

Analisis Peningkatan Performansi Sistem Karena Integrasi DG pada JTM 20kV Feeder Ampelgading

¹Fajar Maulana Akbar, ²I Made Wartana, ³Irrine Budi Sulistiawati
Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional, Malang
¹fjr852527@gmail.com, ²m.wartana@lecturer.itn.ac.id, ³irrine@lecturer.itn.ac.id

Abstract—The 20 kV Ampelgading feeder, which is integrated with the Ampelgading Hydropower Plant (PLTA) as a Distributed Generation (DG), still faces technical challenges such as low voltage at the downstream part of the network and relatively high active power losses. These issues are mainly caused by the long distribution line of approximately ± 180 km and the uneven load distribution, which results in suboptimal power quality. This research aims to analyze the impact of capacitor bank installation on the voltage profile and line losses of the distribution system. The method employed is a simulation using ETAP 21.0.1 software under peak load conditions as the basis of analysis. The improvement strategy is implemented through the Optimal Capacitor Placement (OCP) method, which recommends the installation of 220 kVAR capacitors at Bus 62, Bus 70, and Bus 80 as the optimal locations based on voltage sensitivity analysis. The simulation results indicate that the capacitor bank injection successfully improves the minimum bus voltage from 0.939 p.u. in the base case to 0.973 p.u., ensuring that all buses meet the lower voltage limit standard of 0.95 p.u. Furthermore, total active power losses are reduced from 93.36 kW to 83.37 kW, representing a decrease of approximately 10.7%. These findings demonstrate that the OCP method is an effective technical solution for optimizing the performance of distribution networks, particularly for feeders with geographical and load characteristics similar to the Ampelgading feeder.

Keywords—*Distributed Generation, Optimal Capacitor Placement, Voltage Profile, Power Loss, ETAP 21.0.1*

Abstrak—Feeder 20 kV Ampelgading yang terintegrasi dengan PLTA Ampelgading sebagai Distributed Generation (DG) menghadapi permasalahan teknis berupa tegangan rendah pada sisi hilir jaringan serta rugi daya aktif yang cukup tinggi. Kondisi ini disebabkan oleh panjang saluran distribusi sekitar ± 180 km dan distribusi beban yang tidak merata, sehingga kualitas daya menjadi kurang optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pemasangan kapasitor bank terhadap profil tegangan dan rugi daya pada sistem distribusi tersebut. Metode yang digunakan adalah simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP 21.0.1 dengan kondisi beban puncak sebagai dasar analisis. Strategi perbaikan diterapkan melalui metode Optimal Capacitor Placement (OCP), yang menghasilkan rekomendasi pemasangan kapasitor berkapasitas 220 kVAR pada Bus 62, Bus 70, dan Bus 80 sebagai lokasi optimal berdasarkan analisis sensitivitas tegangan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa injeksi kapasitor bank mampu meningkatkan tegangan minimum dari 0,939 p.u. pada kondisi awal (base case) menjadi 0,973 p.u., sehingga seluruh bus memenuhi standar batas bawah 0,95 p.u. Selain itu, total rugi daya aktif berhasil diturunkan dari 93,36 kW menjadi 83,37 kW atau berkurang sekitar 10,7%. Dengan demikian, metode OCP terbukti menjadi solusi teknis yang efektif dalam pengoptimalan kinerja sistem distribusi tenaga listrik, khususnya pada jaringan yang memiliki karakteristik geografis dan beban seperti Feeder Ampelgading.

Kata Kunci—*Distributed Generation, Optimal Capacitor Placement, Profil Tegangan, Rugi Daya, ETAP.21.0.1*

I. PENDAHULUAN

Peralihan global dari pembangkit listrik tradisional berbasis bahan bakar fosil menuju sumber energi terbarukan merupakan langkah strategis untuk mendukung keberlanjutan sistem kelistrikan dan menekan emisi karbon. Pemerintah Indonesia menetapkan target bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 melalui Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) [1][2]. Salah satu pendekatan yang efektif untuk mendukung transisi energi tersebut adalah *Distributed Generation* (DG). DG merupakan sistem pembangkitan tersebar berkapasitas kecil hingga menengah yang dioperasikan dekat dengan pusat beban. Keberadaannya memberikan manfaat berupa pengurangan rugi daya, peningkatan efisiensi distribusi, serta kontribusi terhadap kestabilan tegangan dan keandalan sistem [2][3][4].

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) termasuk jenis DG yang banyak diterapkan di Indonesia. Selain bersifat ramah lingkungan, PLTA memiliki kemampuan menyuplai daya aktif dan reaktif secara lokal dengan efisiensi yang relatif tinggi. Integrasi PLTA dalam sistem distribusi diharapkan dapat memperbaiki kualitas daya dan mengurangi ketergantungan pada jaringan transmisi utama [5][6]. *Feeder* 20 kV Ampelgading, yang terhubung langsung dengan PLTA Ampelgading, menjadi objek studi yang representatif dalam mengevaluasi dampak integrasi DG terhadap performa jaringan distribusi. Permasalahan teknis yang muncul antara lain penurunan tegangan di ujung saluran dan rugi daya yang tinggi, yang diperparah oleh panjang jaringan sekitar 180 km dan ketidakseimbangan beban [7][8].

Upaya teknis yang dapat dilakukan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah melalui injeksi daya reaktif menggunakan bank kapasitor pada lokasi strategis. Penempatan kapasitor secara optimal terbukti dapat meningkatkan profil tegangan, menstabilkan sistem, serta menurunkan rugi daya saluran dengan mengurangi aliran arus dan beban pada sumber utama [9][10][11]. Beberapa studi terdahulu telah menunjukkan efektivitas metode ini. Metode *Optimal Capacitor Placement* (OCP) berbasis analisis sensitivitas tegangan pada jaringan distribusi radial dilaporkan mampu meningkatkan tegangan hingga 4% serta menurunkan rugi daya sebesar 8–12% [12]. Pendekatan lain menggunakan *Genetic Algorithm* (GA) untuk optimasi lokasi dan kapasitas kapasitor juga terbukti menghasilkan perbaikan faktor daya sekaligus penurunan rugi daya hingga 15% [13].

