

Analisis Dampak Penetrasi Pembangkit Energi Terbarukan Terhadap Profil Tegangan dan Kualitas Daya Jaringan Distribusi

Siti Anisah, Zuraidah Tharo, Fery Karyanta Bangun

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains & Teknologi,

Universitas Pembangunan Panca Budi, Medan

sitianisah@dosen.pancabudi.ac.id; zuraidahtharo@dosen.pancabudi.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis dampak penetrasi pembangkit energi terbarukan terhadap profil tegangan dan kualitas daya jaringan distribusi. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif empiris pada sistem interkoneksi berkapasitas 50 kWp yang terhubung pada jaringan 380/220 V dengan frekuensi nominal 50 Hz. Data terdiri atas tujuh titik pengamatan pada pukul 06.00–18.00 WIB yang meliputi daya injeksi, tegangan fase-netral, frekuensi, THDv, THDi, dan flicker. Tegangan meningkat dari 221 V pada daya 5 kW menjadi 229 V pada daya 48 kW, dengan rata-rata 224,86 V. Frekuensi rata-rata sebesar 49,997 Hz, THDv rata-rata 2,56%, THDi rata-rata 6,51%, dan flicker maksimum 0,42. Perhitungan ulang seluruh tujuh pasangan data menghasilkan koefisien korelasi Pearson $r = 0.981$ dan $R^2 = 0.963$. Model regresi linear adalah $V = 220.731 + 0.162P$, dengan V dalam volt dan P dalam kW. Hasil menunjukkan hubungan positif yang sangat kuat antara daya injeksi dan kenaikan tegangan pada titik interkoneksi. Parameter kualitas daya yang diamati tidak menunjukkan kondisi ekstrem selama periode pengukuran. Penelitian difokuskan pada parameter yang tersedia dan tidak memasukkan SAIDI, SAIFI, CAIDI maupun evaluasi BESS sebagai hasil empiris.

Kata Kunci : Pembangkit Energi Terbarukan, Kualitas Daya, Profil Tegangan, THDv, THDi, Flicker, Regresi Linear

I. PENDAHULUAN

Keandalan dan kualitas daya merupakan aspek penting dalam pengoperasian jaringan distribusi tenaga listrik. Integrasi pembangkit fotovoltai (PV) sebagai distributed generation dapat mengubah arah dan besarnya aliran daya, khususnya pada jaringan tegangan rendah dengan rasio R/X yang relatif tinggi. Pada kondisi produksi PV tinggi dan konsumsi lokal tidak meningkat secara proporsional, injeksi daya aktif dapat menyebabkan kenaikan tegangan di titik interkoneksi. Literatur terbaru menunjukkan bahwa integrasi distributed generation dapat memunculkan voltage rise, harmonisa, ketidakseimbangan, dan perubahan aliran daya pada jaringan distribusi [2], [3].

Pada jaringan tegangan rendah, pengaruh tersebut menjadi penting karena panjang feeder, impedansi penghantar, lokasi interkoneksi, kondisi beban, dan karakteristik inverter menentukan sensitivitas tegangan terhadap perubahan daya. Studi berbasis simulasi telah menunjukkan hubungan antara penetrasi PV, reverse power flow, dan perubahan parameter jaringan [4], sedangkan studi lain mengembangkan pengendalian inverter untuk mengurangi pelanggaran tegangan [5], [6]. Dengan demikian, hasil simulasi memberikan dasar teoritis yang kuat, tetapi tidak selalu menggambarkan kondisi operasional aktual pada titik interkoneksi tertentu.

Penelitian terdahulu juga telah mengevaluasi kualitas daya PLTS melalui pengukuran lapangan. Seme et al. melakukan pengukuran THD pada sistem PV yang terhubung ke jaringan distribusi perkotaan dan menunjukkan bahwa konfigurasi jaringan serta karakteristik inverter berpengaruh terhadap kualitas tegangan dan arus [7]. Namun, penelitian tersebut tidak memfokuskan pemodelan statistik langsung antara besarnya daya injeksi dan perubahan tegangan pada satu titik interkoneksi jaringan 380/220 V. Di sisi lain, sejumlah penelitian terbaru masih dominan menggunakan simulasi atau model jaringan uji [2], [4], [6].

