

OPTIMASI PENEMPATAN *DISTRIBUTED GENERATION* UNTUK MEMPERBAIKI PROFIL TEGANGAN PADA SISTEM DISTRIBUSI 20 KV MENGUNAKAN *VOLTAGE SENSITIVITY INDEX (VSI)*

Rafi Maulana¹, Sutisna², Linda Faridah³, Nurmela⁴

Universitas Siliwangi ^{1,2,3,4}

Email: 227002005@student.unsil.ac.id

Informasi	Abstract
Volume : 3 Nomor : 7 Bulan : Juli Tahun : 2026 E-ISSN : 3062-9624	<i>Rising electricity demand on Nusa Penida Island has led to a decline in voltage profiles across several 20 kV distribution feeders, necessitating measures to improve voltage quality through the integration of Distributed Generation (DG). In accordance with the 2025–2034 Electricity Supply Business Plan (RUPTL), PT PLN (Persero) plans to construct a 4.5 MW Solar Power Plant (PLTS) to serve as a DG source on Nusa Penida. However, improper DG placement can give rise to issues such as reverse power flow and voltage instability. This study aims to analyze voltage profile conditions prior to DG installation, determine the optimal placement location using the Voltage Sensitivity Index (VSI) method, and evaluate the impact of DG placement on voltage profile improvement within the Nusa Penida 20 kV distribution system. The research utilized DIgSILENT PowerFactory software to conduct load flow analysis, involving system modeling based on actual PT PLN (Persero) data, analysis of existing conditions, VSI calculations to identify the optimal location, and testing of various DG capacities—specifically 15%, 30%, 45%, 60%, 75%, and 90% of the feeder's maximum load—while maintaining a total capacity of 4.5 MW as stipulated in the RUPTL. The results indicate that the Bunga Mekar, Ceningan, and Ped feeders experienced the most significant voltage profile degradation. Based on VSI calculations, the optimal locations for DG placement were identified as Bus Bunga Mekar 1, Bus Bunga Mekar 2, Bus Ceningan 4, Bus Ceningan 5, Bus Ceningan 6, and Bus Ped 3. The DG capacity variations yielding the best voltage profile improvements were 75% for Bus Bunga Mekar 1, 90% for Bus Bunga Mekar 2, 90% for Bus Ceningan 4, 90% for Bus Ceningan 5, 45% for Bus Ceningan 6, and 90% for Bus Ped 3, resulting in a total capacity of 4.5 MW. Following the placement of DGs at these locations and capacities, the voltage profiles across all analyzed buses improved and fell within the distribution system's standard operating limits of 0.90–1.05 p.u. The study results demonstrate that the VSI method is effective for determining optimal DG locations and improving voltage profile quality in the Nusa Penida 20 kV distribution system, thereby serving as a reference for the integration of renewable energy generation into distribution networks.</i> Keyword: <i>Distributed Generation, Solar Power Plant (PLTS), Voltage Profile, Voltage Sensitivity Index (VSI), DIgSILENT PowerFactory, 20 kV Distribution System.</i>

Abstrak

Meningkatnya kebutuhan energi listrik di Pulau Nusa Penida menyebabkan penurunan profil tegangan pada beberapa penyulang jaringan distribusi 20 kV sehingga diperlukan upaya untuk meningkatkan kualitas tegangan melalui integrasi Distributed Generation (DG). Berdasarkan Rencana

Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2025–2034, PT PLN (Persero) merencanakan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berkapasitas 4,5 MW sebagai DG di Nusa Penida. Namun, penempatan DG yang tidak tepat dapat mengakibatkan permasalahan seperti aliran daya balik dan ketidakstabilan tegangan. Penelitian ini bertujuan menganalisis kondisi profil tegangan sebelum penempatan DG, menentukan lokasi optimal penempatan DG menggunakan metode Voltage Sensitivity Index (VSI), serta menganalisis pengaruh penempatan DG terhadap perbaikan profil tegangan pada sistem distribusi 20 kV Nusa Penida. Penelitian dilakukan menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory melalui simulasi aliran daya (load flow analysis) dengan tahapan pemodelan sistem berdasarkan data aktual PT PLN (Persero), analisis kondisi eksisting, perhitungan VSI untuk menentukan lokasi optimal, serta pengujian variasi kapasitas DG sebesar 15%, 30%, 45%, 60%, 75%, dan 90% dari beban maksimum penyulang dengan total kapasitas tetap mengacu pada RUPTL sebesar 4,5 MW. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyulang Bunga Mekar, Ceningan, dan Ped merupakan penyulang yang mengalami penurunan profil tegangan paling signifikan. Berdasarkan perhitungan VSI diperoleh lokasi optimal penempatan DG yaitu pada Bus Bunga Mekar 1 dan Bus Bunga Mekar 2, Bus Ceningan 4, Bus Ceningan 5, Bus Ceningan 6, serta Bus Ped 3. Variasi kapasitas DG yang menghasilkan perbaikan profil tegangan terbaik adalah sebesar 75% pada Bus Bunga Mekar 1, 90% pada Bus Bunga Mekar 2, 90% pada Bus Ceningan 4, 90% pada Bus Ceningan 5, 45% pada Bus Ceningan 6, dan 90% pada Bus Ped 3 dengan total kapasitas 4,5 MW. Setelah penempatan DG pada lokasi dan kapasitas tersebut, profil tegangan pada seluruh bus yang dianalisis meningkat dan berada dalam batas standar operasi sistem distribusi sebesar 0,90–1,05 p.u. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode VSI efektif digunakan untuk menentukan lokasi optimal DG dan mampu meningkatkan kualitas profil tegangan di sistem distribusi 20 kV Nusa Penida, sehingga dapat menjadi referensi dalam pengembangan integrasi pembangkit energi terbarukan pada jaringan distribusi.

