

ANALISIS PENGARUH DISTRIBUTED GENERATION DAN BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM (BESS) TERHADAP RUGI-RUGI DAYA PADA JARINGAN DISTRIBUSI 20KV MENGGUNAKAN METODE QUASI-DYNAMIC SIMULATION (QDS)

Hafidz Ibnu Maulidi^{1*}, Sutisna², Rian Nurdiansyah³, Nurmela⁴

Jurusan Teknik Elektro; Universitas Siliwangi; Jl. Mugarsari, Kecamatan Tamansari, Kota Tasikmalaya, Jawa Barat, Kode Pos 46196.

Keywords:

Distributed Generation;
Battery Energy Storage
System; Quasi-Dynamic
Simulation; rugi-rugi daya.

Correspondent Email:

hibnumaulidi@gmail.com

Abstrak. Meningkatnya kebutuhan energi listrik di Pulau Nusa Penida sebagai sistem kelistrikan terisolasi menyebabkan rugi-rugi daya pada jaringan distribusi 20 kV semakin besar akibat panjangnya penyulang dan tingginya aliran daya dari sumber utama menuju pusat beban. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh integrasi Distributed Generation (DG) berupa Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Battery Energy Storage System (BESS) terhadap penurunan rugi-rugi daya menggunakan metode *Quasi-Dynamic Simulation (QDS)* pada DIGSILENT PowerFactory. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif melalui pemodelan sistem distribusi, penyusunan profil beban harian, simulasi kondisi eksisting, serta evaluasi skenario integrasi PLTS, BESS, dan kombinasi keduanya selama 24 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi awal menghasilkan rata-rata rugi-rugi daya sebesar 0,342001 MW atau 1,032%. Integrasi PLTS mampu menurunkan rugi-rugi daya sebesar 13,28%, sedangkan BESS dengan strategi *load shifting* menurunkan sebesar 0,10%. Kombinasi PLTS dan BESS memberikan hasil terbaik dengan rugi-rugi daya sebesar 0,894% atau turun 13,37% dibandingkan kondisi awal sehingga meningkatkan efisiensi penyaluran energi pada jaringan distribusi.



Copyright © 2026 The Author(s),
Published by Jurnal Informatika
dan Teknik Elektro Terapan. This
is an open-access article
distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution-
NonCommercial 4.0 International
License (CC BY-NC 4.0).

Abstract. Increasing electricity demand on Nusa Penida Island as an isolated power system has intensified power losses in the 20 kV distribution network due to long feeders and high power flow from the main supply to load centers. This study aims to analyze the effect of integrating Distributed Generation (DG) based on photovoltaic (PV) systems and Battery Energy Storage System (BESS) on reducing power losses using the *Quasi-Dynamic Simulation (QDS)* method in DIGSILENT PowerFactory. A quantitative approach was employed through distribution system modeling, daily load profile development, baseline simulation, and evaluation of PV, BESS, and combined integration scenarios over a 24-hour period. The results indicate that the baseline condition produced average power losses of 0.342001 MW or 1.032%. PV integration reduced power losses by 13.28%, while BESS employing a *load shifting* strategy achieved a 0.10% reduction. The combined PV-BESS scenario provided the best performance, reducing power losses to 0.894% or 13.37% below the baseline, thereby improving energy distribution efficiency in the isolated distribution network.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring dengan perkembangan teknologi, pertumbuhan jumlah penduduk, serta meningkatnya aktivitas ekonomi masyarakat. Kondisi tersebut menjadikan sistem tenaga listrik dituntut mampu menyediakan pasokan energi yang andal dan efisien. Salah satu permasalahan utama dalam sistem distribusi adalah terjadinya rugi-rugi daya yang tidak dapat dihindari selama proses penyaluran energi listrik dari pembangkit hingga ke konsumen. Rugi-rugi daya dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti panjang saluran distribusi, impedansi jaringan, ukuran dan jenis penghantar, serta nilai tahanan penghantar. Semakin besar impedansi dan semakin jauh jarak penyaluran energi listrik, maka semakin besar pula rugi-rugi daya yang terjadi sehingga efisiensi sistem menjadi menurun [1][2].

Sebagai upaya mengatasi permasalahan tersebut, penerapan Distributed Generation (DG) semakin berkembang sebagai bagian dari strategi modern dalam sistem tenaga listrik. DG merupakan pembangkit berkapasitas relatif kecil yang ditempatkan di dekat pusat beban sehingga mampu mengurangi jarak penyaluran energi listrik, meningkatkan efisiensi sistem, mengurangi rugi-rugi daya, memperkuat keandalan jaringan, serta mendukung pemanfaatan energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan biomassa [3]. Salah satu implementasi DG adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang memberikan manfaat dalam mengurangi ketergantungan terhadap pembangkit konvensional [4]. Namun demikian, karakteristik keluaran daya PLTS yang bergantung pada intensitas radiasi matahari menyebabkan daya yang dihasilkan bersifat fluktuatif sehingga dapat memengaruhi kualitas penyaluran daya dan stabilitas sistem apabila tidak dikelola dengan baik [5].

