2.5.1 Harga pokok produksi (HPP)

Besarnya energi yang dapat diperoleh per tahun dapat dikalkulasi melalui hasil perkalian jumlah daya dibangkitkan (kW) dengan waktu yang diperlukan (t) selama satu tahun (8760 jam) dengan factor daya PF. Secara teori dapat digunakan persamaan (Rondonuwu & Pangemanan, 2019):

$$\text{Energi/Tahun} = P_{net} \times 8760 \times PF \quad (13)$$

dimana *energi/tahun* merupakan produksi energi per tahun (kWh),  $P_{net}$  adalah daya bersih (kW) dan PF adalah Faktor daya

Harga pokok produksi (HPP) merupakan besarnya biaya yang dikeluarkan untuk memproduksi energi dari pengoperasian suatu sistem pembangkit, hal ini diperlukan untuk mengetahui apakah produksi listriknya lebih murah atau lebih mahal. Harga pokok produksi per kWh dapat dihasilkan dengan menghitung semua

biaya modal (Cannual) per tahun, biaya operasi dan pemeliharaan (O+M) per tahun suatu pembangkit dibagi dengan produksi energi per tahun (8760 jam) kWh. Secara teori dapat dihitung dengan persamaan (Harto Jawadz et al., 2019) :

$$HPP \text{ per kWh} = \frac{\frac{C_{\text{annual}}}{\text{th}} + \frac{O\&M}{\text{th}}}{P_{\text{net}} \times 8760 \times \text{PF}} \times 1 \text{ Tahun} \quad (14)$$

Biaya operasional dan pemeliharaan (O&M) per-tahun pada PLTMH biasanya ditentukan sebesar 1-2 % dari biaya investasi awal sistem PLTMH (Komang Ogik Parmana Putra et al., 2023).

### 2.5.2 Discount Factor (DF) dan Biaya Penyusutan (*depreciation*)

Perhitungan nilai uang ini dikenal istilah *Discount Factor* yang merupakan faktor untuk menentukan nilai uang saat sekarang. *Discount Factor* adalah suatu bilangan yang nilainya kecil dari 1, dapat digunakan untuk mengalikan suatu jumlah di waktu yang akan datang (F) agar menjadi setara dengan nilai uang sekarang (P). Discount Factor dicari menggunakan rumus :

$$DF = \frac{1}{(1 + i)^n} \quad (15)$$

DF = Discount Factor, i = (interest rate) tingkat suku bunga dan n=waktu/periode (Zainuri, 2021).

Biaya penyusutan merupakan suatu parameter untuk mengalokasikan biaya. Penyusutan (*depreciation*) adalah suatu proses untuk mengalokasikan biaya aktiva berwujud ke beban dengan cara yang sistematis dan rasional sepanjang umur ekonomis yang diharapkan mendapat manfaat dari penggunaan *aktiva* tersebut. Faktor-faktor yang mempengaruhi biaya penyusutan adalah harga perolehan (*initial cost*), nilai residu, dan umur ekonomis penggunaan aset (Suatan et al., 2020).

$$\text{Biaya Penyusutan} = \frac{\text{Nilai Investasi} - \text{Nilai Residu}}{\text{Umur Ekonomis}} \quad (16)$$

Nilai Residu pada perhitungan bernilai 0, karena diasumsikan pada akhir umur ekonomis, aset tidak dijual kembali dan tidak juga ditukarkan sehingga besarnya nilai residu ialah 0. Setelah di dapatkan besarnya biaya penyusutan (depresiasi) maka selanjutnya dicari proyeksi besarnya biaya penyusutan sepanjang

umur ekonomis aset dengan besarnya inflasi 5% per tahun dan besarnya present value dengan tingkat *diskonto* 12% (Suatan et al., 2020).

### 2.5.3 Parameter Kelayakan Ekonomi PLTMH

Parameter kelayakan ekonomi merupakan salah satu faktor penentu dalam keberlanjutan suatu proyek. Fungsinya untuk memperhitungkan besarnya keuntungan atau kerugian yang akan diterima pada suatu proyek (Suatan et al., 2020). Melalui parameter kelayakan ekonomi dapat dilakukan analisa atau perhitungan akan keuntungan yang akan diperoleh dari suatubproyek sehingga dalam pengambilan keputusan untuk merancang proyek dapat mengambil keputusan dengan baik (Dwi Damarian et al., 2023).

