

ANALISIS PENGARUH PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA TERHADAP KESTABILAN SISTEM KELISTRIKAN KEPULAUAN SANGIHE

Muhammad Syarwan Ariwibowo¹, Usman², Musfirah Putri L³,

^{1,2,3}Politeknik Negeri Ujung Pandang, Jl. Perintis Kemerdekaan KM 10., Kec. Tamalanrea, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90245, Indonesia; Telp/Fax : +62 (411) 585365

Keywords:

Pembangkit Listrik Tenaga Surya;
Battery Energy Storage System;
Pembangkit Listrik Tenaga Diesel;
Transient Stability.

Correspondent Email:

syarwanari@gmail.com

Abstrak. PT PLN (Persero) merencanakan penambahan pembangkit EBT sebesar 40,6 GW hingga tahun 2030, rencana tersebut tersebar ke seluruh pelosok Indonesia termasuk sistem isolated 20 kV salah satunya yaitu pembangunan PLTS Sangihe 1,3 MWp yang berlokasi di Kabupaten Kepulauan Sangihe. Karena sifat surya yang intermiten berpotensi memicu deviasi frekuensi dan penurunan tegangan, penelitian ini mengevaluasi dampak integrasi PLTS terhadap kinerja dinamik sistem dengan acuan standard Grid Code 2020 dengan batas nilai frekuensi operasi sebesar 50,00 Hz $\pm$ 0,20 serta tegangan nominal +5% dan -10%. Pemodelan dilakukan pada ETAP 21.0.1 untuk subsistem PLTD Tahuna dan PLTS Sangihe yang terhubung melalui feeder express sekitar 4,4 km dan didukung *Battery Energy Storage System* (BESS). Hasil penelitian simulasi aliran daya menunjukkan bahwa, nilai profil tegangan di ujung penyulang meningkat rata rata 0,368% kV dengan tegangan paling besar 19,55kV dan tetap dalam standard yang ditentukan. Pada percobaan stabilitas peralihan saat penurunan daya keluaran PLTS sebesar 20%, 50%, 70%, dan 100% pada beban puncak siang, ayunan frekuensi selalu berada dalam batas yang diizinkan dan pulih menuju keadaan tunak dalam kisaran 7 sampai 13 detik, sedangkan tegangan rata rata lima busbar kembali sekitar 19,4 kV dalam 7 sampai 10 detik.



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstract. PT PLN (Persero) plans to add 40.6 GW of renewable power plants by 2030, with projects distributed across Indonesia, including isolated 20 kV systems—one of which is the 1.3 MWp Sangihe PV plant located in the Sangihe Islands Regency. Because solar's intermittent nature can trigger frequency deviations and voltage drops, this study evaluates the impact of PV integration on system dynamic performance with reference to the 2020 Grid Code standard, which specifies a normal operating frequency of 50.00 Hz $\pm$ 0.20 and a nominal voltage band of +5% and -10%. Modeling was carried out in ETAP 21.0.1 for the PLTD Tahuna–PLTS Sangihe subsystem connected via an approximately 4.4 km express feeder and supported by a *Battery Energy Storage System* (BESS). Load-flow simulation results show that the end-of-feeder voltage profile increases by an average of 0.368%, with a maximum voltage of 19.55 kV, and remains within the prescribed standard. In transient stability tests under PV output reductions of 20%, 50%, 70%, and 100% during daytime peak load, frequency oscillations always stay within allowable limits and recover to steady state within about 7–13 seconds, while the average voltage at five observed busbars returns to around 19.4 kV within about 7–10 seconds.

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi EBT (Energi Baru Terbarukan) yang sangat besar, diperkirakan mencapai 3.686 GW (Giga Watt) dari berbagai lintas sumber daya alam meliputi energi surya, bayu, hidro, bioenergi, panas bumi, dan laut. Dari total tersebut, energi surya menyumbang porsi terbesar sekitar 3.200 GW. Namun pada kenyataannya, realisasi pemanfaatan EBT masih jauh tertinggal dibanding potensinya, dengan pemanfaatan hanya sekitar 200 MW (Mega Watt) pada tahun 2023. Kondisi ini menegaskan adanya peluang yang besar untuk mengembangkan potensi energi surya lebih lanjut di Indonesia dengan cara, percepatan kebijakan, pembiayaan, dan kesiapan jaringan [1].

Sebagai penyelenggara ketenagalistrikan nasional, PT PLN (Persero) berkomitmen menjalankan usaha yang berwawasan lingkungan, yang dioperasionisasikan melalui RUPTL 2025–2034. Dokumen ini menargetkan penambahan kapasitas baru sebesar $\pm 40,6$ GW, dengan porsi EBT yang meningkat signifikan, mengarahkan sistem menuju bauran yang lebih hijau dan membuka ruang pengimplementasian pada jaringan listrik sistem *isolated* 20 kV [2].