Penerapan DG dan PLTS menjadi semakin relevan pada sistem kelistrikan Nusa Penida yang dalam RUPTL PT PLN (Persero) Tahun 2025–2034 direncanakan memperoleh tambahan PLTS berkapasitas 4,5 MW pada tahun 2027 serta Battery Energy Storage System (BESS) berkapasitas 7,5 MW. Analisis

sistem distribusi 20 kV di wilayah tersebut menunjukkan total rugi-rugi daya sekitar $\pm 1,1$ MW, dengan penyulang Lembongan, Ceningan, dan Bunga Mekar memiliki rugi-rugi daya tertinggi yang telah melampaui standar SPLN No. 72 Tahun 1987. Di sisi lain, Nusa Penida memiliki potensi energi surya yang sangat besar berdasarkan data Global Solar Atlas sehingga sangat layak dikembangkan sebagai kawasan pembangkit listrik tenaga surya. Akan tetapi, PLTS masih menghadapi kendala berupa keterbatasan produksi saat beban puncak dan kelebihan energi pada siang hari, sehingga diperlukan sistem penyimpanan energi agar pemanfaatannya menjadi lebih optimal [6][7][8][9].

Sebagai solusi terhadap permasalahan tersebut, Battery Energy Storage System (BESS) berfungsi menyimpan energi berlebih dari PLTS dan menyalurkannya kembali ketika produksi listrik menurun atau beban meningkat, sekaligus membantu menjaga kestabilan tegangan, frekuensi, serta keandalan sistem tenaga listrik. Namun, pengaruh BESS terhadap rugi-rugi daya sangat dipengaruhi oleh perubahan profil beban, proses charging–discharging, dan strategi load shifting, sehingga diperlukan pendekatan analisis yang mampu menggambarkan kondisi operasi sistem secara bertahap [10]. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan metode Quasi-Dynamic Simulation (QDS) untuk mengevaluasi secara lebih akurat pengaruh integrasi DG dan BESS terhadap rugi-rugi daya pada jaringan distribusi 20 kV. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan teknis dalam pengembangan sistem distribusi berbasis energi terbarukan, khususnya di wilayah kepulauan, guna meningkatkan efisiensi, keandalan, dan kualitas penyaluran energi listrik secara berkelanjutan [11].

Berdasarkan latar belakang masalah di atas, maka dapat ditentukan bahwa penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengevaluasi pengaruh penerapan Distributed Generation (DG) dan Battery Energy Storage System (BESS) terhadap rugi-rugi daya pada jaringan distribusi 20 kV menggunakan metode Quasi-Dynamic Simulation (QDS). Secara khusus,

penelitian ini bertujuan mengidentifikasi kondisi awal rugi-rugi daya pada sistem distribusi 20 kV melalui simulasi QDS, menganalisis perubahan besarnya rugi-rugi daya setelah integrasi DG dan BESS, serta mengevaluasi efektivitas penerapan kedua teknologi tersebut dalam meningkatkan keandalan sistem distribusi melalui pengurangan rugi-rugi daya secara optimal.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk hingga ke pelanggan melalui jaringan tegangan menengah dan tegangan rendah [12]. Sistem ini terdiri atas distribusi primer yang menghubungkan gardu induk dengan gardu distribusi serta distribusi sekunder yang menyalurkan energi listrik ke pelanggan. Keandalan sistem distribusi sangat dipengaruhi oleh konfigurasi jaringan dan tingkat tegangan yang disesuaikan dengan karakteristik kebutuhan beban [13].

2.2 Rugi-Rugi Daya

Rugi-rugi daya merupakan kehilangan energi listrik selama proses penyaluran yang disebabkan oleh tahanan dan reaktansi penghantar. Besarnya rugi-rugi dipengaruhi oleh arus yang mengalir, panjang saluran, serta karakteristik penghantar, sehingga semakin besar arus dan semakin panjang jaringan maka semakin besar pula energi yang hilang [14]. Pada sistem distribusi tiga fasa, kondisi ketidakseimbangan beban juga menjadi faktor yang memperbesar rugi-rugi daya dan menurunkan efisiensi sistem.

2.3 Distributed Generation (DG) dan Battery Energy Storage System (BESS)

Distributed Generation (DG) merupakan pembangkit berkapasitas kecil yang ditempatkan dekat pusat beban untuk meningkatkan efisiensi penyaluran energi, mengurangi rugi-rugi daya, dan meningkatkan keandalan sistem [15]. Integrasi DG dengan Battery Energy Storage System (BESS) semakin memperkuat kinerja jaringan karena BESS mampu menyimpan kelebihan energi, menyalurkannya kembali saat beban meningkat, mendukung strategi *load shifting*, serta menjaga kestabilan tegangan dan kontinuitas pasokan listrik, khususnya pada

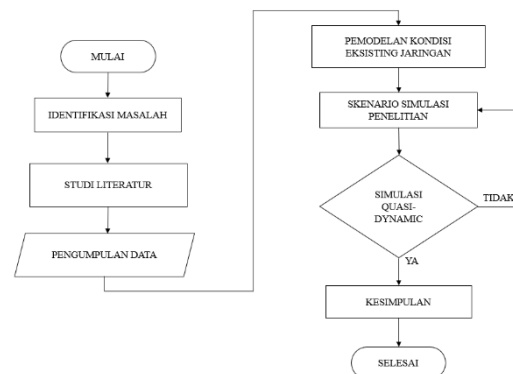
sistem yang memanfaatkan energi terbarukan seperti PLTS.

