

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk, perkembangan ekonomi, serta meningkatnya aktivitas industri dan sosial masyarakat. Hingga saat ini, pemenuhan kebutuhan listrik nasional masih didominasi oleh sumber energi fosil, khususnya batu bara, yang ketersediaannya terbatas dan berdampak negatif terhadap lingkungan melalui peningkatan emisi gas rumah kaca. Kondisi ini mendorong pemerintah Indonesia untuk mempercepat pemanfaatan energi baru dan terbarukan sebagai bagian dari transisi menuju sistem ketenagalistrikan yang lebih bersih, berkelanjutan, dan ramah lingkungan [1].

Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan adalah energi air dalam skala kecil, khususnya melalui Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH). PLTPH memanfaatkan aliran air dengan debit kecil dan head rendah untuk menghasilkan energi listrik secara lokal. Teknologi ini memiliki keunggulan berupa biaya operasional yang relatif rendah, ramah lingkungan, serta sangat sesuai diterapkan di wilayah terpencil atau pedesaan yang belum terjangkau jaringan listrik nasional [2], [3]. Dengan karakteristik tersebut, PLTPH menjadi solusi yang menjanjikan dalam mendukung program elektrifikasi pedesaan dan pengembangan sistem kelistrikan berbasis *off-grid*.

Meskipun demikian, implementasi PLTPH masih menghadapi berbagai tantangan teknis, terutama terkait dengan kestabilan daya keluaran. Sistem PLTPH umumnya menggunakan *Self-Excited Induction Generator* (SEIG) yang sangat sensitif terhadap perubahan beban. Perubahan beban yang bersifat fluktuatif dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara daya pembangkitan dan daya konsumsi, yang berdampak pada penyimpangan tegangan dan frekuensi. Ketidakstabilan tersebut menurunkan kualitas daya listrik, meningkatkan rugi-rugi daya, menyebabkan pemanasan berlebih pada peralatan, serta berpotensi memperpendek umur sistem dan memicu gangguan operasional [6]–[8].

Untuk menjaga kestabilan tegangan dan frekuensi pada sistem PLTPH, berbagai metode pengendalian telah dikembangkan. Salah satu metode konvensional yang banyak digunakan adalah *Electronic Load Controller* (ELC) dengan *dummy load*. Pada metode ini, kelebihan daya akibat penurunan beban akan dialihkan ke beban semu berupa resistor agar daya keluaran generator tetap konstan. Namun, metode ini memiliki kelemahan utama berupa pemborosan energi karena daya berlebih dibuang sebagai panas, sehingga efisiensi sistem menjadi rendah dan tidak mendukung konsep manajemen energi yang optimal [9]–[11].

Metode pengendalian lain yang sering diterapkan adalah kontrol *Proportional–Integral–Derivative* (PID). Pengendali PID memiliki struktur yang sederhana dan mudah diimplementasikan, namun karakteristiknya yang linier

menyebabkan kinerjanya kurang optimal ketika diterapkan pada sistem PLTPH yang bersifat nonlinier dan memiliki dinamika yang kompleks. Pada kondisi perubahan beban yang cepat dan tidak terduga, pengendali PID cenderung menghasilkan respons yang kurang adaptif dan dapat menurunkan kestabilan sistem [12].

Sebagai alternatif, pendekatan berbasis kecerdasan buatan seperti logika *fuzzy* mulai banyak diterapkan pada sistem pembangkit skala kecil. Pengendali *fuzzy* memiliki keunggulan dalam menangani ketidakpastian sistem tanpa memerlukan model matematis yang presisi. Namun, pengendali *fuzzy* murni memiliki keterbatasan dalam menjaga kestabilan respons dinamis dan sangat bergantung pada perancangan aturan yang bersifat subjektif [15], [16]. Oleh karena itu, diperlukan metode kendali hibrida yang mampu menggabungkan kemampuan adaptasi *fuzzy* dengan kestabilan kontrol konvensional.

Kombinasi *Fuzzy-PI Controller* merupakan salah satu solusi yang efektif untuk mengatasi permasalahan tersebut. Pada pendekatan ini, logika *fuzzy* digunakan untuk menyesuaikan parameter pengendali PI secara adaptif berdasarkan kondisi sistem, sementara pengendali PI berperan dalam menjaga kestabilan respon dan mengurangi kesalahan *steady-state*. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pengendali *Fuzzy-PI* mampu meningkatkan kestabilan tegangan dan frekuensi, memperbaiki kualitas daya, serta memberikan respons yang lebih *robust* terhadap variasi beban pada sistem mikrohidro dan pikohidro [13], [14].

Selain aspek kestabilan daya, penerapan manajemen energi juga menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi sistem PLTPH. Integrasi sistem penyimpanan energi berbasis baterai memungkinkan pemanfaatan daya surplus saat beban rendah dan penyediaan daya tambahan ketika beban meningkat. Dengan pengelolaan energi yang tepat, sistem PLTPH tidak hanya mampu menjaga kestabilan daya, tetapi juga meningkatkan keandalan dan kontinuitas suplai listrik pada sistem *off-grid* [23], [24].