#### 1). *Net Present Value* (NPV)

NPV atau nilai sekarang bersih adalah perbedaan antara nilai sekarang bersih (total net cash flow) selama umur proyek dengan nilai sekarang dari besarnya investasi yang ditanamkan. Dengan kata lain, selisih antara serangkaian penerimaan masa akan datang setelah dinilai pada saat sekarang (memakai discount rate) dengan pengeluaran investasi yang dilakukan pada masa sekarang disebut dengan NPV (Net Present Value). Jika angka perolehan perhitungan NPV bernilai positif maka investasi yang dihitung dapat dikatakan layak dan akan mendatangkan sejumlah keuntungan (Zainuri, 2021).

$$NPV = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{(B_t - C_t)}{(1 + i)^n} \quad (17)$$

Dimana NPV= *Net Present Value*, B<sub>t</sub> = benefit pada tiap tahun, C<sub>t</sub> = cost pada tiap tahun, n = jumlah tahun dan i = tingkat suku bunga.

#### 2). *Internal Rate Return* (IRR)

IRR adalah tingkat pengembalian suatu investasi pada saat Net Present Value sama dengan nol. Suatu investasi dikatakan layak dan menguntungkan jika nilai IRR lebih besar dari *cost of capital* yang diasumsikan. Untuk memberikan pemahaman lebih tentang IRR, pengertian lain yang dapat dijadikan pegangan adalah bahwa IRR merupakan tingkat suku bunga yang akan menjadikan jumlah nilai sekarang dari proceeds yang diharapkan akan diterima (*PV of future proceeds*) sama dengan jumlah nilai sekarang dari pengeluaran modal (*PV of capital outlays*)

(Zainuri, 2021). *Internal Rate Return* (IRR) adalah keuntungan yang bisa dihasilkan dengan adanya operasi PLTMH (Dwi Damarian et al., 2023). perhitungan parameter IRR untuk mencari besarnya potensi balik modal dari suatu investasi. IRR direpresentasikan dalam persentase (%).

$$IRR = i_1 + \frac{NPV (+)}{NPV (+) - NPV (-)} \times (i_2 - i_1) \quad (18)$$

Dimana IRR = *Internal Rate of Return*, NPV = *Net Present Value*,  $i_1$  = tingkat suku bunga yang memberikan nilai NPV positif dan  $i_2$  = tingkat suku bunga yang memberikan nilai NPV (Dwi Damarian et al., 2023).

### 3). *Benefit Cost Ratio* (BCR)

*Benefit Cost Ratio* (BCR) didefinisikan sebagai perbandingan antara manfaat (keuntungan) yang diperoleh dengan investasi yang diterapkan. Berdasarkan pengertian tersebut, proyek dapat dikatakan layak apabila BCR sama dengan atau lebih dari 1, sehingga diharapkan besarnya penghasilan lebih dari besar dari besarnya investasi (Dwi Damarian et al., 2023).

$$BCR = \frac{NPV}{Investasi} \quad (19)$$

Dimana BCR = *Benefit Cost Ratio* NPV = *Net Present Value* dan Investasi = Besarnya Biaya Investasi (Suatan et al., 2020).

### 4). *Payback period* (PP)

*Payback period* (PP) merupakan suatu parameter pengukuran jangka waktu yang diperlukan suatu aset untuk mencapai *cash flow* bernilai 0, pendapatan sudah mampu menutupi besarnya biaya investasi.

$$PP = n + \frac{a - b}{c - b} \times 1 \text{ Tahun} \quad (20)$$

Dimana PP = *Payback period*, n = tahun terakhir jumlah arus kas belum mampu menutupi modal investasi, a = Biaya Investasi, b = jumlah arus kas hingga tahun ke- n, c = jumlah arus kas hingga tahun ke - n+1 (Suatan et al., 2020) ((Dwi Damarian et al., 2023).