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi, pertumbuhan populasi dan industri di Indonesia, pemanfaatan energi surya yang efisien dan efektif menjadi sangat penting. Upaya untuk meningkatkan penerapan energi surya akan membawa sektor energi menuju keberlanjutan dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Hal ini dilakukan melalui integrasi teknologinya dalam berbagai bentuk, termasuk sistem off-grid yang cocok untuk daerah terpencil dan hibrida yang melibatkan energi terbarukan lainnya [3].

Rencana ini mencakup pengembangan sistem pembangkit listrik tenaga surya, seperti PLTS Sangihe dengan kapasitas 1,3 MWp, guna meningkatkan kapasitas pembangkit yang berkelanjutan. Pada sistem Kepulauan Sangihe, pemanfaatan energi surya diharapkan mengurangi ketergantungan pada pembangkit fosil dan memperbaiki keandalan pasokan, sejalan dengan agenda transisi energi nasional [4]. Meskipun memberikan potensi yang signifikan, penggunaan energi surya juga dihadapkan pada tantangan, terutama terkait dengan karakteristik intermittency-nya. Energi yang dihasilkan oleh panel surya sangat

tergantung pada kondisi cuaca, yang dapat menyebabkan fluktuasi dalam pasokan listrik [5]. Variabilitas ini dapat mengarah pada masalah seperti deviasi frekuensi, penurunan tegangan, dan permasalahan kualitas daya terutama pada sistem kecil/terisolasi—sehingga memerlukan strategi kendali dan penyangga energi misalnya BESS [6][7]. Integrasi PLTS perlu memenuhi ketentuan Grid Code Indonesia dalam Permen ESDM No. 20/2020 yaitu menetapkan nilai frekuensi operasi normal 50,00 Hz $\pm 0,20$ Hz dan batas tegangan yaitu tegangan nominal +5% dan -10% [8]. Oleh karena itu, penting untuk melakukan analisa dan pengembangan sistem yang dapat menghadapi tantangan ini, seperti sistem penyimpanan energi atau jaringan cerdas yang lebih adaptif.

Berangkat dari kesenjangan antara potensi dan realisasi pemanfaatan energi surya serta implementasinya pada sistem berkapasitas kecil/terisolasi. Penelitian ini membahas tentang analisis pada sistem kelistrikan Kepulauan Sangihe dengan integrasi PLTS 1,3 MWp dan Battery Energy Storage System (BESS). Fokus utamanya adalah menilai dampak integrasi terhadap kestabilan frekuensi dan profil tegangan. Temuan yang dihasilkan diharapkan menjadi landasan teknis bagi strategi operasi dan perluasan EBT pada sistem kepulauan sejenis di Indonesia.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembangkit Tenaga Listrik

Pembangkit listrik secara umum adalah sekumpulan peralatan dan mesin yang mengubah energi primer menjadi energi listrik melalui proses konversi energi yang terukur dan terkendali. Energi primer dapat berasal dari sumber fosil, air, angin, panas bumi, biomassa, nuklir, maupun radiasi matahari. Prosesnya biasanya dimulai dari pembangkitan energi mekanik atau termal lalu diubah menjadi energi listrik oleh generator, dengan mutu tegangan, frekuensi, dan faktor daya dijaga agar sesuai standar sistem tenaga [9].

Klasifikasi pembangkit didasarkan pada sumber energinya. PLTD (Pembangkit Tenaga Listrik Diesel) menggunakan mesin diesel berbahan bakar solar, efisiensinya umumnya di bawah 50% dan struktur biayanya berat pada konsumsi bahan bakar sekitar $\pm 70\%$. PLTA (Pembangkit Tenaga Listrik Air) memanen

energi potensial dan kinetik air sehingga ongkos operasi dan emisinya rendah. PLTU (Pembangkit Tenaga Listrik Uap) membangkitkan listrik dari uap panas berbahan bakar batubara atau minyak dan menjadi penopang utama bauran energi nasional karena biaya pokok produksi yang kompetitif serta pasokan batubara yang berlimpah. PLTG (Pembangkit Tenaga Listrik Gas) mengandalkan turbin gas berbahan bakar gas alam atau minyak, memberikan efisiensi tinggi dan respons cepat sehingga ideal sebagai unit beban puncak. PLTP (Pembangkit Tenaga Listrik Panas Bumi) memanfaatkan panas bumi dengan jejak emisi CO₂ kira-kira seperdelapan dari PLTU batubara. PLTS (Pembangkit Tenaga Listrik Surya) mengubah radiasi matahari melalui modul fotovoltaik menjadi listrik arus searah yang kemudian diubah menjadi arus bolak-balik untuk disalurkan [9].



