

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di Indonesia secara konsisten menunjukkan tren peningkatan yang signifikan seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan akselerasi penggunaan teknologi digital di berbagai sektor kehidupan. Berdasarkan data terbaru dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), realisasi konsumsi listrik per kapita nasional pada akhir tahun 2025 telah mencapai angka 1.584 kWh/kapita [1]. Capaian ini melampaui target awal yang dipatok sebesar 1.464 kWh/kapita, mencerminkan adanya lonjakan aktivitas beban listrik pada sektor rumah tangga maupun industri kecil secara nasional [1], [2].

Meskipun Rasio Elektrifikasi nasional pada awal tahun 2026 telah menyentuh angka 99,83%, tantangan besar masih dihadapi dalam mendistribusikan energi yang andal ke wilayah-wilayah terpencil atau *off-grid* [3]. Kendala geografis Indonesia sebagai negara kepulauan menyebabkan perluasan jaringan transmisi nasional seringkali terkendala biaya investasi yang tinggi dan medan yang sulit dijangkau. Hal ini memicu ketimpangan kualitas energi antara wilayah perkotaan dengan daerah pedesaan yang belum sepenuhnya tersentuh oleh jaringan utama.

Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPh) menjadi salah satu opsi paling efektif untuk elektrifikasi skala mikro guna mengejar target bauran Energi Baru Terbarukan (EBT). Dengan kapasitas di bawah 5 kW, PLTPh mampu memanfaatkan aliran air rendah yang melimpah dengan biaya pembangunan yang relatif terjangkau. Dalam pengoperasiannya, sistem PLTPh mandiri seringkali mengadopsi *self-excited induction generator* (SEIG) karena konstruksinya yang kokoh dan biaya perawatan yang rendah [4].

Namun, penggunaan SEIG memiliki kelemahan mendasar berupa ketidakstabilan tegangan dan frekuensi yang sangat bergantung pada keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan beban yang tersambung [4]. Masalah teknis utama muncul akibat karakteristik beban konsumen yang dinamis, sementara input daya mekanis dari turbin air cenderung konstan. Setiap fluktuasi beban akan langsung memengaruhi kecepatan putar generator, yang berdampak pada deviasi parameter listrik sistem. Tanpa sistem pengendalian yang presisi, fluktuasi ini dapat menyebabkan inefisiensi operasi dan kerusakan pada perangkat elektronik.

Untuk menjaga kestabilan tersebut, diperlukan perangkat *electronic load controller* (ELC) yang berfungsi menyeimbangkan daya dengan cara mengalihkan kelebihan energi ke beban tiruan (*ballast load*) [5]. Penggunaan ELC konvensional

seringkali dikombinasikan dengan sistem manajemen energi berbasis baterai untuk menyimpan energi surplus agar tidak terbuang sia-sia sebagai panas. Integrasi ini memungkinkan pemanfaatan daya secara lebih optimal, namun memerlukan algoritma kendali yang mampu menangani sifat non-linear pada proses pengisian dan pengosongan baterai (*charging/discharging*).

Strategi pengendalian PLTPH telah banyak dieksplorasi dalam penelitian terdahulu, mulai dari metode konvensional seperti *proportional-integral-derivative* (PID). Meskipun strukturnya sederhana, kendali PID seringkali mengalami kendala berupa *overshoot* yang tinggi dan sulit beradaptasi terhadap perubahan beban yang ekstrem [6]. Selain itu, penerapan Logika Fuzzy juga telah diuji untuk meningkatkan fleksibilitas kontrol. Namun, penentuan fungsi keanggotaan yang statis pada metode ini menyebabkan sistem sulit memberikan respon optimal jika gangguan luar berada di luar jangkauan skenario perancangan awal [7].

Sebagai solusi atas keterbatasan algoritma konvensional dan kecerdasan buatan tersebut, SMC menjadi metode kontrol analitis non-linear yang tangguh untuk diimplementasikan. SMC terbukti memiliki ketangguhan (*robustness*) absolut terhadap parameter sistem kelistrikan yang tidak pasti dan invarian terhadap gangguan saat beroperasi pada bidang luncur (*sliding surface*). Walaupun demikian, penerapan SMC konvensional memiliki kelemahan inheren yang disebut fenomena *chattering*, yaitu kemunculan osilasi sinyal frekuensi tinggi akibat karakteristik hukum aksi peralihan yang diskontinu [8]. Pada aplikasi ELC dan sistem penyimpanan baterai, getaran *chattering* ini sangat merugikan karena berpotensi mendistorsi kualitas daya, memicu panas berlebih secara drastis, dan mempercepat kerusakan komponen sakelar semikonduktor.

