

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Isu keberlanjutan energi kini menjadi semakin digaungkan sebab sumber utama energi fosil yang semakin mencapai batas persediannya dan ditambah dengan dampak iklim dari penggunaannya. Pada lima tahun terakhir konsumsi listrik per kapita di Indonesia mengalami peningkatan dengan diikuti tren yang konsisten semakin naik, hal ini sejalan dengan semakin bertambahnya jumlah penduduk Indonesia yang tercatat sudah mencapai 280 juta jiwa[1]. Menurut data dari kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), konsumsi listrik per kapita Indonesia mengalami penurunan pada tahun 2020 akibat pandemi covid-19 sebesar 1.089 kWh perkapita. Namun, konsumsi kembali melonjak mencapai angka tertingginya sebesar 1.411 kWh pada 2024 kemarin[2]. Tren ini menunjukkan bahwa adanya pertumbuhan terhadap kebutuhan energi listrik masyarakat Indonesia seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan digitalisasi di berbagai sektor kehidupan[3].

Meskipun konsumsi listrik meningkat, tantangan dalam distribusi dan akses energi masih menjadi perhatian utama, terutama di wilayah terpencil dan kepulauan. Indonesia dengan kondisi geografis yang memiliki ribuan pulau menambah tantangan pada pemerataan pembangunan infrastruktur jaringan listrik[4]. Dalam upaya mengatasi tantangan ini, pengembangan sistem pembangkit listrik mandiri (*standalone*) berbasis energi terbarukan menjadi solusi yang strategis.

Pembangkit listrik tenaga pikohidro (PLTPH) menjadi salah satu solusi yang cocok untuk digunakan di daerah terpencil seperti pedesaan dengan yang potensi aliran air. PLTPH tidak hanya berperan dalam penyediaan listrik saja, tetapi juga berkontribusi sebagai sumber energi terbarukan serta dapat berperan untuk menekan emisi gas rumah kaca dan mendukung pembangunan berkelanjutan yang merata[5]. PLTPH seringkali digunakan bersamaan dengan generator yang dapat membangkitkan dirinya sendiri yaitu *Self-Excited Induction Generator* (SEIG). SEIG dipilih sebab memiliki konstruksi yang kokoh dan mampu menekan biaya[6].

Namun, dengan segala keunggulan yang dimiliki PLTPH dengan SEIG terdapat sejumlah tantangan diantaranya kemampuan untuk menjaga regulasi tegangan dan frekuensi yang kurang baik, ditambah dengan beban yang cenderung berubah-ubah[7]. Sistem pengendalian konvensional seperti *Automatic Voltage Regulator* (AVR) memiliki keterbatasan dalam merespons perubahan cepat pada sistem nonlinier dari generator[8]. Kemudian, terdapat alternatif lain yang biasa digunakan yaitu *Electronic Load Controller* (ELC) yang menjaga beban untuk tetap seimbang dengan *output* SEIG dengan menyalurkan daya berlebih ke beban buangan (*dump load*) ketika keadaan *oversupply*[9]. Walaupun solusi ini efektif

dalam menjaga stabilitas tegangan dan frekuensi, ELC masih memiliki kelemahan mendasar dari sisi efisiensi energi, karena daya berlebih tidak dimanfaatkan secara optimal dan hanya dibuang dalam bentuk panas. Oleh karena itu, diperlukan sebuah sistem kontrol adaptif yang tidak hanya menjaga stabilitas tegangan, tetapi juga mampu mengelola energi berlebih tersebut secara efisien[9].

Penelitian ini mengusulkan perancangan sebuah Sistem Manajemen Energi (EMS) berbasis *Feed Forward Neural Network* (FFNN). Daripada mengubahnya ke dalam bentuk daya terbuang, sistem ini akan mengalihkan surplus daya dan menyimpannya untuk mengisi baterai. Pendekatan ini memungkinkan pemanfaatan kembali energi surplus untuk menyuplai beban lain pada beban lainnya. Pendekatan ini mengubah ELC konvensional menjadi sebuah sistem cerdas yang mampu meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem secara keseluruhan.

Beberapa tahun terakhir, kecerdasan buatan seperti *Artificial Neural Network* (ANN) mulai diterapkan dalam sistem kendali tegangan. ANN dapat mengenali pola dinamis dan mempelajari hubungan non-linier dari sistem tenaga listrik, sehingga menawarkan respons yang lebih adaptif dan akurat dibandingkan AVR konvensional[10]. Penelitian oleh Dungana dkk (2018) menunjukkan bahwa pengendali ANN mampu menyesuaikan tegangan dengan lebih cepat dalam simulasi sistem eksitasi generator sinkron[11].