Kata Kunci: *Distributed Generation, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Profil Tegangan, Voltage Sensitivity Index (VSI), DIgSILENT PowerFactory, Sistem Distribusi 20 kV.*

A. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi listrik mendorong pemanfaatan sumber energi terbarukan sebagai alternatif penyediaan energi yang berkelanjutan. Salah satu teknologi yang mendukung integrasi energi terbarukan ke dalam sistem tenaga listrik adalah Distributed Generation (DG). DG merupakan konsep pembangkitan listrik berskala kecil yang ditempatkan pada berbagai titik di jaringan distribusi dan dioperasikan secara paralel dengan sistem kelistrikan utama. Penerapan DG bertujuan untuk meningkatkan kinerja sistem distribusi, antara lain dalam memenuhi pertumbuhan kebutuhan beban, memperbaiki profil tegangan, mengurangi rugi-rugi daya pada saluran distribusi, serta meningkatkan kualitas dan keandalan penyaluran energi listrik kepada konsumen[1].[2]

Provinsi Bali merupakan salah satu wilayah dengan pertumbuhan beban listrik yang cukup signifikan, terutama pada daerah tujuan wisata. Salah satu wilayah yang mengalami peningkatan kebutuhan energi listrik adalah Nusa Penida, yang secara administratif berada di Kabupaten Klungkung dan secara geografis terpisah dari Pulau Bali [3]. Pertumbuhan ini menuntut ketersediaan energi listrik yang andal, efisien, dan berkelanjutan sebagai syarat

utama pengembangan ekonomi dan pariwisata serta untuk mencapai target menjadikan Nusa Penida pulau dengan 100% energi terbarukan pada tahun 2030 (Hasjanah, 2024)[4].

Selama ini, pasokan energi listrik di Nusa Penida masih didominasi oleh pembangkit berbasis bahan bakar fosil, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) [3]. Selain memiliki biaya operasional yang tinggi, ketergantungan terhadap pembangkit fosil juga menimbulkan permasalahan lingkungan serta keterbatasan dalam memenuhi pertumbuhan beban listrik jangka panjang. Oleh karena itu, diperlukan upaya diversifikasi sumber energi melalui pemanfaatan Energi Baru dan Terbarukan (EBT). Transisi dari energi konvensional menuju ke Energi Baru dan Terbarukan (EBT), termasuk salah satunya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai *distributed generation* (DG), ditetapkan lewat Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN sebagai tindakan nyata dalam laju pertumbuhan kebutuhan listrik di wilayah Nusa Penida (Mineral, 2025). Terdapat potensi yang sangat bagus untuk intensitas iradiasi matahari yang sangat tinggi di wilayah Nusa Penida, dengan data *Direct normal irradiation* (DNI) sebesar $3.928 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$, dengan *Specific photovoltaic power output* $4.213 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$, dengan temperatur rata-rata 23.3°C , elevasi pada 397 meter sehingga sangat berpotensi untuk pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Global Solar Atlas, 2025). Dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) Tahun 2025–2034, direncanakan penambahan pembangkit listrik berbasis energi terbarukan di wilayah Nusa Penida, salah satunya berupa PLTS dengan kapasitas sebesar 4,5 MW pada tahun 2027. Penambahan pembangkit ini dikategorikan sebagai *distributed generation* (DG) karena terhubung langsung pada jaringan distribusi (Mineral, 2025).

Dari berbagai studi dan penelitian dalam literatur menegaskan bahwa integrasi *distributed generation* (DG) ke dalam jaringan distribusi 20 kV tidak hanya berfungsi sebagai sumber pasokan energi tambahan, tetapi juga dapat memengaruhi karakteristik operasi sistem tenaga listrik. Salah satu aspek penting yang terdampak adalah stabilitas dan profil tegangan. Optimasi lokasi *distributed generation* (DG) sangat berpengaruh terhadap perbaikan profil tegangan dan indeks stabilitas tegangan. Kemudian untuk DG yang ditempatkan di bus yang tepat mampu meningkatkan nilai tegangan minimum bus secara signifikan serta memperbaiki kinerja sistem distribusi secara keseluruhan [5]. Standar SPLN No. 1 Tahun 1995 menetapkan bahwa jatuh tegangan minimal -10% serta kenaikan tegangan maksimal 5% dari tegangan nominal.

Namun demikian, berbagai penelitian menunjukkan bahwa penempatan DG dengan kapasitas dan lokasi yang tidak optimal justru dapat menimbulkan permasalahan baru pada sistem distribusi, seperti aliran daya balik (*reverse power flow*), serta ketidakstabilan tegangan [6]. Maka dari itu integrasi PLTS sebagai DG yang tercantum pada Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) pada jaringan distribusi 20 kV Nusa Penida memerlukan kajian teknis yang mendalam, khususnya terkait penentuan tempat penempatan yang baik. Penempatan DG yang baik akan memberikan dampak yang berbeda terhadap profil tegangan pada setiap bus jaringan distribusi. Kondisi eksisting profil tegangan pada jaringan distribusi 20 kV Nusa Penida mengalami penurunan yang disebabkan oleh peningkatan beban listrik, sehingga perlu dilakukan perbaikan untuk mendapatkan profil tegangan yang sesuai dengan standar yang ditetapkan. Oleh karena itu, diperlukan suatu analisis optimasi penempatan *Distributed Generation* guna memperoleh konfigurasi yang paling efektif dalam memperbaiki profil tegangan tanpa menimbulkan permasalahan baru pada sistem.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini berjudul “ Optimasi Penempatan *Distributed Generation* untuk Memperbaiki Profil Tegangan pada Sistem Distribusi 20 kV Menggunakan *Voltage Sensitivity Index* (VSI)”. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi teknis bagi pengembangan sistem distribusi berbasis energi terbarukan di wilayah kepulauan, khususnya dalam rangka meningkatkan kualitas dan keandalan pasokan tenaga listrik.

TINJAUAN PUSTAKA

Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu kesatuan yang terdiri atas unit pembangkit, gardu induk, jaringan transmisi, dan jaringan distribusi yang saling terhubung untuk menyalurkan energi listrik dari sumber pembangkitan hingga ke konsumen. Di dalam sistem tersebut, jaringan distribusi merupakan bagian yang berhubungan langsung dengan pelanggan sehingga memiliki peran penting dalam menjamin kontinuitas dan kualitas penyaluran energi listrik. Karena berada pada sisi yang paling dekat dengan pengguna akhir serta memiliki cakupan jaringan yang luas, sistem distribusi cenderung mengalami tingkat gangguan yang lebih tinggi dibandingkan dengan subsistem tenaga listrik lainnya [7]. Jaringan distribusi tersusun atas saluran penghantar yang menghubungkan gardu induk dengan pusat-pusat beban dan pelanggan, sehingga berfungsi sebagai media penyaluran energi listrik sesuai

dengan kebutuhan beban. Berdasarkan tingkat tegangannya, sistem distribusi dibedakan menjadi dua bagian utama, yaitu sistem distribusi primer dan sistem distribusi sekunder. [8].

