

Optimasi Penempatan *Distributed generation* dan Kapasitor Bank Berbasis *Particle Swarm Optimization* untuk Meningkatkan Kinerja Sistem Distribusi Kota Sabang

Muhajir^{1*}, Suriadi², Melinda²

¹Teknik Elektro, Fakultas Ilmu Komputer dan Rekayasa, Universitas Multi Data Palembang, Jl. Rajawali No.14, 9 Ilir, Kec. Ilir Tim. II, Kota Palembang, Sumatera Selatan 30113.

² Teknik Elektro dan Komputer, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Jl. Teuku Nyak Arief, Kopedma Darussalam, Banda Aceh, 23111.

Penulis untuk Korespondensi/E-mail: muhajirelektr015@gmail.com

Abstract - The Sabang electricity system is an isolated grid system that relies on diesel power plants with long distribution lines, which can cause high losses and voltage drops. This study aims to find the optimal placement of Distributed Generation (DG) and capacitors using Particle Swarm Optimization (PSO) Method to reduce losses and voltage deviation, with a voltage limit of 5% on a 20 kV system. Simulation results show that without DG and capacitors, losses reach 26 kW at peak load and 24.4 kW at normal load, with low voltages at some buses. After optimization, the combined use of DG and capacitors reduces losses by 50.82% at normal load and 51.15% at peak load. The voltage profile also improves by about 200 - 350 V at each bus, bringing it closer to the nominal value of 20 kV. Compared with Genetic Algorithm (GA), PSO provides better results, with 0.45 - 3.79% lower active power losses and 0 - 7.40% lower reactive power losses. This proves that PSO is effective in improving the efficiency, voltage quality, and reliability of isolated distribution systems.

Abstrak - Sistem kelistrikan Sabang merupakan sistem jaringan terisolasi yang bergantung pada pembangkit listrik diesel dengan saluran distribusi yang panjang, dapat menyebabkan *losses* dan *drop voltage* yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan penempatan optimal Pembangkitan Terdistribusi (DG) dan kapasitor menggunakan Metode Optimasi Swarm Partikel (PSO) untuk mengurangi *losses* dan deviasi tegangan dengan batas tegangan 5% pada sistem 20 kV. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tanpa DG dan kapasitor, kerugian mencapai 26 kW pada beban puncak dan 24,4 kW pada beban normal, dengan tegangan rendah di beberapa bus. Setelah optimasi, penggunaan gabungan DG dan kapasitor mengurangi kerugian sebesar 50,82% pada beban normal dan 51,15% pada beban puncak. Profil tegangan juga meningkat sekitar 200 - 350 V di setiap bus, sehingga mendekati nilai nominal 20 kV. Dibandingkan dengan Algoritma Genetika (GA), PSO memberikan hasil yang lebih baik, dengan kerugian daya aktif 0,45 - 3,79% lebih rendah dan kerugian daya reaktif 0 - 7,40% lebih rendah. Hal ini membuktikan bahwa PSO efektif dalam meningkatkan efisiensi, kualitas tegangan, dan keandalan sistem distribusi terisolasi.

Keywords – *Distributed generation (DG)*, *Losses*, *Particle Swarm Optimization (PSO)*, *Renewable Energy*.

PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan vital yang menunjang berbagai aktivitas sosial dan ekonomi masyarakat. Dalam sistem tenaga listrik, proses penyaluran energi dari pembangkit ke konsumen melalui jaringan transmisi dan distribusi

selalu mengalami rugi-rugi daya akibat resistansi konduktor, transformator serta kondisi beban yang bervariasi [1]. Studi global menunjukkan bahwa rugi energi listrik secara rata-rata masih berada pada kisaran 10 - 15% dari total energi yang diproduksi, rugi terbesar terjadi di sisi distribusi [2]. Pada sistem distribusi bertegangan menengah, rugi daya dapat

mencapai 6 - 10% tergantung pada panjang jaringan dan ketidakseimbangan beban [3].

Sementara itu, penelitian terbaru di India menunjukkan bahwa meskipun rugi transmisi telah ditekan hingga sekitar 2,6%, rugi distribusi masih berkisar antara 12 - 28% [4]. Rugi-rugi ini tidak hanya menyebabkan pemborosan energi, tetapi juga menurunkan efisiensi sistem dan kualitas tegangan di sisi konsumen [5]. Salah satu solusi teknis yang efektif untuk menekan rugi daya adalah penempatan *Distributed generation* (DG) pada jaringan distribusi. *Distributed generation* merupakan sistem pembangkit berkapasitas kecil hingga menengah yang ditempatkan dekat dengan pusat beban [6]. Penerapan DG terbukti meningkatkan keandalan sistem, memperbaiki profil tegangan serta menurunkan rugi-rugi daya secara signifikan [7].

Penelitian yang dilakukan pada sistem IEEE 33-bus menunjukkan bahwa integrasi DG mampu mengurangi rugi daya hingga lebih dari 20% dibanding kondisi tanpa DG [8]. Selain itu, DG juga membantu mengurangi emisi karbon dan meningkatkan efisiensi penggunaan energi, terutama bila dikombinasikan dengan sumber energi terbarukan seperti surya dan biomassa [9]. Selain DG, kompensasi daya reaktif menggunakan kapasitor bank juga merupakan metode yang banyak digunakan untuk meningkatkan efisiensi sistem distribusi. Penempatan kapasitor secara optimal dapat menurunkan rugi-rugi daya pada konduktor dan memperbaiki faktor daya sistem [10]. Beberapa studi menunjukkan bahwa kombinasi DG dan kapasitor bank memberikan hasil yang lebih optimal dibanding penerapan salah satunya saja [11]. Pendekatan ini mampu menekan rugi daya hingga 30% dan menjaga profil tegangan dalam batas standar IEEE [12].

Penelitian sebelumnya pernah dilakukan menggunakan aplikasi ETAP menunjukkan bahwa pangaplikasian kapasitor dan DG dapat menurunkan rugi daya aktif dari 193,2 kW menjadi 188,7 kW dan rugi daya reaktif dari 139,3 kVAr menjadi 136,2 kVAr, sehingga penurunan yang dicapai relatif kecil, yaitu sekitar 2,3%. Hasil simulasi tersebut juga disertai dengan munculnya *critical report* yang menunjukkan bahwa DG mengalami kondisi *overload*, yang mengindikasikan bahwa penentuan kapasitas dan lokasi DG belum sepenuhnya optimal serta berpotensi menimbulkan masalah operasional pada sistem [13].

Dalam menentukan lokasi dan kapasitas optimal dari DG dan kapasitor bank, diperlukan metode optimasi. Berbagai algoritma telah dikembangkan, antara lain *Genetic Algorithm* (GA), *Ant Colony Optimization* (ACO), *Artificial Bee Colony* (ABC), serta *Particle Swarm Optimization* (PSO), dari berbagai metode tersebut, PSO menjadi salah satu yang paling banyak digunakan karena memiliki struktur sederhana, kecepatan konvergensi tinggi serta kemampuan menemukan solusi global dengan akurasi yang baik [14]. PSO juga mudah dimodifikasi menjadi varian adaptif dan multiobjektif, yang sangat cocok untuk permasalahan kompleks seperti optimasi multi-node dan multi-unit pada jaringan distribusi [15]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa PSO mampu menurunkan rugi daya sebesar 20 - 23,7% pada sistem IEEE 69-bus dan memperbaiki profil tegangan secara signifikan [16]. Versi *hybrid* PSO seperti PSO - GWO dan Improved PSO juga terbukti memberikan hasil yang lebih cepat dan stabil dibanding algoritma lain [17].

Khusus di Indonesia, penggunaan DG semakin relevan dengan arah kebijakan nasional menuju sistem tenaga berbasis energi terbarukan sebagaimana tercantum dalam RUPTL 2025 - 2034 milik PLN [18]. Wilayah-wilayah kepulauan seperti Pulau Sabang termasuk kategori sistem *isolated*, di mana pasokan listrik masih bergantung pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Berdasarkan data PLN, sistem kelistrikan Sabang memiliki kapasitas daya terpasang sebesar 7,45 MW dengan beban puncak 5,53 MW dan proyeksi kebutuhan listrik pada tahun 2025 diperkirakan mencapai 0,2 MVA [19]. Salah satu penyulang utama di wilayah ini adalah Penyulang Paya Seunara, dengan panjang jaringan mencapai 65 km dan terdiri dari 45 bus, sehingga berpotensi mengalami penurunan tegangan dan rugi daya yang tinggi. Menurut standar SPLN No. 72 Tahun 1987, batas maksimum penurunan tegangan yang diizinkan adalah 5% untuk jaringan tegangan menengah, 3% untuk trafo distribusi, dan 4% untuk tegangan rendah [20].

Dengan mempertimbangkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan pendekatan optimasi berbasis algoritma cerdas yang mampu menentukan lokasi dan kapasitas DG serta kapasitor secara optimal untuk mengurangi *losses* dan deviasi tegangan dengan batas tegangan 5% pada sistem 20 kV dengan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO). Metode (PSO) dipilih karena kemampuannya dalam menangani permasalahan nonlinier multi objektif dengan hasil yang efisien

dan akurat. Melalui penerapan PSO pada sistem distribusi Sabang, diharapkan diperoleh konfigurasi DG dan kapasitor yang mampu mengurangi rugi daya total, memperbaiki profil tegangan, serta meningkatkan keandalan sistem kelistrikan di wilayah terisolasi seperti Pulau Sabang.