Gambar 1. PLTS Sangihe

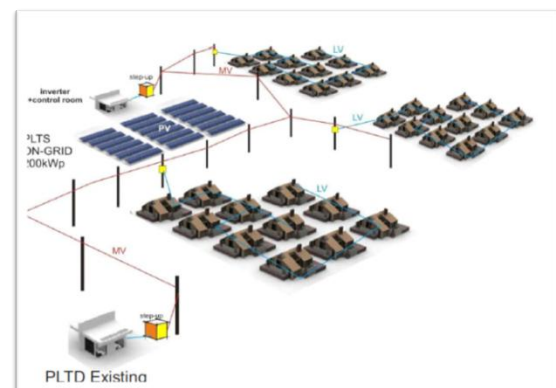
2.2. PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya)

PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) adalah teknologi yang mengubah energi foton matahari menjadi listrik arus searah melalui sel fotovoltaik berbahan semikonduktor seperti silikon. Ketika foton diserap, pasangan muatan terbentuk dan menimbulkan beda potensial sehingga muncul tegangan dan arus pada rangkaian luar. Prinsip kerja ini dikenal sebagai efek fotovoltaik dan merupakan dasar dari operasi sel serta modul surya modern [10].

Berdasarkan cara penerapannya, PLTS dapat dipasang secara tersebar pada banyak titik atau terpusat pada satu lokasi. Berdasarkan keterhubungan, sistem dibedakan menjadi off grid yang berdiri sendiri dengan dukungan baterai untuk menjamin pasokan saat cuaca mendung dan malam hari, serta on grid yang terhubung jaringan sehingga energi dapat

langsung disalurkan ke sistem kelistrikan. Untuk elektrifikasi pedesaan dan wilayah terpencil dengan sumber cahaya melimpah, PLTS banyak direkomendasikan karena andal dan hemat biaya operasi, sedangkan pada perbandingan biaya sistem, studi menunjukkan on grid umumnya lebih murah daripada off grid ketika jaringan tersedia [11].

Sistem off grid umumnya memakai penyimpanan baterai agar pasokan tetap tersedia saat cuaca mendung dan malam hari, dan sering digunakan untuk beban rumah tangga serta layanan seperti telekomunikasi dan pompa air [12]. Sistem on grid dapat beroperasi tanpa baterai sehingga energi langsung masuk ke jaringan, atau menggunakan baterai sebagai cadangan dan untuk mengelola kelebihan daya [13]. Adapun PLTS hybrid dapat dikombinasikan dengan pembangkit lain seperti diesel, mikrohidro, atau angin ditujukan untuk meningkatkan keandalan dan menurunkan biaya energi pada sistem kecil atau terisolasi. Bukti empiris menunjukkan konfigurasi hybrid PLTS diesel baterai sering memberikan kinerja biaya dan keandalan yang baik untuk komunitas terpencil [14].



Gambar 2. Konfigurasi PLTS Hybris (PLTS-PLTD)

2.3. BESS (Battery Energy Storage System)

Battery Energy Storage System atau BESS adalah teknologi penyimpanan energi yang merespons dengan cepat untuk memasok listrik ketika dibutuhkan. Perangkat ini membantu menjaga keandalan sistem dan menstabilkan pemanfaatan energi terbarukan seperti surya dan angin. Dalam peran jangka pendek, BESS menambah suplai saat beban puncak dan

mengurangi curtailment pada sistem PV. Dalam peran jangka panjang, BESS berfungsi sebagai fasilitas penyimpanan energi pada sistem kelistrikan agar pasokan lebih stabil dari waktu ke waktu [15].

BESS umumnya tersusun atas dua komponen utama, yaitu baterai dan inverter dua arah. Baterai dapat diisi dan dikosongkan dengan cepat sehingga mampu mengimbangi sifat intermiten PLTS. Dengan demikian, BESS dapat menyuplai energi saat terjadi shading pada modul surya tanpa mengganggu pembangkit lain. Paket baterai biasanya ditata pada rak dan dipantau oleh Battery Management System agar operasi aman dan efisien, sementara inverter dua arah mengatur aliran daya saat pengisian maupun pelepasan energi ke jaringan [16].

2.4. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Keseimbangan antara daya beban dan daya pembangkit adalah indikator penting dalam kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Beban selalu berubah besarnya sehingga pembangkit harus menyesuaikan keluaran melalui kendali governor untuk daya mekanik dan pengaturan eksitasi untuk tegangan. Oleh karena itu kestabilan mesin pembangkit sangat ditentukan oleh mutu sistem kendalinya. Sistem kendali yang andal mampu mengikuti perubahan kondisi dan menjaga operasi tetap normal meski terjadi gangguan ringan [17].

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan kemampuan sistem atau komponennya untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan. Batas stabilitas dapat dipahami sebagai besarnya daya maksimum yang masih dapat mengalir melalui suatu titik tanpa membuat sistem lepas sinkron. Secara umum masalah stabilitas dibagi menjadi tiga kelompok yaitu stabilitas tetap atau steady state, stabilitas peralihan atau transient, dan stabilitas sub peralihan atau dinamis [18].

Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral tentang aturan jaringan sistem tenaga listrik (Grid Code) adalah serangkaian aturan, persyaratan dan standar yang bersifat dinamis dan adaptif untuk memastikan jaringan sistem tenaga listrik yang aman, andal dan efisien dalam memenuhi kebutuhan penyedia tenaga listrik. Cakupan pengaturannya mencakup sistem Jawa Madura Bali, Sumatera, Sulawesi, Kalimantan, serta Nusa Tenggara Maluku dan

Papua. Dalam penelitian ini fokus pengujian berada pada sistem tegangan menengah 20 kV di Sulawesi, sementara parameter pemenuhan fungsi sesuai Grid Code 2020 diringkas pada tabel 1 [8].

