

Model Integrasi Tenaga Surya-Angin dengan Penyimpanan berbasis Superkapasitor-Baterai pada Kondisi Cuaca dan Beban Dinamis

Muji Juherwin¹⁾, Rifky Irawan¹⁾, Mohamad Farid Misnan²⁾

¹⁾Program Studi Teknik Sistem Energi, Institut Teknologi Lombok, Indonesia

²⁾Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknologi Mara, Malaysia

mujijuherwin@lit.ac.id; rifkyirawan@lit.ac.id;
mohamadfarid@uitm.edu.my;

Abstrak

Integrasi sumber energi terbarukan menghadapi tantangan utama berupa fluktuasi daya yang tinggi, sehingga membutuhkan sistem penyimpanan energi yang responsif dan andal. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja baterai, superkapasitor, serta skema *Hybrid Energy Storage System* (HESS) berbasis mekanisme *breaker* dalam merespons variabilitas sumber energi dan profil beban. Simulasi dilakukan menggunakan data radiasi matahari dari satelit Himawari dan profil beban Pulau Lombok yang telah melalui proses *downscaling*. Hasil menunjukkan bahwa baterai mampu meredam fluktuasi daya, namun memiliki keterbatasan dalam merespons dinamika cepat dan berpotensi mengalami degradasi akibat siklus operasi yang intensif. Sebaliknya, superkapasitor memiliki respons dinamis yang sangat cepat dan mampu menyerap fluktuasi daya secara efektif, tetapi terbatas dalam kapasitas energi. Implementasi HESS dengan mekanisme *breaker*, yang memosisikan superkapasitor sebagai penyimpan utama dan baterai sebagai *backup* berbasis ambang *state of charge* (SOC), terbukti meningkatkan penyerapan energi terbarukan, mengurangi kehilangan energi, serta menurunkan frekuensi siklus baterai. Dengan demikian, strategi ini berpotensi meningkatkan efisiensi dan umur pakai sistem penyimpanan energi.

Kata Kunci : energi terbarukan, *hybrid energy storage system*, baterai, superkapasitor, SOC.

I. PENDAHULUAN

Negara tropis seperti Indonesia memiliki potensi pembangkit listrik tenaga surya yang melimpah karena mendapatkan sinar matahari sepanjang tahun [1,2]. Selain itu, karakter kepulauan yang selalu berangin juga memperlebar jalan menuju kemandirian energi apabila pemanfaatannya dilakukan secara optimal [3]. Melimpahnya potensi tersebut menjadi latar belakang pemerintah Indonesia menetapkan jalan menuju skema 100% penggunaan energi terbarukan di tahun 2060 [4]. Lebih ambisius dari target tersebut, Provinsi NTB menetapkan target pencapaian skema ini di tahun 2050 [5]. Pada RUKN terbaru, pemerintah menetapkan target PLTS dan PLTB yang cukup tinggi [6]. Untuk provinsi NTB saja, PLN siap menyerap tambahan energi terbarukan sebesar 80 MW di tahun 2026 [7].

Sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin memiliki karakteristik intermitensi dan variabilitas yang tinggi. Fluktuasi daya yang terjadi dalam skala waktu cepat dapat memengaruhi stabilitas, terutama pada jaringan dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi [8]. Untuk menjaga keandalan operasional, pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) umumnya memerlukan sistem penyimpanan energi [9]. Oleh karena itu, skema terbaru untuk *variable renewable energy* (VRE) di pulau Lombok akan lebih banyak dikombinasikan

dengan *Battery Energy Storage System* (BESS), seperti PLTS-BESS dan PLTB-BESS [6].

Meskipun demikian, penggunaan baterai juga menghadapi sejumlah keterbatasan, terutama terkait umur siklus, degradasi performa akibat pola charge-discharge yang dinamis, serta keterbatasan dalam merespons fluktuasi daya berfrekuensi tinggi [10]. Selain itu, variabilitas beban yang bersifat dinamis turut menambah kompleksitas dalam pengelolaan sistem berbasis *Battery Energy Storage System* (BESS), khususnya dalam menjaga keseimbangan antara suplai dan permintaan energi secara real-time [11].

Superkapasitor menjadi salah satu alternatif yang telah diterapkan secara global untuk meningkatkan stabilitas daya sekaligus mengoptimalkan penyerapan energi [12]. Perangkat ini memiliki karakteristik densitas daya tinggi dan waktu respons yang sangat cepat, sehingga lebih adaptif terhadap perubahan energi dalam skala waktu singkat [13,14]. Superkapasitor jenis Electric Double Layer Capacitor (EDLC) juga memiliki keunggulan dalam hal umur siklus yang panjang dibandingkan baterai [10]. Oleh karena itu, pemanfaatan superkapasitor sebagai sistem penyimpanan energi berpotensi meningkatkan kinerja sistem, khususnya dalam meredam fluktuasi daya dan mengurangi beban kerja baterai.

Pada kondisi tertentu dan aplikasi spesifik, seperti sistem statis skala kecil atau microgrid, penggunaan superkapasitor juga berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap baterai [15].

