

Optimasi Penempatan Capacitor Bank untuk Menaikkan Profil Tegangan dan Meminimalkan Susut pada Sistem 20 Kv Bangka

Romi Hidayat*, Agus Indarto, Ova Kurniawan

Institut Teknologi PLN, Indonesia

Email: romi2410726@itpln.ac.id*, agus.indarto@itpln.ac.id, ova@itpln.ac.id

Keywords :	Abstract
Capacitor Bank; Voltage Profile; Power Losses; 20 kV Distribution Network; PSS SINCAL	<i>The power distribution system plays a critical role in providing a reliable and high-quality electricity supply to consumers. One common problem in medium-voltage distribution networks is voltage drop and power losses, particularly on long feeders. This condition occurs on the Pelangas feeder within the 20 kV network of PLN UP3 Bangka, which has a network length of approximately 113.15 km, causing several buses to experience voltage below the minimum SPLN standard. This study aims to optimize capacitor bank placement to improve the voltage profile and minimize power losses in the system. The research applies a descriptive quantitative approach using an applied research type with an evaluative design based on simulation modeling in PSS SINCAL software using the Newton-Raphson method. The data used include feeder load data, conductor type and length, transformer data, and the single line diagram of the electrical system. Simulations were conducted by comparing system conditions before and after capacitor bank installation at several candidate locations. The results show that placing the capacitor bank at bus N1693 is the most optimal location, increasing the minimum voltage from $\pm 82.3\%$ to $\pm 90.0\%$, reducing active power losses from 0.622 MW to 0.474 MW, or by 23.79%, and decreasing the maximum voltage drop from $\pm 17.7\%$ to $\pm 10.0\%$. Load characteristics and network configuration were found to influence the determination of the optimal capacitor bank location. These findings confirm that optimizing capacitor bank placement effectively improves the voltage profile, reduces power losses, and enhances the efficiency of the distribution system on the Pelangas feeder.</i>
Kata kunci:	Abstrak
Capacitor Bank; Profil Tegangan; Susut Daya; Jaringan Distribusi 20 kV; PSS SINCAL	Sistem distribusi tenaga listrik memegang peranan penting dalam menyediakan pasokan listrik yang andal dan berkualitas bagi konsumen. Salah satu permasalahan yang sering terjadi pada jaringan distribusi tegangan menengah adalah penurunan tegangan (drop tegangan) serta susut daya, khususnya pada penyulang dengan jaringan yang panjang. Kondisi ini terjadi pada Penyulang Pelangas di sistem 20 kV PLN UP3 Bangka, yang memiliki panjang jaringan sekitar 113,15 km sehingga menyebabkan sejumlah bus mengalami tegangan di bawah batas minimum standar SPLN. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan penempatan capacitor bank guna meningkatkan profil tegangan dan meminimalkan susut daya pada sistem tersebut. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan jenis penelitian terapan dan desain evaluatif berbasis pemodelan simulasi menggunakan perangkat lunak PSS SINCAL dengan metode Newton Raphson. Data yang digunakan meliputi data beban penyulang, jenis dan panjang penghantar, data trafo, serta single line diagram sistem kelistrikan. Simulasi dilakukan dengan membandingkan kondisi sistem sebelum dan sesudah pemasangan capacitor bank pada beberapa kandidat lokasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa

penempatan capacitor bank pada bus N1693 merupakan lokasi paling optimal, yang mampu meningkatkan tegangan minimum dari $\pm 82,3\%$ menjadi $\pm 90,0\%$, menurunkan rugi-rugi daya aktif dari 0,622 MW menjadi 0,474 MW atau sebesar 23,79%, serta menurunkan voltage drop maksimum dari $\pm 17,7\%$ menjadi $\pm 10,0\%$. Karakteristik beban dan konfigurasi jaringan terbukti memengaruhi penentuan lokasi optimal pemasangan capacitor bank. Dengan demikian, optimasi penempatan capacitor bank terbukti efektif dalam memperbaiki profil tegangan, menurunkan susut daya, dan meningkatkan efisiensi sistem distribusi pada Penyulang Pelangas.