2.4 Quasi-Dynamic Simulation (QDS)

Quasi-Dynamic Simulation (QDS) merupakan metode simulasi yang menganalisis kondisi sistem tenaga listrik berdasarkan interval waktu tertentu sehingga perubahan profil beban, pembangkitan, serta operasi BESS dapat dimodelkan secara bertahap [16]. Dibandingkan simulasi statis, QDS memberikan hasil yang lebih akurat dalam menghitung rugi-rugi daya karena mampu merepresentasikan kondisi operasi sistem yang berubah sepanjang waktu. Oleh karena itu, metode ini sangat sesuai digunakan untuk mengevaluasi pengaruh integrasi DG dan BESS terhadap kinerja jaringan distribusi tenaga listrik [17].

3. METODE PENELITIAN

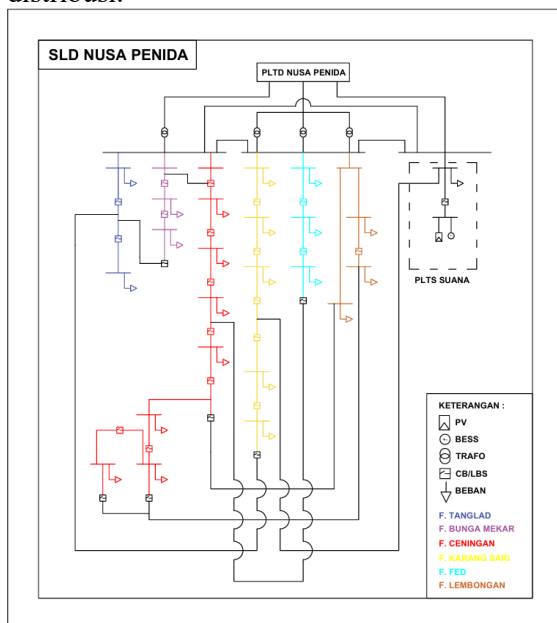
Metode penelitian ini disusun secara sistematis melalui beberapa tahapan yang diawali dengan identifikasi permasalahan berupa rugi-rugi daya pada jaringan distribusi 20 kV, kemudian dilanjutkan dengan studi literatur dan pengumpulan data sistem kelistrikan Nusa Penida. Data yang diperoleh meliputi konfigurasi jaringan, data penyulang, parameter saluran, dan profil beban yang selanjutnya digunakan sebagai dasar pemodelan kondisi eksisting jaringan. Model awal tersebut merepresentasikan kondisi sistem sebelum dilakukan integrasi Distributed Generation (DG) berupa Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Battery Energy Storage System (BESS) sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam proses analisis dan simulasi.



Gambar 1. Flowchart Penelitian

Tahap berikutnya dilakukan penyusunan skenario simulasi menggunakan DIgSILENT PowerFactory dengan metode Quasi-Dynamic

Simulation (QDS). Simulasi diawali dengan analisis kondisi eksisting untuk memperoleh nilai rugi-rugi daya awal, kemudian dilanjutkan dengan perhitungan kapasitas PLTS, kapasitas BESS, serta penentuan lokasi integrasi berdasarkan kondisi jaringan dan karakteristik beban. Selanjutnya dilakukan tiga skenario integrasi, yaitu pemasangan PLTS, penerapan BESS dengan strategi load shifting, dan integrasi PLTS-BESS. Seluruh skenario dianalisis selama periode operasi berdasarkan profil beban harian untuk mengetahui perubahan rugi-rugi daya pada jaringan distribusi.



Gambar 2. Single Line Diagram Nusa Penida

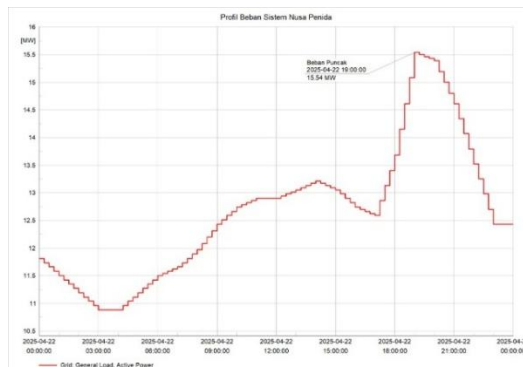
Hasil simulasi dari setiap skenario kemudian dibandingkan dengan kondisi eksisting untuk mengevaluasi efektivitas integrasi DG dan BESS dalam mengurangi rugi-rugi daya serta meningkatkan kinerja jaringan distribusi 20 kV. Apabila hasil simulasi belum menunjukkan perbaikan yang optimal, maka parameter seperti kapasitas PLTS, kapasitas BESS, maupun skenario integrasi disesuaikan dan simulasi diulang hingga diperoleh hasil yang memenuhi tujuan penelitian. Penelitian dilaksanakan pada sistem distribusi 20 kV di Nusa Penida, Bali, dengan tahapan kegiatan yang meliputi studi literatur, penyusunan proposal, pengumpulan dan pengolahan data, analisis hasil, hingga penyusunan laporan akhir penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Studi literatur pada penelitian ini dilakukan melalui penelaahan jurnal, buku, dan berbagai referensi ilmiah yang relevan sebagai dasar untuk memahami konsep sistem distribusi tenaga listrik, analisis rugi-rugi daya, serta penerapan Distributed Generation (DG), khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Battery Energy Storage System (BESS). Selanjutnya, pengumpulan data dilakukan dengan memperoleh data jaringan distribusi 20 kV, data penyulang, data beban, dan parameter saluran pada sistem kelistrikan Nusa Penida yang digunakan sebagai dasar dalam pemodelan serta analisis jaringan distribusi pada penelitian ini.