Penelitian ini memfokuskan analisis pada hubungan kuantitatif antara daya injeksi PLTS 50 kWp dan tegangan fase-netral berdasarkan data pengukuran langsung, disertai evaluasi frekuensi, THDv, THDi, dan flicker. Fokus pada jaringan 380/220 V dipilih karena jaringan tegangan rendah merupakan lokasi umum interkoneksi PV skala terdistribusi dan perubahan tegangan pada level ini dapat langsung memengaruhi peralatan pelanggan. Penelitian tidak mengklaim penentuan hosting capacity atau kausalitas karena data hanya terdiri atas tujuh titik pengamatan. Indeks SAIDI, SAIFI, CAIDI, BESS, dan kontribusi sumber hybrid tidak dianalisis karena data empiris yang diperlukan tidak tersedia.

1.1 State of the Art dan Research Gap

Studi integrasi PLTS pada jaringan distribusi dapat dikelompokkan menjadi tiga pendekatan.

Pertama, studi berbasis simulasi yang menganalisis voltage rise, reverse power flow, hosting capacity, dan pengaruh impedansi jaringan [2], [4], [6]. Kedua, studi kualitas daya yang mengkaji THD, flicker, dan parameter tegangan, tetapi tidak selalu menghubungkan perubahan tersebut secara langsung dengan besarnya daya injeksi. Ketiga, studi pengukuran lapangan yang memberikan bukti operasional nyata, tetapi sering berfokus pada karakteristik kualitas daya tanpa pemodelan hubungan daya-tegangan secara statistik [7].

Berdasarkan perbandingan tersebut, research gap penelitian ini terletak pada penggabungan pengukuran langsung di titik interkoneksi jaringan 380/220 V dengan analisis statistik sederhana yang dapat direproduksi untuk mengkuantifikasi hubungan daya injeksi PLTS dan tegangan. Novelty yang ditawarkan bukan pada pengembangan algoritma baru, melainkan pada penyediaan bukti empiris lokal mengenai sensitivitas tegangan terhadap injeksi daya pada sistem PLTS 50 kWp, sekaligus menyajikan parameter kualitas daya yang diukur pada kondisi operasi yang sama. Pendekatan ini melengkapi penelitian simulasi dengan observasi aktual, meskipun generalisasi tetap dibatasi oleh jumlah sampel.

1.2 Rumusan Masalah

- Bagaimana perubahan daya injeksi pembangkit EBT memengaruhi profil tegangan jaringan distribusi?
- Bagaimana karakteristik frekuensi, THDv, THDi, dan flicker selama periode pengamatan?
- Seberapa kuat hubungan statistik antara daya injeksi dan tegangan pada titik interkoneksi?

1.3 Tujuan Penelitian

- Menganalisis profil tegangan akibat perubahan daya injeksi pembangkit EBT.
- Mengevaluasi frekuensi, THDv, THDi, dan flicker berdasarkan data pengukuran.
- Menentukan korelasi Pearson dan model regresi linear antara daya injeksi dan tegangan.

1.4 Hipotesis

- H1: Terdapat hubungan positif antara peningkatan daya injeksi EBT dan kenaikan tegangan.
- H2: Parameter kualitas daya yang diamati berada pada kondisi operasi yang dapat diterima selama periode pengukuran.

1.5 Kontribusi Penelitian

Kontribusi penelitian terletak pada tiga aspek: (1) menyediakan data pengukuran langsung pada titik interkoneksi PLTS 50 kWp dan jaringan 380/220 V; (2) mengkuantifikasi hubungan daya-tegangan menggunakan korelasi Pearson, p-value, confidence interval, dan regresi linear; serta (3) menggabungkan evaluasi profil tegangan dengan frekuensi, THDv, THDi, dan flicker. Dengan demikian, hasil penelitian dapat digunakan sebagai

baseline empiris untuk evaluasi pengukuran yang lebih rapat dan kajian hosting capacity pada penelitian lanjutan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Integrasi Pembangkit Energi Terbarukan

PLTS yang terhubung pada jaringan distribusi berperan sebagai distributed generation. Besarnya pengaruh terhadap jaringan dipengaruhi kapasitas pembangkit, lokasi titik interkoneksi, impedansi jaringan, kondisi beban, faktor daya, dan karakteristik pengendalian inverter. Pada feeder tegangan rendah, komponen resistif penghantar dapat membuat perubahan daya aktif menghasilkan perubahan tegangan yang relatif lebih terlihat. Literatur terbaru menunjukkan bahwa kenaikan penetrasi PV dapat meningkatkan risiko voltage rise dan reverse power flow, sedangkan smart inverter dengan pengaturan daya reaktif dapat digunakan untuk mitigasi [2], [4]–[6].