Berdasarkan permasalahan dan peluang tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis kestabilan daya dan penerapan manajemen energi pada sistem PLTPH menggunakan kendali *Fuzzy-PI Controller*. Sistem dimodelkan dan disimulasikan menggunakan *MATLAB/Simulink* dengan mempertimbangkan variasi beban yang dinamis. Diharapkan penerapan kendali *Fuzzy-PI* mampu meningkatkan kestabilan daya, efisiensi pemanfaatan energi, serta keandalan operasi PLTPH, sehingga dapat mendukung pengembangan sistem pembangkit listrik pikohidro yang berkelanjutan, khususnya di wilayah pedesaan dan terpencil.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan Masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana karakteristik perubahan beban utama terhadap kestabilan daya, tegangan, dan frekuensi pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) dengan daya input yang diasumsikan konstan?

2. Bagaimana perancangan dan implementasi sistem kendali *Fuzzy-PI Controller* pada PLTPH untuk menjaga kestabilan daya akibat fluktuasi beban?
3. Bagaimana kinerja kendali *Fuzzy-PI* dalam mengatur distribusi daya antara beban utama dan sistem penyimpanan energi (baterai) melalui proses charging dan discharging guna mendukung manajemen energi yang adaptif?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh perubahan beban terhadap kestabilan daya, tegangan, dan frekuensi pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) dengan daya pembangkitan yang diasumsikan konstan.
2. Merancang dan mensimulasikan sistem kendali *Fuzzy-PI Controller* untuk meningkatkan kestabilan daya keluaran PLTPH akibat fluktuasi beban.
3. Menganalisis kinerja sistem manajemen energi berbasis kendali *Fuzzy-PI Controller* dalam mengatur distribusi daya antara beban utama dan sistem penyimpanan energi (baterai) melalui proses *charging* dan *discharging* secara adaptif.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berupa :

1. Memberikan pemahaman mengenai pengaruh perubahan beban utama terhadap kestabilan daya, tegangan, dan frekuensi keluaran pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) dengan daya pembangkitan konstan.
2. Memberikan referensi perancangan dan implementasi sistem kendali *Fuzzy-PI Controller* untuk meningkatkan kestabilan daya keluaran PLTPH akibat fluktuasi beban.
3. Memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem manajemen energi berbasis kendali *Fuzzy-PI Controller* yang mampu mengatur distribusi daya antara proses *charging* dan *discharging* baterai secara adaptif dan efisien.
4. Menjadi bahan acuan bagi peneliti dan praktisi dalam pengembangan sistem kendali cerdas serta penerapannya pada pembangkit listrik tenaga pikohidro dan sistem energi terbarukan skala kecil.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki batasan masalah sebagai berikut :

1. Simulasi sistem PLTPH dan sistem kendali dilakukan menggunakan perangkat lunak *MATLAB/Simulink*.
2. Daya mekanik keluaran dari PLTPH diasumsikan konstan, sesuai dengan kondisi aliran air yang stabil dan tidak mempertimbangkan variasi debit maupun *head* air.
3. Profil beban utama dimodelkan berdasarkan pola umum konsumsi listrik siang dan malam secara ideal, tanpa mempertimbangkan gangguan beban tak terduga.
4. Sistem kendali yang digunakan adalah *Fuzzy-PI Controller*, di mana logika *fuzzy* berfungsi untuk menyesuaikan parameter kendali, sedangkan *PI Controller* digunakan untuk menjaga kestabilan respons sistem.
5. Manajemen energi difokuskan pada pengaturan distribusi daya antara beban utama dan sistem penyimpanan energi berupa baterai, melalui proses *charging* dan *discharging* berdasarkan kondisi kelebihan atau kekurangan daya.
6. Kehilangan daya akibat konversi energi, rugi-rugi sistem, serta efisiensi komponen listrik dan elektronik diasumsikan ideal dan tidak menjadi fokus pembahasan dalam penelitian ini.
7. Pengendalian dilakukan berdasarkan frekuensi, daya sistem dan *State of Charge*.
8. Data pelatihan diambil dari hasil simulasi atau data sintesis.
9. Proses *charging/discharging* baterai terjadi saat kelebihan daya sistem.
10. Kondisi awal *State of Charge* Baterai adalah 82%.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas mengenai latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan yang ingin dicapai, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistem penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas mengenai landasan teori pendukung yang digunakan dalam penyelesaian masalah pada tugas akhir ini.

BAB III METODOLOGI

Bab ini berisikan penjelasan mengenai metode yang mencakup diagram alir penelitian, prinsip kerja, bahan yang digunakan, perancangan jaringan dan teknik pengujian yang dilakukan.