

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk, perkembangan teknologi, serta pertumbuhan aktivitas industri dan ekonomi, kebutuhan energi listrik di Indonesia terus mengalami peningkatan [1]. Kondisi ini menuntut ketersediaan sistem pembangkit listrik yang tidak hanya mampu memenuhi kebutuhan energi, tetapi juga memiliki tingkat keandalan yang tinggi serta berkelanjutan. Namun, hingga saat ini sebagian besar pembangkit listrik masih bergantung pada sumber energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam yang ketersediaannya terbatas serta menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Penggunaan energi fosil secara terus-menerus juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca yang memicu perubahan iklim global. Oleh karena itu, pengembangan energi baru dan terbarukan menjadi langkah strategis dalam mewujudkan sistem energi yang lebih bersih dan berkelanjutan [2].

Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia adalah energi air [3]. Pemanfaatan energi air dapat dilakukan melalui sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Pico Hydro* (PLTPH), yaitu sistem pembangkit yang memanfaatkan energi potensial dan kinetik aliran air untuk menggerakkan turbin yang terhubung dengan generator listrik. Sistem PLTPH memiliki beberapa keunggulan, seperti sumber energi yang relatif stabil, ramah lingkungan, biaya operasional yang rendah, serta dapat diterapkan pada daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik utama. Selain itu, teknologi PLTPH relatif sederhana sehingga sangat potensial dikembangkan sebagai solusi penyediaan energi listrik berbasis lokal pada daerah pedesaan maupun wilayah terpencil [4].

Dalam sistem PLTPH, generator merupakan komponen utama yang berfungsi mengubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik. Salah satu jenis generator yang banyak digunakan pada sistem PLTPH adalah *Self-Excited Induction Generator* (SEIG). Penggunaan SEIG pada sistem pembangkit skala kecil didasarkan pada beberapa keunggulan, yaitu konstruksi yang sederhana, harga yang relatif murah, tidak memerlukan sumber eksitasi DC eksternal, serta memiliki biaya perawatan yang rendah. Selain itu, SEIG memiliki tingkat keandalan yang cukup baik, mudah dioperasikan, dan tidak memerlukan sistem sinkronisasi yang kompleks seperti generator sinkron, sehingga lebih sesuai digunakan pada sistem pembangkitan energi terbarukan berskala kecil dan berdiri sendiri (*stand-alone system*) [5].

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, penggunaan SEIG pada sistem PLTPH juga memiliki beberapa kelemahan yang menjadi tantangan dalam pengoperasiannya. Tegangan dan frekuensi keluaran SEIG sangat dipengaruhi oleh kecepatan putaran turbin, nilai kapasitor eksitasi, serta kondisi beban yang

terhubung pada sistem. Perubahan beban yang terjadi secara tiba-tiba dapat menyebabkan ketidakseimbangan daya antara daya pembangkitan dan daya beban, sehingga mengakibatkan fluktuasi tegangan dan frekuensi keluaran generator [5]. Selain itu, SEIG tidak memiliki sistem pengatur tegangan internal seperti generator sinkron, sehingga kestabilan tegangan tidak dapat dipertahankan secara otomatis. Kondisi tersebut dapat menurunkan kualitas daya listrik, mengganggu kinerja peralatan listrik, serta menurunkan keandalan sistem pembangkitan secara keseluruhan.

Permasalahan tersebut menjadi lebih kompleks karena sistem PLTPH umumnya beroperasi secara *off-grid* atau tidak terhubung dengan jaringan listrik utama. Pada sistem *off-grid*, kestabilan tegangan dan frekuensi sepenuhnya bergantung pada kemampuan sistem dalam menjaga keseimbangan antara daya pembangkitan dan daya yang dikonsumsi oleh beban [5]. Ketika terjadi perubahan beban, sistem tidak memiliki jaringan utama sebagai penyeimbang daya sehingga perubahan tersebut akan langsung memengaruhi performa generator. Perubahan beban yang bersifat dinamis dapat menyebabkan fluktuasi tegangan dan frekuensi keluaran yang berdampak pada penurunan kualitas daya listrik serta berpotensi mengganggu kinerja peralatan listrik [6]. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem pengendalian yang mampu menjaga kestabilan operasi pembangkit secara *real-time*.