PENDAHULUAN

Pada zaman yang semakin pesat dan teknologi yang semakin canggih, serta era industrialisasi yang semakin maju, maka sangat membutuhkan sumber energi listrik yang andal. Dimana tenaga listrik mempunyai peranan yang sangat penting dalam menjalankan aktivitas kehidupan sehari-hari. Kebutuhan tenaga listrik tidak hanya digunakan pada penerangan dan kebutuhan rumah tangga saja, tetapi juga dibutuhkan oleh industri – industri (Arhami et al., 2023; Manalu et al., 2023; Yuntyansyah et al., 2015). Perkembangan industri ini sangat bergantung pada tersedianya tenaga listrik untuk menjalankan proses perindustrian tersebut. Agar terwujudnya penyediaan tenaga listrik kepada para pelanggan/konsumen dengan mutu yang baik serta keandalan yang tinggi dan juga mempertahankan keadaan peralatan selama mungkin guna kepentingan perusahaan itu sendiri (Ferdiansah et al., 2023; Nilhusna et al., 2024; Siregar et al., 2023; Syuhdi et al., 2023; Syukri et al., 2024).

Sistem jaringan distribusi, dikelompokkan menjadi dua bagian, yang pertama disebut dengan Jaringan Distribusi Primer yang memiliki besaran nilai tegangan mulai dari 6 KV, 12kV, 20kV (Rifka Alkhilyatul Ma'rifat, I Made Suraharta, 2024). Bagian yang kedua yaitu Jaringan Distribusi sekunder mulai dari sisi sekunder trafo distribusi yang lewat melalui Panel Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHBTR) dan kemudian melalui jaringan tegangan rendah hingga menuju ke konsumen. Trafo distribusi mempunyai fungsi untuk menurunkan tegangan menengah umumnya di tegangan 20kV menjadi tegangan rendah dengan besaran nilai tegangan 380/220 V, yang mana kemudian disalurkan kembali melalui Jaringan Tegangan Rendah (JTR) hingga sampai ke konsumen (Elchrisa et al., 2019; Pramono & Soewono, 2018; Rafi, 2023; Suprianto, 2018; Zuraidah et al., 2020).

Sistem distribusi tenaga listrik menjadi hal yang penting dalam memastikan pasokan listrik yang handal dan berkualitas bagi pengguna. Salah satu kendala yang sering terjadi dalam sistem distribusi adalah terjadinya penurunan tegangan atau biasa disebut drop tegangan (Abadi & Syafii, 2015; Alland & Arfah Z., 2013; Almanda & Majid, 2019; Desmira & Khoirunnisa, 2020). Drop tegangan adalah penurunan nilai tegangan yang terjadi saat arus listrik mengalir melalui konduktor. Berbagai factor yang menjadi penyebab, seperti resistansi, induktansi, dan kapasitansi dari komponen jaringan. Drop tegangan juga diartikan sebagai terjadinya perbedaan tegangan antara tegangan kirim dari sumber dan tegangan terima atau pusat beban karena adanya impedansi pada jaringan/penghantar. Drop tegangan tersebut dapat memengaruhi kinerja peralatan listrik dan efisiensi operasional. Beberapa factor penyebab drop tegangan dalam jaringan distribusi antara lain:

- a) Panjang Jaringan Distribusi: Jarak yang jauh antara sumber energi dan konsumen menyebabkan resistansi yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan drop tegangan.

- b) Beban Berlebih: Ketika beban di jaringan meningkat melebihi kapasitas, tegangan dapat turun.
- c) Kualitas Konduktor: Penggunaan konduktor dengan ukuran yang tidak memadai dapat meningkatkan resistansi dan mengakibatkan drop tegangan.
- d) Faktor sambungan kabel: Faktor sambungan kabel yang tidak kuat menyebabkan terjadinya lost contact yang dapat memengaruhi nilai tegangan.
- e) Kondisi Lingkungan: Faktor seperti suhu, kelembaban, dan korosi dapat mempengaruhi performa konduktor.
- f) Komponen Jaringan: Komponen seperti trafo, saklar, dan perlindungan yang tidak berfungsi optimal dapat berkontribusi pada drop tegangan.

Dampak dari drop tegangan ini dapat mengakibatkan kinerja peralatan listrik mengalami kerusakan atau beroperasi tidak efisien jika tegangan berada di bawah level yang diperlukan dan pada keandalan sistem, drop tegangan dapat menyebabkan gangguan dan pemadaman listrik, sehingga mengurangi keandalan sistem distribusi.