Tabel 1. Batas Rentang Variasi Tegangan dan Frekuensi Sistem Sulawesi

BATAS RENTANG VARIASI TEGANGAN		
Tegangan Nominal	Rentang	Deskripsi
20 kV	+5% dan -10%	Kondisi Normal
BATAS RENTANG VARIASI FREKUENSI		
Frekuensi Nominal	Rentang	Deskripsi
50 Hz	49,5 Hz - 50,5 Hz	Kondisi Normal
BATAS RENTANG FREKUENSI OPERASI		
Rentang Frekuensi	Rentang Waktu Operasi	
$51,50 \text{ Hz} < f \leq 52,00 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 15 menit	
$51,00 \text{ Hz} < f \leq 51,50 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 90 menit	
BATAS RENTANG FREKUENSI OPERASI		
Rentang Frekuensi	Rentang Waktu Operasi	
$49,00 \text{ Hz} < f \leq 51,00 \text{ Hz}$	Beroperasi secara terus menerus	
$47,50 \text{ Hz} < f \leq 49,00 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 90 menit	
$47,00 \text{ Hz} < f \leq 47,50 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 6 menit	

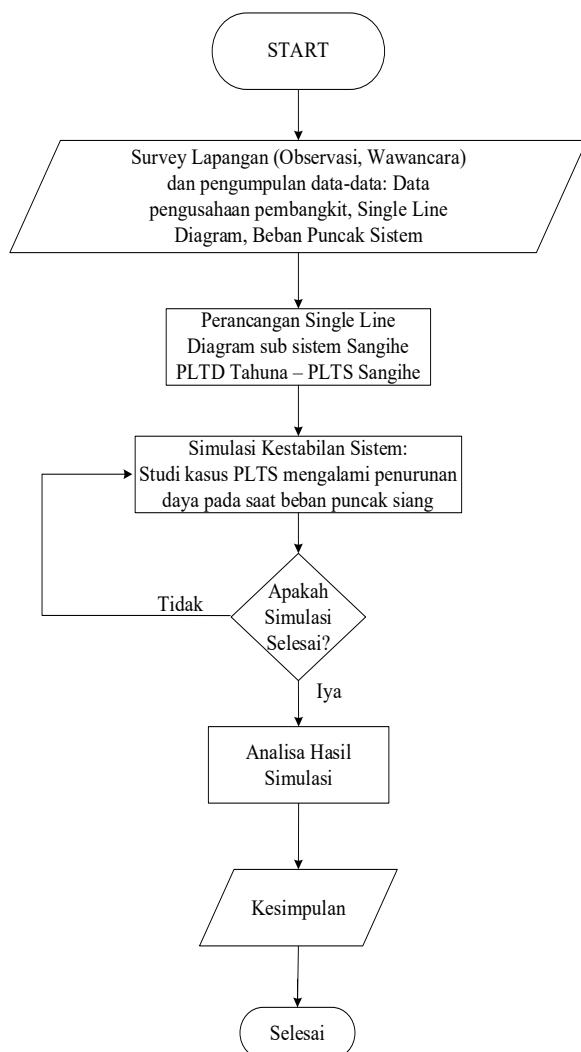
3. METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian secara umum dilakukan di PT. PLN (Persero) UP3 Tahuna, Jl. Baru Tona No.28, Tona 2, Tahuna Timur, Kabupaten Kepulauan Sangihe. Pada bulan Januari 2024 sampai dengan bulan September 2024. Dalam penelitian ini terdapat beberapa tahapan yang dilakukan, yaitu:

- 1) Pengambilan/pengumpulan data sub sistem Sangihe (PLTD Tahuna – PLTS Sangihe) berupa Single Line Diagram, penyulang, panjang saluran, data perusahaan pembangkit PLTD Tahuna dan beban.
- 2) Perancangan sistem isolated PLTD Tahuna – PLTS Sangihe pasca pengoperasian PLTS Sangihe

- 3) Simulasi kestabilan transient studi kasus PLTS mengalami penurunan daya keluaran pada saat beban puncak siang menggunakan ETAP dengan fitur simulasi transient stability
- 4) Analisa hasil simulasi transient stability dengan berpatokan pada ayunan frekuensi dan tegangan pada lima busbar (Busbar PLTD Tahuna, Busbar ujung penyulang Kendahe, Busbar Ujung penyulang Kota, Busbar ujung penyulang Tona, Busbar ujung penyulang Tamako dan busbar GH Miulu).

Alur penelitian ini dapat digambarkan dalam bentuk *flowchart* seperti pada gambar 2.