Selain kompensasi reaktif, integrasi *Distributed Generation* (DG) juga terbukti memberikan manfaat. Kombinasi injeksi daya aktif dari DG dan kompensasi reaktif melalui kapasitor bank dilaporkan lebih efektif dibandingkan penggunaan salah satu metode secara terpisah [14]. Hasil studi internasional bahkan menunjukkan bahwa strategi hibrida DG dan kapasitor mampu meningkatkan keandalan serta efisiensi distribusi hingga 20% [15]. Temuan-temuan tersebut memperkuat urgensi penerapan metode *Optimal Capacitor Placement* (OCP), terutama pada sistem distribusi dengan karakteristik panjang saluran dan ketidakseimbangan beban seperti *Feeder* 20 kV Ampelgading.

Berdasarkan landasan teoritis dan hasil penelitian terdahulu, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis dampak injeksi bank kapasitor terhadap profil tegangan serta rugi daya saluran pada *Feeder* 20 kV Ampelgading. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP dengan berbagai skenario penempatan kapasitor sebagai dasar evaluasi. Hasil analisis diharapkan mampu memberikan rekomendasi teknis yang efektif dalam meningkatkan kualitas tegangan sekaligus menurunkan rugi daya pada jaringan distribusi.

Sejalan dengan tujuan tersebut, maka permasalahan utama yang dirumuskan dalam penelitian ini adalah bagaimana upaya peningkatan kualitas tegangan dan efisiensi sistem distribusi dapat dicapai melalui strategi teknis tertentu pada *Feeder* 20 kV Ampelgading. Permasalahan tersebut dirinci sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh lokasi dan kapasitas bank kapasitor terhadap profil tegangan dan rugi daya saluran pada *Feeder* 20 kV Ampelgading dengan PLTA sebagai kondisi *base case*?
2. Sejauh mana pengaruh skenario injeksi kapasitor bank terhadap perbaikan profil tegangan dan penurunan rugi daya saluran berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP?

Untuk menjawab rumusan masalah tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah memberikan pemahaman yang mendalam dan evaluasi kuantitatif terhadap strategi optimal yang dapat diterapkan dalam sistem distribusi tenaga listrik. Tujuan penelitian difokuskan pada dua aspek utama, yaitu:

1. Menganalisis pengaruh lokasi dan kapasitas bank kapasitor terhadap perbaikan profil tegangan dan penurunan rugi daya saluran pada *Feeder* 20 kV Ampelgading dengan PLTA sebagai kondisi *base case*.
2. Mengevaluasi pengaruh skenario injeksi kapasitor bank terhadap perbaikan profil tegangan dan penurunan rugi daya saluran pada jaringan distribusi berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP.

II. METODE PENELITIAN

A. Metode Teknik pengumpulan Data

Penelitian ini dilakukan pada sistem distribusi tegangan menengah 20 kV Penyulang Ampelgading yang dikelola oleh PLN dan telah terintegrasi dengan PLTA Ampelgading sebagai *Distributed Generation* (DG) permanen dalam sistem dasar (*base case*). Sistem distribusi yang dikaji memiliki konfigurasi radial dengan suplai utama berasal dari Gardu Induk (GI) Turen serta PLTA Ampelgading melalui trafo step-up 6,6/20 kV.

Secara geografis, wilayah Ampelgading di Kabupaten Malang didominasi oleh topografi pegunungan dan lembah, sehingga sebagian besar konsumen berada cukup jauh dari gardu induk. Kondisi ini menimbulkan tantangan dalam mempertahankan profil tegangan serta efisiensi distribusi energi, sehingga diperlukan strategi teknis berupa injeksi kapasitor bank untuk memperbaiki kinerja jaringan.

Untuk mencapai tujuan penelitian, metode yang digunakan disusun secara sistematis melalui tiga tahapan utama. Setiap tahapan saling berkaitan, dimulai dari pemahaman teoritis melalui kajian literatur, dilanjutkan dengan pengumpulan data teknis sebagai dasar model sistem, hingga tahap simulasi dan analisis menggunakan perangkat lunak. Dengan alur ini, hasil penelitian diharapkan tidak hanya bersifat konseptual, tetapi juga didukung oleh validasi data nyata dan evaluasi kuantitatif terhadap sistem distribusi.

1. Kajian Literatur

Studi pustaka dilakukan untuk memperoleh pemahaman teoritis mengenai profil tegangan, rugi daya saluran, konsep dan penerapan *Distributed Generation* (DG), serta metode *Optimal Capacitor Placement* (OCP). Literatur yang dijadikan acuan mencakup buku ajar teknik elektro, jurnal ilmiah terkini, serta standar teknis internasional seperti IEEE, IEC, dan SPLN. Kajian ini juga mencakup prinsip kerja perangkat lunak ETAP 21.0.1 sebagai alat bantu simulasi utama.

2. Pengumpulan Data

Data teknis dihimpun melalui kerja sama dengan unit-unit PLN yang terkait, yaitu:

- PT PLN Unit Induk Transmisi (UIT) Jawa Timur – GI Kebonagung 70 kV sebagai pemasok utama jaringan tegangan menengah,
- PT PLN Unit Induk Distribusi (UID) Jawa Timur – Unit Layanan Pelanggan (ULP) Dampit, yang membawahi Penyulang Ampelgading sebagai bagian dari wilayah kerja distribusi, serta
- PT PLN Unit Pembangkitan Brantas (UP Brantas) sebagai pengelola PLTA Ampelgading, yang berfungsi sebagai *Distributed Generation* (DG) dan telah terhubung secara permanen ke jaringan distribusi 20 kV melalui trafo step-up 6.6/20 kV.