Energi listrik yang disalurkan dari pembangkit listrik / gardu induk memiliki perbedaan dengan energi yang terjual hal ini disebabkan karena adanya energi yang hilang atau biasa disebut susut energi. Susut/ losses terjadi karena adanya sejumlah energi yang hilang dalam proses pengaliran energi mulai dari sistem pembangkit listrik yang menjadi sumber energi / Gardu Induk sampai dengan konsumen sebagai subjek terakhir yang menikmati listrik (Napitupulu et al., 2019; Rifka Alkhilyatul Ma'rifat, I Made Suraharta, 2024). Hal tersebut diakibatkan faktor Teknik dan faktor non teknik. Faktor teknik terjadi biasanya disebabkan oleh faktor jaringan seperti jenis penghantar dan panjang penghantar dan juga disebabkan oleh trafo distribusi. Selain faktor teknik juga ada faktor non teknik yang terjadi karena adanya pelanggaran atau pencurian listrik yang dilakukan oleh pelanggan, ketidakserempakan dalam pencatatan atau dalam perhitungan kWh meter juga bisa menjadi faktor terjadinya susut.

Capacitor bank merupakan salah satu solusi yang efektif dalam mengatasi masalah drop tegangan ini dan meminimalisir rugi-rugi daya pada jaringan distribusi. Dengan menempatkan kapasitor bank pada titik strategis dalam jaringan distribusi, sehingga dapat meningkatkan profil tegangan dengan menyediakan daya reaktif yang dibutuhkan. Selain itu, penggunaan *kapasitor bank* juga berpotensi untuk meminimalkan rugi-rugi daya aktif (*real power losses*) yang terjadi akibat reaktansi induktif disaluran distribusi.

Optimasi penempatan kapasitor bank tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan kualitas tegangan, tPSS SINCALi juga untuk mencapai efisiensi sistem yang lebih baik. Penempatan yang tidak tepat dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya, sehingga pemodelan dan analisis yang mendalam sangat diperlukan untuk menentukan lokasi dan ukuran kapasitor bank yang optimal.

Umumnya pelanggan PLN dibagi tiga, yaitu pelanggan tegangan tinggi (TT), pelanggan Tegangan Menengah (TM) dan pelanggan Tegangan Rendah (TR). Pelanggan TT merupakan pelanggan yang menggunakan listrik dengan tegangan tinggi. Menurut Standar Internasional Komisi Elektroteknik Internasional, saluran tegangan tinggi adalah saluran yang memiliki tegangan di atas 36.000 volt (36 kV). Listrik disalurkan pada tegangan tinggi untuk meningkatkan efisiensi karena meminimalkan jumlah daya yang hilang saat listrik mengalir dari satu lokasi ke lokasi berikutnya. Peralatan proteksi pada Pelanggan TT menggunakan PMT sebagai pengamannya. Pelanggan Tegangan Menengah (TM) PLN adalah pelanggan bisnis,

industri, dan pemerintah dengan daya di atas 200 kVA. Biasanya pada pelanggan Tegangan Menengah proteksi pengaman terletak pada Relay yang terdapat pada CBOG PLN ke pelanggan. Pelanggan Tegangan Rendah (TR) PLN adalah konsumen rumah tangga, publik dan bisnis dengan rentang daya kontrak dimulai dari daya 450 VA hingga 197 kVA dan menggunakan tegangan 220V (1 fasa) dan tegangan 380V (3 fasa).

Adapun peralatan pengaman pada jaringan distribusi sebagai berikut (Napitupulu et al., 2019):

1. Fuse, adalah suatu peralatan pengaman yang umum, dipakai untuk tegangan menengah. Bahannya terbuat dari perak, tembaga, atau paduan timah. , atau paduan timah. Bahan-bahan ini dirancang untuk cepat meleleh (putus) saat dialiri arus beban lebih atau arus hubung singkat . Berdasarkan pembagiannya fuse dapat dibedakan atas Fuse cutout dan Fuse link.
2. Pemutus Tenaga Circuit Breaker (CB), Pemutus daya tegangan menengah mempunyai besaran nilai tegangan diatas 10 KV. Penggunaan Circuit Breaker (CB) ditempatkan pada saluran transmisi, sistem distribusi dan gardu induk dan juga pada CBO PLN pada Pelanggan TM. Fungsi dari circuit breaker sendiri yaitu sebagai penghubung dan pemisah jaringan sistem jika adanya arus hubung singkat sehingga dapat melindungi sistem distribusi dan meminimalisir daerah padam gangguan.