Distributed Generation (DG)

Distributed Generation (DG) adalah pembangkit listrik berkapasitas relatif kecil yang ditempatkan di dekat pusat beban dan dioperasikan dengan cara dihubungkan langsung ke pelanggan, ke jaringan distribusi, atau kombinasi keduanya. Penerapan DG menjadi salah satu strategi dalam pengembangan sistem tenaga listrik modern karena mampu meningkatkan keandalan pasokan energi, memperbaiki kualitas daya, serta mendukung pengurangan penggunaan pembangkit berbasis bahan bakar fosil. Sejalan dengan meningkatnya kebutuhan energi bersih, implementasi DG saat ini lebih banyak memanfaatkan sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya, angin, dan biomassa. Pemanfaatan sumber energi tersebut terus berkembang karena memiliki karakteristik yang ramah lingkungan, menghasilkan emisi yang rendah, bersifat berkelanjutan, serta memerlukan biaya operasi dan pemeliharaan yang relatif lebih rendah dibandingkan pembangkit konvensional [9].

Integrasi DG ke dalam sistem distribusi memberikan berbagai keuntungan teknis, antara lain menurunkan rugi-rugi daya, memperbaiki profil tegangan, meningkatkan keandalan sistem, serta menjaga kualitas daya listrik yang disalurkan kepada konsumen. Oleh karena itu, analisis terhadap pengaruh pemasangan DG pada jaringan distribusi menjadi aspek yang penting untuk dilakukan. Di sisi lain, penggunaan DG berbasis energi terbarukan juga menghadirkan tantangan operasional karena karakteristik pembangkitannya sangat dipengaruhi oleh kondisi alam sehingga daya yang dihasilkan bersifat fluktuatif atau stokastik. Variasi keluaran daya tersebut dapat memengaruhi kinerja sistem distribusi. Ketika daya yang dibangkitkan masih lebih kecil daripada kebutuhan beban, pengaruhnya terhadap kondisi jaringan umumnya tidak signifikan. Namun, apabila daya keluaran DG melebihi kebutuhan beban pada sisi hilir, kelebihan energi akan mengalir kembali menuju sisi hulu jaringan. Kondisi ini menyebabkan perubahan arah aliran daya dari pola konvensional satu arah menjadi aliran daya dua arah (*bidirectional power flow*), sehingga memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan maupun pengoperasian sistem distribusi agar tetap memenuhi batasan teknis dan standar keandalan. [10].

Sistem Per-Unit

Dalam banyak masalah kelistrikan perlu dinyatakan skala atau satuan. Umumnya hal ini dilakukan dalam analisis sistem tenaga dan metode standar yang dipakai adalah sistem

per-unit (p.u). Nilai-nilai yang dinyatakan dalam satuan ini memiliki nilai yang sebenarnya dibagi nilai dasar (base value). Secara umum persamaan sistem per-unit sebagai berikut [11]:

$$V_{p.u} = \frac{V_{actual}}{V_{base}}$$

Voltage Sensitivity Index (VSI)

Voltage Sensitivity Index (VSI) merupakan indeks yang digunakan untuk mengukur sensitivitas dan performansi tegangan sistem distribusi berdasarkan penyimpangan tegangan seluruh bus terhadap nilai nominal, serta digunakan untuk menentukan lokasi optimal penempatan Distributed Generation (DG) yang memberikan perbaikan profil tegangan terbaik. Analisis sensitivitas tegangan dilakukan untuk mengevaluasi indeks kinerja tegangan (*voltage performance index*) pada suatu sistem tenaga listrik.[12]. VSI dapat dihitung dengan persamaan berikut:

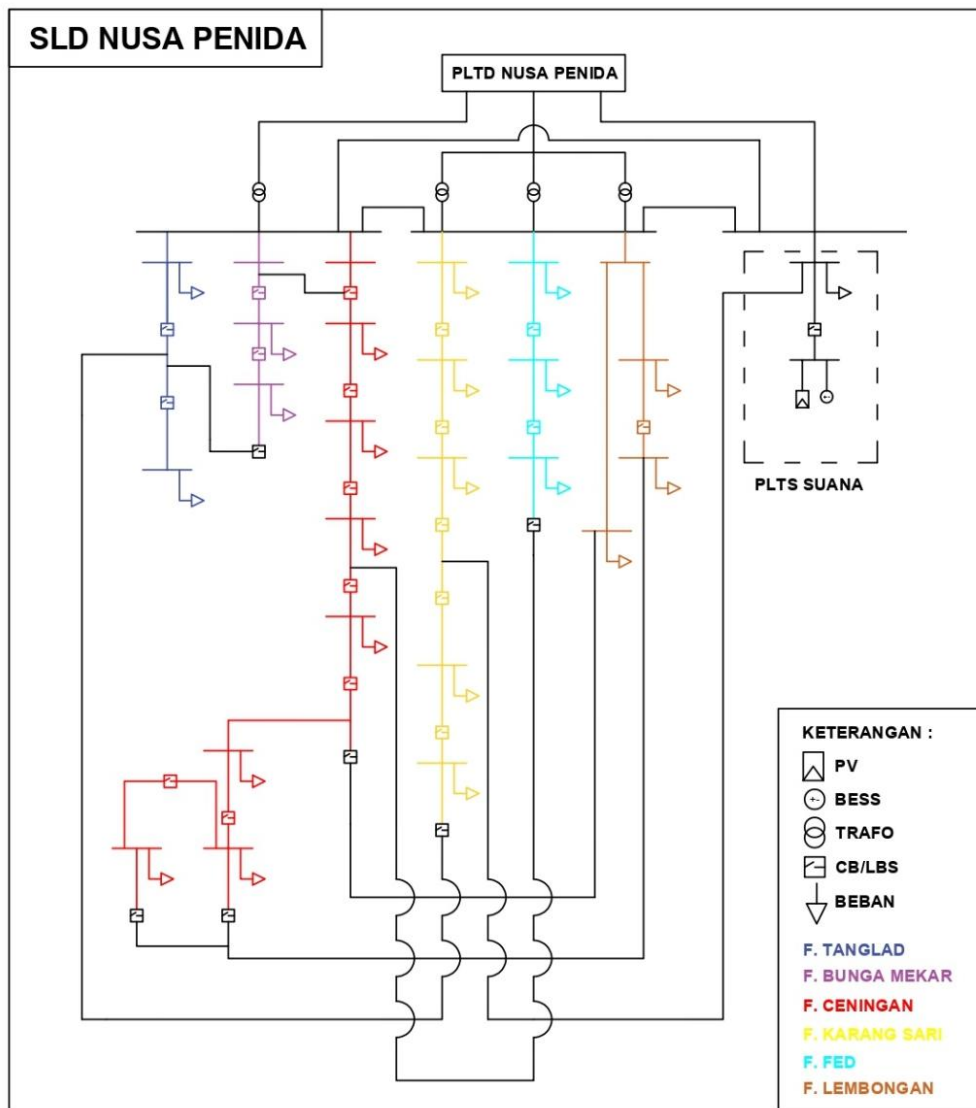
$$VSI_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (1 - V_k)^2}{n}}$$

