

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Eskalasi permintaan energi listrik di Indonesia selaras dengan dinamika pertumbuhan penduduk dan ekspansi ekonomi nasional. Hingga saat ini, pemenuhan kebutuhan energi tersebut masih didominasi oleh penggunaan sumber daya fosil terbatas, khususnya batu bara, yang memicu dampak lingkungan signifikan berupa peningkatan emisi gas rumah kaca. Sebagai langkah mitigasi terhadap keterbatasan sumber daya non-terbarukan, Pemerintah Indonesia tengah mengakselerasi transisi menuju sistem kelistrikan berkelanjutan dengan memprioritaskan pengembangan Energi Baru dan Terbarukan (EBT), termasuk potensi panas bumi, air, biomassa, serta tenaga surya[1].

Pertumbuhan penduduk, perkembangan sektor industri, serta peningkatan aktivitas ekonomi terus mendorong kenaikan kebutuhan energi listrik di Indonesia. Data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menunjukkan bahwa konsumsi listrik nasional pada tahun 2024 mencapai 1.411 kWh per kapita, meningkat dibandingkan beberapa tahun sebelumnya dan ditargetkan terus bertambah pada tahun-tahun berikutnya seiring meningkatnya kebutuhan masyarakat dan sektor industri. Meskipun demikian, sistem ketenagalistrikan nasional masih didominasi oleh pembangkit berbahan bakar fosil. Pada tahun 2024, kapasitas terpasang pembangkit berbasis energi fosil mencapai sekitar 85%, sedangkan pembangkit berbasis Energi Baru Terbarukan (EBT) baru mencapai sekitar 15% dari total kapasitas terpasang nasional. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa percepatan pengembangan pembangkit berbasis EBT masih menjadi kebutuhan penting untuk mendukung ketahanan energi sekaligus mengurangi emisi gas rumah kaca. Salah satu sumber EBT yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan di Indonesia adalah energi air karena didukung oleh kondisi geografis, curah hujan, dan ketersediaan sumber daya air yang melimpah.

Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPh) merepresentasikan solusi energi mikro yang memiliki prospek strategis bagi sektor ketenagalistrikan di Indonesia. Teknologi ini bekerja dengan mengonversi energi dari debit air terbatas dan *head* sangat rendah menjadi daya listrik berskala lokal. Selain efisiensi biaya operasional dan karakteristiknya yang rendah emisi, PLTPh merupakan instrumen krusial dalam mempercepat akselerasi elektrifikasi di daerah tertinggal yang belum terintegrasi dengan jaringan listrik nasional[2].

Meskipun memiliki potensi besar, implementasi PLTPh sering kali terhambat oleh kendala teknis yang esensial, yakni ketidakseimbangan antara daya yang dihasilkan dengan fluktuasi beban listrik yang bersifat dinamis. Ketidakseimbangan ini memicu instabilitas pada parameter tegangan dan frekuensi, yang secara langsung mendegradasi kualitas daya dalam sistem. Dampak sistemik

dari fenomena ini mencakup peningkatan rugi-rugi daya serta pelepasan panas berlebih yang berisiko memperpendek umur pakai komponen elektrik. Oleh karena itu, tingginya risiko kerusakan peralatan dan potensi pemadaman lokal menjadi tantangan krusial dalam operasional PLTPh, terutama pada wilayah dengan profil konsumsi energi yang sangat variatif[3], [4].

Berbagai strategi pengendalian telah dikembangkan guna memitigasi kendala operasional pada sistem PLTPh. Salah satu pendekatan konvensional yang masih lazim digunakan adalah *Electronic Load Controller* (ELC) berbasis *dummy load*, yang bekerja dengan mengalihkan surplus daya ke resistor untuk menjaga stabilitas keluaran saat beban menurun. Namun, mekanisme ini memiliki kelemahan signifikan berupa disipasi energi yang tidak efisien serta ketidakmampuan dalam menangani kondisi beban berlebih[5]. Di sisi lain, pengendali PID sering kali diintegrasikan untuk meregulasi respons sistem terhadap fluktuasi beban. Namun, sifat linearitas pada algoritme PID menjadikannya kurang optimal dalam mengakomodasi karakteristik nonlinier dan dinamika sistem PLTPh yang kompleks[6].

Efektivitas PID sangat bergantung pada penalaan parameter yang tepat. Dalam sistem PLTPh yang memiliki karakteristik nonlinier dan dinamika beban yang kompleks, metode penalaan konvensional seperti *trial-and-error* atau *Ziegler-Nichols* sering kali gagal mencapai performa optimal. Hal ini menyebabkan sistem kurang responsif terhadap fluktuasi beban yang cepat, sehingga mengakibatkan instabilitas pada tegangan dan frekuensi[7], [8].