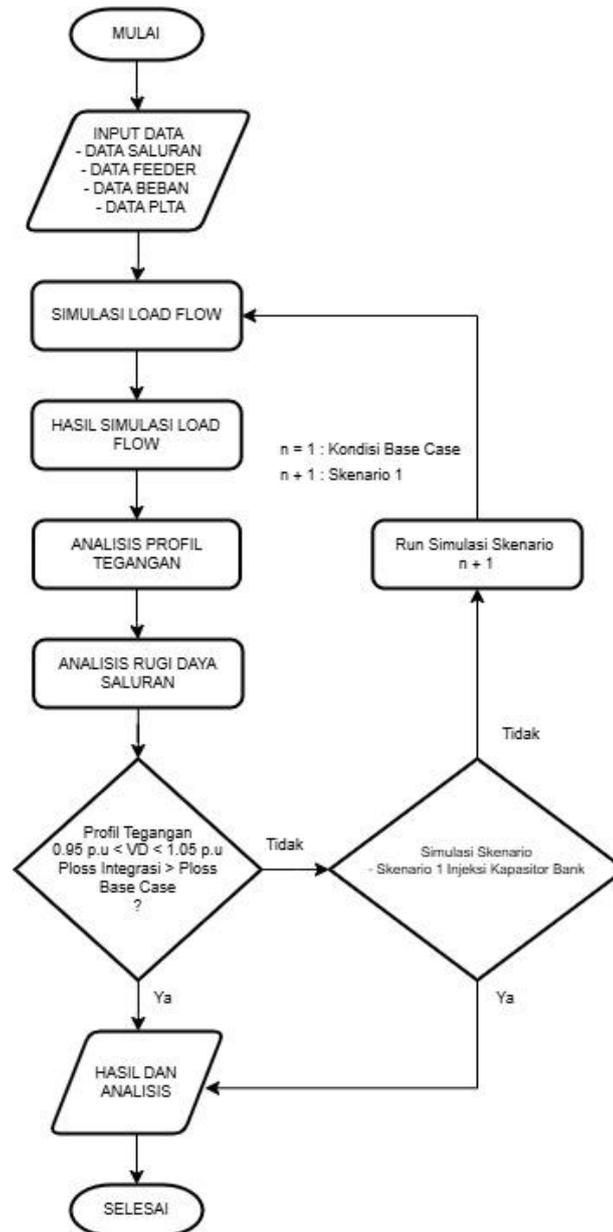
Data yang dikumpulkan meliputi *single line diagram* (SLD), impedansi saluran, data transformator distribusi, beban konsumen, serta karakteristik operasional PLTA Ampelgading ($2 \times 5,2$ MVA). Seluruh data diverifikasi melalui pencocokan dokumen resmi dan observasi lapangan untuk memastikan keakuratan parameter input dalam simulasi.

3. Simulasi dan Analisis

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP 21.0.1 dengan kondisi beban puncak sebagai dasar analisis. Model awal (*base case*) mencakup integrasi tetap PLTA Ampelgading sebagai DG. Tahap berikutnya dilakukan pengujian Skenario 1, yaitu skenario injeksi kapasitor bank pada titik-titik kritis hasil analisis sensitivitas tegangan menggunakan metode OCP. Tiga lokasi strategis, yaitu Bus 62, Bus 70, dan Bus 80, dipilih sebagai titik pemasangan kapasitor masing-masing berkapasitas 220 kVAR. Tujuan pemasangan kapasitor ini adalah untuk menyuplai daya reaktif secara lokal sehingga mampu meningkatkan profil tegangan dan menurunkan rugi daya saluran. Hasil simulasi pada Skenario 1 kemudian dibandingkan dengan kondisi *base case* untuk mengevaluasi efektivitas injeksi kapasitor dalam meningkatkan kualitas tegangan dan efisiensi distribusi daya pada sistem jaringan 20 kV Penyulang Ampelgading.

B. Flowchart

Penelitian ini dilakukan melalui serangkaian tahapan sistematis yang dirancang untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai pengaruh integrasi *Distributed Generation* (DG) terhadap profil tegangan dan rugi daya saluran pada sistem distribusi tegangan menengah 20 kV. Tahapan pertama dimulai dengan pengumpulan data teknis jaringan, meliputi konfigurasi *single line diagram* (SLD), parameter saluran, beban, transformator, serta data operasional PLTA Ampelgading sebagai sumber DG. Data tersebut kemudian digunakan dalam tahap pemodelan sistem menggunakan perangkat lunak ETAP untuk merepresentasikan kondisi aktual jaringan distribusi. Selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya (*load flow analysis*) pada kondisi dasar (*base case*) maupun skenario integrasi kapasitor bank. Hasil simulasi dari berbagai skenario dianalisis secara komparatif untuk mengevaluasi perubahan profil tegangan, rugi daya saluran, serta efektivitas strategi teknis yang diterapkan.



Gambar 1 Flowchart

Penjelasan *flowchart* pada Gambar 1 sebagai berikut:

1. Mulai

Proses dimulai dengan menyusun *Single Line Diagram* (SLD) dari *Feeder* Ampelgading menggunakan perangkat lunak ETAP. Model jaringan harus sudah mencakup PLTA yang telah terintegrasi sebagai bagian dari sistem eksisting.

2. Input Data

Masukkan seluruh data teknis ke dalam ETAP, meliputi:

- Data Saluran
- Data *Feeder*
- Data Beban
- Data PLTA eksisting (yang sudah menyatu dengan sistem)

Proses ini bertujuan membentuk model dasar (*base case*) sistem jaringan eksisting.

3. Simulasi *Load Flow*

Lakukan simulasi *load flow* (aliran daya) untuk kondisi awal sistem. Simulasi ini digunakan untuk menghitung distribusi daya aktif dan reaktif, serta nilai tegangan pada setiap bus dalam jaringan distribusi.