Dalam metode *Voltage Sensitivity Index* (VSI), bus dengan nilai VSI terendah diprioritaskan sebagai lokasi pemasangan *Distributed Generation* (DG). Hal ini disebabkan nilai VSI yang semakin mendekati nol menunjukkan bahwa kondisi tegangan pada bus tersebut semakin mendekati nilai referensi atau nilai nominal sistem. Dengan demikian, nilai VSI yang lebih kecil mengindikasikan performa tegangan yang lebih baik dan mencerminkan lokasi yang lebih sesuai untuk integrasi DG guna meningkatkan kinerja sistem distribusi. [12].

B. METODE PENELITIAN

Sistem Kelistrikan dan Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan sistem kelistrikan Nusa Penida yang ditunjukan pada Gambar 1. Sistem tersebut disuplai oleh 22 unit pembangkit dengan total kapasitas pembangkitan sistem sebesar 33,15 MW. Dari sisi jaringan distribusi, sistem Nusa Penida terdiri atas 6 penyulang yang saling terhubung antar sistem.



Gambar 1. Single Line Diagram Sistem 20 kV Nusa Penida

Dalam penelitian ini SLD yang ada pada Gambar 2 adalah sistem distribusi 20 kV Pulau Nusa Penida. Diagram ini merepresentasikan keterhubungan antara sumber pembangkit, penyulang distribusi, serta titik-titik beban utama pada jaringan. SLD digunakan sebagai dasar pemodelan topologi jaringan dalam simulasi aliran daya, sehingga seluruh parameter teknis seperti impedansi saluran, lokasi beban, dan sumber daya dapat direpresentasikan secara konsisten dalam analisis simulasi aliran daya menggunakan perangkat lunak *DigSILENT PowerFactory*.

Hitung Voltage Sensitivity Index (VSI) jaringan dengan penempatan DG 15% dihitung dengan penempatan setiap bus untuk lokasi bus optimal

Pada tahap ini penelitian dilakukan menggunakan Metodologi Voltage Sensitivity Index (VSI) digunakan untuk menetapkan tempat optimal penempatan DG di sistem distribusi

berdasarkan perbaikan profil tegangan sistem secara keseluruhan. Metode ini mengevaluasi sensitivitas tegangan jaringan terhadap injeksi daya DG yang ditempatkan secara bergantian pada setiap bus.[13][14]

Untuk tahapan selanjutnya perhitungan metodologi VSI diawali dengan pemodelan jaringan distribusi dan simulasi aliran daya pada kondisi beban maksimum tanpa penempatan DG untuk memperoleh profil tegangan awal sistem. Selanjutnya, DG dengan kapasitas 15% dari total beban feeder ditempatkan secara bergantian pada setiap bus, dengan ketentuan bahwa dalam satu skenario hanya terdapat satu DG yang aktif. Untuk setiap skenario penempatan DG, dilakukan simulasi aliran daya guna memperoleh nilai tegangan pada seluruh bus sistem. Setelah didapat nilai tegangan maka dilakukan perhitungan dengan rumus VSI untuk mendapatkan nilai VSI tersebut.

Proses ini diulangi hingga seluruh bus dalam jaringan diuji sebagai kandidat lokasi DG. Nilai VSI dari setiap skenario kemudian diurutkan, dan bus dengan nilai VSI terkecil ditetapkan sebagai lokasi optimal penempatan DG, karena menunjukkan bahwa penempatan DG pada bus tersebut mampu menghasilkan deviasi tegangan sistem yang paling kecil dan profil tegangan yang paling mendekati nilai nominal.

Skenario Simulasi

Tahapan dimulai dengan input data jaringan ke dalam perangkat lunak *DigSILENT PowerFactory* yang meliputi data bus, data saluran, data beban, dan data pembangkit. Selanjutnya dilakukan analisis kondisi eksisting menggunakan simulasi aliran daya (*load flow*) untuk mengetahui profil tegangan awal sistem sebelum penambahan DG.

Setelah itu dilakukan perhitungan *Voltage Sensitivity Index* (VSI) untuk menentukan bus yang paling sensitif terhadap perubahan daya dan berpotensi menjadi lokasi optimal penempatan DG. Berdasarkan hasil tersebut, dilakukan input variasi kapasitas DG sebesar 15%, 30%, 45%, 60%, 75%, dan 90% dari total beban maksimum, seperti pada tabel 1

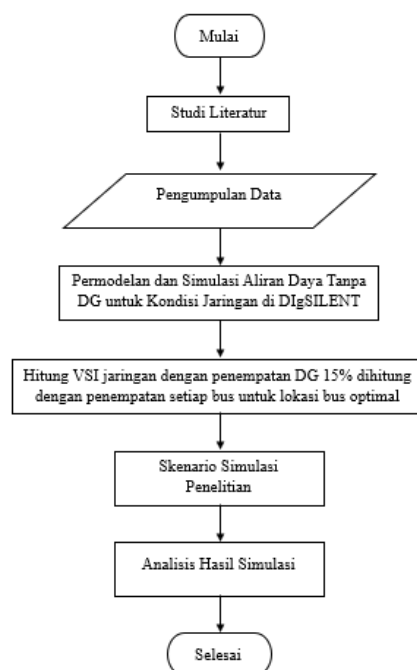
Tabel 1 Variasi kapasitas daya DG

Variasi kapasitas daya DG
15%
30%
45%
60%

75%
90%

Hasil setiap skenario kemudian dianalisis untuk melihat perubahan profil tegangan pada sistem distribusi. Jika nilai tegangan belum memenuhi standar yang ditentukan, maka simulasi dilakukan kembali dengan variasi kapasitas lainnya [15]. Apabila profil tegangan telah memenuhi standar operasi sistem distribusi, maka dilakukan validasi hasil simulasi untuk memastikan bahwa lokasi dan kapasitas DG yang diperoleh merupakan solusi yang optimal.