Pelanggan PLN di Pulau Bangka sendiri, mayoritas pelanggan Tegangan Menengah umumnya berasal dari Pabrik Industri Timah dan Tambak udang yang berlokasi di ujung pantai dan pelosok hutan yang jauh dari sumber pembangkit listrik. Akibat kondisi geografis tersebut, beberapa pelanggan mengalami dampak drop tegangan. Hal ini tentunya menjadi masalah pada aspek kepuasan pelanggan dan di sisi PLN sendiri mengalami rugi-rugi daya akibat drop tegangan tersebut. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Hanif Syuhdi et al. (2023) pada sistem distribusi ULP Maros, Arhami et al. (2023) pada sistem distribusi Lombok, serta Elchrisa et al. (2019) pada Feeder IS.03 Rayon Limboto, telah membuktikan efektivitas capacitor bank dalam memperbaiki faktor daya dan profil tegangan pada jaringan distribusi. Namun demikian, penelitian-penelitian tersebut masih berfokus pada analisis dampak pemasangan tanpa melakukan optimasi lokasi secara komparatif pada beberapa alternatif titik pemasangan, serta belum mempertimbangkan secara spesifik kondisi jaringan panjang dengan karakteristik beban industri yang berada di lokasi terpencil seperti di Pulau Bangka. Selain itu, metode optimasi yang digunakan masih terbatas pada simulasi tunggal tanpa melakukan perbandingan antar kandidat lokasi untuk menentukan titik paling optimal.

METODE PENELITIAN

Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sistem kelitrikan 20 kV PLN UP3 Bangka, data beban penyulang, jenis dan Panjang penghantar, data trafo, data kapasitor yang akan di optimas dan data single line diagram penyulang yang akan di uji. Selanjutnya kemudian melakukan simulasi pada software PSS SINCAL dan menggunakan metode Newton Rhapson.

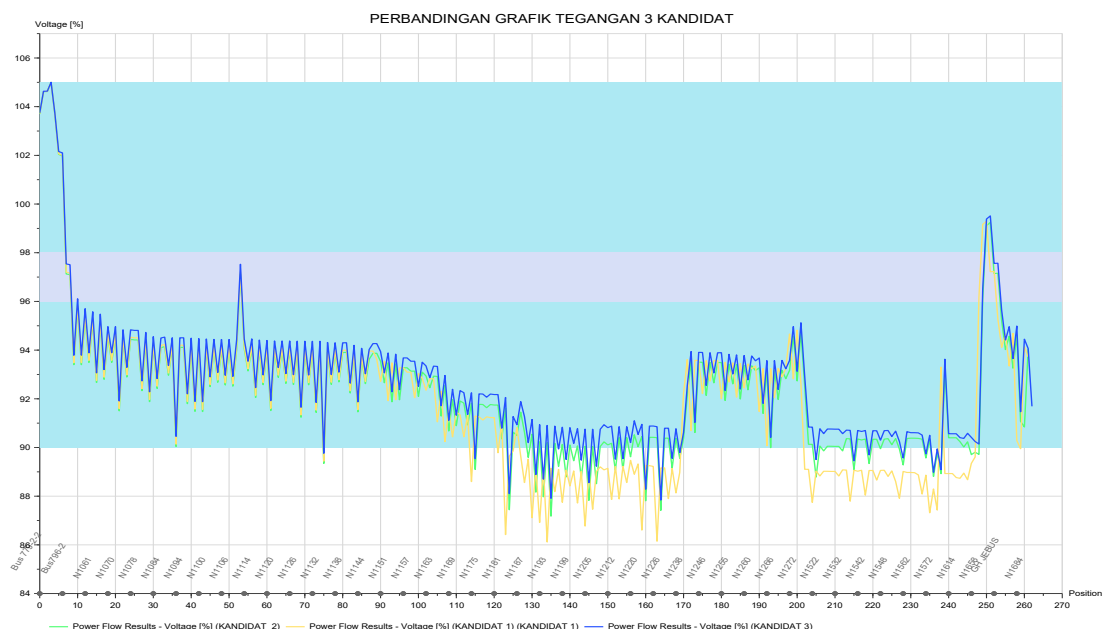
Hasil dan Analisa

Hasil dari simulasi dipergunakan untuk mengetahui profil tegangan dan susut daya pada system 20kV Bangka , dengan mengvaluasi bagaimana dampaknya kepada sistem distribusi (dalam konteks kali ini berfokus kepada tegangan dan susut) sebelum dan sesudah dilakukannya optimasi penempatan kapasitor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Perbandingan Hasil Load Flow 3 Kandidat Pemasangan Kapasitor