2.2 Profil Tegangan

Profil tegangan menggambarkan variasi tegangan selama periode operasi. Deviasi tegangan terhadap tegangan nominal dihitung menggunakan:

$$\Delta V(\%) = |V - V_{\text{nom}}| / V_{\text{nom}} \times 100\% \quad (1)$$

Pada penelitian ini digunakan $V_{\text{nom}} = 220$ V untuk evaluasi tegangan fase-netral. Nilai deviasi digunakan sebagai indikator perubahan profil, sedangkan penilaian kepatuhan tetap mempertimbangkan standar dan kondisi titik interkoneksi.

2.3 Kualitas Daya

Kualitas daya dievaluasi melalui tegangan, frekuensi, harmonisa tegangan dan arus, serta flicker. THDv dan THDi digunakan untuk menunjukkan tingkat distorsi gelombang, sedangkan Pst digunakan sebagai indikator flicker. Pengukuran flicker mengacu pada prinsip pengukuran IEC 61000-4-15, sedangkan evaluasi harmonisa mengacu pada IEEE Std 519-2014 sejauh parameter sistem yang tersedia memungkinkan. Untuk THDi, kepatuhan tidak dapat diputuskan hanya dari nilai THDi total karena batas arus IEEE 519 bergantung pada rasio arus hubung singkat terhadap arus beban dan komponen harmonisa individual. PUIL 2020 dan ketentuan PLN digunakan sebagai acuan konteks instalasi dan operasi distribusi [1], [8]–[10].

2.4 Korelasi Pearson

Koefisien Pearson digunakan untuk mengukur kekuatan dan arah hubungan linear dua variabel. Dalam penelitian ini daya injeksi P menjadi variabel bebas dan tegangan V menjadi variabel terikat. Koefisien dihitung dengan:

$$r = [n\sum PV - (\sum P)(\sum V)] / \sqrt{\{[n\sum P^2 - (\sum P)^2] [n\sum V^2 - (\sum V)^2]\}} \quad (2)$$

Selain nilai r , p -value dua sisi dan interval kepercayaan 95% dihitung karena ukuran sampel hanya tujuh observasi.

2.5 Regresi Linear

Model regresi linear sederhana dinyatakan dengan:

$$V = a + bP \quad (3)$$

Nilai a merupakan intersep, b merupakan koefisien perubahan tegangan terhadap daya, dan R^2 menunjukkan proporsi variasi tegangan yang dijelaskan oleh model. Signifikansi koefisien b diuji pada $\alpha = 0,05$ dan interval kepercayaan 95% dilaporkan untuk menunjukkan ketidakpastian estimasi.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Desain dan Lokasi Penelitian

Penelitian merupakan penelitian terapan dengan pendekatan kuantitatif empiris. Pengukuran dilakukan pada sistem on-grid PLTS berkapasitas interkoneksi 50 kWp yang terhubung pada jaringan distribusi tegangan rendah 380/220 V, 50 Hz. Pengujian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Pembangunan Panca Budi dengan dukungan sistem on-grid yang terpasang di Stasiun Medan. Titik pengamatan berada pada titik interkoneksi sistem PLTS dengan jaringan, sehingga variabel daya injeksi dan parameter kualitas daya diamati pada lokasi listrik yang sama.