Flowchart Penelitian



Gambar 2. Flowchart Penelitian

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

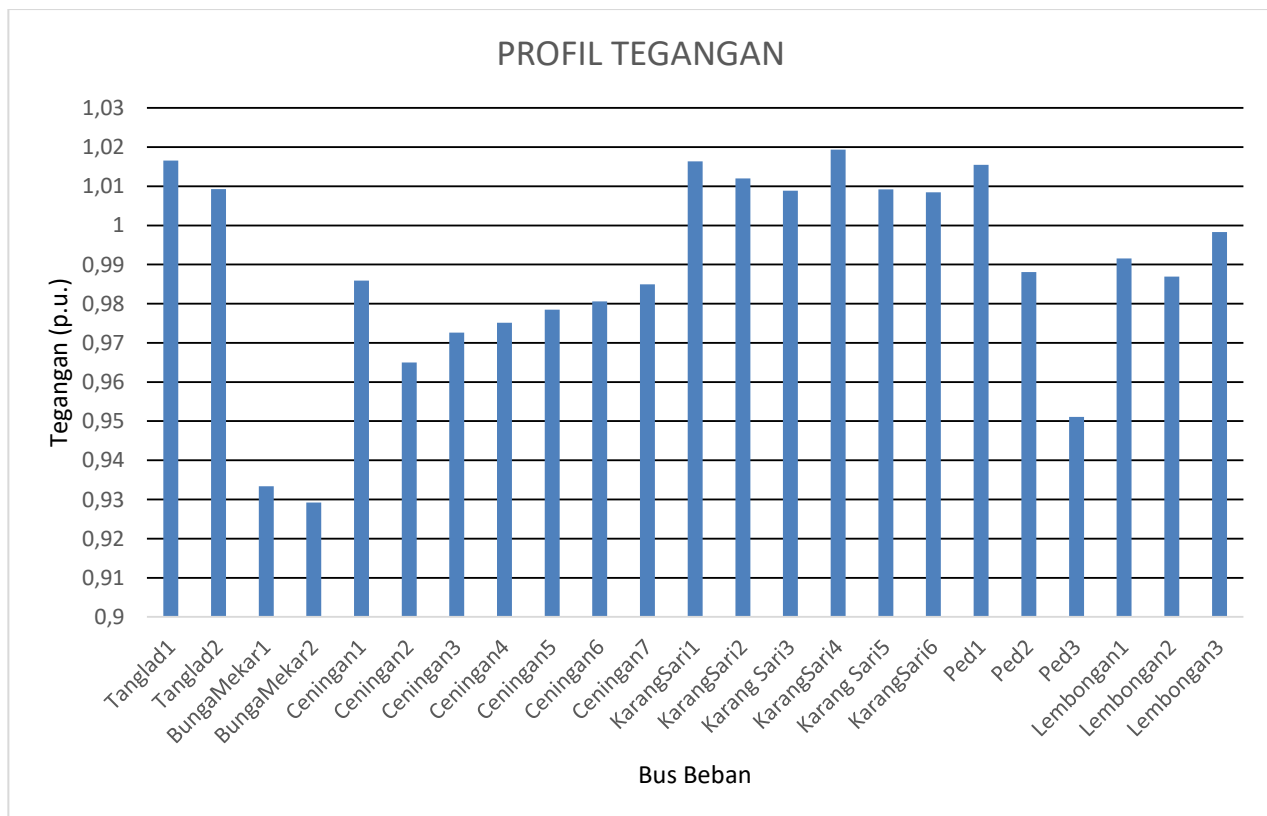
Kondisi Awal Sistem

Pada bagian ini terdapat kondisi awal sistem sebelum penambahan pembangkit *Distributed Generation* (DG). Analisis dilakukan menggunakan simulasi aliran daya (*Load Flow*). Hasil analisis ini selanjutnya digunakan sebagai acuan untuk menemukan bahwa pada penyulang mana saja yang terjadi penurunan profil tegangan yang cukup rendah. Serta sebagai acuan untuk perbandingan akhir dari hasil analisis setelah penempatan DG untuk perbaikan profil tegangan.

Tabel 2 Kondisi dasar jaringan untuk profil tegangan.

Penyulang	Nama Bus Beban	Tegangan (kV)	Tegangan (p.u.)
Tanglad	Bus Tanglad_1	20,330992	1,016549
	Bus Tanglad_2	20,185520	1,009276
Bunga Mekar	Bus Bunga Mekar_1	18,667514	0,933375
	Bus Bunga Mekar_2	18,583686	0,929184
Ceningan	Bus Beban Ceningan_1	19,718483	0,985924
	Bus Beban Ceningan_2	19,300270	0,965013
	Bus Beban Ceningan_3	19,451869	0,972593
	Bus Beban Ceningan_4	19,503043	0,975152
	Bus Beban Ceningan_5	19,569439	0,978471
	Bus Beban Ceningan_6	19,611973	0,980598
	Bus Beban Ceningan_7	19,699564	0,984978
Karang Sari	Bus Beban Karang Sari_1	20,327935	1,016396
	Bus Beban Karang Sari_2	20,239950	1,011997
	Bus Beban Karang Sari_3	20,177372	1,008868
	Bus Beban Karang Sari_4	20,387802	1,019390
	Bus Beban Karang Sari_5	20,184393	1,009219
	Bus Beban Karang Sari_6	20,169865	1,008493
Ped	Bus Beban Ped_1	20,310228	1,015511
	Bus Beban Ped_2	19,761953	0,988097
	Bus Beban Ped_3	19,022038	0,951101
Lembongan	Bus Beban Lembongan_1	19,830753	0,991537
	Bus Beban Lembongan_2	19,738118	0,986905
	Bus Beban Lembongan_3	19,965801	0,998290

Berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 2, seluruh bus masih beroperasi dalam batas standar tegangan yang diizinkan, yaitu 0,90–1,05 p.u. Namun, terdapat beberapa bus yang mengalami penurunan tegangan hingga mendekati batas minimum standar. Nilai tegangan terendah terjadi pada Bus Bunga Mekar 1 sebesar 0,933375 p.u. (18,667514 kV) dan Bus Bunga Mekar 2 sebesar 0,929184 p.u. (18,583686 kV), yang menunjukkan kondisi penurunan tegangan yang sangat signifikan yaitu hampir mencapai batas minimum standar. Selain itu, beberapa bus pada penyulang lainnya juga terdapat penurunan tegangan yang lumayan. Yaitu pada penyulang ceningan yang paling terlihat penurunannya adalah pada bus beban ceningan 2 yaitu sebesar 0,965013 p.u. (19,300270 kV). Kemudian pada penyulang Ped yaitu pada bus beban ped 3 sebesar 0,951101 p.u. (19,022038 kV).