Untuk menentukan lokasi pemasangan *capacitor bank* yang paling optimal, dilakukan perbandingan hasil simulasi *load flow* terhadap tiga alternatif lokasi pemasangan, yaitu pada awal daerah yang mengalami penurunan tegangan (Kandidat 1), ujung penyulang (Kandidat 2), dan bagian tengah daerah yang mengalami penurunan tegangan (Kandidat 3). Evaluasi dilakukan berdasarkan dua parameter utama, yaitu profil tegangan pada setiap bus dan besarnya rugi-rugi daya aktif (*active power losses*). Hasil perbandingan profil tegangan ketiga kandidat ditunjukkan pada Gambar 4.7, sedangkan ringkasan hasil simulasi disajikan pada



Gambar 1 Grafik Perbandingan Profil Tegangan Hasil Load Flow Tiga Kandidat Pemasangan Capacitor Bank

Berdasarkan Gambar 1 terlihat bahwa ketiga alternatif pemasangan *capacitor bank* memberikan peningkatan profil tegangan dibandingkan kondisi eksisting. Namun demikian, terdapat perbedaan tingkat efektivitas pada masing-masing lokasi pemasangan. Kurva Kandidat 1 menunjukkan bahwa masih terdapat beberapa titik dengan nilai tegangan yang berada di bawah batas standar operasi, terutama pada bagian akhir penyulang. Kondisi ini mengindikasikan bahwa suplai daya reaktif yang diberikan dari lokasi awal daerah *voltage drop* belum mampu mengkompensasi kebutuhan daya reaktif pada seluruh jaringan sehingga masih terjadi kondisi *undervoltage* pada beberapa bus.

Pada Kandidat 2, profil tegangan mengalami peningkatan yang lebih baik dibandingkan Kandidat 1. Seluruh bus telah berada dalam rentang tegangan yang memenuhi standar SPLN

sehingga kondisi *undervoltage* berhasil dihilangkan. Hal ini menunjukkan bahwa pemasangan *capacitor bank* pada ujung penyulang mampu memperbaiki kualitas tegangan hingga ke titik beban paling jauh. Meskipun demikian, peningkatan profil tegangan pada beberapa ruas penyulang masih belum merata apabila dibandingkan dengan kandidat ketiga.

Sementara itu, Kandidat 3 memperlihatkan profil tegangan yang paling baik. Kurva tegangan pada hampir seluruh bus berada di atas dua kandidat lainnya dan menunjukkan distribusi tegangan yang lebih merata sepanjang penyulang. Penempatan *capacitor bank* pada bagian tengah daerah yang mengalami penurunan tegangan memungkinkan daya reaktif disalurkan secara lebih seimbang ke arah hulu maupun hilir penyulang, sehingga penurunan tegangan akibat impedansi saluran dapat diminimalkan. Dengan demikian, lokasi ini mampu memberikan peningkatan kualitas tegangan secara menyeluruh pada sistem distribusi.

Selain profil tegangan, perbandingan juga dilakukan terhadap besarnya rugi-rugi daya aktif sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1

Tabel 1 Perbandingan Hasil Simulasi Load Flow Tiga Kandidat

Parameter	Kandidat 1	Kandidat 2	Kandidat 3
Daya Aktif Masuk (MW)	5,451	5,428	5,389
Daya Aktif Beban (MW)	4,916	4,916	4,916
Total Rugi-rugi Daya Aktif (MW)	0,535	0,512	0,474
Persentase Rugi-rugi Daya Aktif (%)	9,81	9,43	8,8
Rugi-rugi Transformator (MW)	0,041	0,041	0,041
Rugi-rugi Saluran (MW)	0,494	0,471	0,433
Daya Reaktif Masuk (MVar)	1,098	1,133	1,151
Daya Reaktif Beban (MVar)	2,803	2,803	2,803
Profil Tegangan	Masih terdapat bus <i>undervoltage</i>	Seluruh bus memenuhi standar	Seluruh bus memenuhi standar
Tingkat Efektivitas	Cukup Baik	Baik	Sangat Baik (Terpilih)

Berdasarkan Tabel 1 terlihat bahwa perubahan lokasi pemasangan *capacitor bank* memberikan pengaruh terhadap efisiensi sistem distribusi. Kandidat 1 menghasilkan total rugi-rugi daya aktif sebesar 0,535 MW atau 9,81%, sehingga menjadi kandidat dengan rugi-rugi terbesar di antara ketiga alternatif. Hal tersebut sejalan dengan hasil profil tegangan yang masih menunjukkan adanya bus dengan kondisi *undervoltage*.