Penelitian terkait sistem penyimpanan energi hibrida berbasis baterai–superkapasitor telah banyak dilakukan [16,17]. Penelitian sebelumnya fokus pada stabilitas daya dan integrasi *micro-grid* [18-25]. Kajian yang secara spesifik mengintegrasikan sistem fotovoltaik dan angin dengan pendekatan berbasis data cuaca satelit resolusi tinggi serta data beban riil pada konteks sistem kelistrikan kepulauan tropis masih terbatas. Keterbatasan ini menyebabkan belum optimalnya pemahaman mengenai strategi integrasi yang paling sesuai untuk kondisi operasional nyata, khususnya dalam menghadapi dinamika sumber energi dan beban secara simultan.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model simulasi yang mengintegrasikan pembangkit listrik tenaga surya dan angin dengan sistem penyimpanan energi hibrida berbasis baterai–superkapasitor. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan data cuaca berbasis satelit Himawari yang dikombinasikan dengan data riil konsumsi energi listrik di Pulau Lombok untuk mengevaluasi respons sistem secara lebih representatif terhadap kondisi lapangan. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran mengenai keandalan sistem, karakteristik respons penyimpanan energi terhadap fluktuasi daya, serta strategi integrasi yang dapat mendukung pengembangan sistem energi terbarukan di wilayah kepulauan.

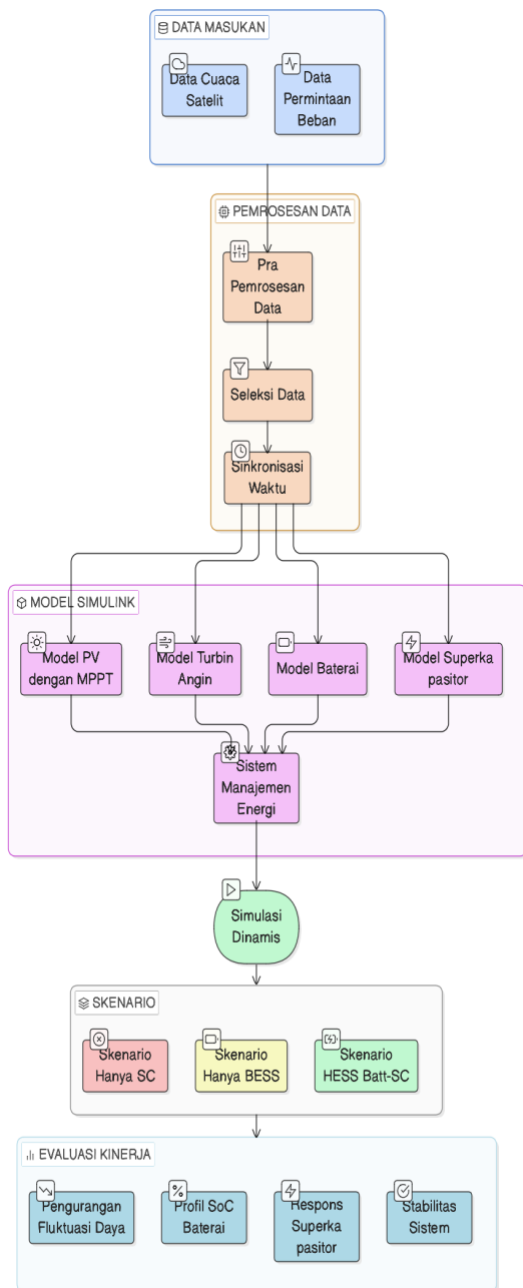
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan dan simulasi dinamis untuk menganalisis integrasi pembangkit listrik tenaga surya dan angin dengan sistem penyimpanan energi hibrida berbasis baterai dan superkapasitor. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB Simulink []. Pendekatan ini memungkinkan implementasi langsung dari model matematis ke dalam bentuk blok fungsional, sehingga hubungan antar variabel dapat dianalisis secara sistematis dan realistis. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

Data utama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data cuaca dan data beban. Data cuaca diperoleh dari satelit Himawari-8 dengan resolusi

temporal satu jam, yang mencakup irradiance, kecepatan angin, dan temperatur lingkungan.

Untuk merepresentasikan kondisi sistem yang menantang, dipilih periode waktu dengan tingkat fluktuasi tinggi. Data tersebut kemudian diekstrapolasi menjadi resolusi per detik menggunakan interpolasi kontinu. Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan resolusi temporal simulasi, menghindari diskontinuitas sinyal, serta memungkinkan analisis respons cepat yang menjadi karakteristik utama superkapasitor. Data beban sistem kelistrikan Pulau Lombok diperoleh dari literatur [26] dan diproses dengan metode yang sama untuk menghasilkan profil beban dengan resolusi tinggi. Sinkronisasi waktu dilakukan untuk memastikan konsistensi antara data sumber energi dan beban dalam simulasi.



Gambar 1. Diagram alir proses penelitian

Pemodelan pembangkit listrik tenaga surya dilakukan berdasarkan hubungan antara irradiance dan daya keluaran panel surya. Secara matematis, hubungan tersebut dinyatakan sebagai berikut:

$$P_{PV}(t) = \eta_{PV} \cdot A \cdot G(t) \quad (1)$$

Model ini memberikan representasi yang cukup akurat untuk analisis sistem skala jaringan tanpa memerlukan parameter detail modul yang kompleks. Selain itu, model ini kompatibel dengan pendekatan berbasis data real.