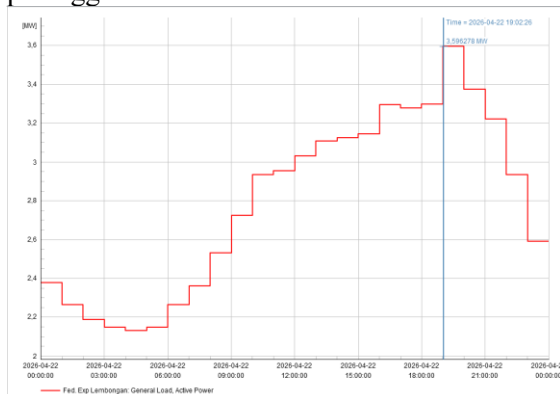
4.1 Pengumpulan Data

Jaringan distribusi 20 kV di sistem kelistrikan Nusa Penida memiliki total panjang saluran sebesar 304,0735 km yang tersebar pada enam penyulang, yaitu Tanglad, Bunga Mekar, Ceningan, Karang Sari, Ped, dan Lembongan. Setiap penyulang memiliki karakteristik yang berbeda, baik dari segi panjang saluran maupun besarnya beban yang disuplai, sehingga menghasilkan nilai rugi-rugi daya aktif dan reaktif yang berbeda. Penyulang Bunga Mekar merupakan penyulang dengan panjang saluran terpanjang, sedangkan Penyulang Tanglad memiliki panjang saluran paling pendek. Di sisi lain, Penyulang Ped dan Lembongan melayani beban yang relatif lebih besar dibandingkan penyulang lainnya, sehingga berkontribusi terhadap meningkatnya rugi-rugi daya pada jaringan. Perbedaan karakteristik tersebut dipengaruhi oleh konfigurasi jaringan, distribusi beban, serta kondisi operasi masing-masing penyulang. Selain itu, sistem kelistrikan Nusa Penida yang beroperasi secara terisolasi menyebabkan penyaluran daya pada beberapa penyulang menempuh jarak yang cukup panjang, sehingga rugi-rugi daya pada jaringan distribusi menjadi lebih signifikan.



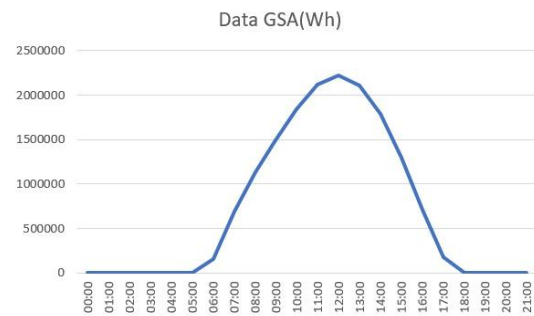
Gambar 3. Grafik Beban Harian 24 Jam pada Sistem Jaringan Nusa Penida

Pada Gambar 3. terlihat profil beban harian sistem kelistrikan Nusa Penida selama 24 jam yang menunjukkan fluktuasi kebutuhan daya listrik. Beban cenderung rendah pada dini hari, kemudian meningkat secara bertahap sejak pagi hingga mencapai puncaknya pada pukul 19.00 sebesar 15,54 MW, sebelum kembali menurun pada malam hari. Pola ini mengindikasikan bahwa konsumsi energi listrik tertinggi terjadi pada malam hari seiring meningkatnya aktivitas pelanggan.



Gambar 4. Profil Beban Harian Penyulang Lembongan

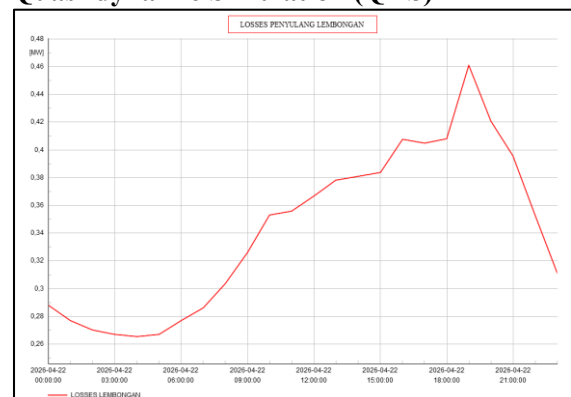
Berdasarkan Gambar 4, profil beban Penyulang Lembongan mengalami peningkatan secara bertahap dari pagi hingga mencapai beban puncak pada malam hari. Pola ini menunjukkan bahwa kebutuhan daya pelanggan paling tinggi terjadi pada malam hari dan menjadi dasar dalam analisis kondisi eksisting serta evaluasi pengaruh integrasi Distributed Generation (DG) dan Battery Energy Storage System (BESS) terhadap kinerja jaringan distribusi.