Gambar 3 Profil Tegangan Sebelum Penempatan DG

Penempatan Distributed Generation (DG) dengan Voltage Sensitivity Index

Hasil simulasi aliran daya (*load flow*) dan perhitungan *Voltage Sensitivity Index* (VSI) untuk menentukan tempat yang baik untuk penempatan DG. Pada hasil simulasi aliran daya ini yaitu asumsi awal untuk penempatan DG disetiap bus pada penyulang yang akan diteliti untuk mendapatkan hasil tegangan sebagai dasar dalam perhitungan VSI. Hasil dari perhitungan VSI ini bisa dilihat dari tabel dibawah ini:

Tabel 3 Hasil Nilai Voltage Sensitivity Index (VSI)

Nama Penyulang	Nama Bus	Nilai VSI
Bunga Mekar	Bunga Mekar 1	0,054147
	Bunga Mekar 2	0,053075
Ceningan	Ceningan 1	0,018868
	ceningan 2	0,013784
	ceningan 3	0,010198
	ceningan 4	0,010049
	ceningan 5	0,010099
	ceningan 6	0,010198
	ceningan 7	0,010344
Ped	Ped 1	0,030298
	Ped 2	0,026702
	Ped 3	0,018412

Pada Tabel 3, hasil nilai VSI tersebut maka dapat dilihat dari nilai VSI yang paling terkecil dari setiap penyulang yang akan menjadi lokasi optimal untuk ditempatkan DG. Hal ini karena semakin dekat nilai VSI dengan nol maka tegangan setiap bus di sistem menghampiri nilai referensi. Maka nilai VSI yang kecil performansi tegangannya lebih baik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk penyulang bunga mekar lokasi yang optimal adalah bus bunga mekar 2 dengan nilai VSI sebesar 0,053075 dan bus bunga mekar 1 yaitu sebesar 0,054147. Kemudian untuk penyulang Ceningan yaitu pada bus ceningan 4 sebesar 0,010049, ceningan 5 sebesar 0,010099, dan ceningan 6 yaitu sebesar 0,010198. Selanjutnya untuk yang terakhir adalah pada penyulang Ped yaitu pada bus ped 3 dengan nilai VSI sebesar 0,018412.

Profil Tegangan Setelah Penempatan Distributed Generation (DG)

Hasil dari penentuan lokasi yang optimal untuk penempatan DG kemudian dilakukan variasi kapasitas daya DG untuk dilakukan penempatan DG yang sebenarnya. Karena dalam kapasitas daya DG ini sangat berpengaruh untuk peningkatan profil tegangan, maka dari itu bisa dilihat pada tabel 4 setiap bus beban yang dipasang DG dengan besaran kapasitas dayanya, sebagai berikut:

Tabel 4 Hasil Akhir Persentase Kapasitas Daya DG

Nama Penyulang	Nama Bus	Persentase Variasi Kapasitas Daya	Total Daya (MW)
Bunga Mekar	Bunga Mekar 2	90%	0,658265
	Bunga Mekar 1	75%	0,658265
Ceningan	Ceningan 4	90%	0,526612
	Ceningan 5	90%	0,724091
	Ceningan 6	45%	0,747887
Ped	Ped 3	90%	1,18488

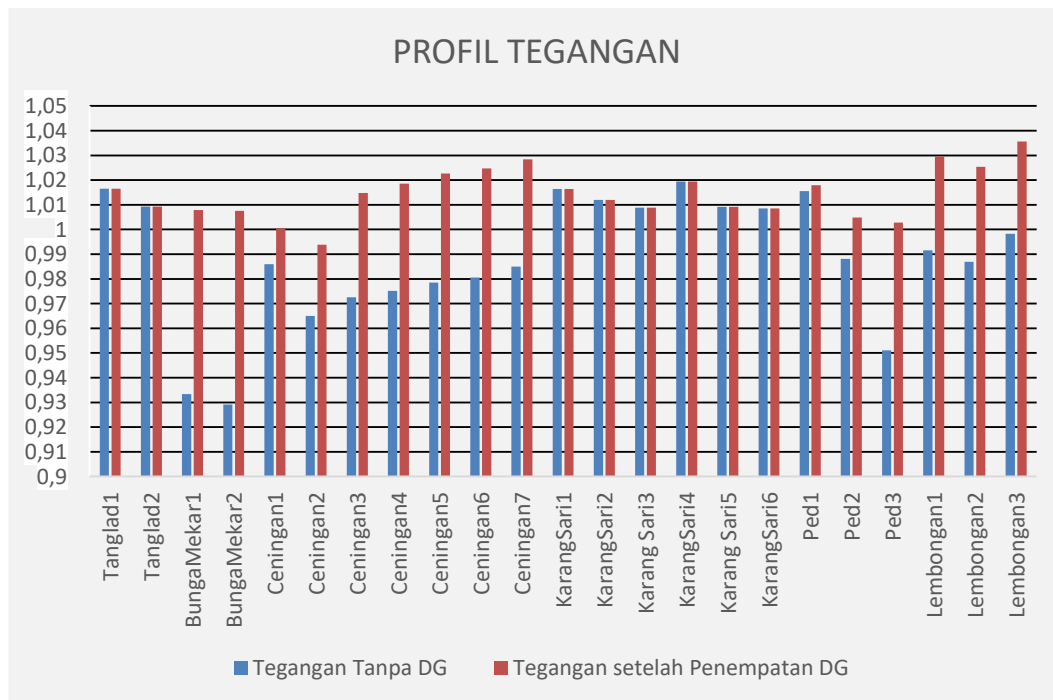
Berdasarkan Tabel 4.50 maka total kapasitas untuk penempatan DG yaitu sebesar 4,5 sesuai dengan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) tahun 2025-2034, yang direncanakan dengan pembangkit berupa PLTS di wilayah Nusa Penida sebesar 4,5 MW.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa setelah penempatan DG yang optimal pada lokasi tersebut dan juga dengan kapasitas yang sudah ditentukan maka kondisi profil tegangan pada tiga penyulang yang sebelumnya mengalami penurunan tegangan yang signifikan mengalami perbaikan lagi yang signifikan kembali ke batas nominal. Maka dari itu bisa dilihat pada Tabel 5 kondisi profil tegangan setelah penempatan DG sebagai berikut:

Tabel 5 Profil Tegangan Setelah Penempatan DG

Nama Penyulang	Nama Bus	Tegangan awal sebelum penempatan DG		Tegangan setelah penempatan DG	
		Tegangan (kV)	Tegangan (p.u.)	Tegangan (kV)	Tegangan (p.u.)
Tanglad	Tanglad 1	20,330992	1,016549	20,330992	1,016549
	Tanglad 2	20,185520	1,009276	20,185520	1,009276
Bunga Mekar	Bunga Mekar 1	18,667514	0,933375	20,156689	1,007834
	Bunga Mekar 2	18,583686	0,929184	20,151021	1,007551
Ceningan	Ceningan1	19,718483	0,985924	20,007725	1,000386
	Ceningan2	19,30027	0,965013	19,876727	0,993836
	Ceningan3	19,451869	0,972593	20,294717	1,014735
	Ceningan4	19,503043	0,975152	20,372198	1,018609
	Ceningan5	19,569439	0,978471	20,4524	1,02262
	Ceningan6	19,611973	0,980598	20,493847	1,024692
	Ceningan7	19,699564	0,984978	20,567467	1,028373
Karang Sari	Karang Sari1	20,327935	1,016396	20,327935	1,016396
	Karang Sari2	20,23995	1,011997	20,23995	1,011997
	Karang Sari3	20,177372	1,008868	20,177372	1,008868
	Karang Sari4	20,387802	1,01939	20,387802	1,01939
	Karang Sari5	20,184393	1,009219	20,184393	1,009219
	Karang Sari6	20,169865	1,008493	20,169865	1,008493
Ped	Ped1	20,310228	1,015511	20,357535	1,017876
	Ped2	19,761953	0,988097	20,097314	1,004865
	Ped3	19,022038	0,951101	20,056111	1,002805
Lembongan	Lembongan1	19,830753	0,991537	20,590692	1,029534
	Lembongan2	19,738118	0,986905	20,507511	1,025375
	Lembongan3	19,965801	0,99829	20,711461	1,035573

Dapat dilihat pada gambar 4 sebagai perbandingan yang cukup signifikan dengan dengan adanya grafik sebelum penempatan dan sesudah penempatan DG pada sistem distribusi 20kV Nusa Penida sebagai berikut:



Gambar 4 Profil Tegangan Setelah Penempatan DG

Pada Gambar 4.9 menunjukkan bahwa profil tegangan pada setiap bus beban pada semua penyulang kembali ke dalam batas nominalnya. Yaitu semua nya masih berada pada batas normal dalam range yaitu 0,90 – 1,05 p.u. sesuai dengan standar jatuh tegangan PLN. Hasil grafik diatas dapat dianalisa setelah optimasi penempatan DG dan juga kapasitas pada DG tersebut sehingga profil tegangan nya meningkat. Peningkatan tegangan diakibatkan setelah penempatan DG yang optimal dengan metode VSI di sistem distribusi, maka arus yang mengalir di gardu induk berkurang karena sebagian beban jaringan dipikul oleh DG maka jatuh tegangan berkurang. Dari hal tersebut maka bus pada penyulang bunga mekar yaitu bus bunga mekar 2 dan 1 mengalami peningkatan tegangan, yaitu untuk bus bunga mekar 2 yang sebelumnya (18,583686 kV) 0,929184 p.u. menjadi (20,151021 kV) 1,007551 p.u. dan juga pada bus bunga mekar 1 yaitu sebelumnya (18,667514 kV) 0,933375 p.u. menjadi (20,156689 kV) 1,007834 p.u. Kemudian pada bus beban pada penyulang ceningan dan juga penyulang ped mengalami peningkatan profil tegangan.

D. KESIMPULAN

- a. Berdasarkan hasil simulasi kondisi dasar (base case), profil tegangan pada sistem distribusi 20 kV menunjukkan bahwa terdapat beberapa bus beban yang mengalami penurunan tegangan akibat jarak yang jauh dari sumber dan pengaruh impedansi saluran. Nilai tegangan terendah terjadi pada penyulang bunga mekar yaitu pada bus bunga mekar 2 sebesar 0,929184 p.u. sehingga menjadi bus yang paling kritis terhadap kondisi undervoltage. Kemudian nilai tegangan terendah juga terjadi pada penyulang ceningan yaitu pada bus ceningan 2 yaitu sebesar 0,965013 p.u. Sementara itu pada penyulang ped juga terdapat nilai tegangan terendah yaitu pada bus ped 3 sebesar 0,951101 p.u. Kondisi ini menunjukkan bahwa profil tegangan sistem belum optimal dan memerlukan perbaikan untuk menjaga kualitas penyaluran energi listrik.
- b. Metode Voltage Sensitivity Index (VSI) berhasil diperlukan untuk penentuan lokasi optimal penempatan DG di sistem distribusi 20 kV. Berdasarkan hasil perhitungan VSI pada penyulang bunga mekar, bus bunga mekar 2 dan 1 memiliki nilai VSI paling kecil sehingga dipilih sebagai lokasi pemasangan DG. Pada penyulang ceningan terdapat hasil perhitungan VSI, bus ceningan 4, 5, dan juga 6 memiliki nilai VSI terkecil. Penyulang ped juga terdapat nilai VSI terkecil yaitu pada bus ped 3. Hasil ini menunjukkan bahwa metode VSI mampu mengidentifikasi bus yang paling sensitif terhadap perubahan tegangan dan memberikan kontribusi terbesar terhadap perbaikan profil tegangan sistem.
- c. Setelah dilakukan pemasangan DG berupa PLTS berkapasitas 4,5 MW pada bus optimal hasil metode VSI, profil tegangan sistem mengalami peningkatan pada seluruh bus beban disetiap penyulang yang terdapat penempatan DG. Penyulang bunga mekar memiliki tegangan minimum pada bus bunga mekar 2 sistem meningkat dari 0,929184 p.u jadi 1,007551 p.u. sementara pada bus bunga mekar 1 meningkat dari 0,933375 p.u. jadi 1,007834 p.u. Sedangkan untuk penyulang ceningan pada bus beban ceningan 4 meningkat dari 0,975152 p.u.jadi 1,018609 p.u. pada bus beban ceningan 5 meningkat dari 0,978471 p.u. jadi 1,02262 p.u. dan bus ceningan 6 yaitu 0,980598 p.u. jadi 1,024692 p.u. tidak hanya itu bus yang didekatnya juga terjadi peningkatan juga kedalam nilai nominal. Kemudian pada penyulang ped juga khusus nya di bus beban ped 3 mengalami peningkatan dari 0,951101 p.u. jadi 1,002805 p.u. dan terjadi sedikit peningkatan juga pada bus beban ped 1 dan 2. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penempatan DG di tempat yang tepat mampu memperkecil jatuh tegangan, dan