Pemodelan pembangkit listrik tenaga angin secara teoritis mengikuti hubungan daya terhadap kecepatan angin pada persamaan (2).

$$P_{WT}(t) = \frac{1}{2} \rho A C_p v^3(t) \quad (2)$$

Model baterai dikembangkan menggunakan pendekatan *state of charge (SoC)* yang merepresentasikan tingkat energi tersimpan dalam baterai. Secara matematis, model ini representasikan sebagai:

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \frac{1}{C_{bat}} \int_{t_0}^t \eta \cdot I(\tau) d\tau \quad (3)$$

Superkapasitor dimodelkan menggunakan *Equivalent Circuit Model (ECM)* berbasis rangkaian RC yang mampu merepresentasikan dinamika cepat perangkat. Hubungan antara arus dan tegangan dinyatakan sebagai:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{1}{C} \left(I(t) - \frac{V(t)}{R} \right) \quad (4)$$

Integrasi baterai dan superkapasitor dilakukan dalam konfigurasi paralel untuk membentuk *Hybrid Energy Storage System (HESS)*. Distribusi daya dalam sistem diatur menggunakan strategi manajemen energi berbasis keseimbangan daya yang dinyatakan sebagai:

$$P_{load}(t) = P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_{BESS}(t) + P_{SC}(t) \quad (5)$$

Untuk mengoptimalkan peran masing-masing perangkat, dilakukan pemisahan waktu penggunaan sistem penyimpanan untuk mensupply beban tergantung kondisi SoC. superkapasitor digunakan sebagai sistem penyimpanan utama saat kondisi fluktuasi energi dan beban tinggi. Selama energi yang tersimpan pada superkapasitor masih cukup, supply energi diprioritaskan hanya berasal dari superkapasitor. Pada kondisi ini, baterai diisolasi menggunakan *electronic breaker circuit*. Rangkaian breaker akan otomatis tertutup saat supply energi dari superkapasitor mulai mendekati ambang yang ditetapkan dan baterai mulai mensuplai energi ke load.

Seluruh model diintegrasikan dalam satu sistem untuk mensimulasikan kondisi operasi dengan input berupa data irradiance, kecepatan angin, dan beban yang telah diproses. Evaluasi kinerja sistem dilakukan dengan menganalisis fluktuasi daya, profil SoC baterai, serta respons tegangan superkapasitor. Fokus utama evaluasi adalah kemampuan sistem dalam meredam fluktuasi daya serta mengurangi beban kerja baterai. Untuk tujuan tersebut, dilakukan tiga skenario simulasi, yaitu hanya menggunakan baterai, hanya menggunakan superkapasitor, dan skenario ketiga adalah menggunakan kombinasi keduanya. Perbandingan

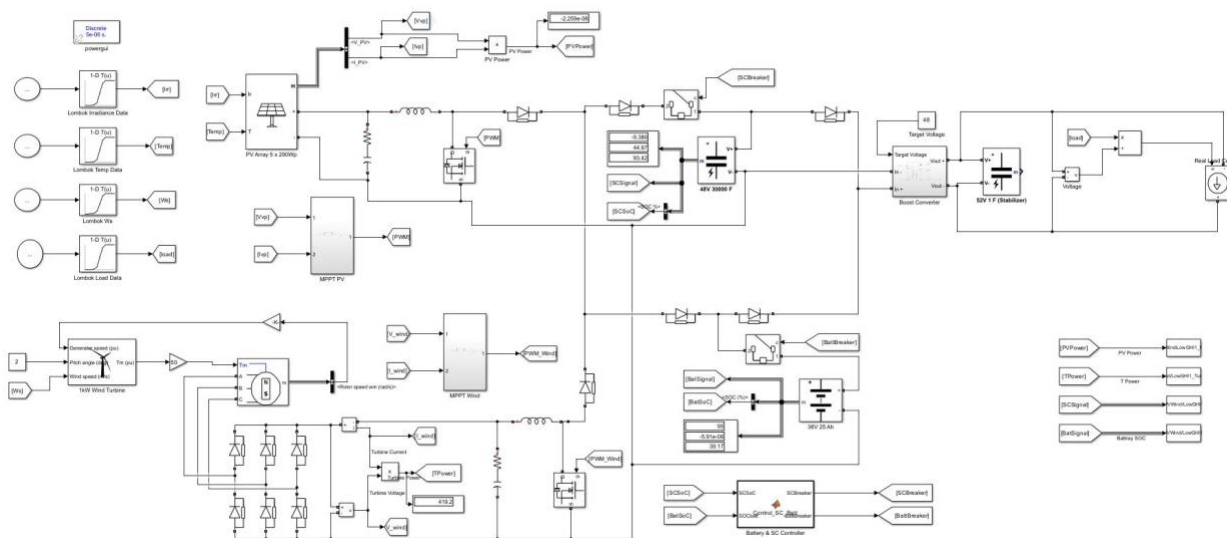
antar skenario digunakan untuk menilai peningkatan stabilitas dan efektivitas sistem secara kuantitatif.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Block diagram implementasi model pada Matlab Simulink

Implementasi model sistem dilakukan menggunakan platform MATLAB Simulink dengan pendekatan berbasis blok yang merepresentasikan integrasi antara sumber energi terbarukan, sistem penyimpanan energi, serta strategi manajemen energi dalam satu kerangka simulasi dinamis.

Arsitektur lengkap sistem yang diimplementasikan pada Simulink ditunjukkan pada Gambar 2. Diagram ini mencakup blok pembangkitan (PV dan wind), sistem penyimpanan energi (baterai dan superkapasitor), serta modul manajemen energi yang mengatur distribusi daya.