3.2 Spesifikasi Sistem

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Sistem Pembangkit Terpasang

Parameter	Spesifikasi
Kapasitas nominal	50 kWp
Jumlah modul PV	100 unit
Kapasitas modul	500 Wp
Inverter	Grid-tie 3-fasa
Kapasitas inverter	50 kW
Tegangan jaringan	380/220 V
Frekuensi nominal	50 Hz

3.3 Pengumpulan Data

Data dikumpulkan pada tujuh titik waktu terjadwal, yaitu 06.00, 08.00, 10.00, 12.00, 14.00, 16.00, dan 18.00 WIB. Metode sampling yang digunakan adalah time-point sampling pada interval dua jam untuk menangkap perubahan daya PLTS sepanjang periode operasi harian. Parameter yang dicatat meliputi daya PLTS, tegangan fase-netral, frekuensi, THDv, THDi, dan Pst. Pengukuran dilakukan pada titik interkoneksi. Dataset yang tersedia tidak memuat model alat, kelas akurasi, dan dokumen kalibrasi instrumen; oleh karena itu informasi tersebut tidak direkonstruksi atau diklaim sebagai fakta baru.

Kondisi ini dicantumkan sebagai keterbatasan metodologis dan menjadi bagian yang perlu dilengkapi pada pengukuran lanjutan.

3.4 Analisis Data

- Menghitung nilai rata-rata, minimum, dan maksimum setiap parameter.
- Menghitung deviasi tegangan terhadap 220 V menggunakan Persamaan (1).
- Menghitung korelasi Pearson antara daya dan tegangan menggunakan Persamaan (2).
- Menguji signifikansi korelasi dengan p -value dua sisi dan 95% confidence interval.
- Menyusun regresi linear $V = a + bP$ menggunakan Persamaan (3), kemudian melaporkan R^2 , p -value koefisien, dan 95% confidence interval.
- Membandingkan hasil pengukuran dengan acuan kualitas daya yang relevan, dengan mempertimbangkan batas penerapan setiap standar.
- Menghitung deviasi tegangan terhadap 220 V.
- Menghitung korelasi Pearson antara daya dan tegangan.
- Menyusun regresi linear $V = a + bP$.
- Membandingkan hasil pengukuran dengan acuan kualitas daya yang relevan.

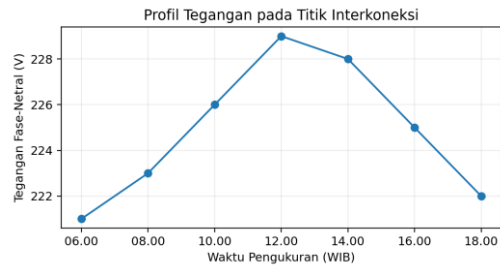
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Profil Daya dan Tegangan

Tabel 2. Hasil Profil Tegangan dan Profil Produksi Daya

Waktu	Daya EBT (kW)	V F-N (V)
06.00	5	221
08.00	18	223
10.00	35	226
12.00	48	229
14.00	45	228
16.00	25	225
18.00	2	222

Tegangan minimum sebesar 221 V terjadi pada daya 5 kW, sedangkan tegangan maksimum sebesar 229 V terjadi pada daya 48 kW. Rata-rata tegangan sebesar 224,86 V. Terhadap tegangan nominal 220 V, deviasi maksimum sebesar 4,09%. Kenaikan tegangan dari 221 V menjadi 229 V bersamaan dengan kenaikan daya dari 5 kW menjadi 48 kW menunjukkan pola voltage rise pada titik interkoneksi. Namun, karena pengamatan hanya tujuh titik dan kondisi beban serta daya reaktif tidak tersedia, hasil ini ditafsirkan sebagai asosiasi empiris, bukan bukti kausal tunggal.



Gambar 1. Profil Tegangan pada Titik Interkoneksi

4.2 Parameter Kualitas Daya

Tabel 3. Data Parameter Frekuensi, THD, dan Flicker Sistem

Waktu	f (Hz)	THDv (%)	THDi (%)	Pst
06.00	49.95	1.8	4.5	0.18
08.00	50.01	2.3	5.8	0.24
10.00	50.03	2.8	7.2	0.35
12.00	50.05	3.4	8.6	0.42
14.00	50.02	3.1	8.1	0.39
16.00	49.98	2.5	6.5	0.27
18.00	49.94	2.0	4.9	0.21

Frekuensi berada pada rentang 49,94–50,05 Hz dengan rata-rata 49,997 Hz. THDv rata-rata sebesar 2,56% dan maksimum 3,4%, sedangkan THDi rata-rata sebesar 6,51% dan maksimum 8,6%. Flicker maksimum adalah 0,42. Nilai THDv dan THDi meningkat bersamaan dengan periode daya yang lebih tinggi, tetapi pola tersebut belum cukup untuk menyimpulkan hubungan sebab-akibat karena perubahan beban dan kondisi jaringan tidak diukur secara simultan. Hasil ini konsisten dengan literatur bahwa konverter daya pada sistem PV dapat memengaruhi kualitas daya, tetapi besarnya dampak bergantung pada karakteristik inverter dan jaringan [3], [7].