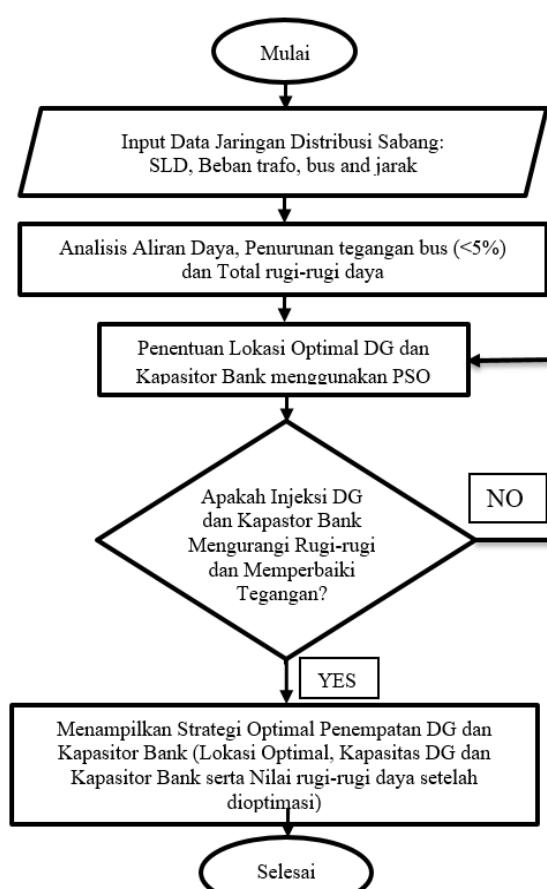
METODE

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Pulau Sabang, pada tahun 2023 bulan April tepatnya di wilayah Penyulang Paya Seunara. Pengambilan data penelitian menggunakan metode survei lapangan ke Unit Pelaksana Pelayanan Distribusi (UP2D) PLN. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada karakteristik wilayah yang memiliki jumlah trafo paling banyak dan jarak penyulang paling jauh.

Diagram Alir Penelitian

Tahapan atau alur dalam penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Gambar 1 menunjukkan diagram alir penelitian yang menggambarkan tahapan analisis penentuan lokasi

optimal penempatan *Distributed generation* (DG) dan kapasitor pada sistem distribusi menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO). Proses dimulai dengan input data sistem kelistrikan Sabang, yang meliputi *Single Line Diagram* (SLD), data transformator, beban, bus dan saluran distribusi. Selanjutnya dilakukan analisis aliran daya (*load flow analysis*) untuk memperoleh profil tegangan dan rugi daya pada setiap bus. Hasil analisis ini digunakan untuk menentukan penurunan tegangan (*voltage drop*) yang berada dalam rentang 1 - 5% dari tegangan nominal serta menghitung total rugi daya sistem. Tahapan berikutnya adalah penentuan lokasi optimal DG dan kapasitor menggunakan algoritma PSO, partikel-partikel mewakili posisi kandidat bus yang diuji berdasarkan fungsi objektif untuk meminimalkan rugi daya dan memperbaiki profil tegangan. Proses iterasi PSO terus dilakukan hingga kondisi terbaik tercapai yaitu ketika injeksi DG mampu mengurangi rugi daya dan meningkatkan tegangan sistem. Jika kondisi tersebut belum terpenuhi, maka algoritma mengulang proses optimasi hingga mendapatkan hasil yang konvergen. Setelah kondisi optimal tercapai, sistem mencetak strategi penempatan DG terbaik, baik dari sisi lokasi maupun kapasitas sebagai solusi akhir. Secara teoritis, pendekatan ini sesuai dengan konsep optimasi global berbasis *swarm intelligence*, PSO mampu mencari solusi optimum dengan konvergensi cepat dan akurasi tinggi dalam permasalahan non-linear seperti optimasi sistem distribusi, sehingga hasil yang diperoleh dapat meningkatkan efisiensi energi serta keandalan jaringan distribusi listrik.

Sistem Kelistrikan Sabang

Sistem kelistrikan di Sabang masih berstatus *isolated system 20 kV* yang berarti jaringan listrik di wilayah ini belum terhubung langsung dengan sistem interkoneksi utama Sumatra atau jaringan nasional [19]. Kondisi ini disebabkan oleh fakta bahwa Sabang masih sepenuhnya bergantung pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) sebagai sumber utama penyedia energi listrik. Berdasarkan data dari PLTD PLN Sabang, kapasitas daya terpasang mencapai 7,54 MW, sedangkan beban puncak tercatat sebesar 5,53 MW, menunjukkan adanya margin daya yang relatif kecil sehingga sistem cenderung rentan terhadap fluktuasi beban dan gangguan pasokan bahan bakar, untuk mendistribusikan daya ke seluruh wilayah, sistem kelistrikan Sabang memiliki beberapa penyulang (*feeder*) yang berbeda panjang dan cakupan wilayahnya, sebagaimana ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Penyulang Sabang

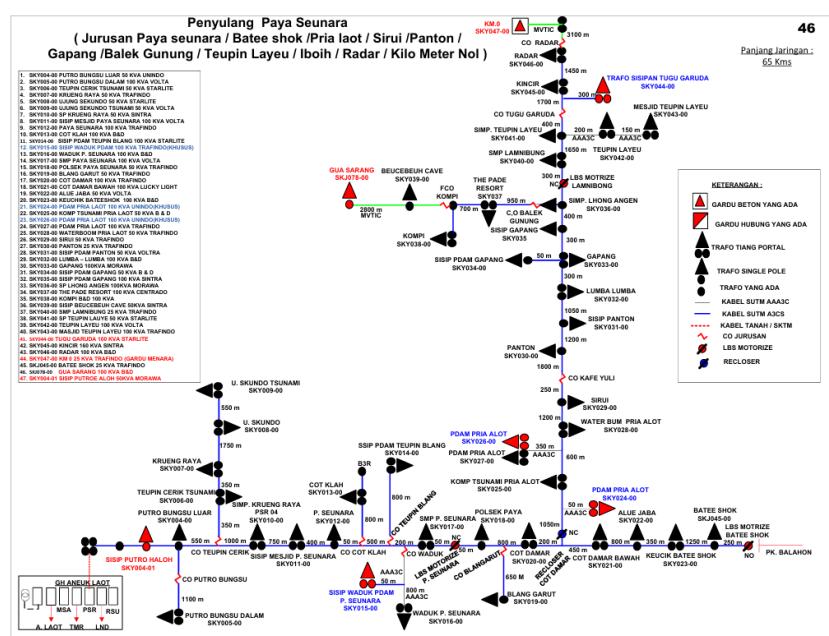
No	Penyulang	Panjang Penyulang (kms)
1	Aneuk Laot	12
2	Mina Seulawah Agung	15
3	Taman Ria	12
4	Paya Seunara	65
5	Lanud	15
6	Rumah Sakit Umum	20
7	Balohan	45
8	Anoi Itam	13,2

Tabel 1 memperlihatkan bahwa terdapat delapan penyulang utama, yaitu Aneuk Laot dengan panjang 12 km, Mina Seulawah Agung sepanjang 15 km, Taman Ria 12 km, Paya Seunara 65 km, Lanud 15 km, Rumah Sakit Umum 20 km, Balohan 45 km dan Anoi Itam sepanjang 13,2 km. Berdasarkan data tersebut dapat dilihat bahwa penyulang Paya Seunara merupakan saluran terpanjang dengan total panjang 65 km yang menunjukkan bahwa wilayah jangkauannya paling luas dibandingkan penyulang lainnya. Panjang saluran yang bervariasi ini sangat berpengaruh terhadap profil tegangan dan rugi daya (*losses*) di setiap jaringan, semakin panjang saluran maka rugi daya dan penurunan tegangan akan semakin besar akibat resistansi dan reaktansi saluran yang meningkat.

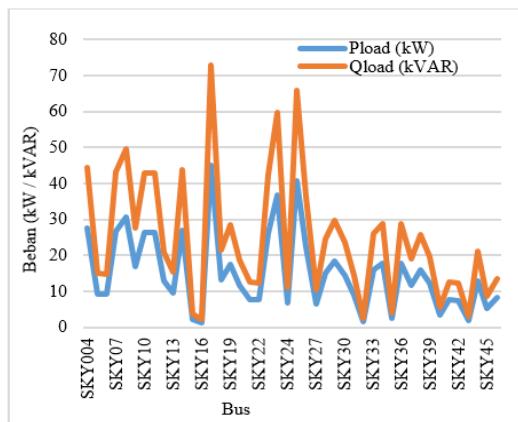
Secara teoritis, hal ini sesuai dengan hukum Ohm dan prinsip aliran daya, di mana panjang konduktor memengaruhi besar arus dan daya yang hilang sepanjang jaringan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap konfigurasi penyulang di Sabang menjadi langkah penting dalam analisis performa sistem distribusi, terutama dalam penelitian ini yang berfokus pada optimasi penempatan DG dan

kapasitor untuk mengurangi rugi daya dan memperbaiki profil tegangan pada sistem distribusi terisolasi di wilayah Sabang.

Sistem kelistrikan penyulang Paya Seunara memperoleh pasokan energi listrik dari Gardu Hubung (GH) Aneuk Laot yang berfungsi sebagai titik utama distribusi daya menuju wilayah Paya Seunara dan sekitarnya. Jarak antara GH Aneuk Laot dan pangkal penyulang Paya Seunara adalah sekitar 6 km, dengan konfigurasi jaringan tegangan menengah yang beroperasi pada 20 kV. Jalur penyulang ini membentang dari Desa Paya Seunara hingga mencapai titik Kilometer Nol Pulau Sabang yang merupakan ujung paling barat sistem distribusi di wilayah tersebut. Sepanjang lintasan ini, penyulang melayani berbagai beban konsumen seperti fasilitas umum, perumahan serta infrastruktur wisata yang tersebar di sepanjang rute. Karakteristik sistem distribusi ini memperlihatkan variasi impedansi dan beban yang signifikan akibat perbedaan panjang saluran serta jarak antar bus. Oleh karena itu, analisis terhadap data beban dan impedansi kabel pada penyulang Paya Seunara menjadi hal yang sangat penting dalam evaluasi performa sistem, terutama untuk mengidentifikasi potensi rugi daya (*losses*), penurunan tegangan (*voltage drop*), serta peluang penempatan *Distributed generation* (DG) dan kapasitor secara optimal. Data rinci mengenai beban dan impedansi kabel disajikan pada gambar 2 dan gambar 3 yang menjadi dasar dalam analisis aliran daya dan optimasi sistem distribusi di wilayah Paya Seunara.