Gambar 5. Profil Beban PLTS

Berdasarkan Gambar 5, data radiasi matahari per jam digunakan untuk membentuk profil keluaran daya PLTS selama 24 jam. Profil tersebut diterapkan sebagai time characteristic pada model PLTS di DIgSILENT PowerFactory, sehingga keluaran daya pada simulasi mengikuti perubahan intensitas radiasi matahari dan mampu merepresentasikan kondisi pembangkitan yang lebih realistis.

4.2 Analisis Rugi Rugi Daya Menggunakan Quasi-dynamic Simulation (QDS)



Gambar 6. Grafik Losses Menggunakan QDS

Berdasarkan Gambar 6, nilai rugi-rugi daya aktif dan reaktif pada Penyulang Lembongan mengalami fluktuasi selama simulasi 24 jam mengikuti perubahan beban sistem. Hasil ini digunakan sebagai kondisi awal (*baseline*) untuk membandingkan pengaruh penerapan skenario integrasi PLTS dan BESS terhadap rugi-rugi daya menggunakan metode Quasi-Dynamic Simulation (QDS).

Ploss,i selama 24 jam dalam interval 1 jam kemudian jumlahkan :

$$\begin{aligned} P_{loss} = & 0,288013 + 0,277196 + 0,270435 + \\ & 0,267082 + 0,265443 + 0,267077 + \\ & 0,277193 + 0,286215 + 0,30385 + \\ & 0,325866 + 0,353207 + 0,355863 + \\ & 0,366687 + 0,377935 + 0,380788 + \\ & 0,383717 + 0,407715 + 0,404872 + \\ & 0,408036 + 0,460787 + 0,420912 + \\ & 0,395672 + 0,353207 + 0,310256 \end{aligned}$$

$$= 8,208024$$

Kemudian jumlahkan dengan N selama 24 jam:

$$= \frac{8,208024}{24} \\ = 0,342001 \text{ MW}$$

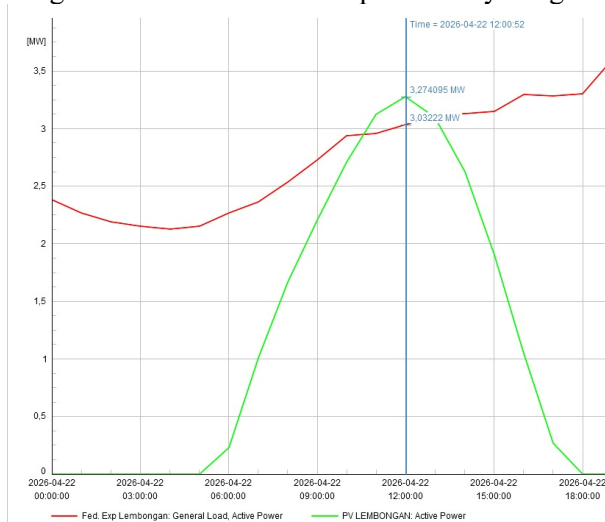
Kemudian jumlahkan dalam bentuk persentase sebagai berikut:

$$\text{Losses (\%)} = \frac{0,342001}{33,15} \times 100\% \\ = 1,032 \%$$

Berdasarkan hasil perhitungan, rata-rata rugi-rugi daya pada Penyulang Lembongan mencapai 0,342001 MW. Dengan total daya beban sebesar 4,095868 MW, persentase rugi-rugi daya yang dihasilkan adalah 1,032%.

4.3 Perhitungan Kapasitas PLTS

Perhitungan kapasitas PLTS dilakukan untuk menentukan daya terpasang yang sesuai dengan kebutuhan beban pada Penyulang



Gambar 7. Perhitungan Kelebihan daya PV

Berdasarkan hasil perhitungan Persamaan (2.7), nilai kelebihan daya PLTS dapat bernilai positif atau negatif. Nilai negatif menunjukkan daya PLTS belum mampu memenuhi kebutuhan beban, sedangkan nilai positif menandakan adanya surplus energi yang dapat disimpan pada Battery Energy Storage System (BESS) untuk digunakan kembali ketika produksi PLTS menurun.

4.4 Perhitungan Kapasitas BESS

Tabel 1. Kelebihan Daya PV untuk Discharge

Waktu	Kelebihan Daya (MW)
11:00	0,16759
12:00	0,245572

Dalam penelitian ini Battery Energy Storage System (BESS) dioperasikan dengan Depth of Discharge (DoD) sebesar 90% untuk menjaga

Lembongan. Besarnya kapasitas dihitung berdasarkan daya beban dan efisiensi sistem PLTS menggunakan Persamaan 2.6, kemudian hasilnya digunakan sebagai acuan dalam penyusunan skenario simulasi integrasi PLTS pada jaringan distribusi.

$$P_{PLTS} = \frac{\eta}{100\%} \times P_{beban}$$

Diketahui:

- $P_{beban} = 4,095868 \text{ MW}$
- $\eta = 80\%$

Perhitungan:

$$P_{PLTS} = \frac{80\%}{100\%} \times 4,095868 = 3,27669 \text{ MWp}$$

Sehingga, kapasitas PLTS yang digunakan pada simulasi adalah 3,27669 MWp.

umur pakai baterai dan mengurangi degradasi. Berdasarkan Persamaan (2.8) dengan rata-rata daya PLTS 0,965280583 MW, durasi operasi 5 jam, efisiensi baterai 95%, dan DoD 90%, diperoleh kapasitas BESS sebesar 5,645 MWh. Nilai tersebut selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam penentuan karakteristik operasi BESS pada skenario *load shifting*.