Salah satu metode yang umum digunakan untuk menjaga kestabilan pada sistem pembangkit *off-grid* adalah *Electronic Load Controller* (ELC). ELC bekerja dengan cara mengatur distribusi daya pada sistem melalui pengalihan kelebihan daya generator menuju beban tambahan atau *dummy load*. Dengan menjaga total daya yang diserap generator tetap konstan, kestabilan frekuensi dan tegangan sistem dapat dipertahankan [7]. Ketika beban utama menurun, ELC akan mengalihkan daya berlebih menuju *dummy load*, sedangkan ketika beban utama meningkat, daya pada *dummy load* akan dikurangi sehingga daya generator dapat diprioritaskan untuk menyuplai beban utama. Dengan mekanisme tersebut, perubahan daya akibat fluktuasi beban dapat diminimalkan sehingga sistem pembangkitan menjadi lebih stabil.

Namun demikian, sistem ELC konvensional umumnya masih menggunakan resistor sebagai *dummy load* sehingga energi berlebih hanya dibuang dalam bentuk panas. Metode tersebut memang mampu menjaga kestabilan sistem, tetapi pemanfaatan energi listrik menjadi kurang efisien karena energi yang dihasilkan generator tidak dimanfaatkan secara optimal [7]. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sistem ELC yang tidak hanya mampu menjaga kestabilan pembangkit, tetapi juga mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi listrik yang dihasilkan.

Untuk meningkatkan efisiensi sistem, penelitian ini mengembangkan ELC dengan memanfaatkan baterai sebagai media penyimpanan energi. Energi berlebih yang dihasilkan generator tidak dibuang begitu saja, melainkan disimpan ke dalam

baterai melalui sistem pengisian daya dan dapat dimanfaatkan kembali untuk menyuplai beban pendamping melalui inverter satu fasa. Dengan pendekatan tersebut, sistem tidak hanya mampu menjaga kestabilan tegangan dan frekuensi, tetapi juga meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi listrik serta mengurangi pemborosan energi pada sistem pembangkitan.

Selain penggunaan ELC, penerapan sistem kendali juga menjadi faktor penting dalam meningkatkan performa sistem pembangkitan. Berbagai metode pengendalian telah dikembangkan, seperti pengendali PID, logika fuzzy, *adaptive control*, maupun metode berbasis kecerdasan buatan. Pengendali PID memiliki kemampuan yang baik dalam mempercepat respon sistem dan mengurangi *error*, namun memerlukan proses tuning parameter yang tepat agar dapat bekerja optimal pada sistem yang bersifat dinamis [8]. Sementara itu, metode logika fuzzy mampu menangani ketidakpastian sistem dengan baik, tetapi membutuhkan perancangan *rule base* yang lebih kompleks serta implementasi yang relatif lebih rumit pada sistem nyata [9].

Dibandingkan metode pengendalian lainnya, pengendali Proportional–Integral (PI) memiliki struktur yang lebih sederhana, mudah diimplementasikan, serta mampu memberikan performa pengendalian yang baik pada sistem pembangkitan skala kecil [10]. Pengendali PI juga efektif dalam mengurangi *error steady-state* dan meningkatkan kestabilan sistem terhadap perubahan beban, sehingga banyak digunakan pada aplikasi pengendalian tegangan dan frekuensi pada sistem energi terbarukan [11]. Dalam penelitian ini, pengendali PI digunakan untuk mengatur kinerja *Electronic Load Controller* sehingga sistem mampu merespons perubahan beban secara *real-time* dan menjaga kestabilan tegangan serta frekuensi keluaran generator.

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji penggunaan *Electronic Load Controller* (ELC) pada sistem pembangkit energi terbarukan, sebagian besar penelitian masih menggunakan *dummy load* konvensional berupa resistor sehingga energi berlebih belum dimanfaatkan secara optimal. Selain itu, pengembangan sistem ELC yang terintegrasi dengan penyimpanan energi dan pengendali Proportional–Integral (PI) pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) berbasis *Self-Excited Induction Generator* (SEIG) masih menjadi topik yang menarik untuk dikembangkan lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan melalui pemodelan dan simulasi menggunakan MATLAB/Simulink untuk menganalisis performa sistem pengendalian dalam menjaga kestabilan daya, tegangan, dan frekuensi pada kondisi beban dinamis.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini difokuskan pada pengendalian sistem pembangkitan energi listrik pada PLTPH berbasis SEIG–ELC menggunakan pengendali *Proportional–Integral* (PI). Sistem yang dikembangkan diharapkan mampu menjaga kestabilan daya, tegangan, dan frekuensi, meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi melalui sistem penyimpanan energi

baterai, serta meningkatkan keandalan dan kualitas daya pada sistem pembangkit listrik tenaga pikohidro.