Gambar 2. Single Line Diagram Penyulang Paya Seunara

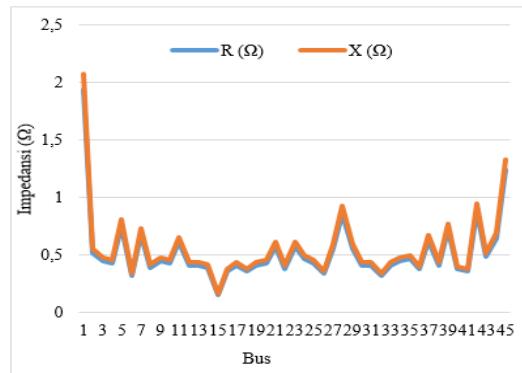


Gambar 3. Daya Beban Aktif dan Daya Beban Reaktif

Gambar 3 menunjukkan profil beban aktif (P_{load}) dan beban reaktif (Q_{load}) pada setiap bus sistem distribusi yang merepresentasikan variasi kebutuhan daya di sepanjang jaringan. Berdasarkan hasil simulasi, nilai beban aktif (P_{load}) berkisar antara 5 kW hingga 40 kW, sedangkan beban reaktif (Q_{load}) memiliki rentang yang lebih besar yaitu antara 10 kVAR hingga 75 kVAR. Terlihat bahwa pada beberapa bus, seperti SKY016 dan SKY024, nilai beban reaktif mencapai puncak sekitar 70-75 kVAR yang menunjukkan adanya konsumsi daya induktif tinggi akibat penggunaan peralatan seperti motor induksi atau transformator distribusi. Secara umum, nilai Q_{load} cenderung lebih tinggi daripada P_{load} , menandakan bahwa sistem memiliki faktor daya yang rendah, yang berdampak pada meningkatnya rugi daya (*losses*) serta *voltage drop* di sepanjang saluran distribusi. Berdasarkan teori sistem tenaga listrik, tingginya komponen daya reaktif menyebabkan penurunan efisiensi penyaluran daya dan penurunan tegangan pada bus yang jauh dari sumber. Oleh karena itu, profil beban pada gambar ini menggambarkan perlunya kompensasi daya reaktif, misalnya melalui pemasangan kapasitor dan *Distributed generation* (DG), guna memperbaiki faktor daya, mengurangi rugi daya serta meningkatkan stabilitas dan kualitas tegangan sistem distribusi secara keseluruhan.

Gambar 4 menunjukkan profil impedansi saluran yang terdiri dari resistansi (R) dan reaktansi (X) pada setiap bus dalam sistem distribusi. Berdasarkan hasil simulasi, nilai resistansi bervariasi antara $0,2 \Omega$ hingga $1,5 \Omega$, sedangkan reaktansi berada pada rentang $0,25 \Omega$ hingga $2,1 \Omega$. Nilai impedansi tertinggi terlihat pada bus 1 dengan reaktansi sekitar $2,1 \Omega$, sedangkan nilai terendah terdapat di sekitar bus 19 dengan R dan X mendekati $0,3 \Omega$. Secara umum, pola grafik menunjukkan bahwa reaktansi (X) memiliki nilai sedikit lebih besar dibandingkan

resistansi (R) di sebagian besar bus yang menunjukkan karakteristik saluran distribusi dominan induktif, sebagaimana umum terjadi pada sistem tenaga listrik berbasis penghantar tembaga atau aluminium.



Gambar 4. Resistansi dan Reaktansi

Nilai impedansi yang bervariasi di sepanjang jaringan dipengaruhi oleh panjang saluran, ukuran konduktor serta konfigurasi topologi jaringan. Berdasarkan teori sistem tenaga listrik, besarnya impedansi sangat berpengaruh terhadap rugi daya dan penurunan tegangan (*voltage drop*) pada saluran distribusi. Semakin tinggi nilai R dan X pada suatu segmen, semakin besar pula potensi terjadinya rugi energi dan penurunan tegangan di titik beban. Oleh karena itu, analisis profil impedansi seperti yang ditunjukkan pada gambar ini penting untuk menentukan lokasi optimal penempatan DG atau kapasitor, guna memperkecil rugi daya, meningkatkan efisiensi penyaluran daya, serta menjaga kestabilan tegangan di seluruh sistem distribusi.

Tabel 2. Data Impedansi Penyulang Paya Seunara

Luas Penampang	Impedansi Urutan Positif (Ω)	Impedansi urutan Nol (Ω)
16	$2,0161 + j 0,403$	$2,1641 + j 1,6911$
25	$1,2903 + j 0,3895$	$1,4384 + j 1,6770$
35	$0,9217 + j 0,3790$	$1,0697 + j 1,6665$
50	$0,6452 + j 0,3678$	$0,7932 + j 1,6553$
70	$0,4608 + j 0,3572$	$0,6088 + j 1,6447$
95	$0,3096 + j 0,3449$	$0,4876 + j 1,6324$
120	$0,2688 + j 0,3376$	$0,4168 + j 1,6324$
150	$0,2162 + j 0,3305$	$0,3631 + j 1,6180$
185	$0,1744 + j 0,3239$	$0,3224 + j 1,6114$
240	$0,1344 + j 0,3158$	$0,2824 + j 1,6034$

Penyulang Paya Seunara menggunakan kabel penghantar SUTM berjenis *All Alloy Aluminium Conductor* (AAAC) dengan ukuran NYY 4×70 mm. Kemudian penyulang Paya Seunara memiliki 45 trafo dengan total daya sebesar 765,8 kVA yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Impedansi Penyulang Paya Seunara

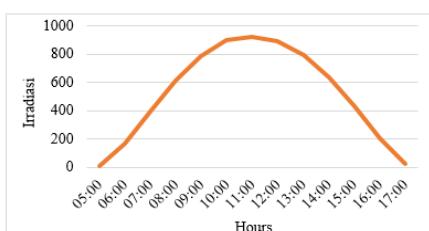
No	Kode Trafo	Beban Trafo (kVA)	No	Kode Trafo	Beban Trafo (kVA)
1	SKY004	20.864	24	SKY026	48.4
2	SKY004	8.955	25	SKY027	32.024
3	SKY005	10.054	26	SKY028	21.259
4	SKY006	17.224	27	SKY029	9.175
5	SKY007	21.821	28	SKY030	8.193
6	SKY008	7.713	29	SKY031	14.441
7	SKY009	2.26	30	SKY032	18.869
8	SKY010	15.778	31	SKY033	9.218
9	SKY011	9.285	32	SKY034	31.414
10	SKY012	53.636	33	SKY036	20.182
11	SKY013	18.053	34	SKY037	43.849
12	SKY014	1.586	35	SKY038	36.563
13	SKY015	13.829	36	SKY039	31.815
14	SKY016	0	37	SKY040	15.565
15	SKY017	2.781	38	SKY041	10.908
16	SKY018	14.444	39	SKY042	31.229
17	SKY019	11.248	40	SKY043	0
18	SKY020	14.507	41	SKY044	31.956
19	SKY021	0	42	SKY045	32.799
20	SKY022	15.255	43	SKY046	0.458
21	SKY023	0	44	SKY047	6.369
22	SKY024	26.755	45	SKJ045	5.952
23	SKY025	19.141		Total	765.8

Nilai Resistansi dan Reaktansi pada Z1 didapatkan dari perhitungan berikut (1)(2).

$$R = \frac{6000}{1000} \text{ km} \times 0,4608 \frac{\text{ohm}}{\text{km}} = 2,76480 \text{ ohm} \quad (1)$$

$$X = \frac{6000}{1000} \text{ km} \times 0,3572 \frac{\text{ohm}}{\text{km}} = 2,14320 \text{ ohm} \quad (2)$$

Dalam tahap integrase DG, terlebih dahulu harus diketahui nilai irrradiasi pada daerah tersebut. Fungsinya adalah untuk mengetahui besarnya daya yang bisa dihasilkan oleh panel surya yang berfungsi untuk dapat menurunkan *losses* yang terjadi. Nilai radiasi pada penelitian ini bersumber dari NASA. Data radiasi dapat dilihat di gambar 5.



Gambar 5. Profil Harian Intensitas Radiasi Matahari Pada Pulau Sabang

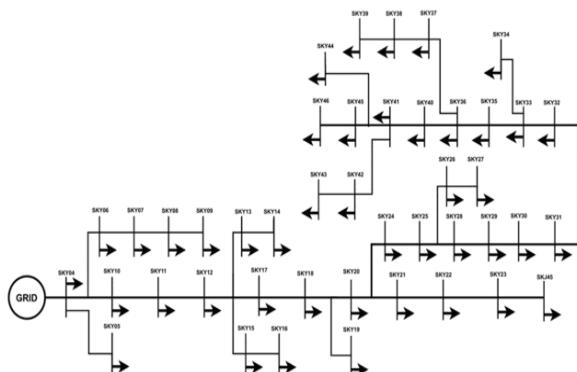
Gambar 5 menunjukkan profil intensitas radiasi matahari (*irradiance*) terhadap waktu dalam satu hari yang menggambarkan potensi energi surya sebagai sumber daya untuk sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Data *irradiance* ini diperoleh dari NASA POWER Data Access Viewer yang menyediakan data iklim dan energi berbasis satelit dengan resolusi tinggi. Berdasarkan hasil pengolahan data, nilai *irradiance* mulai meningkat sejak pukul 06.00 dengan intensitas sekitar 100 W/m², kemudian mencapai puncak sekitar 920 W/m² pada pukul 11.00 - 12.00, dan menurun kembali hingga mendekati 0 W/m² pada pukul 17.00. Pola ini mencerminkan karakteristik radiasi matahari harian di wilayah tropis, intensitas maksimum terjadi saat posisi matahari berada mendekati zenit. Secara teoritis, besarnya *irradiance* dipengaruhi oleh sudut elevasi matahari, kondisi atmosfer, serta tingkat tutupan awan (*cloud cover*). Peningkatan *irradiance* dari pagi hingga tengah hari disebabkan oleh bertambahnya sudut datang sinar matahari, sedangkan penurunan setelah tengah hari terjadi akibat penurunan sudut tersebut dan meningkatnya hamburan atmosfer. Pola radiasi ini menjadi dasar penting dalam perencanaan dan optimasi kapasitas sistem PLTS, karena menentukan efisiensi konversi energi surya dan potensi keluaran daya maksimum pada periode siang hari, khususnya untuk strategi manajemen energi dan perancangan sistem penyimpanan daya.