4. Hasil Simulasi *Load Flow*

Catat hasil dari simulasi awal, yang menjadi acuan untuk perbandingan terhadap skenario-skenario berikutnya. Hasil yang dicatat mencakup profil tegangan dan rugi daya total saluran (P_{loss} *base case*).

5. Analisis Profil Tegangan

Evaluasi apakah profil tegangan di semua bus masih berada dalam batas toleransi standar, yaitu $0.95 \text{ p.u.} \leq VD \leq 1.05 \text{ p.u.}$. Nilai di luar batas ini menandakan perlunya perbaikan sistem.

6. Analisis Rugi Daya Saluran

Analisis jumlah rugi daya saluran secara keseluruhan untuk mengetahui efisiensi sistem. Data ini akan digunakan sebagai pembandingan ketika sistem mengalami intervensi (modifikasi skenario).

7. Cek Kondisi

Tentukan apakah sistem telah memenuhi dua kriteria utama:

- Profil tegangan berada dalam rentang standar ($0.95 \text{ p.u.} \leq VD \leq 1.05 \text{ p.u.}$)
- Total rugi daya saluran setelah integrasi (P_{loss} integrasi) lebih kecil dari kondisi awal (P_{loss} *base case*). Jika kedua kondisi tersebut terpenuhi, maka sistem dianggap optimal.

Jika Ya, maka akan dilanjutkan ke Hasil dan Analisis

Jika Tidak, maka akan dilanjutkan ke Simulasi Skenario 1

8. Simulasi Skenario

Dilakukan simulasi berdasarkan skenario berikut:

- $n + 1 =$ Skenario 1 Injeksi Kapasitor Bank

Setelah modifikasi, ulangi proses dari simulasi load flow hingga evaluasi.

9. Hasil dan Analisa

Menampilkan hasil akhir dari seluruh skenario, baik *base case* maupun skenario 1. Bandingkan profil tegangan dan rugi daya antar skenario untuk menentukan rekomendasi terbaik.

10. Selesai

Proses evaluasi selesai, dan sistem terbaik ditentukan berdasarkan kinerja serta profil tegangan yang optimal

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

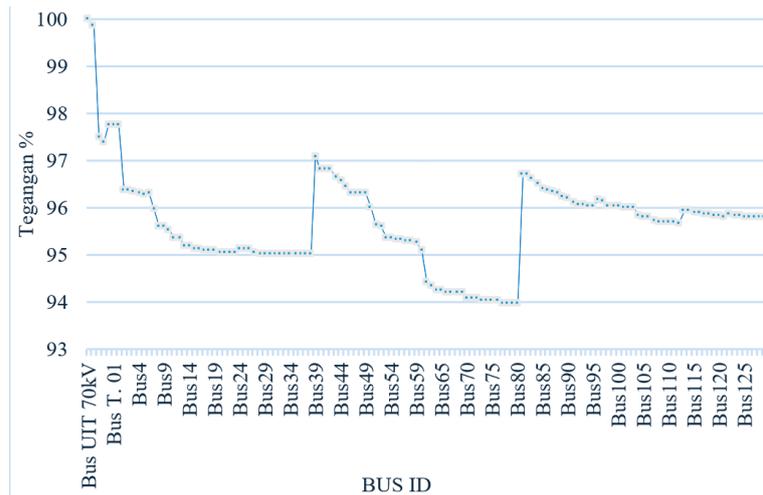
Hasil simulasi analisis aliran daya pada sistem distribusi 20 kV *Feeder* Ampelgading ditampilkan berdasarkan skenario yang telah ditentukan sebelumnya. Data lengkap seluruh bus bersifat terbatas dan tidak dapat dipublikasikan secara rinci, maka pembahasan difokuskan pada titik-titik (bus) yang mengalami pelanggaran batas tegangan atau menunjukkan perubahan signifikan terhadap profil tegangan dan rugi daya saluran. Analisis dilakukan berdasarkan grafik profil tegangan seluruh bus, tabel bus kandidat yang melanggar batas standar tegangan (di luar rentang 0,95–1,05 pu), serta grafik rugi daya aktif pada seluruh saluran.

A. Hasil *Load Flow Base Case*

Bagian ini menyajikan hasil simulasi aliran daya (*load flow*) pada kondisi awal (*base case*) dengan PLTA Ampelgading yang telah terintegrasi, tanpa penambahan kapasitor bank. Hasil ini digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi efektivitas skenario perbaikan yang diuji.

1. Hasil *Load Flow Base Case* pada Busbar

Bagian ini menyajikan hasil aliran daya berupa profil tegangan pada seluruh bus sistem distribusi 20 kV, berdasarkan kondisi aktual lapangan. Analisis difokuskan pada distribusi tegangan untuk mengidentifikasi bus yang melanggar batas standar.



Gambar 2 Profil Tegangan Bus Kondisi *Base Case*

Berdasarkan Gambar 2, hasil simulasi *base case* menunjukkan bahwa dari 129 bus, hanya Bus 61 hingga Bus 80 yang mengalami tegangan di bawah batas minimum 0,95 pu, dengan nilai terendah sebesar 93,96% pada Bus 80. Kondisi ini terjadi karena lokasi bus berada di ujung jaringan dengan panjang saluran yang signifikan, sehingga suplai daya dari sumber utama tidak mampu sepenuhnya menjaga kestabilan tegangan dan mengakibatkan rugi daya lebih besar. Berdasarkan standar tegangan yang diatur dalam SPLN dan IEEE, profil tegangan pada bus distribusi harus dijaga dalam rentang 0,95–1,05 pu untuk menjamin kualitas daya yang andal.

Dengan mempertimbangkan hal tersebut, fokus penelitian diarahkan pada Bus 61 hingga Bus 80 sebagai titik kritis yang memerlukan intervensi teknis. Strategi perbaikan dilakukan melalui injeksi kapasitor pada lokasi strategis untuk menyuplai daya reaktif secara lokal, memperbaiki profil tegangan, serta menurunkan rugi daya saluran. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi besarnya deviasi tegangan, menentukan urgensi perbaikan pada titik kritis, serta merancang skenario optimasi yang tepat sasaran agar efisiensi dan keandalan sistem distribusi dapat ditingkatkan sesuai standar internasional (IEEE, IEC) maupun nasional (SPLN).