Gambar 2. Block diagram implementasi sistem PV–Wind–HESS pada MATLAB Simulink

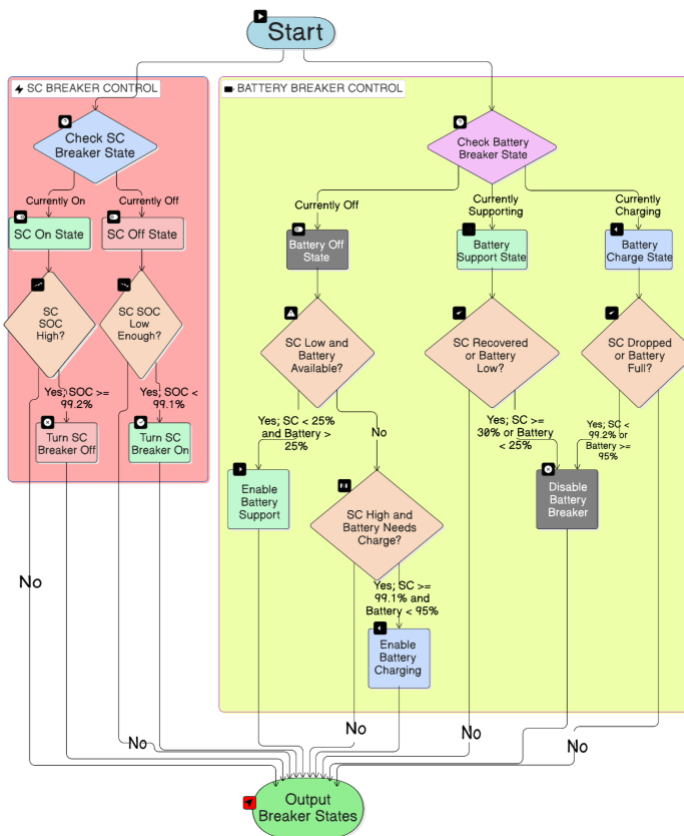
Salah satu kontribusi utama dalam penelitian ini adalah pengembangan mekanisme pengaturan distribusi energi berbasis electronic breaker circuit yang diintegrasikan dalam sistem penyimpanan energi hibrida. Berbeda dengan pendekatan konvensional yang umumnya menggunakan pembagian berbasis frekuensi secara simultan, penelitian ini mengusulkan pendekatan berbasis kondisi energi (state-dependent switching) untuk mengoptimalkan peran masing-masing perangkat.

Untuk mengoptimalkan peran masing-masing perangkat, dilakukan pemisahan waktu penggunaan sistem penyimpanan untuk mensuplai beban tergantung pada kondisi state of charge (SoC) dan tingkat energi yang tersedia.

Superkapasitor digunakan sebagai sistem penyimpanan utama pada kondisi fluktuasi energi dan beban yang tinggi. Selama energi yang tersimpan pada superkapasitor masih berada di atas ambang batas tertentu, suplai energi diprioritaskan berasal dari superkapasitor. Pada kondisi ini, baterai diisolasi dari sistem menggunakan rangkaian electronic breaker.

Ketika energi pada superkapasitor mulai menurun dan mendekati ambang batas yang telah ditentukan, rangkaian breaker secara otomatis berubah kondisi menjadi tertutup, sehingga baterai mulai terhubung dan berkontribusi dalam menyuplai beban. Mekanisme ini memungkinkan transisi yang adaptif antara kedua sistem penyimpanan tanpa membebani baterai secara berlebihan pada kondisi fluktuasi tinggi.

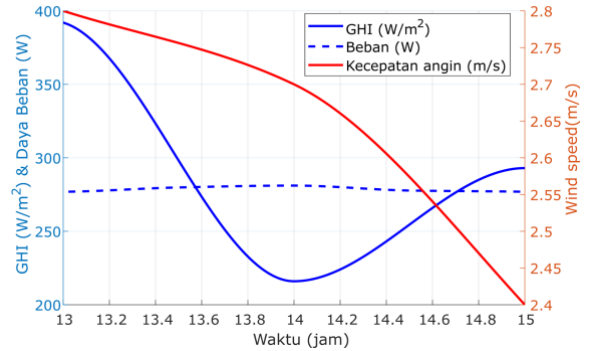
Selain untuk mengatur waktu penggunaan sistem penyimpanan energi, *electronic breaker* juga berfungsi sebagai proteksi superkapasitor dari *over-voltage* yang berbahaya. Penerapan sistem *breaker* pada sisi baterai dan superkapasitor memberikan fleksibilitas kontrol yang lebih baik saat pengisian dan pengosongan daya. Implementasi rangkaian *breaker* dalam Simulink dilakukan menggunakan blok switch yang dikontrol oleh sinyal logika berbasis SOC baterai dan superkapasitor. Pendekatan ini memberikan fleksibilitas dalam pengaturan strategi kontrol sekaligus menjaga kesederhanaan model. Diagram alir dari mekanisme *electronic breaker* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Flow chart mekanisme electronic breaker untuk pengaturan switching antara superkapasitor dan baterai.