Pada Kandidat 2, total rugi-rugi daya aktif turun menjadi 0,512 MW atau 9,43%. Selain itu, seluruh bus telah memenuhi batas tegangan yang dipersyaratkan. Hal ini menunjukkan bahwa perpindahan lokasi *capacitor bank* menuju ujung penyulang mampu meningkatkan efisiensi sistem sekaligus memperbaiki kualitas tegangan.

Hasil terbaik diperoleh pada Kandidat 3, di mana total rugi-rugi daya aktif berhasil diturunkan menjadi 0,474 MW atau 8,80%, dengan rugi-rugi saluran sebesar 0,433 MW, yang merupakan nilai terendah dibandingkan kandidat lainnya. Nilai tersebut menunjukkan bahwa

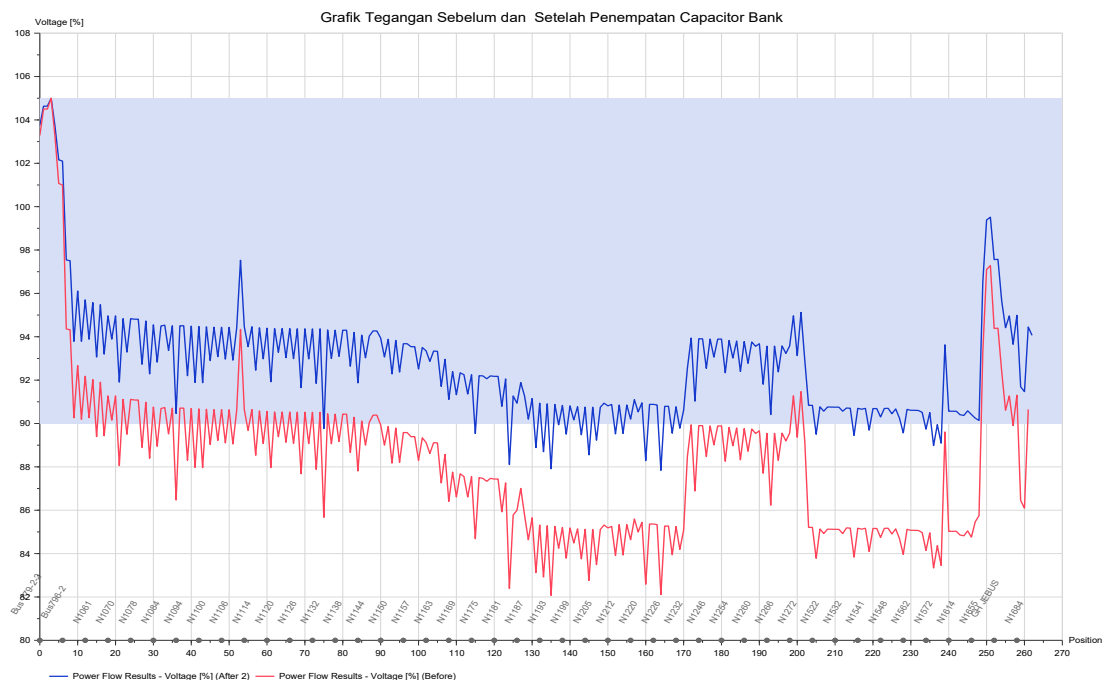
penempatan *capacitor bank* pada bagian tengah daerah yang mengalami penurunan tegangan mampu mengurangi aliran daya reaktif pada saluran secara lebih efektif sehingga arus saluran menurun dan rugi-rugi daya akibat efek I^2R dapat diminimalkan. Selain menghasilkan rugi-rugi daya yang paling kecil, profil tegangan pada seluruh bus juga telah memenuhi standar operasi dan menunjukkan distribusi tegangan yang lebih merata di sepanjang penyulang.

Berdasarkan hasil analisis grafik profil tegangan dan parameter hasil *load flow*, dapat disimpulkan bahwa Kandidat 3 merupakan lokasi pemasangan *capacitor bank* yang paling optimal. Lokasi ini memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan profil tegangan dan penurunan rugi-rugi daya aktif dibandingkan dua alternatif lainnya. Oleh karena itu, Kandidat 3 dipilih sebagai lokasi pemasangan *capacitor bank* pada penelitian ini dan digunakan sebagai dasar analisis pada tahapan selanjutnya.