4.3 Korelasi Pearson

Perhitungan ulang terhadap seluruh tujuh pasangan data menghasilkan koefisien Pearson $r = 0,981$. Uji korelasi dua sisi menghasilkan $p = 0,000094$, sedangkan interval kepercayaan 95% untuk r adalah $[0,873; 0,997]$. Nilai tersebut menunjukkan hubungan linear positif yang sangat kuat pada dataset yang diamati. Koefisien determinasi $R^2 = 0,963$, sehingga sekitar 96,3% variasi tegangan pada dataset dapat dijelaskan oleh variasi daya dalam model linear sederhana. Karena $n = 7$, interval kepercayaan dan batas generalisasi harus diperhatikan secara ketat.

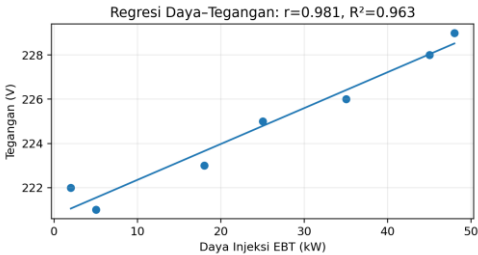
4.4 Regresi Linear

Model regresi yang diperoleh berdasarkan tujuh observasi adalah:

$$V = 220,731 + 0,162P$$

Koefisien regresi sebesar 0,162 V/kW menunjukkan kecenderungan kenaikan tegangan sekitar 0,162 V untuk setiap kenaikan daya 1 kW

pada rentang data yang diamati. Estimasi slope memiliki 95% confidence interval $[0,125; 0,199]$ V/kW dan $p = 0,000094$. Hasil ini memperkuat adanya hubungan linear pada dataset, tetapi persamaan tetap merupakan model empiris untuk kondisi dan rentang pengamatan penelitian, bukan model universal jaringan.



Gambar 2. Hubungan Daya Injeksi dan Tegangan

4.5 Evaluasi Parameter

Tabel 4. Matriks Evaluasi Kesesuaian Hasil Pengukuran Terhadap Standar

Parameter	Hasil	Evaluasi
Tegangan	224,86 V rata-rata; 229 V maksimum	Deviasi maksimum 4,09% terhadap 220 V; dibandingkan dengan batas tegangan yang berlaku.
Frekuensi	49,997 Hz rata-rata	49,997 Hz rata-rata; tidak ada perubahan ekstrem pada tujuh titik.
THDv	2,56% rata-rata; 3,4% maksimum	Maksimum 3,4%; IEEE 519-2014: THD tegangan 8% untuk PCC ≤1 kV, bila berlaku.
THDi	6,51% rata-rata; 8,6% maksimum	Maksimum 8,6%; kepatuhan IEEE 519 memerlukan Isc/IL dan data harmonisa individual.
Flicker Pst	0,42 maksimum	Pst maksimum 0,42; metode mengacu IEC 61000-4-15; batas mengikuti standar yang berlaku.

4.6 Pembahasan

Kenaikan tegangan yang terlihat pada hasil pengukuran sejalan dengan mekanisme aliran daya pada feeder distribusi. Pada jaringan radial, perubahan tegangan di sepanjang penghantar dipengaruhi oleh komponen resistansi dan reaktansi serta perubahan daya aktif dan reaktif. Ketika PLTS meningkatkan injeksi daya aktif, aliran daya bersih dari jaringan menuju beban berkurang dan pada kondisi tertentu dapat berbalik menuju sumber, sehingga tegangan di titik

interkoneksi meningkat. Fenomena voltage rise dan reverse power flow pada jaringan tegangan rendah juga dilaporkan pada studi simulasi dan analisis jaringan PV [2], [4].