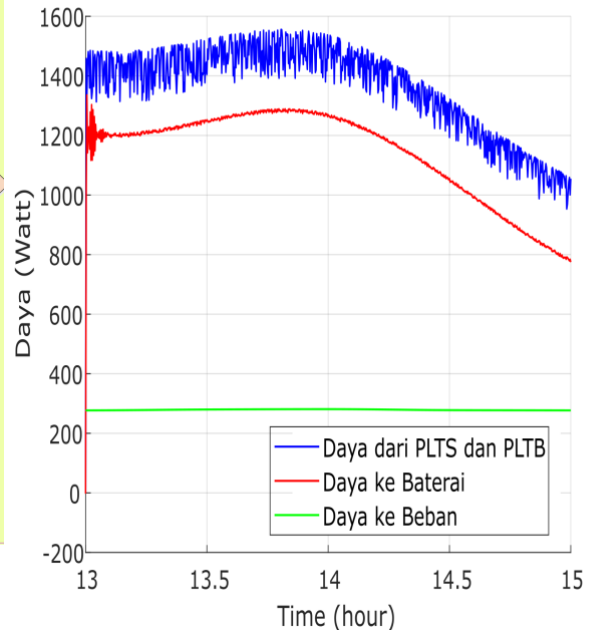
3.2 Perbandingan Skenario Penyimpanan Energi Menggunakan Baterai (BESS) vs Superkapasitor

Pengujian perbandingan kinerja baterai dan superkapasitor dilakukan menggunakan data radiasi matahari dari satelit Himawari serta profil beban Pulau Lombok yang telah melalui proses *downscaling*. Profil input yang digunakan dalam simulasi ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Profil input pada simulasi perbandingan kinerja baterai dan superkapasitor secara terpisah.

Untuk menganalisis karakteristik daya pada masing-masing perangkat penyimpanan energi, dilakukan simulasi secara terpisah. Simulasi pertama menggunakan baterai sebagai satu-satunya sistem penyimpanan tanpa melibatkan superkapasitor. Hasil simulasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Profil daya pada sistem yang hanya menggunakan baterai.

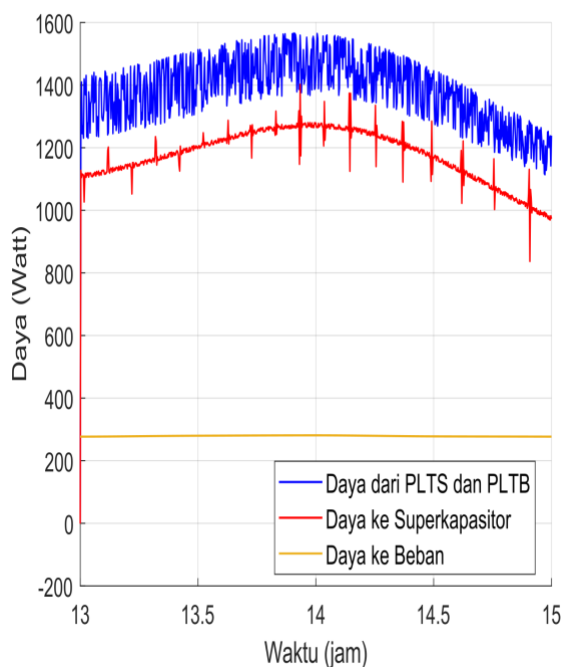
Hasil simulasi pada Gambar 5 menunjukkan bahwa profil produksi energi bersifat fluktuatif, yang terutama dipengaruhi oleh variabilitas sumber energi terbarukan, khususnya pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB). Meskipun terjadi perubahan daya yang cepat pada sisi sumber, daya yang diserap oleh baterai relatif lebih stabil. Hal ini disebabkan oleh karakteristik baterai yang

memiliki respons dinamis lebih lambat sehingga mampu meredam fluktuasi daya (*power smoothing*). Daya yang disimpan dalam baterai merupakan selisih antara daya pembangkitan dan daya beban.

Namun demikian, kemampuan peredaman fluktuasi ini berpotensi menimbulkan konsekuensi operasional, seperti peningkatan temperatur, degradasi kapasitas, dan penurunan umur siklus (*cycle life*), terutama apabila baterai mengalami siklus pengisian dan pengosongan yang intens pada kondisi fluktuatif. Oleh karena itu, evaluasi lebih lanjut terhadap aspek termal dan degradasi baterai diperlukan.

Selanjutnya, simulasi dilakukan dengan menggunakan superkapasitor sebagai satu-satunya sistem penyimpanan energi tanpa baterai. Profil daya hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 6

14

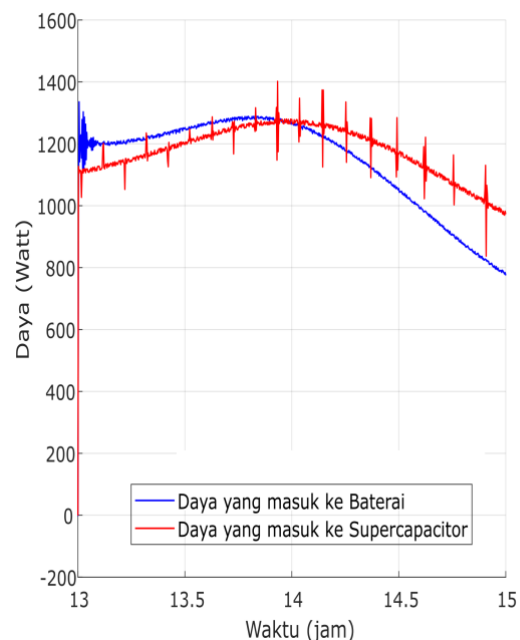


Gambar 6. Profil daya pada sistem yang hanya menggunakan superkapasitor.

Berdasarkan Gambar 6, terlihat bahwa superkapasitor menunjukkan respons yang berbeda dibandingkan baterai. Daya yang diserap cenderung mengikuti dinamika sumber dengan lebih cepat, meskipun tetap terdapat mekanisme stabilisasi. Selain itu, muncul fluktuasi jangka pendek yang berkaitan dengan dinamika energi pada sistem *maximum power point tracking* (MPPT). Fenomena ini menunjukkan kemampuan

superkapasitor dalam merespons perubahan daya secara cepat.