Gambar 2. Alur Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Kondisi Sistem Kelistrikan Pulau Sangihe

Sistem kelistrikan Kepulauan Sangihe saat ini disuplai oleh enam pembangkit, yaitu PLTD Tahuna, PLTS Sangihe, PLTD Petta, PLTD Lesabe, PLTD Tamako, dan PLTMH Upel. Pada operasi normal, jaringan terbagi menjadi tiga subsistem: PLTD Tahuna dan PLTS Sangihe melayani Tahuna dan sekitarnya, PLTD Petta dan PLTD Lesabe melayani sisi utara dan timur, sedangkan PLTD Tamako dan PLTMH Upel melayani sisi selatan.

PLTS Sangihe berkapasitas 1,3 MWp terhubung dengan PLTD Tahuna dengan kapasitas terpasang 13,78 MW dengan daya mampu 9,675 MW yang melalui feeder express sepanjang 4,4 KMS yang selanjutnya menyuplai ke 5 feeder yaitu feeder Kolongan, feeder Kota Tahuna, feeder Kolongan. Total beban puncak dari ke empat feeder tersebut adalah 4,7 MW pada beban puncak siang dan 5,39 MW pada beban puncak malam.

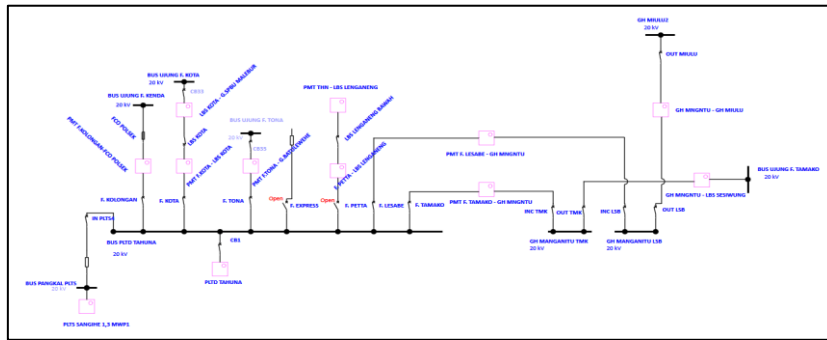
PLTS Sangihe berkapasitas 1,3 MWp diintegrasikan dengan 15 unit pembangkit listrik tenaga diesel yang ada di ULPLTD Tahuna untuk mengurangi konsumsi bahan bakar di pulau Sangihe. Tabel 2 merupakan rincian mengenai PLTS Sangihe.

Tabel 2. Data Peralatan PLTS Sangihe

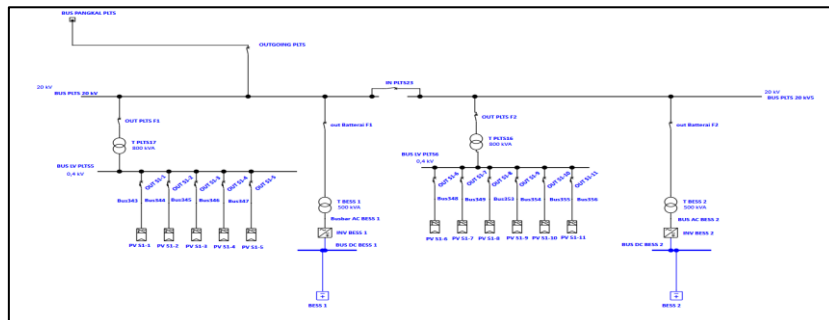
Peralatan	DATA PLTS SANGIHE			
	Komponen	Jumlah	Kapasitas	Total
PLTS	PV Module ICA370	3520	370 Wp	1302 kWp
	PV Inverter SUN2000-100KTL	11	100 kW	1100 kW
BESS	BSS Battery Storage	176	5,120 kWh	901,12 kWh
	PCS Battery Inverter	2	500 kW	1000 kW

4.2. Simulasi Aliran Daya Sistem PLTS Sangihe – PLTD Tahuna

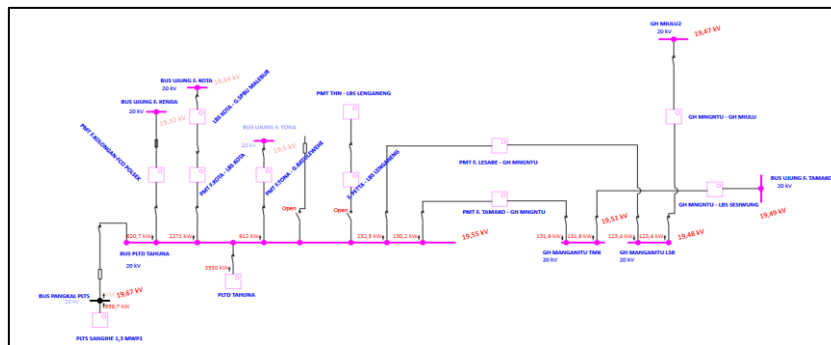
Pemodelan difokuskan pada subsistem PLTD Tahuna dan PLTS Sangihe. Penyusunan model dilakukan dengan perangkat lunak ETAP dan ditunjukkan pada gambar 3 dan 4 yang memuat tampilan subsistem serta single line diagram masing masing pembangkit. Simulasi dilakukan pada beban puncak siang agar terlihat