2. Hasil Load Flow Base Case pada Bus Kandidat

Bagian ini berfokus pada analisis bus kandidat, yaitu Bus 61 hingga Bus 80, yang berdasarkan hasil simulasi *base case* menunjukkan tegangan di bawah standar batas 0,95–1,05 p.u. Penyimpangan tersebut mencerminkan ketidakseimbangan pasokan dan kebutuhan daya di area jaringan ujung, sehingga diperlukan intervensi teknis untuk mencegah penurunan kualitas tegangan dan meningkatnya rugi daya. Analisis ini menjadi dasar dalam menentukan tingkat deviasi yang terjadi sekaligus merancang skenario perbaikan yang relevan dan tepat sasaran.

Tabel 1 Hasil Load Flow *Base Case* pada Bus Kandidat

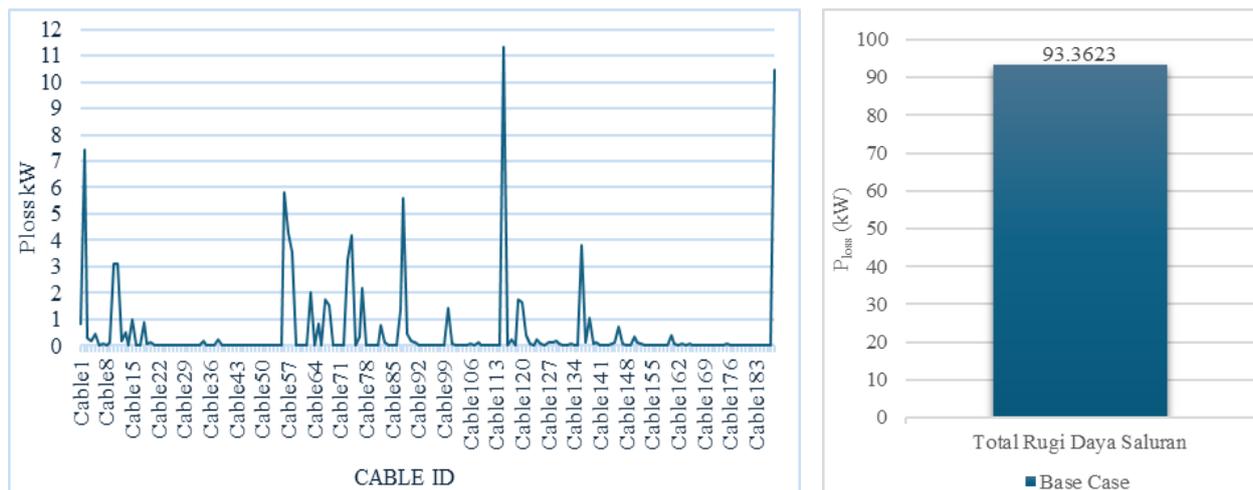
BUS ID	Nominal kV	Tegangan (V%)
Bus61	20	94.42
Bus62	20	94.36
Bus63	20	94.3
Bus64	20	94.25
Bus65	20	94.24
Bus66	20	94.23
Bus67	20	94.22
Bus68	20	94.2
Bus69	20	94.2
Bus70	20	94.08
Bus71	20	94.07

BUS ID	Nominal kV	Tegangan (V%)
Bus72	20	94.07
Bus73	20	94.06
Bus74	20	94.06
Bus75	20	94.04
Bus76	20	94.03
Bus77	20	93.98
Bus78	20	93.97
Bus79	20	93.97
Bus80	20	93.96

Berdasarkan Tabel 1, seluruh bus kandidat dari Bus 61 hingga Bus 80 mengalami kondisi tegangan di bawah standar (*undervoltage*), dengan nilai tegangan berada pada rentang 94,42% hingga 93,96%, di mana Bus 80 tercatat memiliki tegangan terendah. Pola penurunan tegangan ini terlihat konsisten dan terjadi secara bertahap dari Bus 61 menuju Bus 80. Kondisi tersebut terutama dipengaruhi oleh panjang saluran distribusi yang signifikan serta besarnya beban pada sisi hilir, sehingga mengakibatkan terjadinya rugi-rugi daya dan *voltage drop* yang semakin besar di sepanjang jaringan. Fenomena ini menegaskan perlunya upaya perbaikan melalui strategi teknis, seperti kompensasi daya reaktif dengan kapasitor bank, untuk menjaga profil tegangan tetap berada dalam rentang standar 0,95–1,05 p.u. sesuai ketentuan SPLN dan IEEE.

3. Hasil Rugi Daya Saluran Kondisi *Base Case*

Bagian ini menyajikan analisis rugi daya aktif pada seluruh saluran distribusi berdasarkan kondisi *base case*. Evaluasi ini bertujuan untuk menilai efisiensi sistem sebelum dilakukan tindakan perbaikan apa pun. Besarnya rugi daya menunjukkan sejauh mana energi hilang selama proses penyaluran dari sumber ke beban, yang dapat memengaruhi performa dan keandalan sistem distribusi. Data ini menjadi acuan penting dalam mengukur dampak perbaikan pada skenario intervensi berikutnya.



Gambar 3 Rugi Daya Saluran Kondisi *Base Case*

Berdasarkan Gambar 4 dan Tabel 2, rugi daya aktif terbesar terkonsentrasi pada lima saluran, yaitu Cable115 (11,31 kW), Cable188 (10,45 kW), Cable56 (5,80 kW), Cable88 (5,60 kW), dan Cable74 (4,16 kW). Jika dijumlahkan, kelima saluran ini menyumbang sekitar 40% dari total rugi daya sistem (93,36 kW). Besarnya rugi daya pada saluran-saluran tersebut dipengaruhi oleh kombinasi panjang saluran, arus beban yang tinggi, serta lokasi jaringan yang berada pada jalur distribusi utama menuju beban hilir.