Karakteristik tersebut sejalan dengan sifat superkapasitor yang memiliki kerapatan daya tinggi (*high power density*), sehingga mampu menyerap dan melepaskan energi dalam waktu singkat. Sebaliknya, baterai memiliki kerapatan energi lebih tinggi namun kerapatan daya lebih rendah, sehingga respons terhadap fluktuasi cepat menjadi terbatas. Akibatnya, pada kondisi sumber energi yang sangat fluktuatif, kemampuan superkapasitor dalam menyerap energi cenderung lebih baik dibandingkan baterai. Perbandingan ini ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan daya yang disimpan pada baterai dan superkapasitor.

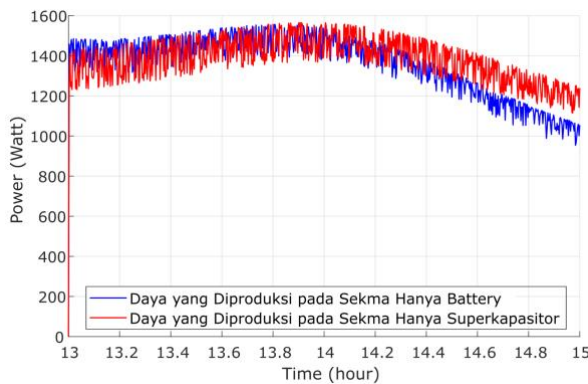
Hasil pada Gambar 7 menunjukkan bahwa meskipun pada awalnya baterai mampu menyerap energi dengan baik, kinerjanya cenderung menurun seiring waktu, terutama saat terjadi fluktuasi signifikan pada sekitar pukul 14.00. Pada kondisi yang sama, superkapasitor mampu mempertahankan kinerja penyerapan energi secara lebih konsisten.

Dalam simulasi ini, digunakan profil beban terkontrol yang merepresentasikan kondisi beban riil di lapangan. Kombinasi antara beban yang relatif konstan dan keterbatasan respons baterai terhadap fluktuasi menyebabkan sebagian energi dari PLTS dan PLTB tidak dapat terserap secara optimal pada skema yang hanya menggunakan

baterai. Hal ini berimplikasi pada penurunan total energi yang berhasil dimanfaatkan.

Sebaliknya, penggunaan superkapasitor memungkinkan penyerapan energi yang lebih efektif pada kondisi fluktuatif, sehingga meningkatkan pemanfaatan energi dari sumber terbarukan. Dalam sistem nyata, energi yang tidak terserap berpotensi terdisipasi dalam bentuk panas, yang dapat menurunkan efisiensi sistem dan mempercepat degradasi komponen. Perbandingan daya pembangkitan yang termanfaatkan pada kedua skema ditunjukkan pada Gambar 8.

15



Gambar 8. Perbandingan daya listrik dari PLTS dan PLTB pada skema baterai dan superkapasitor.

3.3 Skenario Hybrid Energy Storage System (HESS) dengan Mekanisme Breaker (Baterai-Superkapasitor)

Perbedaan karakteristik antara baterai dan superkapasitor menjadikan keduanya komplementer untuk diintegrasikan dalam suatu sistem penyimpanan energi hibrida (*Hybrid Energy Storage System*, HESS). Pada umumnya, konfigurasi HESS diimplementasikan secara paralel, di mana superkapasitor berfungsi sebagai peredam fluktuasi daya (*power smoothing*) dan penstabil tegangan, sementara baterai tetap berperan sebagai penyimpan energi utama. Pendekatan ini menyebabkan baterai mengalami siklus pengisian dan pengosongan yang relatif intensif, sehingga berpotensi mempercepat degradasi dan menurunkan umur pakainya.

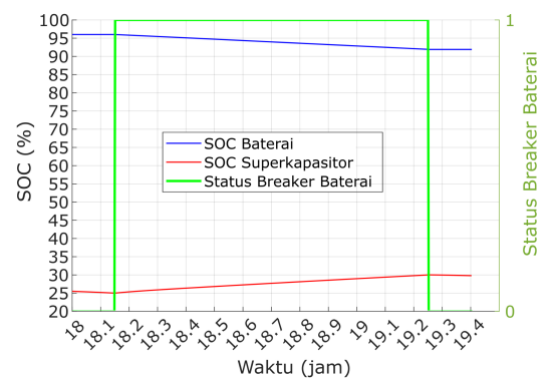
Dalam penelitian ini, diusulkan strategi operasi yang berbeda, di mana baterai dan superkapasitor tidak hanya berfungsi secara komplementer, tetapi juga saling mendukung (*mutual backup*) melalui mekanisme pemutusan (*breaker*) berbasis ambang kondisi muatan (*state of charge*, SOC). Pada skema ini, superkapasitor diposisikan sebagai penyimpan energi utama yang menangani dinamika daya harian, sedangkan baterai berfungsi sebagai cadangan yang hanya diaktifkan ketika energi pada superkapasitor tidak mencukupi untuk memenuhi beban.

Pendekatan ini didasarkan pada karakteristik superkapasitor yang memiliki kerapatan daya tinggi dan umur siklus yang sangat panjang (hingga orde jutaan siklus), sehingga lebih sesuai untuk menangani fluktuasi daya dan siklus cepat.

16

Sebaliknya, baterai dengan kerapatan energi yang lebih tinggi digunakan secara selektif untuk menghindari siklus operasi yang berlebihan. Dengan demikian, frekuensi pengisian dan pengosongan baterai dapat dikurangi, yang pada akhirnya berpotensi memperpanjang umur pakainya.