Desain Single Line Diagram (SLD) Penyulang Paya Seunara

Setelah seluruh data pendukung terkumpul melalui tahapan studi literatur dan survei lapangan ke Unit Pelaksana Pelayanan Distribusi (UP2D) PLN, tahap berikutnya adalah melakukan proses perancangan *Single Line Diagram* (SLD) penyulang Paya Seunara menggunakan perangkat lunak ETAP. Proses ini bertujuan untuk memperoleh representasi sistem distribusi tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis yang menggambarkan hubungan antar elemen utama sistem, seperti sumber, saluran transmisi, transformator dan beban. Data masukan yang digunakan meliputi nilai resistansi (R) serta impedansi (X) pada setiap segmen kabel distribusi, yang diperoleh dari hasil perhitungan teknis maupun referensi spesifikasi pabrikan. Nilai-nilai tersebut sangat penting karena menentukan rugi daya dan kestabilan tegangan pada sistem distribusi.

Selanjutnya, dilakukan penginputan data trafo yang mencakup kapasitas daya terpasang (kVA) dan rating tegangan, di mana tegangan primer ditetapkan sebesar 20 kV dan tegangan sekunder sebesar

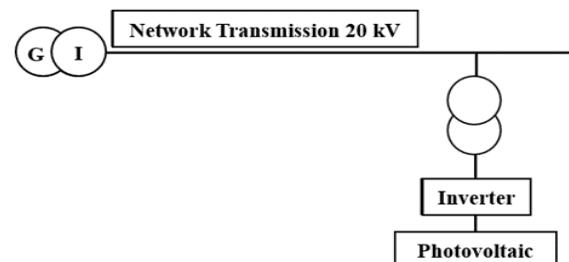
380/220 V sesuai dengan standar sistem distribusi menengah PLN. Selain itu, data beban untuk masing-masing trafo juga dimasukkan untuk menggambarkan kondisi aktual penyulang Paya Seunara. Hasil akhir dari tahap ini adalah rancangan *Single Line Diagram* (SLD) yang menggambarkan konfigurasi sistem distribusi secara menyeluruh, termasuk titik-titik penyulang, posisi transformator distribusi, serta aliran daya antar komponen utama. Diagram ini menjadi dasar untuk analisis teknis lebih lanjut seperti perhitungan rugi daya, evaluasi kestabilan sistem, dan kajian keandalan jaringan distribusi listrik di wilayah tersebut.



Gambar 6. *Single Line Diagram* Penyulang Paya Seunara

Gambar 6 menunjukkan rancangan *Single Line Diagram* (SLD) penyulang Paya Seunara. Diagram ini merepresentasikan aliran daya dari sumber utama (GRID) menuju titik-titik beban yang tersebar pada jaringan distribusi menengah hingga ke tingkat konsumen akhir. SLD ini menggambarkan konfigurasi sistem distribusi dari sisi primer 20 kV yang diturunkan melalui transformator distribusi ke sisi sekunder 380/220 V. Secara topologis, sistem penyulang Paya Seunara ini memiliki struktur radial bercabang, suplai energi berasal dari satu sumber utama dan menyebar melalui beberapa percabangan menuju beban di berbagai lokasi. Konfigurasi ini umum digunakan dalam jaringan distribusi karena memiliki desain yang sederhana, biaya investasi relatif rendah dan mudah dioperasikan, namun demikian, analisis lebih lanjut dengan ETAP diperlukan untuk mengevaluasi rugi daya (*losses*), drop tegangan, serta keandalan suplai daya pada setiap cabang jaringan. Penamaan bus seperti SKY10, SKY17, SKY24, dan seterusnya merepresentasikan titik-titik transformator distribusi yang menyuplai daerah konsumen tertentu di wilayah Paya Seunara.

Distributed Generation (DG)



Gambar 7. Diagram Injeksi *Distributed generation*

Struktur sistem interkoneksi *Distributed Generation* (DG) terhadap jaringan distribusi dapat dilihat pada gambar 7. Diagram tersebut menggambarkan konfigurasi umum hubungan pembangkit DG (*photovoltaic*), yang dihubungkan ke jaringan distribusi 20 kV melalui inverter. Pembangkit DG akan disebar dan dialokasikan sepanjang jaringan distribusi serta dikondisikan sesuai kondisi lapangan. Dalam pemasangan DG, ada 2 aspek yang harus diperhatikan antara lain *penetration* dan *location*.

Penetration

Penetrasi DG dapat dirumuskan sebagai perbandingan kapasitas DG terhadap total kebutuhan beban pada jaringan, seperti yang dijelaskan pada persamaan 3.

$$\text{Total DG Capacity} = \frac{\text{DG Penetration}}{\text{total load capacity}} \quad (3)$$

Harga penetrasi DG yang telah diinjeksi yaitu sebesar 25%, sehingga didapatkan total kapasitas DG sebesar 153 kVA. Pada prinsipnya penetrasi DG dapat dimaksimalkan menjadi 100%, tetapi akan mengakibatkan masalah seperti *over-voltage*. DG yang bersumber dari PLTS akan diinjeksi kepada penyulang Paya Seunara yaitu sebesar 153 KVA.

Tabel 4. Spesifikasi *Distributed generation* Panel Array

	Parameters	Value
Solar Panel	Power	220,9 W
	Voltage at Max Power (Vmax)	29,61 V
	Open Circuit Voltage (Voc)	36,24 V
	Current at Max Power	7,46 A
	Short Circuit Current	8,09 A
	Fill Factor (%)	75,34%
	No of Panels in series	7
Rating Array	No of Panels in Parallel	108
	Total Power Generation (kW)	196,7 kW
	Total Voltage (Vdc)	394,93 VDC

Parameters	Value
Total Current (Adc)	440,14 ADC
Inverter	
Input Voltage (Vdc)	394,93 VDC
Output Voltage (kV)	400 V
Rating (KVA)	177 KVA

Pada tabel 4 dapat dilihat bahwa daya dari keluaran satu modul surya sebesar 220,9 Watt, untuk menginjeksi ke penyulang Paya Seunara maka dibutuhkan perancangan PV array, dimana array adalah gabungan dari beberapa PV. Pada perancangan array ini PV yang dirangkai secara seri ada 13 unit dan 59 unit PV yang dirangkai secara parallel untuk mencapai kapasitas 153 kVA. Daya yang diinjeksi pada bus menggunakan persamaan (4-7) [20].

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| (G_{ik} \cos \theta_{ik} + D_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (4)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| (G_{ik} \sin \theta_{ik} + D_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (5)$$

$$P_{Gi} = P_{Di} \quad (6)$$

$$Q_{Gi} = Q_{Di} \quad (7)$$

Dimana.

P_i : Injeksi daya aktif pada bus i (W)

Q_i : Injeksi daya reaktif pada bus i (VAR)

P_{Gi} : Active power generation at i bus (W)

P_{Qi} : Reactive power generation at i bus (W)

P_{Di} : Active power load at i bus (W)

Q_{Di} : Reactive power load at i bus (W)

V_i : Voltage magnitude at bus i (W)

V_k : Voltage magnitude at bus k (W)

Daya DG yang diinjeksi ke Bus PLN tergantung dari radiasi matahari yang dicapai. Daya yang akan diinjeksi dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel. 5 Daya PV Array Terhadap Nilai Radiasi

Jam	Radiasi (W/m ²)	Daya Array PV (kW)
7.00	400	62,97
8.00	625	101,43
9.00	815	134,63
10.00	949	158,34
11.00	1005	168,31
12.00	982	164,21
13.00	880	146,1
14.00	710	116,21
15.00	485	77,37

Location

Penempatan DG bersifat variatif, untuk menyederhanakannya, penempatan DG diklasifikasikan 3 tempat yaitu (1) Bus di bagian hulu dari penyulang (2) Bus di bagian tengah penyulang (3) Bus di bagian hilir penyulang [21]

Penempatan *Distributed generation* (DG) dan kapasitor secara optimal sangat penting untuk mengurangi rugi daya dan meningkatkan profil tegangan pada sistem distribusi, terutama di jaringan radial seperti feeder Paya Seunara, kota Sabang. Dalam penelitian ini, Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) banyak digunakan karena kemampuannya menemukan solusi global yang efisien untuk masalah optimasi non-linear dan multi-objektif [16]. Mekanisme kerja PSO dimulai dengan inisialisasi sejumlah partikel yang merepresentasikan kemungkinan penempatan DG dan kapasitor pada bus sistem distribusi. Setiap partikel memiliki posisi dan kecepatan yang diperbarui berdasarkan pengalaman terbaik individu (*personal best*, pbest) dan terbaik global (*global best*, gbest). Evaluasi dilakukan melalui analisis aliran daya untuk menghitung fungsi objektif yang meminimalkan rugi daya total dan deviasi tegangan, dengan batasan tegangan bus 0.95 - 1.05 p.u. dan kapasitas saluran. Proses iteratif ini berlanjut hingga konvergen pada konfigurasi terbaik yang memberikan keseimbangan optimal antara pengurangan rugi daya dan peningkatan kualitas tegangan.

$$v_i^{k+1} = w v_i^k + c_1 r_1 (pbest_i - s_i^k) + c_2 r_2 (gbest - s_i^k) \quad (8)$$

$$s_i^{k+1} = s_i^k + V_i^{k+1} \quad (9)$$

Persamaan 8 dan 9 merupakan persamaan pembaruan kecepatan dan posisi partikel pada algoritma PSO, untuk mengimplementasikan persamaan 8 dan 9, diperlukan beberapa data input dan parameter antara lain posisi awal partikel (s_i^0), kecepatan awal (v_i^0), nilai $pbest_i$ dan $gbest_i$, parameter inersia (ω), koefisien akselarasi c_1 dan c_2 , bilangan acak r_1 dan r_2 , jumlah partikel, batas posisi dan kecepatan, serta kriteria penghentian iterasi. Data-data ini menjadi dasar perhitungan *load flow* dan evaluasi fungsi objektif. PSO dapat menentukan lokasi dan ukuran optimal DG serta kapasitor pada bus hulu, tengah dan hilir sistem. Rincian lengkap parameter dan data yang digunakan dalam simulasi PSO ditunjukkan pada tabel 6.