Pada pukul 12.00, daya mencapai 48 kW dan tegangan 229 V, sedangkan ketika daya turun menjadi 45 kW, 25 kW, dan 2 kW, tegangan turun menjadi 228 V, 225 V, dan 222 V. Pola tersebut konsisten dengan korelasi dan regresi yang diperoleh. Dari sisi inverter, operasi konverter grid-tie menjaga sinkronisasi terhadap jaringan, tetapi switching dan strategi kontrol dapat berkontribusi terhadap harmonisa. Studi kualitas daya PV berbasis pengukuran dan kajian terbaru tentang distributed generation menunjukkan bahwa dampak harmonisa dan tegangan sangat dipengaruhi karakteristik inverter serta kondisi jaringan [3], [7].

Implikasi teknisnya adalah peningkatan penetrasi PLTS pada jaringan tegangan rendah perlu disertai pemantauan tegangan dan kualitas daya dengan resolusi waktu lebih rapat. Karena nilai maksimum 229 V masih berada dalam rentang pengamatan dan deviasi terhadap 220 V sebesar 4,09%, penelitian ini belum menetapkan batas hosting capacity. Untuk mitigasi kenaikan tegangan, pengaturan daya reaktif melalui smart inverter, Volt/VAR, atau strategi pengendalian lain dapat dipertimbangkan; literatur menunjukkan bahwa kompensasi daya reaktif lokal dapat mengurangi pelanggaran tegangan pada feeder dengan penetrasi PV tinggi [5], [6].

4.7 Keterbatasan Penelitian

Keterbatasan utama penelitian adalah jumlah observasi yang hanya tujuh titik waktu, belum tersedianya data daya reaktif, faktor daya, arus, kondisi beban, impedansi feeder, serta metadata lengkap instrumen pengukuran dan kalibrasinya. Data juga belum mencakup pengamatan multi-hari atau interval 1–15 menit, sehingga variasi cuaca, beban, dan dinamika inverter belum dapat dipisahkan. Oleh karena itu, hasil penelitian dibatasi pada asosiasi daya-tegangan dan karakteristik kualitas daya pada dataset yang tersedia. Penelitian ini juga tidak mengklaim hosting capacity, kausalitas, SAIDI, SAIFI, CAIDI, BESS, maupun kontribusi sumber hybrid secara terpisah.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Daya injeksi PLTS 5–48 kW berasosiasi dengan perubahan tegangan 221–229 V, dengan rata-rata 224,86 V dan deviasi maksimum 4,09% terhadap 220 V.
2. Frekuensi berada pada rentang 49,94–50,05 Hz dengan rata-rata 49,997 Hz, sehingga tidak terlihat penyimpangan ekstrem pada tujuh titik pengamatan.

3. THDv rata-rata 2,56% dan maksimum 3,4%; THDi rata-rata 6,51% dan maksimum 8,6%; sedangkan Pst maksimum 0,42. Evaluasi THDi tidak dapat dinyatakan patuh/tidak patuh hanya dari THDi total karena parameter IEEE 519 untuk arus memerlukan data sistem tambahan.
4. Hubungan daya-tegangan sangat kuat pada dataset, dengan $r = 0,981$, $p = 0,000094$, 95% CI [0,873; 0,997], $R^2 = 0,963$, dan model $V = 220,731 + 0,162P$.
5. Secara teknis, peningkatan injeksi daya PLTS berasosiasi dengan kenaikan tegangan di titik interkoneksi. Temuan ini memberikan baseline empiris untuk pemantauan dan kajian hosting capacity, tetapi belum cukup untuk menetapkan batas penetrasi karena data beban, daya reaktif, impedansi, dan pengamatan multi-periode belum tersedia.
6. Kesimpulan dibatasi pada parameter yang benar-benar diukur. SAIDI, SAIFI, CAIDI, BESS, dan kontribusi sumber hybrid tidak disimpulkan karena data empiris yang diperlukan tidak tersedia.