Gambar 9 menunjukkan mekanisme perpindahan (*switching*) suplai energi dari superkapasitor ke baterai ketika nilai SOC superkapasitor mencapai ambang batas minimum yang telah ditentukan.



Gambar 9. Mekanisme *switching* antara superkapasitor dan baterai berdasarkan ambang SOC.

Berdasarkan Gambar 9, terlihat bahwa ketika SOC superkapasitor mencapai batas minimum, suplai daya ke beban secara otomatis dialihkan ke baterai. Proses ini ditandai dengan mulai mengalirnya daya dari baterai dan terhentinya kontribusi daya dari superkapasitor. Mekanisme perpindahan ini didukung oleh perbedaan tegangan antar perangkat serta sistem isolasi berbasis dioda, sehingga transisi berlangsung secara pasif tanpa memerlukan kontrol aktif yang kompleks.

Pada kondisi SOC minimum, tegangan superkapasitor berada pada kisaran sekitar 12 V, sedangkan tegangan baterai dijaga pada sekitar 39 V pada kondisi SOC tinggi ($\pm 96\%$). Perbedaan tegangan ini menyebabkan superkapasitor tidak lagi mampu menyuplai beban, sehingga secara alami beban dialihkan ke baterai. Sebaliknya, energi dari pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) yang tetap beroperasi pada malam hari akan cenderung mengisi superkapasitor terlebih dahulu karena tingkat tegangannya yang lebih rendah. Aliran energi dari baterai ke superkapasitor dicegah oleh dioda, sehingga tidak terjadi *reverse current*.

Selama periode *backup* oleh baterai, superkapasitor terus mengalami proses pengisian dari sumber energi yang tersedia.

Untuk mencegah penggunaan baterai secara berkelanjutan, sistem dirancang dengan ambang penghentian *backup*, yaitu ketika SOC superkapasitor telah mencapai sekitar 30%. Pada titik ini, suplai daya kembali dialihkan ke superkapasitor, sehingga baterai dapat kembali ke kondisi siaga (*standby*).

Strategi ini memberikan jeda operasi (*rest period*) bagi baterai, sehingga mengurangi akumulasi siklus dalam jangka panjang. Selain itu, pada kondisi ketersediaan energi angin yang tinggi, superkapasitor berpotensi memenuhi kebutuhan beban secara penuh tanpa melibatkan baterai dalam periode waktu yang lebih lama. Dengan demikian, pendekatan ini tidak hanya meningkatkan fleksibilitas operasional sistem, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan keandalan dan umur pakai sistem penyimpanan energi secara keseluruhan

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa baterai memiliki kemampuan meredam fluktuasi daya, namun terbatas dalam merespons dinamika cepat dan berpotensi mengalami degradasi akibat siklus operasi yang intensif. Sebaliknya, superkapasitor unggul dalam merespons fluktuasi daya tinggi karena kerapatan daya yang besar, tetapi terbatas dalam kapasitas energi.

Implementasi Hybrid Energy Storage System (HESS) dengan mekanisme breaker memungkinkan pembagian peran yang lebih optimal, di mana superkapasitor berfungsi sebagai penyimpan utama dan baterai sebagai backup berbasis ambang SOC. Strategi ini meningkatkan

penyerapan energi terbarukan, mengurangi kehilangan energi, serta menurunkan frekuensi siklus baterai, sehingga berpotensi memperpanjang umur pakai sistem.

4.2 Saran

1. Perlu dilakukan validasi eksperimental untuk memastikan kinerja sistem pada kondisi nyata.
2. Pengembangan kontrol adaptif diperlukan untuk meningkatkan optimalisasi distribusi energi.
3. Kajian lanjutan terkait degradasi dan umur pakai sistem perlu dilakukan secara kuantitatif.
4. Optimasi kapasitas baterai dan superkapasitor penting untuk mencapai desain yang efisien dan ekonomis.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia atas dukungan pendanaan penuh terhadap penelitian ini melalui skema **Penelitian Dosen Pemula (PDP)** tahun 2025.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Rajabnia M, Ali M, Vasquez J, Guan Y, Guerrero J, Khan B, et al. Long-Term Renewable Energy Planning in the Indonesian Context: A Lombok Island Study Case. *Appl Sci*. 2023. <https://doi.org/10.3390/app132312860>.
- [2]. Kang W, Guan Y, Wijaya D, Bawan E, Perdana A, Vasquez J, et al. Community microgrid planning in Lombok Island: an Indonesian case study. *Front Energy Res*. 2023. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1209875>.
- [3]. Natalia D, Yoesgiantoro D, Yusgiantoro FC. Projection of Coal-Fired Power Plant (CFPP) Towards Net Zero Emission 2060 in Indonesia. *Int J Res Innov Soc Sci*. 2022;6(5):465-71. <https://doi.org/10.47772/ijriss.2022.6523>.
- [4]. Ershov DN. Features of Indonesia's Low-Carbon Development Strategy. *Probl Dal'nego Vostoka*. 2024 Dec;15(3):101-11.