Tabel. 6 Input Nilai ke PSO

Category	Symbol / Parameter	Description	Unit / Range	Source
Line Data	R_{ij}	Resistance between bus i and j (for loss calculation I^2R)	Ω or Ω/km	PLN
	X_{ij}	Reactance between bus i and j (for voltage drop analysis)	Ω or Ω/km	PLN
	l_{ij}	Line length between bus i and j	km	PLN
Bus Data	I_{max}	Maximum current capacity of conductor	A	PLN
	$P_{load,i}$	Active power demand at bus i	kW	PLN
	$Q_{load,i}$	Reactive power demand at bus i	kVAr	PLN
	PF_i	Power factor at each bus	-	PLN
	Zone	Feeder section (upstream, middle, downstream)	-	Based on bus location
Transformer Data	S_{rated}	Transformer capacity	kVA	PLN
	$Z_t = R_t + jX_t$	Transformer impedance (in %)	%	PLN
	$V_{prim/sec}$	Primary and secondary voltages	kV	PLN
Decision Variables (DG & Capacitor)	b_{DG}	DG power output (to be optimized)	kW	PSO Output
	P_{DG}	Bus location for capacitor placement	Bus index	Range 50–500
	Q_{cap}	Capacitor reactive power (to be optimized)	kVAr	Range 50 - 400
PSO Algorithm Parameters	b_{cap}	Bus location for capacitor placement	Bus index	PSO Output
	N	Number of particles (population size)	30–50	Set by user
	k_{msx}	Maximum number of iterations	100–200	Set by user
	ω	Inertia weight	0.9 → 0.4	
	C_1, C_2	Cognitive and social acceleration coefficients	1.5 - 2.5	
Objective Function	r_1, r_2	Random numbers generated per iteration	0 - 1	
	v_{msx}	Maximum velocity (as % of variable range)	10 - 20%	User defined
	ϵ	Convergence threshold	$10^{-4} - 10^{-5}$	Stop criterion
	f $= \omega_P P_{loss}$ $+ \omega_V \sum V_i - 1 $	$ V_i - 1 $		Objective to minimize total power loss and voltage deviation
	$P_{loss} = \sum I_{ij}^2 \times R_{ij}$	Total rugi daya aktif sistem	kW	Hasil Analisis load flow
	V_i $\omega p, \omega V$	Tegangan bus hasil iterasi PSO Weighting factors for loss and voltage	p.u. 0.6 / 0.4	Simulasi PSO User defined

Berdasarkan tabel 5 mekanisme kerja PSO sebagai berikut. Nilai R, X, dan data beban (P, Q) dari PLN digunakan untuk menghitung aliran daya (*loadflow*) dan rugi daya.

$$P_{loss} = \sum I_{ij}^2 \times R_{ij} \quad (10)$$

Hasil *load flow* tiap iterasi dipakai untuk mengevaluasi fungsi objektif.

$$f = \omega_P P_{loss} + \omega_V \sum |V_i - 1| \quad (11)$$

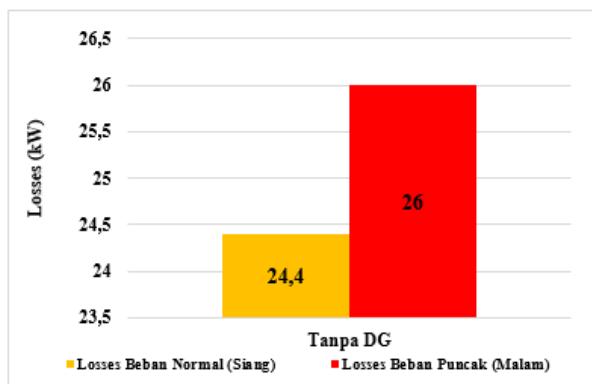
Parameter PSO seperti ω , $c1$, $c2$, $r1$, $r2$ digunakan dalam pembaharuan posisi dan kecepatan seperti pada persamaan 8 dan persamaan 9. Nilai *fitness* terkecil menunjukkan konfigurasi paling optimal

menghasilkan lokasi DG dan kapasitor di bus hulu, tengah, atau hilir yang memberikan rugi daya minimum dan profil tegangan terbaik.

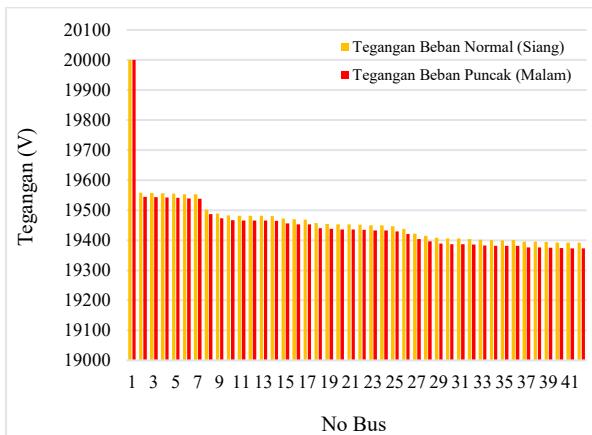
HASIL DAN PEMBAHASAN

Load Flow Penyulang Paya Seunara

Setelah dilakukan *running load flow* penyulang Paya Seunara pada aplikasi ETAP, didapatkan hasil berupa *losses* dan profil tegangan yang terdapat pada penyulang Paya Seunara.

Gambar 8. Data *Losses* Penyulang Paya Seunara

Gambar 8 menunjukkan data rugi daya (*losses*) pada penyulang Paya Seunara dengan kondisi tanpa DG dan kapasitor, total rugi daya (*losses*) mencapai 26 kW untuk beban puncak dan 24,4 kW untuk beban normal. Nilai *losses* ini terjadi karena adanya rugi-rugi daya pada konduktor akibat tahanan listrik yang dilalui oleh arus serta faktor lain seperti panjang saluran distribusi yang cukup jauh dan jatuh tegangan pada jaringan. Semakin besar arus yang mengalir/semaikn panjang saluran distribusi, maka rugi daya yang ditimbulkan juga semakin tinggi.



Gambar 9. Data Profil Tegangan Penyulang Paya Seunara

Gambar 9 menunjukkan profil penurunan tegangan pada seluruh bus sistem untuk kondisi beban normal (siang) dan beban puncak (malam). Pada bus 1, tegangan masih berada pada nilai nominal sebesar 20 kV, kemudian mengalami penurunan bertahap seiring bertambahnya nomor bus hingga mencapai nilai terendah pada bus-bus ujung jaringan. Berdasarkan data pada gambar 9, untuk kondisi siang hari tegangan terendah mencapai sekitar 19.391,9 V, sedangkan pada malam hari turun lebih jauh hingga sekitar 19.373 V. Hal ini menegaskan bahwa kondisi beban malam hari menyebabkan penurunan tegangan yang lebih besar dibandingkan

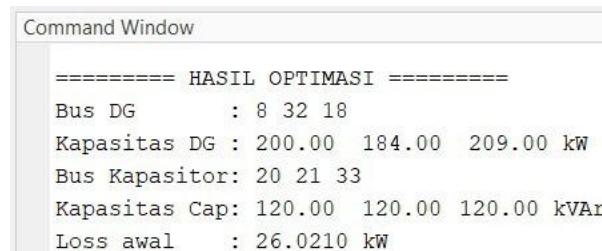
beban siang, karena arus yang mengalir di jaringan meningkat sehingga rugi tegangan pada saluran juga semakin besar. Secara kuantitatif, total persentase *drop voltage* pada beban malam hari mencapai 118,75%, sedangkan pada beban siang hari sebesar 115,05%. Nilai ini menunjukkan bahwa akumulasi penyimpangan tegangan dari nilai nominal pada kondisi malam hari lebih besar dibandingkan siang hari. Dengan kata lain, sistem berada pada kondisi operasi yang lebih berat saat beban puncak, sehingga kualitas tegangan semakin menurun. Hal ini terlihat konsisten pada grafik gambar 8, batang berwarna merah (beban puncak/malam) hampir di seluruh bus selalu berada di bawah batang kuning (beban normal/siang).

Pola penurunan tegangan yang cenderung monoton dari bus awal ke bus akhir juga mengindikasikan karakteristik sistem distribusi radial, bus yang semakin jauh dari sumber mengalami drop tegangan yang semakin besar akibat akumulasi impedansi saluran dan kenaikan arus beban. Perbedaan nilai *undervoltage* total antara siang dan malam sebesar sekitar 3,7% (118,75% – 115,05%) menegaskan bahwa peningkatan beban memberikan dampak signifikan terhadap kualitas tegangan sistem. Dengan demikian, grafik ini tidak hanya memperlihatkan adanya masalah *drop voltage* di hampir seluruh bus, tetapi juga memvalidasi secara kuat bahwa kondisi beban puncak (malam hari) merupakan kondisi kritis yang membutuhkan strategi perbaikan tegangan, seperti penempatan kapasitor, DG, atau kombinasi keduanya, untuk meningkatkan profil tegangan dan menjaga keandalan sistem.