Kondisi ini menunjukkan bahwa optimasi pada titik-titik saluran tersebut akan memberikan dampak signifikan dalam menurunkan rugi daya total sistem. Oleh karena itu, strategi perbaikan seperti penyisipan kapasitor bank pada bus terkait atau penataan ulang beban berpotensi meningkatkan efisiensi distribusi energi secara substansial.

B. Hasil Load Flow Skenario 1 OCP

Pada skenario ini menganalisis penambahan kapasitor bank untuk meningkatkan tegangan dan mengurangi rugi daya pada jaringan distribusi 20 kV. Fokus diberikan pada Bus 61–80 yang sebelumnya mengalami *under voltage* pada kondisi *base case*.

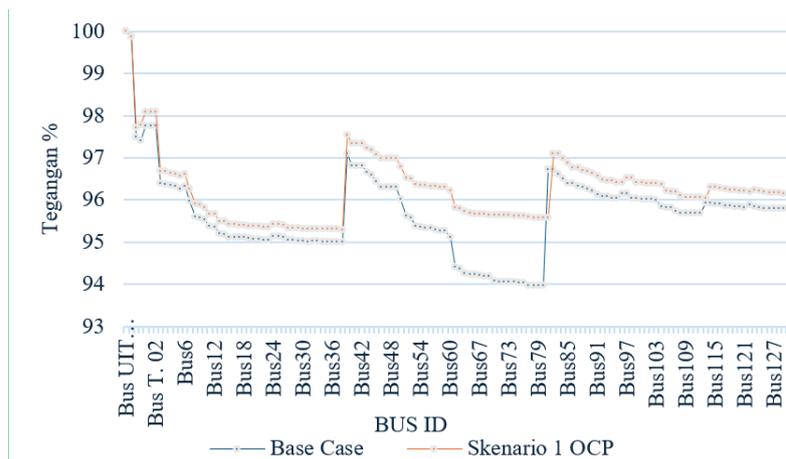
1. Dasar Penempatan dan Kapasitas Kapasitor Bank

Penambahan kapasitor bank dilakukan untuk mengompensasi defisit daya reaktif pada sistem distribusi, khususnya pada Bus 61 hingga Bus 80 yang mengalami tegangan di bawah standar (0,95 pu) pada kondisi *base case*. Secara teoritis, penambahan kapasitor akan mengurangi total daya reaktif sistem, memperbaiki faktor daya, dan meningkatkan tegangan bus. Penentuan lokasi dan kapasitas optimal dilakukan menggunakan fitur *Optimal Capacitor Placement (OCP)* pada software ETAP 21.0.1 dan analisis sensitivitas tegangan.

Hasil simulasi OCP menunjukkan tiga lokasi paling efektif untuk pemasangan kapasitor, yaitu Bus 62, 70, dan 80. Bus 62 merupakan titik percabangan utama yang mempengaruhi dua jalur utama distribusi. Bus 70 berada di awal cabang kiri dengan tegangan paling rendah, dan Bus 80 merupakan titik terjauh dari sumber yang mengalami *drop* tegangan terbesar. Masing-masing bus direkomendasikan dipasang kapasitor berkapasitas 220 kVAR, hasil pembulatan dari nilai simulasi sebesar 219,4 kVAR.

2. Hasil Load Flow Skenario 1 pada Busbar

Bagian ini menyajikan hasil simulasi aliran daya pada Skenario 1, yaitu setelah dilakukan injeksi kapasitor bank pada sistem distribusi 20 kV. Analisis difokuskan pada profil tegangan di seluruh bus untuk mengevaluasi dampak pemasangan kapasitor terhadap perbaikan tegangan, khususnya pada bus-bus yang sebelumnya mengalami pelanggaran batas standar (0,95–1,05 p.u.). Hasil ini dibandingkan dengan kondisi awal (*base case*) untuk melihat sejauh mana peningkatan performa sistem yang dicapai melalui kompensasi daya reaktif.



Gambar 4 Perbandingan Profil Tegangan Bus: *Base Case* dan Skenario 1 OCP

Berdasarkan Gambar 5, pemasangan kapasitor bank di Bus 62, 70, dan 80 mampu memperbaiki tegangan pada seluruh jaringan distribusi. Pada kondisi awal (*Base Case*), Bus 61–80 mengalami *under voltage* dengan nilai terendah di Bus 80 sebesar 93,96%. Setelah penerapan Skenario 1 OCP, tegangan meningkat secara merata, di mana Bus 80 naik menjadi 95,58%, Bus 70 mencapai 95,65%, dan Bus 61 mencapai 95,83%. Dengan kenaikan tersebut, seluruh bus sudah berada dalam rentang standar 0,95–1,05 pu, sehingga masalah *under voltage* berhasil diatasi. Perubahan ini menunjukkan bahwa penempatan kapasitor pada titik strategis efektif menjaga kestabilan profil tegangan di sepanjang saluran distribusi.

3. Hasil Load Flow Skenario 1 pada Bus Kandidat

Fokus analisis diarahkan pada Bus 61 hingga Bus 80, yang sebelumnya mengalami pelanggaran batas tegangan. Evaluasi dilakukan untuk menilai efektivitas injeksi kapasitor bank dalam meningkatkan tegangan pada area kritis tersebut dan memastikan kesesuaiannya dengan standar operasional sistem.