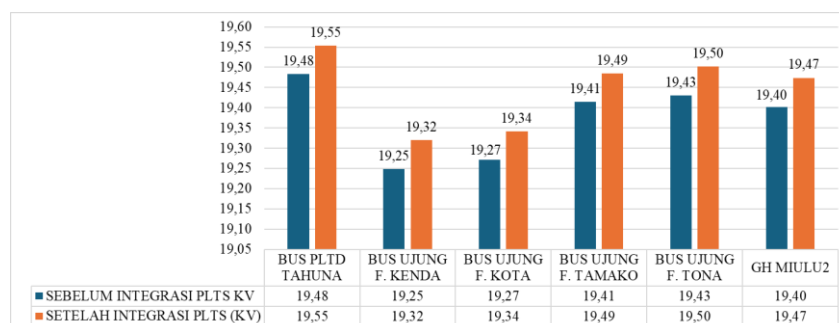
Gambar 3. Single Line Diagram Sistem PLTD Tahuna – PLTS Sangihe



Gambar 4. Single Line Diagram Sistem PLTS Sangihe



Gambar 5. Hasil Simulasi Aliran Daya Sistem PLTD Tahuna – PLTS Sangihe



Gambar 6. Hasil Data Simulasi Profil Tegangan

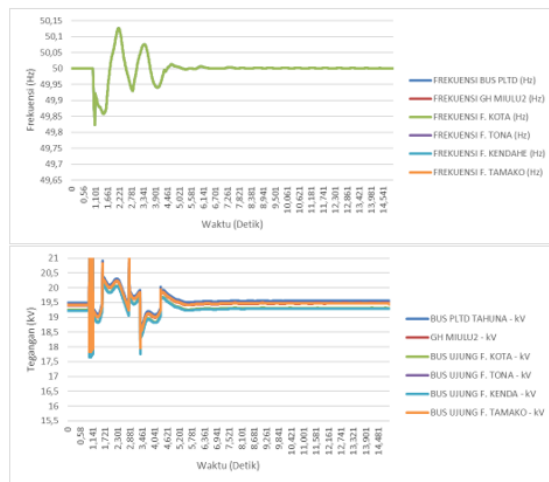
pengaruh injeksi daya surya terhadap profil operasi. Hasil perhitungan ini mewakili kondisi kestabilan tetap atau steady state dan ditampilkan pada gambar 5, sedangkan perbandingan tegangan sebelum dan sesudah

integrasi ditunjukkan pada gambar 6. Hasil simulasi load flow sebelum dan sesudah integrasi PLTS tersebut dapat dilihat pada profil tegangan pada busbar-busbar ujung penyulang terdapat kenaikan atau perbaikan tegangan

karena adanya integrasi PLTS Sangihe. Profil tegangan setelah dilakukan integrasi PLTS Sangihe terjadi kenaikan rata-rata sebesar 0,368%, seperti terlihat pada profil tegangan ujung feeder kendahe yang awalnya 19,25 kV naik menjadi 19,32 kV setelah dilakukan integrasi PLTS Sangihe.

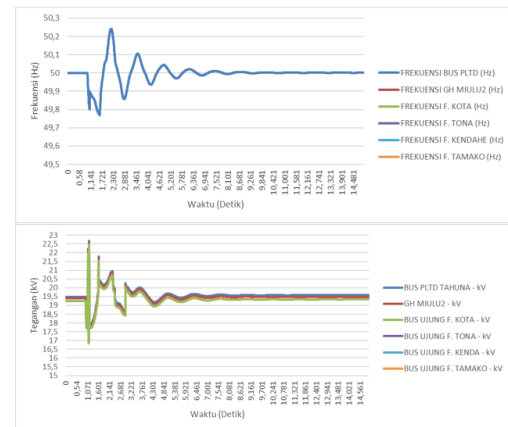
4.2. Simulasi Stabilitas Peralihan (*Transient Stabltiy*) Penurunan Daya PLTS

Simulasi *transient stability* dilakukan untuk melakukan pendekatan terkait penurunan *irradiance* secara tiba-tiba, sehingga mempengaruhi daya keluaran PLTS Sangihe. Penurunan daya keluaran yang dimaksud adalah penurunan daya pada saat beban puncak siang sebesar 659,7 kW. Pengujian dilakukan pada empat skenario penurunan daya sebesar 20%, 50%, 70%, dan 10%. Indikator yang diamati meliputi frekuensi sistem, waktu *steady state*, serta perubahan profil tegangan pada beberapa busbar utama.