4.5 Penentuan Lokasi Integrasi PLTS & BESS

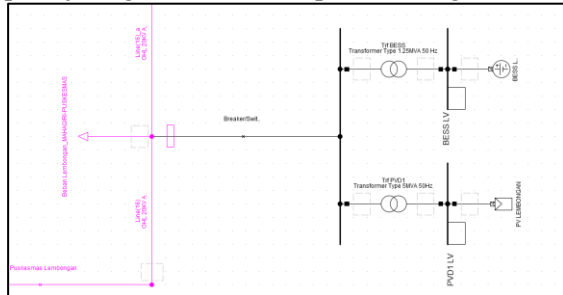
Tabel 2. Data Kelompok Beban Penyulang Lembongan

No.	Nama Beban	Daya Aktif (kW)
1.	Beban Lembongan_TLATAK-LBS TLATAK	585,124
2.	Beban Lembongan_SMP4-PUSKESMAS	1462,81
3.	Beban Lembongan_MAHAGIRI-PUSKESMAS	2047,934

Tabel 2 menyajikan kelompok beban pada Penyulang Lembongan yang digunakan sebagai objek penelitian. Ketiga beban tersebut menjadi dasar dalam menentukan lokasi penempatan Distributed Generation (DG) pada skenario simulasi.

Terdapat tiga kelompok beban pada Penyulang Lembongan dengan kebutuhan daya yang berbeda, yaitu TLATAK–LBS TLATAK sebesar 0,6 MW, SMP4–Puskesmas sebesar 1,5 MW, dan Mahagiri–Puskesmas sebesar 2,05 MW. Perbedaan kebutuhan daya tersebut

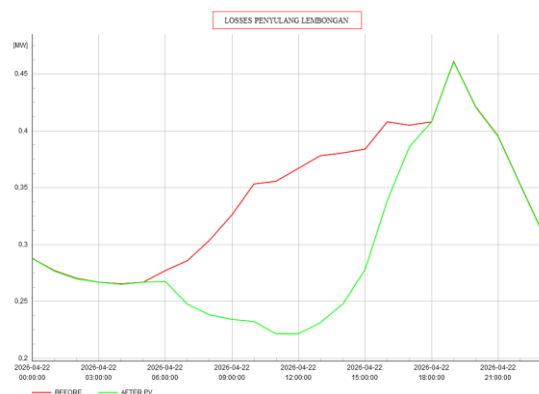
menjadi dasar dalam menentukan lokasi penempatan Distributed Generation (DG) agar suplai energi lebih optimal dan rugi-rugi daya pada jaringan distribusi dapat dikurangi.



Gambar 8. Penempatan *Distributed Generation (DG) dan Battery Energy Storage System (BESS)*

Pada Gambar 8 ditunjukkan bahwa lokasi Mahagiri-Puskesmas dipilih sebagai titik penempatan Distributed Generation (DG) karena memiliki kebutuhan daya terbesar (2.047,934 kW) dan berada dekat dengan kelompok beban lainnya. Kondisi ini memungkinkan energi PLTS dimanfaatkan secara lebih optimal oleh beberapa beban sekaligus sehingga meningkatkan efisiensi penyaluran dan mengurangi rugi-rugi daya. Pada penelitian ini, lokasi tersebut ditetapkan sebagai load center, sedangkan Battery Energy Storage System (BESS) ditempatkan berdekatan dengan PLTS agar energi surplus dapat langsung disimpan, meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan, dan mendukung penurunan rugi-rugi daya pada jaringan distribusi.

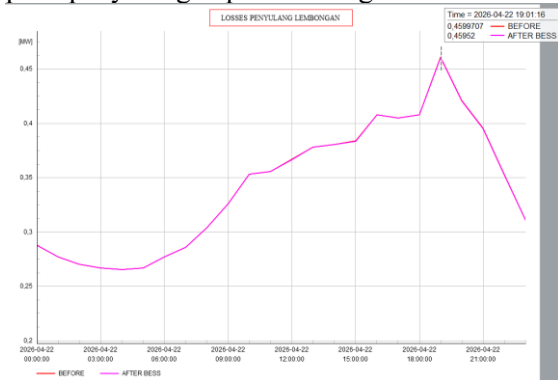
4.6 Analisis Pengaruh Integrasi DG dan BESS terhadap Rugi Rugi Daya



Gambar 9. Rugi Rugi Daya Setelah Integrasi PLTS

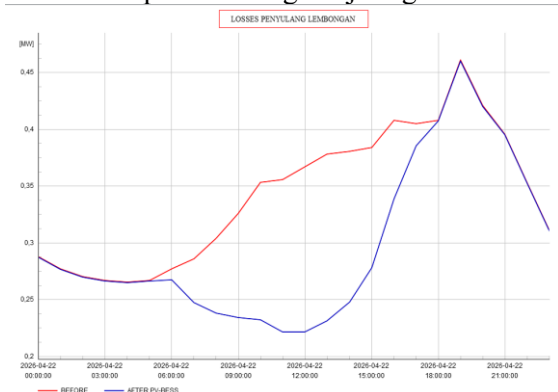
Berdasarkan Gambar 9, integrasi Distributed Generation (DG) berupa PLTS mampu

menurunkan rugi-rugi daya selama periode simulasi 24 jam. Penurunan mulai terlihat sejak PLTS beroperasi pada pukul 06.00, kemudian meningkat seiring bertambahnya daya keluaran PLTS dan mencapai kondisi optimum sekitar pukul 11.00–13.00. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar daya yang dihasilkan PLTS, semakin kecil pasokan daya dari gardu induk sehingga aliran arus dan rugi-rugi daya pada penyulang dapat dikurangi.