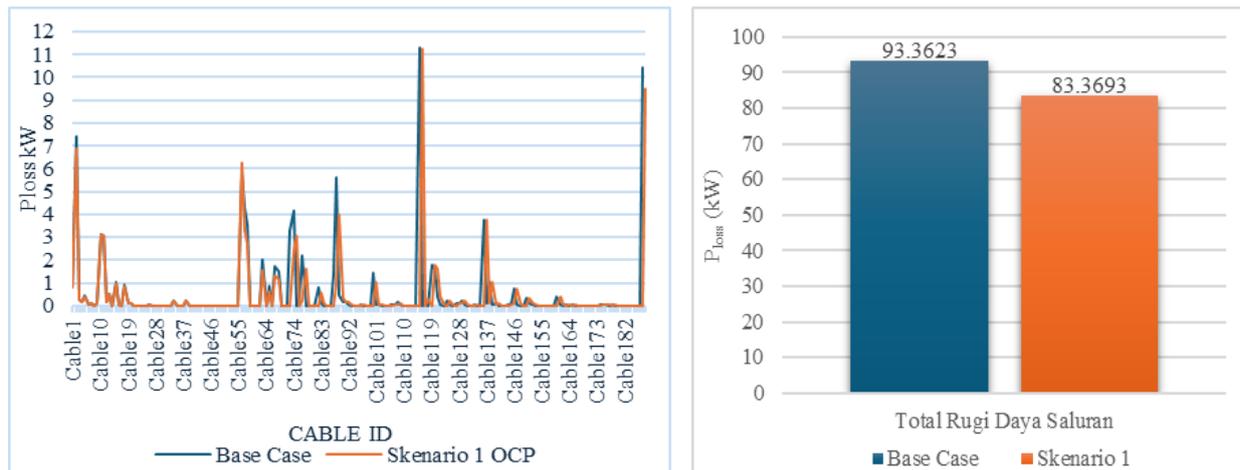
Tabel 2 Hasil Load Flow Skenario 1 pada Bus Kandidat

BUS ID	Tegangan Bus (%)	
	Base Case	Skenario 1 OCP
Bus61	94.42	95.83
Bus62	94.36	95.8
Bus63	94.3	95.73
Bus64	94.25	95.68
Bus65	94.24	95.67
Bus66	94.23	95.67
Bus67	94.22	95.66
Bus68	94.2	95.64
Bus69	94.2	95.64
Bus70	94.08	95.65
Bus71	94.07	95.64
Bus72	94.07	95.64
Bus73	94.06	95.63
Bus74	94.06	95.63
Bus75	94.04	95.62
Bus76	94.03	95.61
Bus77	93.98	95.58
Bus78	93.97	95.58
Bus79	93.97	95.58
Bus80	93.96	95.58

Berdasarkan Tabel 2, seluruh bus dari Bus 61 hingga Bus 80 mengalami perbaikan signifikan pada profil tegangan setelah dilakukan injeksi kapasitor OCP. Pada kondisi *Base Case*, tegangan bus berada di bawah standar minimum 95% (0,95 pu), dengan nilai terendah di Bus 80 sebesar 93,96%, yang jelas mengindikasikan adanya permasalahan *undervoltage* di sisi hilir jaringan. Setelah penerapan OCP, tegangan seluruh bus meningkat secara merata dan berhasil masuk ke dalam rentang standar, di mana Bus 80 naik menjadi 95,58%. Secara rata-rata, terjadi kenaikan sekitar 1,4% di seluruh bus, yang menunjukkan bahwa kapasitor OCP berperan efektif dalam menurunkan rugi-rugi daya reaktif, memperbaiki distribusi aliran daya, serta mengembalikan profil tegangan ke kondisi yang andal. Hasil ini menegaskan bahwa strategi penempatan kapasitor tepat sasaran dan mampu mengatasi masalah *undervoltage* yang sebelumnya terjadi pada segmen jaringan ini.

4. Hasil Rugi Daya Saluran Skenario 1

Bagian ini menyajikan analisis rugi daya aktif pada seluruh saluran distribusi berdasarkan hasil simulasi Skenario 1 setelah pemasangan kapasitor bank. Evaluasi dilakukan untuk membandingkan kondisi ini dengan base case, sehingga terlihat sejauh mana kapasitor mampu menurunkan rugi daya. Penurunan rugi daya menunjukkan meningkatnya efisiensi sistem karena berkurangnya aliran daya reaktif dan arus pada saluran, yang berdampak pada berkurangnya jatuh tegangan serta rugi-rugi pemanasan konduktor. Kondisi ini tidak hanya meningkatkan kualitas tegangan, tetapi juga mengurangi beban kerja peralatan jaringan, sehingga kinerja dan keandalan sistem distribusi menjadi lebih optimal.



Gambar 5 Rugi Daya Saluran Kondisi Skenario 1

Berdasarkan Gambar 7, lima saluran dengan rugi daya terbesar pada kondisi base case adalah Cable115 (11,31 kW), Cable110 (11,29 kW), Cable188 (10,45 kW), Cable56 (5,80 kW), dan Cable88 (5,60 kW). Setelah injeksi kapasitor pada Skenario 1, kelima saluran tersebut masih mendominasi rugi daya, namun nilainya menurun menjadi masing-masing 11,25 kW, 11,00 kW, 9,49 kW, 6,27 kW, dan 3,99 kW. Dari hasil ini terlihat bahwa Cable88 mengalami penurunan paling signifikan, yaitu sebesar 1,61 kW atau sekitar 29%, sedangkan saluran lain menunjukkan penurunan yang relatif lebih kecil. Visualisasi batang pada grafik Gambar 7 juga menegaskan bahwa sebagian besar saluran, terutama yang memiliki rugi daya besar, mengalami pengurangan kerugian setelah adanya kompensasi kapasitor.