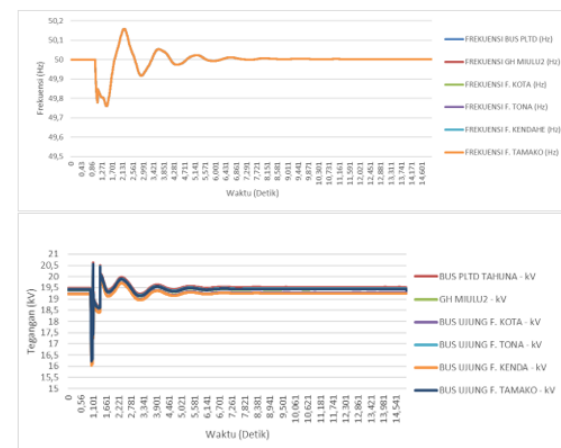
Gambar 7. Efek Daya Keluaran PLTS Drop 20%

Pada skenario penurunan daya keluaran sebesar 20% yang ditunjukkan pada gambar 7, frekuensi sistem berayun selama 5 detik lalu berangsur pulih mencapai *steady state* pada detik ke 7 dengan rentang 50,12 Hz sampai 49,82 Hz sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 15. Sementara pada sisi tegangan, nilai rata rata tegangan di lima busbar kembali normal pada detik ke 7 dengan nilai sekitar 19,43 kV.



Gambar 8. Efek Daya Keluaran PLTS Drop 20%

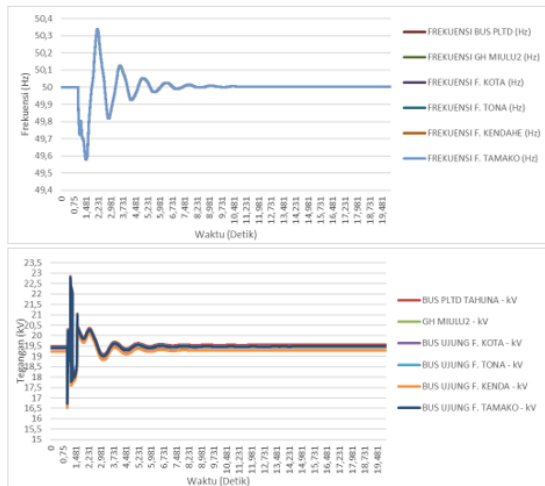
Pada skenario penurunan daya keluaran sebesar 50% yang ditunjukkan pada gambar 8, frekuensi sistem berayun selama 11 detik lalu berangsur pulih mencapai *steady state* pada detik ke 12 dengan rentang 50,24 Hz sampai 49,76 Hz sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 15. Sementara pada sisi tegangan, nilai rata rata tegangan di lima busbar kembali normal pada detik ke 9 dengan nilai sekitar 19,45 kV.



Gambar 9. Efek Daya Keluaran PLTS Drop 20%

Pada skenario penurunan daya keluaran sebesar 70% yang ditunjukkan pada gambar 9, frekuensi sistem berayun selama 12 detik lalu berangsur pulih mencapai *steady state* pada detik ke 13 dengan rentang 50,15 Hz sampai 49,75 Hz sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 15. Sementara pada sisi tegangan, nilai rata rata tegangan di lima busbar kembali

normal pada detik ke 10 dengan nilai sekitar 19,399 kV.



Gambar 10. Efek Daya Keluaran PLTS Drop 100%

Pada skenario penurunan daya keluaran sebesar 100% yang ditunjukkan pada gambar 10, frekuensi sistem berayun selama 12 detik lalu berangsur pulih mencapai *steady state* pada detik ke 13 dengan rentang 50,335 Hz sampai 49,57 Hz sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 15. Sementara pada sisi tegangan, nilai rata rata tegangan di lima busbar kembali normal pada detik ke 7 dengan nilai sekitar 19,426 kV.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa simulasi aliran daya pada sistem PLTD Tahuna–PLTS Sangihe dengan pemodelan ETAP dapat membantu kualitas tegangan, terbukti profil tegangan ujung penyulang naik rata rata 0,368 persen untuk sistem 20 kV dengan tegangan paling besar 19,55kV. Pada uji transien saat penurunan daya keluaran PLTS di beban puncak siang, sistem selalu kembali stabil dengan bantuan BESS dimana skenario 20% memberi ayunan frekuensi 50,12 hingga 49,82 Hz yang pulih sekitar 7 detik dan tegangan rata rata lima busbar kembali sekitar 19,43 kV dalam 7 detik, skenario 50% memberi 50,24 hingga 49,76 Hz pulih 12 detik dan tegangan sekitar 19,45 kV pulih 9 detik, skenario 70 % memberi 50,15 hingga 49,75 Hz pulih 13 detik dan tegangan sekitar 19,399 kV pulih 10 detik, serta skenario 100% memberi 50,335 hingga 49,57 Hz pulih