- <https://doi.org/10.31857/s0131281224030071>.
- [5]. Pemerintah Provinsi Nusa Tenggara Barat. Peraturan Gubernur Nusa Tenggara Barat Nomor 43 Tahun 2024 tentang Peta Jalan Nusa Tenggara Barat Menuju Emisi Nol Bersih Sektor Energi Tahun 2050. 2024.
- [6]. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 85.K/TL.01/MEM.L/2025 tentang Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) 2025. Jakarta: Kementerian ESDM; 2025
- [7]. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ID). Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 188.K/TL.03/MEM.L/2025 tentang Pengesahan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2025-2034 [Internet]. Jakarta: Kementerian ESDM; 26 Mei 2025
- [8]. Handayani K, Anugrah P. Assessing the implications of net-zero emissions pathways: An analysis of the Indonesian power sector. In: 2021 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP); 2021 Sep 29. p. 270-275. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICT-PEP53949.2021.9600954>.
- [9]. Almohaimed S, Abdel-Akher M. Power Quality Issues and Mitigation for Electric Grids with Wind Power Penetration. *Appl Sci*. 2020. <https://doi.org/10.3390/app10248852>.
- [10]. Libich J, Sedlaříková M, Máca J, Čudek P, Kazda T, Fafílek G, et al. Supercapacitors vs. Lithium-ion Batteries: Properties and Applications. *Chem Ing Tech*. 2024 Mar;96(3):279-85. <https://doi.org/10.1002/cite.202300054>.
- [11]. Liu, Chang, Yujie Wang, L. xilinx Wang, and Zonghai Chen. "Load-adaptive real-time energy management strategy for battery/ultracapacitor hybrid energy storage system using dynamic programming optimization." *Journal of Power Sources* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227024>.
- [12]. Zheng B, Liu C, Pan M, Gong F, Xu X, Wang X, et al. Module-Based Supercapacitors: Potential Energy Storage Solutions for Large-Scale Photovoltaic Systems. *Energy Technol*. 2024 Dec;12(12):2401011. <https://doi.org/10.1002/ente.202401011>.
- [13]. Hasan MH, Roy A, Sakib MM, Rizve AZ. A Review of Grid-Connected Supercapacitor Systems. In: 2024 IEEE International Conference on Power, Electrical, Electronics and Industrial Applications (PEEIACON); 2024 Sep 12. p. 993-998. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PEEIACON63629.2024.10800178>.
- [14]. Almusawi M, Shukla A, Kavitha P, Gambhire GM, Pardeshi PR, Pragathi B. Comparative Analysis of Supercapacitors vs. Batteries. In: E3S Web of Conferences; 2024. Vol. 591. p. 01010. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202459101010>.
- [15]. Glass E, Glass V. Enabling supercapacitors to compete for ancillary services: An important step towards 100% renewable energy. *Electr J*. 2020 Jun;33(5):106763. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106763>.
- [16]. Díaz-González, F., Cristian Chillón-Antón, M. Llonch-Masachs, S. Galceran-Arellano, J. Rull-Duran, J. Bergas-Jané, and E. Bullich-Massagué. "A hybrid energy storage solution based on supercapacitors and batteries for the grid integration of utility scale photovoltaic plants." *Journal of Energy Storage* (2022). <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104446>.
- [17]. Khalid, M. "A Review on the Selected Applications of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Microgrids." *Energies* 12 (2019): 4559. <https://doi.org/10.3390/en12234559>.
- [18]. Liu S, Wei L, Wang H. Review on reliability of supercapacitors in energy storage applications. *Appl Energy*. 2020;278:115436. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115436>.
- [19]. Olabi A, Abbas Q, Makky A, Abdelkareem M. Supercapacitors as next generation energy storage devices: Properties and applications. *Energy*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123617>.
- [20]. Czagány M, Hompoth S, Keshri A, Pandit N, Galambos I, Gácsi Z, et al. Supercapacitors: An Efficient Way for Energy Storage Application. *Mater*. 2024;17. <https://doi.org/10.3390/ma17030702>.
- [21]. Banele Mbendane, B. Abe and C. Richards. "Analysis of Supercapacitors in

- Renewable Energy Systems for Managing Power Fluctuations." *International Journal of Energy Research* (2024). <https://doi.org/10.1155/2024/4575761>.
- [22]. Alaa Hamzah Abdullah, Karrar M. Al-Anbary, Qasim Mahdi Hamad, Hanaa Mohsin Ali Al Abboodi and Mohammed Taih Gatte. "Frequency response of microgrids with PV power generation and energy storage system (battery and supercapacitor)." *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics* (2024). <https://doi.org/10.11591/eei.v13i1.5071>.
- [23]. Mohamed El-Sayed M. Essa, Mohammed Fouad Ali, E. E. El-kholy, Mohammed Amer, Mahmoud Elsis, Uzair Sajjad, Khalid Hamid and Hilmy El-sayed Awad. "Improving micro-grid management: A review of integration of supercapacitor across different operating modes." *Heliyon*, 11 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42178>.
- [24]. Tuhibur Rahman and Talal Alharbi. "Exploring Lithium-Ion Battery Degradation: A Concise Review of Critical Factors, Impacts, Data-Driven Degradation Estimation Techniques, and Sustainable Directions for Energy Storage Systems." *Batteries* (2024). <https://doi.org/10.3390/batteries10070220>.
- [25]. Jhoan Alejandro Montenegro-Oviedo, C. A. Ramos-Paja, M. L. Orozco-Gutiérrez, Édinson Franco-Mejía and S. I. Serna-Garcés. "Design and Experimental Validation of a Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System Based on an Adaptive LQG Controller." *Applied System Innovation* (2024). <https://doi.org/10.3390/asi8010001>.
- [26]. Apribowo C, Hadi S, Wijaya F, Setyonegoro M, S S. Optimal sizing and placement of battery energy storage system for maximum variable renewable energy penetration considering demand response flexibility: A case in Lombok power system, Indonesia. *Energy Convers Manag X*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100620>.