Secara total, Gambar 7 menunjukkan bahwa injeksi kapasitor berhasil menurunkan rugi daya aktif sistem distribusi dari 93,36 kW menjadi 83,37 kW, atau berkurang sekitar 10,7%. Perubahan ini mengindikasikan peningkatan efisiensi sistem, di mana aliran daya reaktif dapat ditekan sehingga rugi daya berkurang secara signifikan. Dengan demikian, pemasangan kapasitor bank tidak hanya berperan dalam perbaikan profil tegangan, tetapi juga meningkatkan keandalan dan kinerja sistem distribusi secara keseluruhan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi ETAP pada jaringan distribusi 20 kV Feeder Ampelgading untuk kondisi *base case* dan penerapan Skenario 1 (injeksi kapasitor menggunakan metode OCP), diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh lokasi dan kapasitas bank kapasitor terhadap profil tegangan dan rugi daya.
 Hasil perhitungan OCP menunjukkan bahwa penempatan kapasitor pada lokasi yang tepat mampu memperbaiki profil tegangan yang semula berada di bawah standar. Pada kondisi base case, tegangan minimum tercatat sebesar 0,937 p.u. di Bus 80, sedangkan setelah injeksi kapasitor meningkat menjadi 0,973 p.u. Seluruh bus kandidat (Bus 61–Bus 80) yang sebelumnya undervoltage berhasil masuk ke dalam batas standar SPLN/IEEE (0,95–1,05 p.u.). Hal ini membuktikan bahwa pemilihan lokasi dan kapasitas kapasitor yang optimal berperan penting dalam menjaga kualitas tegangan pada sistem distribusi.
2. Pengaruh skenario injeksi kapasitor terhadap efisiensi dan rugi daya sistem.
 Injeksi kapasitor bank mampu menurunkan total rugi daya aktif dari 93,36 kW menjadi 83,37 kW, atau berkurang sekitar 10,7%. Penurunan terbesar teridentifikasi pada saluran dengan aliran daya tinggi seperti Cable 115, Cable 56, Cable 88, Cable 74, dan Cable 73. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan kapasitor tidak hanya memperbaiki profil tegangan, tetapi juga meningkatkan efisiensi penyaluran daya serta memperkuat stabilitas sistem distribusi secara menyeluruh.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Hidayat, L. M. Hayusman, and R. Setiawan, "Integrasi Distributed Generation (DG) Pada Sistem Distribusi 20 kV Sebagai Upaya Mengurangi Losses dan Meningkatkan Profil Tegangan," *Industri Inovasi: Jurnal Teknik Industri*, vol. 8, no. 2, pp. 22–26, Jan. 1970, doi: 10.36040/industri.v8i2.650.
- [2] R. T. Jurnal, "Analisis Drop Tegangan Pada Jaringan Tegangan Menengah Dengan Menggunakan Simulasi Program ETAP," *Energi Kelistrikan*, vol. 10, no. 1, pp. 26–37, Feb. 2019, doi: 10.33322/energi.v10i1.321.
- [3] H. Suyono, R. N. Hasanah, and T. Utomo, "Analisis Stabilitas Sistem Daya Pada Interkoneksi PLTMH Ampelgading di Gardu Induk Turen," *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 6, no. 2, 2012.
- [4] S. Baqaruzi and A. Muhtar, "Analisis Jatuh Tegangan dan Rugi-rugi Akibat Pengaruh Penggunaan Distributed Generation Pada Sistem Distribusi Primer 20 kV," *E-Joint Electron. Electr. J. Innov. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 20–26, Jul. 2020, doi: 10.35970/e-joint.v1i1.216.
- [5] I. N. C. Artawa, I. W. Sukerayasa, and I. A. D. Giriantari, "Analisa Pengaruh Pemasangan Distributed Generation Terhadap Profil Tegangan Pada Penyulang Abang Karangasem," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 16, no. 3, p. 79, Dec. 2017, doi: 10.24843/MITE.2017.v16i03p13.
- [6] E. K. Bawan, "Interkoneksi PLTMH dan Rekonfigurasi Jaringan Terhadap Profil Tegangan dan Rugi Daya Sistem Manokwari," 2018.
- [7] B. A. Candra, "Analisa Pengaruh Operasi On-Grid Pembangkit Terdistribusi Terhadap Profil Tegangan dan Rugi Daya Saluran," 2019.
- [8] A. Asran, M. Jannah, and A. Setiawan, "Simulasi dan Analisa Pemasangan Distributed Generation (DG) Fuel Cell dan Pengaruhnya Terhadap Interkoneksi Sistem Distribusi," *Jurnal Energi Elektrik*, vol. 9, no. 2, pp. 1–9, 2020.
- [9] S. Jamilah, I. Usrah, and A. Chobir, "Analisis Pengaruh Perubahan Faktor Daya dari Lagging menjadi Leading di Favehotel Tasikmalaya," *JEEE (Jurnal Edukasi Elektro dan Energi)*, vol. 5, no. 2, pp. 1–7, 2022.
- [10] A. Nizar, B. Suprianto, S. I. Haryudo, and M. Wdiyartono, "Analisis Rugi Daya Menggunakan ETAP Pada Jaringan Distribusi 20 kV Penyulang Bagong," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, 2021.
- [11] A. Indra, A. Tanjung, and U. Situmeang, "Analisis Profil Tegangan dan Rugi Daya Jaringan Distribusi 20 kV PT PLN (Persero) Rayon Siak Sri Indrapura Dengan Beroperasinya PLTMG Rawa Minyak," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 4, no. 1, 2019.
- [12] R. A. El-Sehiemy, A. M. Azmy, E. E. Elattar, and A. F. Zobaa, "Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems for Power Loss Reduction and Voltage Profile Improvement," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 1, pp. 210–218, 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0799.
- [13] S. Sultana and P. K. Roy, "Multi-objective Quasi-oppositional Teaching Learning Based Optimization for Optimal Location of Distributed Generator in Radial Distribution Systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 534–545, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.023.
- [14] M. Doostan, A. A. Gharaveisi, and H. Narimani, "Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation and Capacitor Banks in Distribution Systems Using Water Cycle Algorithm," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 78, pp. 401–411, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.01.046.
- [15] S. M. Leghari, H. A. Soomro, M. A. Uqaili, and S. A. Shaikh, "A Comprehensive Review on Optimal Integration of Distributed Generation and Capacitor Banks in Distribution Networks," *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 8258, Nov. 2022, doi: 10.3390/en15218258.