Penentuan Lokasi Optimal DG dan Kapasitor Bank menggunakan PSO

Penentuan lokasi optimal DG dan kapasitor dilakukan menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO), setelah nilai rugi daya dan profil tegangan sistem diperoleh dari perhitungan aliran daya dengan metode *Backward/Forward Sweep* (BFS). Setiap partikel PSO merepresentasikan kombinasi lokasi bus dan kapasitas DG dan kapasitor sebagai solusi kandidat. Parameter PSO ditetapkan dengan $\omega = 0,7$, $c_1 = 1,5$, dan $c_2 = 1,5$ untuk menjaga keseimbangan antara eksplorasi dan eksplorasi solusi, jumlah partikel sebanyak 40, serta iterasi maksimum 80, dimana nilai fungsi objektif telah menunjukkan konvergensi sebelum iterasi maksimum tercapai. Analisis sensitivitas dilakukan dengan memvariasikan ω pada rentang 0,4 - 0,9 dan c_1 serta c_2 pada rentang 1-2. Hasilnya menunjukkan bahwa perubahan

parameter hanya mempengaruhi kecepatan konvergensi, sedangkan lokasi optimal DG tetap konsisten berada di Bus 8, Bus 19, dan Bus 32. Hal ini membuktikan bahwa solusi yang diperoleh bersifat stabil dan robust terhadap variasi parameter PSO.



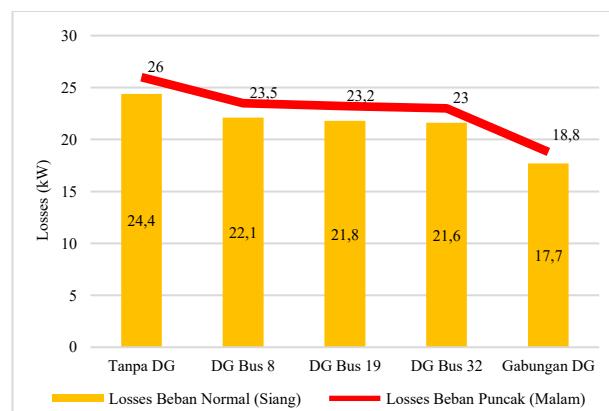
Gambar 10. Output Simulasi PSO pada MATLAB

Berdasarkan hasil output simulasi PSO pada MATLAB (Gambar 10), lokasi optimal penempatan tiga unit DG diperoleh pada Bus 8, Bus 19 dan Bus 32. Pemilihan ketiga bus tersebut menunjukkan bahwa PSO mampu mengidentifikasi titik-titik yang secara teknis paling efektif dalam menurunkan arus saluran, mengurangi rugi daya aktif, serta memperbaiki profil tegangan, khususnya pada bus-bus yang memiliki jarak relatif jauh dari slack bus dan akumulasi beban yang signifikan. Selain itu, kinerja PSO dibandingkan dengan *Genetic Algorithm* (GA) menggunakan data dan fungsi objektif yang sama. Hasil menunjukkan bahwa PSO mencapai nilai rugi daya minimum dengan iterasi lebih sedikit dan waktu komputasi yang lebih singkat serta konvergensi yang lebih stabil dibandingkan GA, sehingga PSO dinilai lebih efektif untuk penentuan lokasi dan kapasitas optimal DG dan kapasitor bank pada sistem distribusi radial.

Untuk evaluasi lebih lanjut, dilakukan enam skenario pengujian, yaitu (1) Penempatan masing-masing DG dan kapasitor pada bus 8, (2) Penempatan masing-masing DG dan kapasitor pada bus 19, (3) Penempatan masing-masing DG dan kapasitor pada bus 32, (4) Penempatan DG pada bus 8, 19 dan 32, (5) Penempatan Kapasitor pada bus 8, 19 dan 32, (6) Penempatan Gabungan DG dan Kapasitor pada bus 8, 13 dan 32.

Integrasi *Distributed generation* ke Jaringan

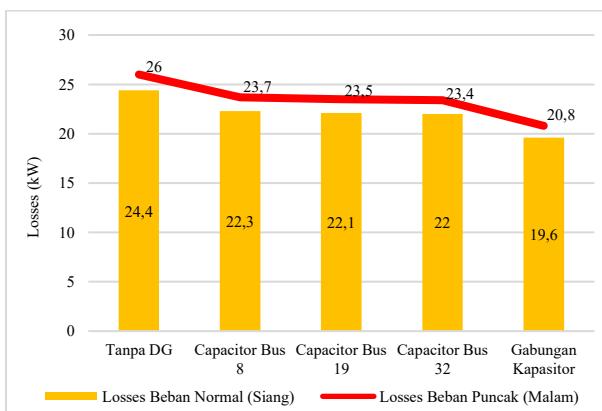
DG dan kapasitor yang di integrasikan pada masing-masing bus berfungsi untuk mendapatkan perbedaan nilai *losses* dan tegangan pada penyulang. Hasil perbedaan studi kasus 1 sampai 3 nilai *losses* tiap-tiap bus yang d'integrasikan DG dapat dilihat pada gambar 11.



Gambar 11. Perbandingan *losses* dengan Beban Berbeda Dan Penempatan DG Pada Bus Berbeda

Gambar 11 menunjukkan perbandingan *losses* sistem pada kondisi beban normal (siang) dan beban puncak (malam) untuk beberapa skenario penempatan DG. Pada kondisi tanpa DG, *losses* siang tercatat sebesar 24,4 kW, sedangkan pada malam hari meningkat menjadi 26 kW, atau lebih tinggi 1,6 kW (sekitar 6,56%). Ketika DG ditempatkan di Bus 8, *losses* siang turun menjadi 20,6 kW yang berarti terjadi penurunan sebesar 15,57% menjadi 3,8 kW dibandingkan kondisi tanpa DG, sedangkan *losses* malam turun menjadi 22 kW, berkurang 4 kW (15,38%). Pada penempatan DG di Bus 19, *losses* siang menjadi 20,4 kW, turun 4,0 kW (16,39%), dan *losses* malam menjadi 21,8 kW, turun 4,2 kW (16,15%). Selanjutnya, pada penempatan DG di Bus 32, *losses* siang tercatat 20,2 kW yang berarti penurunan sebesar 4,2 kW (17,21%), sementara *losses* malam menjadi 21,6 kW, turun 4,4 kW (16,92%) dibandingkan tanpa DG. Kondisi terbaik diperoleh pada skenario gabungan DG, di mana *losses* siang turun signifikan menjadi 16,6 kW, berkurang 31,97% menjadi 7,8, dan *losses* malam turun menjadi 17,7 kW, berkurang 8,3 kW (31,92%). Selain itu, untuk seluruh skenario terlihat bahwa *losses* pada malam hari selalu lebih besar dibandingkan siang hari, dengan selisih berkisar antara 1,1 - 1,6 kW atau sekitar 6,6 - 6,9%. Hal ini menunjukkan bahwa beban puncak memberikan kontribusi peningkatan *losses*, namun keberadaan DG, khususnya pada konfigurasi gabungan, mampu menurunkan *losses* sistem secara signifikan hingga sekitar 32% baik pada kondisi siang maupun malam.

Integrasi Kapasitor ke Jaringan

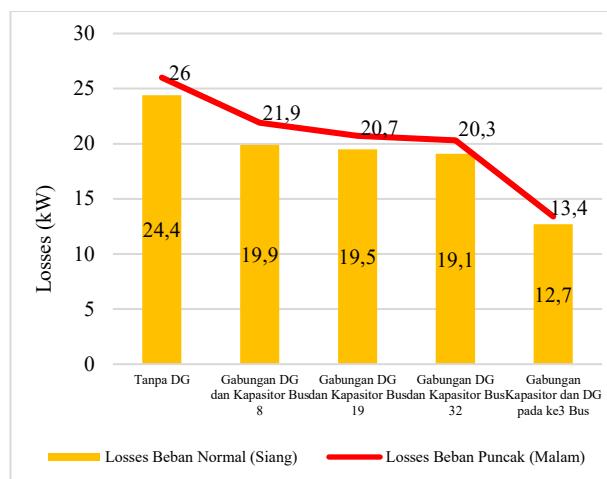


Gambar 12. Perbandingan *Losses* dengan Beban Berbeda Dan Penempatan Kapasitor pada Bus Berbeda

Gambar 12 memperlihatkan perbandingan *losses* sistem menggunakan kapasitor pada kondisi beban dan skenario yang sama dengan sebelumnya. Pada kondisi kapasitor di Bus 8, *losses* siang turun dari 24,4 menjadi 20,8 kW yang berarti terjadi penurunan sebesar 3,6 kW atau sekitar 14,75% dibandingkan tanpa kapasitor, sedangkan *losses* malam turun menjadi 22,2 kW, berkurang 3,8 kW (14,62%). Pada pemasangan kapasitor di Bus 19, *losses* siang menjadi 20,7 kW, turun 3,7 kW (15,16%) dan *losses* malam menjadi 22,1 kW, turun 3,9 kW (15%). Selanjutnya, pada kapasitor di Bus 32, *losses* siang tercatat 20,6 kW yang berarti penurunan sebesar 3,8 kW (15,57%), sementara *losses* malam menjadi 22 kW, turun 4,0 kW (15,38%). Kondisi terbaik diperoleh pada skenario gabungan kapasitor, *losses* siang turun signifikan menjadi 18,4 kW, berkurang 6,0 (24,59%), dan *losses* malam turun menjadi 19,6 kW, berkurang 6,4 kW (24,62%) dibandingkan kondisi tanpa kapasitor. Selain itu, dengan konfigurasi gabungan kapasitor memberikan kinerja paling optimal karena mampu mereduksi *losses* hingga sekitar 25% baik pada kondisi siang maupun malam.

Integrasi Gabungan *Distributed generation* dan Kapasitor ke Jaringan

Integrasi menggunakan DG dan kapasitor sudah dilakukan, selanjutnya skenario perbandingan *losses* dengan menggabungkan DG dan kapasitor. Gambar 13 menyajikan perbandingan *losses* sistem distribusi pada kondisi beban normal (siang) dan beban puncak (malam) akibat penerapan integrasi gabungan *Distributed generation* (DG) dan kapasitor pada beberapa konfigurasi bus, sehingga dapat diamati pengaruh masing-masing skenario terhadap penurunan *losses* jaringan.