Beberapa penelitian terkait yang relevan antara lain:

- Alfi R. dan Iwan S. (2019) merancang kestabilan PLTPH dengan menggunakan ELC yang diatur oleh algoritma *A succeseptive* berhasil mendapatkan kestabilan tegangan dan frekuensi mendekati tegangan nominalnya.[12]
- Raikhani dkk (2020) merancang sistem AVR berbasis logika fuzzy untuk pembangkit mikrohidro, namun masih terbatas dari segi adaptabilitas terhadap perubahan ekstrem[8].
- Teguh U. dkk. (2021) membuktikan melalui perancangan sistem PLTMH menggunakan mikrokontroler STM32 dengan metode ELC berupa tahanan geser. Namun, kestabilan sistem sedikit melewati batas nominal yang ditentukan.[13]
- Badrudeen dkk. (2024) telah membuktikan bahwa ANN efektif untuk mengontrol frekuensi SEIG menggunakan ELC konvensional. Namun, penerapannya hanya sebatas pada ELC saja yang mana energi yang berlebih dibuang ke dalam bentuk panas[14].

Meskipun berbagai pendekatan ANN telah diuji pada sistem tenaga listrik, penerapan arsitektur *Feed Forward Neural Network* (FFNN) secara spesifik untuk sistem 2 arah pada manajemen energi masih jarang ditemukan pada sistem PLTPH. Padahal, FFNN telah terbukti efektif dalam beberapa studi untuk mengatur tegangan *output* SEIG. FFNN memiliki arsitektur yang relatif sederhana, hal inilah yang menjadi keunggulannya sebab mampu melakukan pendekatan nonlinier yang baik terhadap dinamika sistem pembangkit mandiri.

Oleh sebab itu, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengeksplorasi dan mengimplementasikan penerapan FFNN yang tidak hanya sebagai pengendali tegangan, tetapi juga berfungsi sebagai otak dari sistem manajemen energi yang efisien. Dengan memanfaatkan kontribusi baterai sebagai penyimpan energi dan FFNN sebagai pengontrol, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem energi terbarukan yang lebih andal dan adaptif, terkhusus di daerah-daerah yang belum dapat dijangkau jaringan listrik nasional.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan *Feed Forward Neural Network* sebagai pengendali frekuensi dan tegangan pada sistem PLTPH di lingkungan MATLAB/Simulink?
2. Bagaimana performa FFNN mengatur distribusi daya dengan EMS untuk menyeimbangkan sistem secara adaptif?
3. Bagaimana EMS dengan FFNN mengatur distribusi daya antara *charging* dan *discharging* baterai untuk menyeimbangkan sistem secara adaptif?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang model pengendali frekuensi dan tegangan menggunakan FFNN pada sistem PLTPH di lingkungan MATLAB/Simulink.
2. Menguji efektivitas pengendali FFNN dengan manajemen energi terhadap PLTPH melalui simulasi di lingkungan MATLAB/Simulink.
3. Menganalisis mekanisme distribusi daya pada mode *charging* dan *discharging* baterai yang diatur oleh EMS untuk menyeimbangkan sistem secara adaptif.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan Penelitian ini ialah:

1. Sistem PLTPH disimulasikan dalam lingkungan MATLAB/Simulink.
2. Jenis *neural network* yang digunakan adalah *Feed Forward Neural Network*.
3. Data pelatihan diambil dari hasil simulasi atau data sintesis.
4. Fokus pada aspek elektrik meliputi: tegangan *output*, distribusi daya ke beban, dan frekuensi sistem.
5. Kondisi yang dibahas yaitu ketika sistem berada pada kondisi *Oversupply* (kelebihan daya) dan kondisi stabil
6. Pengendalian dilakukan berdasarkan frekuensi, daya beban dan SoC.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Merancang sistem pengendalian FFNN untuk menjaga kestabilan daya keluaran PLTPH akibat perubahan beban.

2. Memberikan solusi alternatif cerdas untuk pengendalian tegangan pada pembangkit energi terbarukan.
3. Menjadi referensi awal dalam penerapan *neural network* pada sistem tenaga skala kecil.
4. Menunjukkan potensi pengendalian kecerdasan buatan dalam sektor kelistrikan berbasis sistem dinamis.

1.6 Sistematika Penelitian

Sistematika penulisan dari tugas akhir ini adalah :

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori dasar yang mendukung dalam penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang penjelasan dan langkah-langkah mengenai penelitian yang dilakukan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi pemaparan data hasil penelitian yang telah diperoleh, baik dari pengujian maupun perhitungan. Data tersebut kemudian dianalisis untuk mengetahui keterkaitan dengan teori yang ada serta tujuan penelitian. Pada bagian ini juga dilakukan pembahasan mengenai temuan penelitian, interpretasi hasil, perbandingan dengan penelitian terdahulu, serta faktor-faktor yang memengaruhi hasil penelitian.

BAB V PENUTUP

Bab ini memuat kesimpulan yang diperoleh dari hasil analisis dan pembahasan, yang menjawab perumusan masalah dan tujuan penelitian. Selain itu, disajikan pula saran-saran yang dapat dijadikan masukan untuk penelitian selanjutnya maupun penerapan hasil penelitian di lapangan.