5.2 Saran

1. Memperpanjang pengukuran menjadi multi-hari dengan interval 1–15 menit agar variasi irradiansi, beban, dan operasi inverter dapat dianalisis.
2. Mencatat daya aktif, daya reaktif, faktor daya, arus, impedansi/parameter feeder, dan kondisi beban pada titik interkoneksi.
3. Menguji beberapa skenario tingkat penetrasi PLTS untuk memperoleh estimasi hosting capacity berbasis batas tegangan.
4. Mengevaluasi strategi Volt/VAR, Volt/Watt, atau kontrol daya reaktif inverter untuk mitigasi voltage rise.
5. Jika dikembangkan menjadi sistem hybrid/BESS, merekam kontribusi setiap sumber dan parameter operasi BESS secara terpisah serta menguji dampaknya terhadap profil tegangan dan kualitas daya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standardisasi Nasional. PUIL 2020: *Persyaratan Umum Instalasi Listrik*. Jakarta: BSN.
- [2] Farrell JA, Hui SYR, McNulty J. 2020, *Impact of Distributed Renewable Energy Sources on Power Quality in Microgrids*. IEEE Transactions on Smart Grid. ;11(5):4353–4361.
- [3] Ghosh A, Kumar P, Hassan S. 2017, *Power Quality Issues in Renewable Energy Systems and Their Mitigation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 77:623–634.
- [4] IEC. IEC 61000-4-15: 2015, *Electromagnetic Compatibility (EMC) – Testing and Measurement Techniques – Flickermeter*

- Functional and Design Specifications*. Geneva: IEC.
- [5] IEEE Power and Energy Society. IEEE Std 519-2014: *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. New York: IEEE; 2014.
 - [6] Islam MR, Rahman MM, Hasan MK. 2023, *Harmonic Assessment and Mitigation in Grid-Connected Solar Photovoltaic Systems: A Comprehensive Review*. *Renewable Energy*. 206:1261–1278.
 - [7] Jafari S, Jorfi S. 2018, *Power Quality Management in Renewable Energy Systems: A Review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 92:421–429.
 - [8] Jiang J, Zhang H, Liu Z. 2020, *Impact of Renewable Energy Integration on Power Quality in Distribution Systems*. *Energy Reports*. 6:1279–1290.
 - [9] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. 2024, *Statistik Ketenagalistrikan Indonesia 2024*. Jakarta: Kementerian ESDM.
 - [10] Kumar N, Singh B, Al-Haddad K., 2023, *Power Quality Improvement in Grid-Connected Solar Energy Systems Using Advanced Control Techniques*. *IEEE Access*. 11:45892–45908.
 - [11] Nogueira R, Santos P, Costa JM. 2021, *Power Quality Monitoring in Distribution Networks with High Penetration of Renewable Energy*. *IEEE Access*. 9:25533–25542.
 - [12] Pereira JG, de Almeida AT, Costa AA. 2021, *Renewable Energy Integration: Impacts on Power Quality and Control Strategies*. *Electric Power Systems Research*. 195:107060.
 - [13] PT PLN (Persero). 2021, *Standar PLN tentang Kualitas Daya dan Operasi Sistem Distribusi*. Jakarta: PT PLN (Persero).
 - [14] Sadeghi M, Saldaña JA, Rodríguez JM. 2022, *Power Quality Enhancement in Renewable Energy Systems Using Power Electronic Converters*. *Energy Conversion and Management*. 2022;257:115476.
 - [15] Soh CK, Leong KS, Fang Z. 2020, *Assessing the Impact of Renewable Energy on Power Quality in Smart Grids*. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 15(4) :1829–1837.
 - [16] Tharo Z, Anisah S. 2023, *Implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk Rumah Tinggal*. Medan: Tahta Media Group.
 - [17] Tharo Z, Syahputra E, Mulyadi R. 2022, *Analysis of Saving Electrical Load Costs With a Hybrid Source of PLN-PLTS 500 Wp*. *Journal of Applied Engineering and Technological Science*. 4(1):235–243.
 - [18] Siagian P, Hamdani M. 2022, *Application of Savonius Type Turbine Technology for the Conversion of Low Speed Wind into Small Electrical Energy Source*. *Journal of Applied Engineering and Technological Science*. 3(2):190–197.
 - [19] Anisah, Siti, and Zuraidah Tharo. 2025, *The potential of rooftop solar power plants as an environmentally friendly energy source for residents in Medan City*. *Journal of Information Technology, Computer Science and Electrical Engineering* 2.3 83-90.
 - [20] Situmorang, Van Bastian, Zuraidah Tharo, and Parlin Siagian. 2025, *Optimization of Renewable Energy Integration in Power Systems for Clean Energy Transition*. *Proceedings of International Conference on Islamic Community Studies*.