Untuk meredam *chattering* secara efektif sekaligus meminimalkan eror, parameter desain SMC—seperti ketebalan batas area (*boundary layer*), konstanta penguatan (*gain*), dan landaian lereng luncur—wajib ditala secara presisi. Melakukan penalaan rangkaian parameter tersebut secara manual terbukti sangat rumit, memakan waktu, dan tidak menjamin tercapainya titik efisiensi optimal. Oleh karena itu, pendekatan kecerdasan komputasi metaheuristik menggunakan algoritma *particle swarm optimization* (PSO) diintegrasikan ke dalam sistem guna melacak dan menemukan susunan parameter SMC yang paling optimum secara matematis [9]. Algoritma PSO dipilih karena memiliki konvergensi iteratif yang sangat cepat, komputasi yang sederhana, serta efisiensi pelacakan yang tinggi dalam meminimalkan nilai fungsi objektif.

Berdasarkan permasalahan dan peluang optimasi tersebut, penelitian ini difokuskan pada pemodelan dan perancangan algoritma kendali hibrida SMC-PSO. Strategi kontrol adaptif ini akan diaplikasikan pada ELC yang terintegrasi dengan sistem penyimpanan baterai guna meregulasi keseimbangan daya pembangkit dan

dinamika beban konsumen secara presisi pada PLTPh *off-grid*. Melalui integrasi PSO, diharapkan respons kontroler SMC menjadi jauh lebih akurat, osilasi *chattering* dapat diredam secara drastis, serta kontinuitas manajemen energi kelistrikan dapat senantiasa dijaga kestabilannya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah yang akan dibahas dalam 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 SMC-PSO pada PLTPh untuk menjaga kestabilan daya terhadap fluktuasi beban?
3. Bagaimana kinerja kendali berbasis SMC-PSO terhadap ELC dalam mengelola distribusi daya antara proses pengisian dan pengosongan baterai secara adaptif untuk menjaga keseimbangan sistem?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam 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 SMC-PSO untuk menjaga kestabilan daya keluaran PLTPh.
3. Merancang sistem distribusi daya berbasis ELC untuk mengatur proses pengisian dan pengosongan baterai secara adaptif terhadap perubahan beban.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terfokus dan terarah, ditetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Seluruh perancangan dan pengujian sistem dilakukan secara simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink.
2. Daya keluaran dari PLTPh dianggap konstan, sesuai karakteristik aliran air yang stabil.
3. SMC-PSO digunakan sebagai sistem kendali utama yang mengatur kinerja ELC.
4. Pengendalian dilakukan berdasarkan frekuensi, daya sistem dan *State of Charge* (SoC).

5. Baterai melakukan pengisian saat terjadi surplus daya antara pembangkitan dan beban, serta pengosongan saat terjadi defisit daya dalam sistem.
6. Kehilangan daya pada konversi dan efisiensi komponen diasumsikan ideal.
7. Profil beban utama dibuat berdasarkan pola umum konsumsi listrik ideal pada siang dan malam hari.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi ilmiah berupa kajian analitis penerapan SMC sebagai metode kendali non-linear dalam menjaga kestabilan tegangan dan frekuensi pada sistem PLTPh.
2. Memperkaya khazanah keilmuan di bidang sistem kendali non-linear dan manajemen energi pada pembangkit listrik skala kecil (*off-grid*).
3. Memberikan solusi manajemen energi berbasis baterai yang mampu menopang suplai listrik pada wilayah pedesaan dan terpencil yang belum terjangkau jaringan PLN.
4. Hasil simulasi dan pemodelan pada MATLAB/Simulink dapat dijadikan acuan teknis bagi praktisi dan perancang sistem dalam mengembangkan PLTPh yang lebih efisien dan andal.

1.6 Sistematika Penulisan

Penyusunan proposal tugas akhir ini dibagi menjadi beberapa bab yang saling berkesinambungan. Adapun rincian struktur penulisannya adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas mulai dari latar belakang masalah dalam penelitian, tujuan yang ingin dicapai, manfaat yang akan didapatkan, batasan masalah, hingga sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan berbagai landasan teoretis serta kajian literatur yang relevan. Kajian yang dibahas mencakup konsep dasar pembangkit pikohidro, prinsip kerja *sliding mode control* (SMC), algoritma *particle swarm optimization* (PSO), serta manajemen energi yang menjadi fondasi dalam perancangan dan penyelesaian masalah.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas tahapan operasional dan prosedur sistematis yang diterapkan selama proses pengerjaan tugas akhir. Pembahasannya mencakup diagram alir penelitian, alur perancangan model sistem

PLTPh, penetapan spesifikasi parameter kontrol, hingga desain skenario pengujian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan data-data hasil simulasi yang telah dilakukan beserta analisis komprehensifnya, dan evaluasi kinerja sistem kendali SMC-PSO guna menjawab rumusan masalah yang telah ditetapkan.

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan penelitian dan memuat saran berupa rekomendasi teknis maupun masukan konstruktif bagi pengembangan rancangan sistem serupa di masa mendatang.