Gambar 10. Rugi Rugi Daya Setelah Integrasi BESS dengan Skenario Load Shifting

Berdasarkan Gambar 10, penurunan rugi-rugi daya akibat integrasi Battery Energy Storage System (BESS) hanya terjadi pada periode beban puncak, yaitu pukul 18.00–22.00, saat BESS melakukan proses *discharging*. Di luar periode tersebut, nilai rugi-rugi daya relatif tidak berubah karena BESS belum melepaskan energi ke jaringan.



Gambar 11. Rugi Rugi Daya Setelah Integrasi PLTS dan BESS

Berdasarkan Gambar 11, integrasi Distributed Generation (DG) dan Battery Energy Storage System (BESS) mampu menurunkan rugi-rugi daya pada dua periode operasi. Penurunan pertama terjadi pada pukul 06.00–17.00 saat PLTS menyuplai daya ke jaringan, sedangkan penurunan berikutnya berlangsung pada pukul 18.00–22.00 ketika

BESS mendukung pemenuhan beban puncak melalui strategi *load shifting*.

4.7 Analisis Efektivitas Integrasi *Distributed Generation* (DG) dan *Battery Energy Storage System* (BESS) dalam Menurunkan Rugi Rugi Daya

Tabel 3. Rugi Rugi Daya Setelah Integrasi PLTS

Skenario	Losses (%)	Persentase Penurunan Losses (%)	Keterangan
Sebelum Integrasi	1,032	-	Kondisi awal
After PLTS	0,895	13,28	Penurunan signifikan
After BESS	1,031	0,10	Penurunan relatif kecil
After PLTS & BESS	0,894	13,37	Penurunan terbesar

Berdasarkan Tabel 3, seluruh skenario integrasi menunjukkan penurunan rugi-rugi daya dibandingkan kondisi sebelum integrasi. Namun, tingkat efektivitasnya berbeda pada setiap skenario. Integrasi *Distributed Generation* (DG) berupa PLTS memberikan penurunan rugi-rugi daya yang paling besar karena mampu menyuplai sebagian kebutuhan beban secara langsung. Sementara itu, penerapan *Battery Energy Storage System* (BESS) dengan strategi *load shifting* hanya menghasilkan penurunan yang relatif kecil karena energi yang digunakan berasal dari surplus daya PLTS yang terbatas. Kombinasi DG dan BESS menghasilkan rugi-rugi daya paling rendah, meskipun peningkatannya dibandingkan penggunaan DG saja tidak terlalu signifikan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi DG dan BESS mampu meningkatkan efisiensi jaringan distribusi 20 kV Nusa Penida yang memiliki karakteristik sebagai sistem kelistrikan terisolasi dengan penyulang yang relatif panjang. Penempatan PLTS di dekat pusat beban dapat mengurangi pasokan daya dari sumber utama sehingga aliran arus pada jaringan menjadi lebih kecil dan rugi-rugi daya menurun. Selain itu, BESS berperan menjaga penurunan rugi-rugi daya pada periode beban puncak melalui strategi *load shifting* dengan memanfaatkan energi yang telah disimpan sebelumnya. Temuan ini sejalan dengan [11] yang menyatakan bahwa integrasi *Distributed*

Generation pada jaringan distribusi dapat mengurangi rugi-rugi daya melalui pengurangan aliran daya dari sumber utama dan meningkatkan efisiensi penyaluran energi.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, integrasi *Distributed Generation* (DG) berupa PLTS dan *Battery Energy Storage System* (BESS) terbukti mampu menurunkan rugi-rugi daya pada jaringan distribusi 20 kV Penyulang Lembongan berdasarkan analisis menggunakan metode *Quasi-Dynamic Simulation (QDS)*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rugi-rugi daya mengikuti perubahan profil beban harian dan mencapai nilai tertinggi pada periode beban puncak. Kondisi awal sistem memiliki rata-rata rugi-rugi daya sebesar 0,342001 MW atau 1,032%, yang kemudian digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi pengaruh setiap skenario integrasi.

Perbandingan seluruh skenario menunjukkan bahwa integrasi PLTS memberikan kontribusi terbesar dalam menurunkan rugi-rugi daya karena mampu menyuplai energi langsung ke pusat beban, sedangkan BESS dengan strategi *load shifting* berperan sebagai pendukung dengan memanfaatkan energi surplus PLTS pada periode beban puncak. Kombinasi PLTS dan BESS menghasilkan kinerja terbaik dengan rugi-rugi daya sebesar 0,894% atau mengalami penurunan sebesar 13,37% dibandingkan kondisi awal. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan melakukan optimasi lokasi dan kapasitas PLTS maupun BESS, mengembangkan strategi operasi BESS seperti *peak shaving* atau *Energy Management System (EMS)*, serta mengevaluasi parameter lain seperti profil tegangan, kualitas daya, keandalan sistem, dan aspek ekonomi agar manfaat integrasi energi terbarukan dapat dianalisis secara lebih menyeluruh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat, karunia, dan penyertaan-Nya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis juga menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada dosen pembimbing, dosen penguji, seluruh dosen dan staf Program Studi Teknik Elektro, pihak PLN UP3 Bali