Mengingat keterbatasan tersebut, integrasi algoritme Particle Swarm Optimization (PSO) menjadi krusial untuk meningkatkan kapabilitas kontroler PID. PSO merupakan algoritme metaheuristik berbasis populasi yang memiliki kemampuan untuk melakukan proses penentuan parameter PID secara adaptif dan sistematis. Dengan dukungan optimasi PSO, kendali PID tidak lagi bersifat statis, melainkan menjadi lebih adaptif dan presisi dalam menjaga kestabilan daya PLTPh di berbagai kondisi operasional[9], [10].

Pemanfaatan PSO dalam proses penalaan PID mampu meningkatkan performa sistem kontrol pada model nonlinier yang kompleks. Metode ini mampu menemukan parameter optimal dengan lebih cepat serta menghindari jebakan *local minima*, sehingga menghasilkan respons kontrol yang lebih stabil dan akurat. Selain itu, kemampuan adaptif PSO memungkinkan sistem merespons perubahan kondisi secara dinamis, meningkatkan robustnes dan performa keseluruhan dibandingkan metode penalaan konvensional[11].

Penelitian ini berfokus pada implementasi sistem kendali berbasis PID-PSO untuk meregulasi stabilitas daya pada simulasi PLTPh melalui pemodelan MATLAB/Simulink. Dalam model ini, PLTPh dikonfigurasi untuk menghasilkan output daya yang konstan, sementara beban utama disimulasikan secara dinamis mengikuti profil konsumsi energi siang dan malam. Mekanisme pengendalian PID-PSO berperan krusial dalam mengelola surplus energi. Saat

terjadi kelebihan daya, sistem akan mengarahkan daya tersebut menuju baterai melalui proses konversi AC ke DC untuk pengisian. Namun, apabila baterai telah mencapai kapasitas pengisian penuh maka kelebihan daya akan dialihkan ke *dummy load*. Sebaliknya, apabila permintaan beban melampaui kapasitas produksi PLTPh, kontroler akan menginisiasi proses *discharge* baterai melalui inverter DC ke AC satu fasa guna menjaga kontinuitas suplai energi

Penerapan metodologi ini diharapkan mampu menjamin stabilitas parameter tegangan dan frekuensi pada sistem PLTPh, sekaligus mengelevasi efisiensi pemanfaatan energi secara signifikan. Dengan demikian, keandalan operasional pembangkit skala ultra-mikro dalam skenario *off-grid* diharapkan dapat terwujud secara optimal, khususnya untuk memenuhi kebutuhan energi di wilayah terpencil. Lebih jauh, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi teoretis maupun praktis terhadap akselerasi teknologi kendali cerdas di sektor energi baru dan terbarukan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan mensimulasikan model sistem PLTPh berbeban dinamis pada kondisi daya input konstan berdasarkan respons tegangan keluaran?
2. Bagaimana merancang model kendali berbasis PID-PSO pada PLTPh untuk menjaga kestabilan daya terhadap fluktuasi beban?
3. Bagaimana kinerja kendali berbasis PID-PSO terhadap ELC dalam mengelola distribusi daya antara proses pengisian dan pengosongan baterai untuk menjaga keseimbangan sistem?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mensimulasikan model sistem PLTPh berbeban dinamis pada kondisi daya input konstan berdasarkan respons tegangan keluaran.
2. Merancang model kendali berbasis PID-PSO untuk menjaga kestabilan daya keluaran PLTPh.
3. Merancang sistem distribusi daya berbasis ELC untuk mengatur proses pengisian dan pengosongan baterai terhadap perubahan beban.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berupa:

1. Merancang model sistem PLTPh beban dinamis pada kondisi daya *input* konstan.
2. Merancang model sistem pengendalian PID-PSO untuk menjaga kestabilan daya keluaran PLTPh akibat fluktuasi beban.

3. Mengatur distribusi daya antara pengisian dan pengosongan baterai menggunakan ELC untuk menyeimbangkan sistem daya.
4. Memberikan referensi dalam pengembangan sistem kontrol pada pembangkit energi terbarukan berbasis PLTPh.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki batasan masalah sebagai berikut:

1. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink.
2. Subsistem pembangkit hidrolik diasumsikan beroperasi pada kondisi tunak. Debit air (Q), head (H), torsi mekanik turbin (T_m), dan kecepatan putar generator dijaga konstan sehingga daya mekanik masukan ke generator dianggap tetap selama simulasi.
3. Profil beban utama dibuat berdasarkan pola umum konsumsi listrik ideal pada siang dan malam hari.
4. PID-PSO digunakan sebagai sistem kendali utama yang mengatur kinerja ELC.
5. Pengendalian dilakukan berdasarkan frekuensi dan *State of Charge*.
6. Baterai melakukan pengisian saat terjadi surplus daya antara pembangkitan dan beban, serta pengosongan saat terjadi defisit daya dalam sistem.
7. Kehilangan daya pada konversi dan efisiensi komponen diasumsikan ideal.

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.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Bab ini berisikan informasi hasil dan pembahasan dari penelitian tugas akhir ini.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian selanjutnya.