Gambar 13. Perbandingan *Losses* dengan Beban Berbeda Dan Penempatan Gabungan Kapasitor dan DG pada Bus Berbeda

Berdasarkan gambar 13, penerapan kombinasi *Distributed generation* (DG) dan kapasitor memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan *losses*. Pada kondisi tanpa DG dan kapasitor, *losses* tercatat sebesar 24,4 kW pada beban normal dan 26 kW pada beban puncak. Pemasangan DG dan kapasitor pada satu bus mampu menurunkan *losses* sebesar 24 - 27%, dengan konfigurasi terbaik diperoleh pada Bus 32 yang memberikan reduksi sebesar 26,64% pada siang hari dan 26,54% pada malam hari. Penurunan paling optimal dicapai pada skenario pemasangan DG dan kapasitor secara gabungan pada ketiga bus, *losses* berhasil diturunkan menjadi 12,0 kW pada siang hari dan 12,7 kW pada malam hari, atau masing-masing sebesar 50,82% dan 51,15%. Hasil ini membuktikan bahwa koordinasi antara DG dan kapasitor sangat efektif dalam meminimalkan rugi daya sekaligus meningkatkan efisiensi operasi sistem distribusi pada berbagai kondisi pembebanan.

Perbandingan Reduksi *Losses* menggunakan metode PSO dan GA

Tabel 7 menampilkan hasil perbandingan reduksi rugi daya aktif (kW) dan rugi daya reaktif (kVAR) yang diperoleh menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Genetic Algorithm* (GA), beserta selisih persentase kinerjanya dalam menentukan lokasi optimal penempatan DG dan kapasitor pada sistem distribusi.

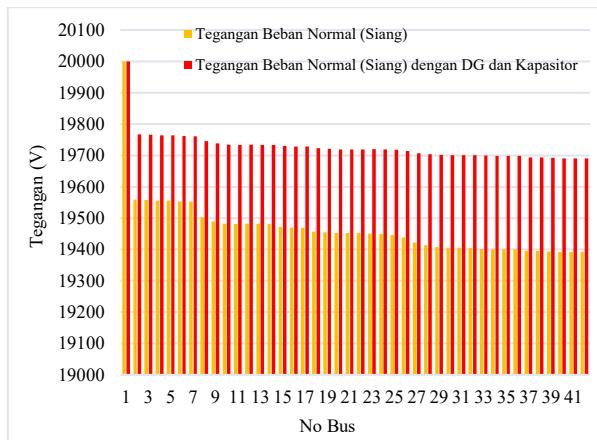
Tabel. 7 Perbandingan Hasil *losses* Metode PSO dengan Metode GA

Parameter	Bus	Metode				Perbandingan		
		PSO		GA		Hasil		
		Losses (kW)	Losses (kVAR)	Bus	Losses (kW)	Losses (kVAR)	Losses (kW)	Losses (kVAR)
Tanpa DG		26	21.6		26	21.6		
DG	8	22	19	7	22.1	19.1	0.45%	0.52%
	19	21.8	18.9	14	21.9	19	0.46%	0.53%
	32	21.6	18.8	23	21.8	18.9	0.92%	0.53%
Gabungan DG	8,19,	17.7	17	7,14,	18	17.2	1.67%	1.16%
	32			23				
Kapasitor	8	22.2	18.9	7	22.3	18.9	0.45%	0.00%
	19	22.1	18.8	14	22.2	18.8	0.45%	0.00%
	32	22	18.7	23	22.1	18.8	0.45%	0.53%
Gabungan Kapasitor	8,19,32	19.6	17.4	7,14,	19.8	17.4	1.01%	0.00%
				23				
Kapasitor dan DG	8	19.7	17.7	7	19.9	17.8	1.01%	0.56%
	19	19.5	17.5	14	19.6	17.6	0.51%	0.57%
	32	19.1	17.3	23	19.4	17.5	1.55%	1.14%
Gabungan Kapasitor dan DG	8,19,	12.7	14.1	7,14,	13.2	14.3	3.79%	1.40%
	32			23				

Tabel 7 menunjukkan perbandingan Metode PSO secara konsisten menghasilkan rugi daya aktif dan reaktif yang lebih kecil dibandingkan Metode GA pada seluruh skenario optimasi. Selisih kinerja antara PSO dan GA berada pada rentang 0,45 - 3,79% untuk *losses* kW dan 0 - 1,40% untuk *losses* kVAR. Perbedaan paling signifikan terjadi pada skenario gabungan kapasitor dan DG, di mana PSO mampu menurunkan *losses* menjadi 12,7 kW dan 14,1 kVAR, sedangkan GA hanya mencapai 13,2 kW dan 14,3 kVAR. Hal ini mengindikasikan bahwa PSO lebih efektif dalam menangani optimasi multivariabel dan interaksi nonlinier antar bus, sehingga mampu menemukan lokasi bus dengan sensitivitas *losses* yang lebih tinggi. PSO lebih unggul dalam mengoptimasi masalah multidimensi (lokasi + kombinasi DG + kapasitor). PSO memiliki

mekanisme berbagi informasi global (*global best*) sehingga partikel-partikel dapat dengan cepat berkumpul menuju solusi terbaik. Sedangkan GA berpotensi terjebak pada lokal optimum karena proses seleksi, *crossover* dan mutasi yang bergantung pada populasi awal.

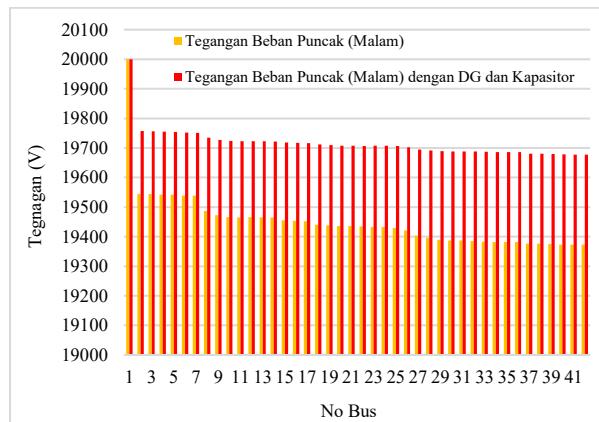
Perbandingan Tegangan Sebelum dan setelah Integrasi Gabungan *Distributed generation* dan Kapasitor ke Jaringan



Gambar 14. Perbandingan Profil Tegangan pada Setiap Bus antara Kondisi Tanpa DG-Kapasitor dan Kombinasi DG-Kapasitor Beban Normal

Gambar 14 menunjukkan perbandingan profil tegangan sistem pada kondisi beban normal (siang) sebelum dan sesudah pemasangan kombinasi DG dan kapasitor. Berdasarkan data pada gambar 13, terlihat bahwa tanpa DG dan kapasitor, tegangan pada bus setelah bus sumber (20 kV) mengalami penurunan bertahap dari sekitar 19.558,3 V hingga mencapai nilai terendah sekitar 19.391,9 V di bus paling ujung. Penurunan ini menunjukkan adanya kondisi *undervoltage* yang cukup signifikan, khususnya pada bus-bus yang jauh dari sumber, akibat rugi tegangan sepanjang saluran. Setelah diterapkan DG dan kapasitor, profil tegangan sistem mengalami peningkatan yang sangat jelas dan lebih merata di seluruh bus. Tegangan pada bus kedua meningkat menjadi sekitar 19.766,7 V dan secara bertahap turun hingga sekitar 19.690 V pada bus terakhir. Dibandingkan dengan kondisi tanpa kompensasi, setiap bus mengalami kenaikan tegangan rata-rata sekitar 200-300 V. Hal ini membuktikan kombinasi DG dan kapasitor efektif dalam menyuplai daya aktif dan daya reaktif secara lokal, sehingga arus dari sumber utama berkurang, rugi tegangan pada saluran menurun dan profil tegangan sistem menjadi lebih baik.

Secara visual, hal ini tampak dari batang merah yang selalu berada di atas batang kuning pada seluruh nomor bus, artinya untuk setiap titik beban, tegangan dengan DG dan kapasitor selalu lebih tinggi dibandingkan kondisi awal. Selain itu, gradien penurunan tegangan dari bus awal ke bus akhir menjadi lebih landai, menandakan bahwa sistem menjadi lebih stabil dan distribusi tegangan lebih seragam. Dengan demikian, grafik ini menegaskan bahwa penerapan gabungan DG dan kapasitor tidak hanya mampu mengurangi rugi daya, tetapi juga secara signifikan memperbaiki kualitas tegangan sistem. Kondisi *undervoltage* yang sebelumnya dominan pada hampir seluruh bus dapat ditekan, sehingga tegangan operasi menjadi lebih mendekati nilai nominal 20 kV. Hal ini sangat penting untuk meningkatkan keandalan sistem, menjaga kinerja peralatan listrik serta memenuhi standar kualitas daya pada jaringan distribusi.



Gambar 15. Perbandingan Profil Tegangan pada Setiap Bus antara Kondisi Tanpa DG-Kapasitor dan Kombinasi DG-Kapasitor beban Puncak

Gambar 15 menunjukkan perbandingan profil tegangan pada kondisi beban puncak (malam) sebelum dan sesudah pemasangan kombinasi *Distributed generation* (DG) dan kapasitor. Berdasarkan data pada tabel sebelumnya, pada kondisi awal tanpa DG dan kapasitor, tegangan setelah bus sumber (20 kV) langsung mengalami penurunan menjadi sekitar 19.544,5 V dan terus menurun secara bertahap hingga mencapai nilai terendah sekitar 19.373 V pada bus paling ujung. Hal ini menandakan terjadinya kondisi *undervoltage* yang cukup signifikan pada hampir seluruh bus, terutama pada bus yang jauh dari sumber, akibat tingginya arus beban pada jam puncak yang menyebabkan rugi tegangan saluran semakin besar. Setelah diterapkan DG dan kapasitor, profil tegangan mengalami peningkatan yang sangat jelas. Tegangan pada bus kedua meningkat menjadi sekitar

19.757,3 V dan secara bertahap menurun hingga sekitar 19.677,3 V pada bus terakhir. Jika dibandingkan dengan kondisi tanpa kompensasi, setiap bus mengalami kenaikan tegangan rata-rata sekitar 200-350 V. Peningkatan ini menunjukkan bahwa DG berperan dalam menyuplai daya aktif secara lokal, sedangkan kapasitor menyediakan daya reaktif yang dibutuhkan beban, sehingga arus yang mengalir dari sumber utama berkurang dan rugi tegangan sepanjang saluran menjadi lebih kecil.