memperbaiki profil tegangan, serta menjaga tegangan operasi tetap berada dalam batas standar SPLN yaitu 0,90–1,05 p.u. Dengan demikian, penempatan DG secara optimal terbukti efektif dalam meningkatkan kinerja sistem distribusi 20 kV.

UCAPAN TERIMA KASIH

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

E. DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. FITRIANA, D. A. WICAKSONO, S. ARIYANI, and H. SETYAWAN, "Optimasi Penempatan dan Kapasitas DG untuk Memaksimalkan Loadability pada Penyulang Watu Ulo Jember," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 10, no. 3, p. 664, Jul. 2022, doi: 10.26760/elkomika.v10i3.664.
- [2] N. A. Musdir, A. Arief, and M. B. Nappu, "PENEMPATAN DISTRIBUTED GENERATION OPTIMAL MEMPERTIMBANGKAN REKONFIGURASI JARINGAN," *Jurnal EKSITASI*, vol. 1, no. 2, pp. 29–35, 2022.
- [3] D. Samodrawati and D. Sukasri, "Optimasi Kapasitas PLTS Hybrid Nusa Penida dengan Menggunakan Aplikasi Homer," *J. Teknol.*, vol. 12, no. 1, pp. 15–26, Nov. 2024, doi: 10.31479/jtek.v12i1.350.
- [4] M. Tri Agus Latifatul Huda, I. Made Wartana, and I. Budi Suslistiowati, "INTEGRASI PLTS PADA SISTEM DISTRIBUSI 20KV UNTUK MENINGKATKAN PROFIL TEGANGAN DAN MEREDUKSI RUGI-RUGI DAYA," 2024.
- [5] Awansah, O. Zebua, and H. Gusmedi, "Penentuan Kapasitas dan Lokasi Optimal dari Pembangkit Tersebar pada Jaringan Distribusi Penyulang Nila di Gardu Induk Metro," *JURNAL NASIONAL TEKNIK ELEKTRO*, vol. 7, no. 3, pp. 153–160, Nov. 2018, doi: 10.25077/jnte.v7n3.553.2018.
- [6] S. Nugroho, "PENENTUAN LOKASI OPTIMAL INTERKONEKSI DISTRIBUTED GENERATION PADA PENYULANG KBL09 MENGGUNAKAN ALGORITMA PARTICLE SWARM OPTIMIZATION," vol. 26, no. 2, pp. 85–94, 2025, [Online]. Available: <http://jurnalnasional.ump.ac.id/index.php/Techno>
- [7] Suprianto, "Pengaruh Distributed Generation Terhadap Tegangan Jatuh di Jaringan Distribusi 20 kV PT. PLN Rayon Kuala Simpang," *Journal of Electrical Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 140–148, Oct. 2018.
- [8] R. Harahap, S. A. Siregar, S. Hardi, and S. HS, "Analisis Sistem Jaringan Distribusi 20 KV Penyulang SB.02 Pada PT. PLN (Persero) ULP Sibolga Kota Menggunakan Metode Section Technique dan Failure Mode Effect Analysis (FMEA)," Jun. 2022.

- [9] F. J. Likadja, W. F. Galla, and D. C. Kase, "ANALISIS PENYAMBUNGAN PLTS OELPUAH 5 MWP KE SISTEM SALURAN UDARA TEGANGAN MENENGAH (SUTM) 20 KV PT. PLN UNIT LAYANAN KUPANG," *Jurnal Media Elektro*, vol. XI, no. 1, pp. 17–24, Apr. 2022, doi: 10.35508/jme.v0i0.6592.
- [10] T. Prasetyo *et al.*, "Penentuan Lokasi dan Kapasitas Distributed Generation Pada Sistem Distribusi Penyulang Semanu Dengan Flower Pollination Algorithm," vol. 9, no. 1, 2024, doi: 10.31851/ampere.
- [11] K. Ramadhan, B. Sirait, I. Sc, A. S. T. Zainal, and M. Eng, "STUDI PEMASANGAN DISTRIBUTED GENERATION (DG) TERHADAP PROFIL TEGANGAN PADA JARINGAN TEGANGAN MENENGAH (JTM) 20 kV PT. PLN (PERSERO) AREA PONTIANAK," 2022.
- [12] S. Yunus and I. Ismail, "Studi Penempatan dan Kapasitas Pembangkit Tersebar terhadap Profil Tegangan dan Rugi Saluran pada Saluran Marapalam," *JURNAL NASIONAL TEKNIK ELEKTRO*, vol. 7, no. 1, p. 8, Mar. 2018, doi: 10.25077/jnte.v7n1.462.2018.
- [13] A. D. Toding, I. Made Wartana, and A. U. Krismanto, "ANALISIS PENGARUH INTEGRASI PV TERHADAP KESTABILAN STATIS TEGANGAN PADA SISTEM KELISTRIKAN LOMBOKUDUL SESUAI KEBUTUHAN," 2024.
- [14] Y. Latumahina, A. Lomi, and A. U. Krismanto, "ANALISIS KESTABILAN FREKUENSI AKIBAT PENGINTEGRASIAN PLTS 20 MW PADA SISTEM KELISTRIKAN LOMBOK," 2023.
- [15] A. I. Zajuli, A. U. Krismanto, and I. B. Sulistiawati, "ANALISIS PROBABILISTIK PENGARUH INTEGRASI 0,5 MWp PLTS ITN MALANG TERHADAP PROFIL TEGANGAN SISTEM DISTRIBUSI SINGOSARI PENYULANG KARANGPLOSO," 2022.