beserta seluruh pihak yang telah memberikan data, informasi, dan dukungan selama proses penelitian, serta keluarga, sahabat, dan rekan-rekan yang senantiasa memberikan doa, motivasi, dan bantuan baik secara langsung maupun tidak langsung. Semoga segala kebaikan, dukungan, dan kontribusi yang telah diberikan memperoleh balasan yang berlimpah dari Tuhan Yang Maha Esa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Almohaimed en M. Abdel-Akher, "Power Quality Issues and Mitigation for Electric Grids with Wind Power Penetration", *Appl. Sci.*, vol 10, Des 2020, doi: 10.3390/app10248852.
- [2] I. Kartika, "Analisa Rugi-Rugi Daya Diakibatkan Arus Kapasitif", *J. Surya Energy*, vol 1, no 2, bl 100, 2017, doi: 10.32502/jse.v1i2.600.
- [3] A. Asran, M. Jannah, en A. Setiawan, "Simulasi dan Analisa Pemasangan Distributed Generation (DG) Fuel Cell dan Pengaruhnya Terhadap Interkoneksi Sistem Distribusi", *J. Energi Elektr.*, vol 9, no 2, bl 24, 2020, doi: 10.29103/jee.v9i2.3275.
- [4] L. Gaitan, J. Gomez Ariza, en E. Rivas, "Simulation of a 14 Node IEEE System with Distributed Generation Using Quasi-dynamic Analysis", 2018, bll 497–508. doi: 10.1007/978-3-030-00350-0_41.
- [5] N. Indriani en I. Garniwa, "Optimasi Battery Energy Storage System Dalam Mengatasi Renewable Energy Intermittency dan Load Leveling", *J. Tek. Elektro dan Komputasi*, vol 4, no 1, bll 11–20, 2022, [Online]. Available at: <http://jurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/ELKOM/article/view/7216>
- [6] I. Irfanto en B. Sudiarto, "Studi Pengaruh Implementasi PLTS dan BESS terhadap Kestabilan Sistem Jaringan Terisolasi di Indonesia", *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol 9, bl 84, Jun 2023, doi: 10.24036/jtev.v9i1.122721.
- [7] H. Januar, "Optimasi Kapasitas BESS untuk Kawasan Hunian Residensial", 2007.
- [8] X. Li, R. Ma, W. Gan, en S. Yan, "Optimal Dispatch for Battery Energy Storage Station in Distribution Network Considering Voltage Distribution Improvement and Peak Load Shifting", *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol 10, bll 131–139, Jan 2022, doi: 10.35833/MPCE.2020.000183.
- [9] Manalu, "Analisis Rugi Rugi Daya pada Saluran Distribusi Tegangan Menengah 20 KV di PT.PLN (Persero) UP3 Sibolga", *J. Teknol. Udar.*, vol 2, no 1, bll 306–312, 2024.
- [10] K. G. Manopo, H. Tumaliang, en S. Silimang, "Analisis Indeks Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik Berdasarkan SAIFI dan SAIDI Pada PT. PLN (Persero) Area Minahasa Utara", *J. Tek. Elektro*, vol 1, no 1, bll 1–12, 2020.
- [11] R. F. Margeritha, R. Hartati, en N. Utama, "Analisis Penyambungan Distributed Generation Guna Meminimalkan Rugi-Rugi Daya Menggunakan Metode Particle Swarm Optimization (PSO)", *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol 16, bl 122, Des 2017, doi: 10.24843/MITE.2017.v16i03p19.
- [12] N. O. K. Y. Suya, "Analisis Profil Tegangan pada Rancang Bangunan PLTS Mandiri 100 Wp", 2021.
- [13] M. Muhajir, Suriadi, "Optimasi Penempatan Distributed generation dan Kapasitor", *J. AL-AZHAR Indones. SERI SAINS DAN Teknol.*, vol 11, no January, 2026.
- [14] Pinkey, M. Kumari, S. Singh, en A. Ali, "Planning of Radial Distribution System with Distributed Generation-A Review", *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol 17, no 4, bll 145–163, 2024, doi: 10.25103/jestr.174.17.
- [15] L. Pradigta, S. Raharja, R. P. Eviningsih, I. Ferdiansyah, en D. S. Yanaratri, "Received : Agustus 2019 Perancangan Dan Implementasi DC-DC Bidirectional Converter Dengan Sumber Energi Listrik Dari Panel Surya Dan Baterai Untuk Pemenuhan Kebutuhan Daya Listrik Beban Di kawasan Indonesia sangat tepat untuk menerapkan Renewable Energy", *J. Teknol. Terpadu*, vol 7, no 2, 2019.
- [16] S. Pramudita, "Penempatan Dan Ukuran Battery Energy Storage System (Bess) Pada Sistem Sulbagsel", 2024.
- [17] Siregar, "Analisa Rugi Rugi Daya pada Saluran Transmisi Tegangan 150 KV di PT.PLN (Persero) Sistem Khatulistiwa", *J. Teknol. Terpadu*, vol 2, no 2, 2017.