Secara visual, hal ini terlihat dari batang merah yang selalu berada di atas batang kuning untuk seluruh nomor bus, artinya pada semua titik beban, tegangan dengan DG dan kapasitor selalu lebih tinggi dibandingkan kondisi awal beban puncak. Selain itu, kemiringan penurunan tegangan dari bus awal ke bus akhir menjadi lebih landai yang menandakan distribusi tegangan menjadi lebih merata dan stabil meskipun sistem berada pada kondisi beban maksimum. Dengan demikian, grafik pada gambar 14 membuktikan bahwa penerapan kombinasi DG dan kapasitor sangat efektif dalam memperbaiki kualitas tegangan pada kondisi beban puncak, yang merupakan kondisi operasi paling kritis dalam sistem. Undervoltage yang sebelumnya cukup besar dapat ditekan secara signifikan, sehingga tegangan operasi mendekati nilai nominal 20 kV. Hasil ini juga memperkuat kesimpulan bahwa strategi gabungan DG dan kapasitor tidak hanya menurunkan rugi daya, tetapi juga meningkatkan keandalan dan kualitas pelayanan sistem distribusi listrik, khususnya pada saat beban puncak malam hari.

KESIMPULAN

Hasil optimasi menggunakan *Particle Swarm Optimization* (PSO) menunjukkan bahwa penempatan DG dan kapasitor bank sudah mampu menurunkan *losses* secara signifikan, masing-masing hingga sekitar 32% untuk DG dan 25% untuk kapasitor, namun kinerja terbaik diperoleh pada skenario integrasi gabungan DG dan kapasitor bank. Pada konfigurasi optimal ini, *losses* berhasil ditekan menjadi 12,0 kW pada beban normal dan 12,7 kW pada beban puncak, atau setara dengan penurunan sebesar 50,82% dan 51,15% dibandingkan kondisi awal. Penurunan *losses* yang sangat signifikan ini terjadi karena PSO mampu menentukan lokasi DG dan kapasitor pada bus yang paling efektif secara elektrik. DG mengurangi aliran daya aktif dari sumber utama dengan menyuplai beban secara lokal, sedangkan kapasitor

menurunkan aliran daya reaktif dengan meningkatkan faktor daya sistem. Kombinasi keduanya menurunkan arus total jaringan, sehingga rugi daya konduktor berkurang secara drastis. Dibandingkan dengan *Genetic Algorithm* (GA), PSO memberikan hasil yang lebih optimal dengan selisih reduksi *losses* aktif sebesar 0,45 - 3,79% dan *losses* reaktif sebesar 0-1,40%. Hal ini menunjukkan bahwa PSO lebih efektif dalam menemukan konfigurasi sistem dengan rugi daya minimum. Dengan demikian, secara ilmiah dapat disimpulkan bahwa PSO merupakan metode optimasi yang sangat andal untuk alokasi DG dan kapasitor bank, karena mampu menurunkan rugi daya sistem distribusi lebih dari 50%, meningkatkan efisiensi energi, dan memperbaiki kinerja operasi jaringan, khususnya pada sistem distribusi terisolasi seperti Kota Sabang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala, khususnya Program Studi Teknik Elektro dan Komputer, atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pihak PT PLN (Persero), khususnya Unit Pelaksana Pelayanan Distribusi (UP2D) dan PLTD PLN Sabang, yang telah menyediakan data teknis sistem kelistrikan serta memberikan izin dan dukungan dalam proses pengumpulan data lapangan. Selain itu, penulis menyampaikan apresiasi kepada semua pihak yang telah memberikan masukan, saran dan bantuan baik secara langsung maupun tidak langsung sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] D. F. Niste, R. Tîrnovan, S. Pavel, H. Beleiu, C. Andrei and Marius Misaros, "Electricity Losses in Focus: Detection and Reduction Strategies—State of the Art," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 7, pp. 1-43, 2025.
<https://doi.org/10.3390/app15073517>
- [2] P. Parvizi, M. Jalilian, A. M. Amidi, M. R. Zangeneh and J.-R. Riba, "Technical Losses in Power Networks: Mechanisms, Mitigation Strategies, and Future Directions," *Electronics*, vol. 14, no. 17, pp. 1-67, 2025
<https://doi.org/10.3390/electronics14173442>
- [3] M. L. Woldesemayat, D. B. Biramo and A. T. Tantu, "Assessment of power distribution system losses and mitigation through optimally placed D-STATCOM. A case study: Gesuba town 15 kV distribution system," *Cogent Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 1-13, 2024
<https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2330824>
- [4] "Power transmission losses plugged, but distribution leaks remain concern," *The Times of India*, Bhopal, India, May 22, 2025. [Online]. Available:
<https://timesofindia.indiatimes.com/city/bhopal/power-transmission-losses-plugged-but-distribution-leaks-remain-concern/articleshow/121324005.cms>.
- [5] I. Blinov, V. Radziukynas, P. Shmaniuk, A. Dyczko, K. Stecuła, V. Sychova, V. Miroshnyk, and R. Dychkovskyi, "Smart Management of Energy Losses in Distribution Networks Using Deep Neural Networks," *Energies*, vol. 18, no. 12, pp. 1-17, 2025.
<https://doi.org/10.3390/en18123156>
- [6] S. A. Adegoke, Y. Sun, A. S. Adegoke and D. Ojeniyi, "Optimal placement of distributed generation to minimize power loss and improve voltage stability," *Heliyon*, vol. 10, no. 21, pp. 1-28, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39298>
- [7] T. Wanjekeche, A. A. Ndapuka and L. N. Mukena, "Strategic Sizing and Placement of Distributed Generation in Radial Distributed Networks Using Multiobjective PSO," *Hindawi Journal of Energy*, no. 1, pp. 1-14, 2023.
<https://doi.org/10.1155/2023/6678491>
- [8] A. Owosuh, Y. Hamam and J. Munda, "A New Framework for Active Loss Reduction and Voltage Profile Enhancement in a Distributed Generation-Dominated Radial Distribution Network," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 3, pp. 1-22, 2024.
<https://doi.org/10.3390/app14031077>
- [9] H. M. H. Farh, A. A. Al-Shamma'a, A. Qamar, F. Saeed and A. M. Al-Shaan, "Optimal Sizing and Placement of Distributed Generation under N-1 Contingency Using Hybrid Crow Search–Particle Swarm Algorithm," *Sustainability*, vol. 16, no. 6, pp. 1-21, 2024.
<https://doi.org/10.3390/su16062380>
- [10] M. Bilal, M. S. M. Arif, B. Ullah, S. B. Hisham and S. S. A. Ali, "Annual Cost and Loss Minimization in a Radial Distribution Network by Capacitor Allocation Using PSO," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 24, pp. 1-18, 2021.
<https://doi.org/10.3390/app112411840>
- [11] K. Fettah, T. Guia, A. Salhi, S. Mouassa, A. Bosisio and R. Shirvani, "Optimal Allocation of Capacitor Banks and Distributed Generation: A

- Comparison of Recently Developed Metaheuristic Optimization Techniques on the Real Distribution Networks of ALG-AB-Hassi Sida, Algeria," *Sustainability*, vol. 16, no. 11, pp. 1-23, 2024.
<https://doi.org/10.3390/su16114419>
- [12] P. Asabere, F. Sekyere, P. Ayambire and W. K. Ofosu, "Optimal capacitor bank placement and sizing using particle swarm optimization for power loss minimization in distribution network," *Journal of Engineering Research*, vol. 13, no. 2, pp. 1307-1315, 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.03.007>
- [13] D. S. Wahyuni, R. Rahmat, M. Ayu, M. D. Faraby and A. R. Sultan, "Analisa Penempatan Distributed Generation (DG) dan Kapasitor Bank pada IEEE 118-Bus Sistem Distribusi Radial," Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika (SNTEI), vol. 9, no. 1, pp. 13-18, 2023
<https://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/snsei/article/view/4315>
- [14] N. Srilatha, "Distributed Generation Placement Using Voltage Stability Index and Optimal Sizing Using Adaptive Particle Swarm Optimization," *E3S Web of Conferences*, vol. 399, pp. 1-9, 2023.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339901007>
- [15] M. A. Kamarposhti, R. Ghandour, M. Abdel-Aty, M. Hafez, M. Alfiras, S. Alkhazaleh, I. Colak and A. Solyman, "Optimizing capacitor bank placement in distribution networks using a multi-objective particle swarm optimization approach for energy efficiency and cost reduction," *Scientific Reports*, vol. 15, pp. 1-18, 2024.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-96341-8>
- [16] M. B. Tuka and S. E. Ali, "Optimal allocation and sizing of distributed generation for improvement of distribution feeder loss and voltage profile in the distribution network using genetic algorithm," *Sage Journal*, vol. 59, no. 2, pp. 217-231, 2025.
<https://doi.org/10.1177/00202940251323760>
- [17] A. B. Alyu, A. O. Salau, B. Khan and J. N. Eneh, "Hybrid GWO-PSO based optimal placement and sizing of multiple PV-DG units for power loss reduction and voltage profile improvement," *Scientific Reports*, vol. 13, pp. 1-17, 2023.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-34057-3>
- [18] PT PLN (Persero), Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2025 - 2034, Jakarta, Indonesia, 2025. [Online]. Available: https://gatrik.esdm.go.id/frontend/download_index/?kode_category=ruptl_pln
- [19] PT PLN (Persero), Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021 - 2030. Jakarta, Indonesia: PT PLN (Persero), 2021. [Online]. Available: https://gatrik.esdm.go.id/frontend/download_index/?kode_category=ruptl_pln
- [20] SPLN No. 72, Batas Penurunan Tegangan Sistem Distribusi Tenaga Listrik, Jakarta: Perusahaan Listrik Negara, 1987. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/346784959/108921502-SPLN-72-1987-pdf>