13 detik dan tegangan sekitar 19,426 kV pulih 7 detik, seluruhnya berada dalam standard Grid Code 2020 yaitu dengan rentang frekuensi pada saat operasi normal pada kisaran 50,00 Hz $\pm$ 0,20 dan batas tegangan yaitu tegangan nominal +5% dan -10%. Konfigurasi penerapan integrasi PLTS-PLTD pada sistem kelistrikan Kepulauan Sangihe, secara tidak langsung dapat mengurangi konsumsi BBM PLTD tanpa menurunkan keandalan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. A. Pambudi *et al.*, “Renewable energy in Indonesia: current status, potential, and future development,” *Sustainability*, vol. 15, no. 3, p. 2342, 2023.
- [2] PT PLN (Persero), *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2025-2034*. Jakarta: PT PLN (Persero), 2025. [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2025/06/b967d-ruptl-pln-2025-2034-pub-.pdf>
- [3] R. Syahputra and I. Soesanti, “Planning of Hybrid Micro-Hydro and Solar Photovoltaic Systems for Rural Areas of Central Java, Indonesia,” *J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 2020, no. 1, p. 5972342, 2020.
- [4] D. Gatot, R. Tarore, and A. Sembel, “Analisis Kebutuhan Infrastruktur Di Perbatasan Pulau Marore, Kabupaten Kepulauan Sangihe,” *Sabua J. Lingkungan. Binaan dan Arsit.*, vol. 10, no. 1, pp. 33–44, 2021.
- [5] A. Makkulau, S. Samsurizal, and S. Kevin, “Karakteristik temperatur pada permukaan sel surya polycrystalline terhadap efektifitas daya keluaran pembangkit listrik tenaga surya,” *Sutet*, vol. 10, no. 2, pp. 69–78, 2020.
- [6] M. Z. Farahmand, M. E. Nazari, S. Shamlou, and M. Shafie-khah, “The simultaneous impacts of seasonal weather and solar conditions on PV panels electrical characteristics,” *Energies*, vol. 14, no. 4, p. 845, 2021.
- [7] S. Hermawan and L. Nurpulaela, “Penilaian Produktivitas Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terhadap Variabilitas Cuaca: Simulasi PVsyst,” *J. Mekanova Mek. Inov. dan Teknol.*, vol. 10, no. 1, pp. 61–74, 2024.
- [8] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, *Peraturan Menteri ESDM Nomor 20 Tahun 2020: Aturan Jaringan*

- Sistem Tenaga Listrik (Grid Code)*. Jakarta, 2020. [Online]. Available: [https://jdih.esdm.go.id/common/dokumen-external/PM ESDM No 20 Tahun 2020.pdf](https://jdih.esdm.go.id/common/dokumen-external/PM%20ESDM%20No%2020%20Tahun%202020.pdf)
- [9] Y. Patasik, A. R. Sultan, A. R. Idris, and A. Rahmadani, "ANALISIS POLA OPERASI JARINGAN 20 KV PASCA BEROPERASINYA GARDU INDUK MOLIBAGU DI PLN UP3 KOTAMOBAGU," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 3, 2025.
- [10] Mahmudatul Ula and Arief Rahmadani, "Rancang Bangun Maximum Power Point Tracking pada Panel Surya dengan Metode Incremental Conductance Menggunakan Zeta Konverter," *Techne J. Ilm. Elektrotek.*, vol. 22, no. 1, pp. 1–20, Apr. 2023, doi: 10.31358/techne.v22i1.334.
- [11] H. Gusmedi, R. P. Putra, and A. S. Samosir, "DESAIN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) ON-GRID 60 KWP," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 1, 2025.
- [12] P. Rizal, "PLTS Off-Grid System Planning for Electricity Needs in Oil Palm Plantations," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 3, 2025.
- [13] F. N. Oktaviani and A. Rahmadani, "Implementation of Elman Neural Network with Backpropagation Algorithm for Battery State of Charge Estimation," in *2024 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICTPEP)*, Sep. 2024, pp. 118–123. doi: 10.1109/ICT-PEP63827.2024.10733470.
- [14] D. J. Damiri, R. Lamanian, and R. Laksana, "Design and Simulation of On-Grid Rooftop Solar Power Plant (Rooftop PV) System on Office Buildings with a PLN Grid System," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 11, no. 1, p. 231, 2023, doi: 10.26760/elkomika.v11i1.231.
- [15] M. Mudakir, A. Aripriharta, and A. P. Wibawa, "Analysis of battery energy storage system (BESS) performance in reducing the impact of variable renewable energy generation intermittency on the electricity system," *J. Mechatronics, Electr. Power, Veh. Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 158–176, 2024.
- [16] W. E. P. Ksamawati, A. R. Kurniawan, D. A. Wimantika, D. A. Zaini, and B. Priyono, "Analysis of Battery Energy Storage System (BESS) Technology in Diesel Displacement: A Case Study of Off-Grid Areas," *J. Technol. Policy Energy Electr. Power*, vol. 1, no. 1, pp. 106–115, 2024.
- [17] M. Jamlaay, "Analisa Stabilitas Transien Sistem Tenaga Listrik Multi Mesin 11 Bus," *J. ELKO (Elektrikal dan Komputer)*, vol. 3, no. 1, 2022.
- [18] A. Hasibuan, A. Bintoro, S. Salahuddin, and R. D. Meutia, "Reliability Distribution System on Load Break Switch Addition at PT. PLN (PERSERO) ULP Langsa City Using RIA-SECTION Technique Combined Method on ETAP 14.1. 0," *Andalasian Int. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 57–64, 2022.