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) berbasis *Self-Excited Induction Generator* (SEIG) dengan daya input yang diasumsikan konstan?
2. Bagaimana perancangan dan implementasi sistem *Electronic Load Controller* (ELC) dengan pengendali Proportional–Integral (PI) pada PLTPH berbasis SEIG untuk menjaga kestabilan daya, tegangan, dan frekuensi akibat fluktuasi beban?
3. Bagaimana kinerja pengendali Proportional–Integral (PI) dalam mengatur distribusi daya antara beban utama dan sistem penyimpanan energi (baterai) melalui proses *charging* dan *discharging* guna mendukung efisiensi dan stabilitas sistem pembangkitan?.

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) berbasis *Self-Excited Induction Generator* (SEIG) dengan daya pembangkitan yang diasumsikan konstan.
2. Merancang dan mengimplementasikan sistem *Electronic Load Controller* (ELC) dengan pengendali Proportional–Integral (PI) untuk meningkatkan kestabilan daya, tegangan, dan frekuensi keluaran PLTPH akibat fluktuasi beban.
3. Menganalisis kinerja pengendali Proportional–Integral (PI) dalam mengatur distribusi daya antara beban utama dan sistem ELC + penyimpanan energi (baterai) guna mendukung efisiensi dan stabilitas sistem pembangkitan.

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) berbasis *Self-Excited Induction Generator* (SEIG).
2. Memberikan referensi dalam perancangan dan implementasi sistem *Electronic Load Controller* (ELC) dengan pengendali Proportional–Integral (PI) untuk meningkatkan kestabilan sistem pembangkitan akibat fluktuasi beban.

3. Memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem manajemen energi berbasis pengendali Proportional–Integral (PI) yang mampu mengatur distribusi daya antara beban utama dan sistem penyimpanan energi melalui proses *charging* dan *discharging* secara adaptif dan efisien.
4. Menjadi bahan acuan bagi peneliti dan praktisi dalam pengembangan sistem kendali pada pembangkit listrik tenaga pikohidro serta penerapannya pada sistem energi terbarukan skala kecil.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) berbasis *Self-Excited Induction Generator* (SEIG) skala laboratorium.
2. Sistem PLTPH dimodelkan dan disimulasikan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink.
3. Daya mekanik masukan dari turbin diasumsikan konstan sesuai kondisi aliran air yang stabil dan tidak mempertimbangkan variasi debit maupun *head* air.
4. Sistem pembangkitan yang diteliti beroperasi secara *off-grid* atau tidak terhubung dengan jaringan listrik utama.
5. Perubahan beban utama dimodelkan sebagai beban dinamis untuk mengamati pengaruhnya terhadap kestabilan daya, tegangan, dan frekuensi sistem.
6. Sistem kendali yang digunakan adalah pengendali Proportional–Integral (PI) pada *Electronic Load Controller* (ELC) untuk menjaga kestabilan sistem pembangkitan.
7. 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.
8. Sistem penyimpanan energi menggunakan baterai dan inverter satu fasa sebagai pendukung pemanfaatan energi berlebih dari sistem pembangkitan.
9. Analisis penelitian difokuskan pada parameter daya, tegangan, frekuensi, serta respons sistem terhadap perubahan beban.
10. Kehilangan daya akibat rugi-rugi konversi energi, efisiensi komponen elektronik, dan faktor mekanik lainnya tidak menjadi fokus utama dalam penelitian ini.

1.6 Sistematika Penulisan

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 ANALISA

Bab ini berisi hasil dan analisa dari hasil penelitian yang dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi penarikan kesimpulan berdasarkan hasil penelitian dan saran untuk penelitian berikutnya.