Perbandingan Sebelum dan Sesudah Optimasi

Setelah dilakukan optimasi penempatan **capacitor bank** pada bus **N1693**, dilakukan perbandingan antara kondisi sistem sebelum dan sesudah optimasi untuk mengetahui pengaruh pemasangan *capacitor bank* terhadap kinerja Penyulang Pelangas. Parameter yang dibandingkan meliputi profil tegangan, rugi-rugi daya aktif (*active losses*), rugi-rugi daya reaktif (*reactive losses*), penurunan tegangan (*voltage drop*), serta faktor daya sistem.

Berdasarkan hasil simulasi Load Flow menggunakan perangkat lunak PSS SINCAL, diperoleh bahwa pemasangan *capacitor bank* memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap peningkatan kualitas tegangan dan efisiensi penyaluran daya pada jaringan distribusi.



Gambar 2 Perbandingan Hasil Grafik Tegangan Penyulang Pelangas Sebelum dan Setelah Optimasi

Grafik perbandingan profil tegangan menunjukkan bahwa pemasangan *capacitor bank* memberikan peningkatan tegangan pada hampir seluruh bus Penyulang Pelangas. Pada kondisi eksisting masih terdapat banyak bus yang memiliki tegangan di bawah batas minimum standar SPLN sebesar 90% (18 kV), terutama pada bagian tengah hingga ujung penyulang. Setelah

dilakukan optimasi, seluruh bus mengalami kenaikan tegangan hingga berada di atas batas minimum yang diperbolehkan.

Peningkatan tersebut terjadi karena capacitor bank menyuplai kebutuhan daya reaktif secara lokal sehingga aliran daya reaktif dari Gardu Induk berkurang. Akibatnya, arus yang mengalir pada penghantar menjadi lebih kecil sehingga jatuh tegangan (*voltage drop*) sepanjang penyulang dapat dikurangi.

Tabel 2 Perbandingan Hasil Load Flow Penyulang Pelangas Kondisi Eksisting dan Setelah Optimasi

Parameter	Existing	Setelah Optimasi	Selisih	Perubahan
Tegangan Minimum	± 82,3 %	± 90,0 %	7,70%	Meningkat
Tegangan Maksimum	±105 %	±105 %	0%	Tetap
Active Losses	0,622 MW	0,474 MW	0,148 MW	Turun 23,79 %
Reactive Losses	-0,623 MVar	-1,652 MVar	-1,029 MVar	Kebutuhan daya reaktif dari sumber menurun
Voltage Drop Maksimum	±17,7 %	±10,0 %	-7,70%	Menurun

Berdasarkan hasil simulasi, rugi-rugi daya aktif mengalami penurunan dari 0,622 MW menjadi 0,474 MW, sehingga terjadi penurunan sebesar 0,148 MW atau sekitar 23,79%. Penurunan rugi-rugi daya ini menunjukkan bahwa sistem distribusi bekerja lebih efisien setelah pemasangan capacitor bank. Berkurangnya aliran daya reaktif menyebabkan arus pada penghantar menurun sehingga rugi-rugi akibat tahanan penghantar (*I²R losses*) juga menjadi lebih kecil.

Selain itu, daya aktif yang harus disuplai dari Gardu Induk juga mengalami penurunan dari 5,538 MW menjadi 5,389 MW, sedangkan daya aktif yang diterima oleh beban tetap sebesar 4,916 MW. Hal tersebut menunjukkan bahwa energi yang hilang selama proses penyaluran menjadi lebih kecil dibandingkan kondisi sebelum optimasi.

Dilakukan analisis terhadap kondisi sistem distribusi 20 kV Penyulang Pelangas sebelum dan sesudah optimasi penempatan capacitor bank menggunakan perangkat lunak PSS SINCAL. Parameter yang dianalisis meliputi profil tegangan dan susut daya (*power losses*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa penempatan capacitor bank pada bus N1693 mampu memperbaiki kualitas tegangan serta meningkatkan efisiensi penyaluran tenaga listrik pada penyulang.

Analisis Profil Tegangan

Profil tegangan merupakan salah satu indikator utama dalam menilai kualitas penyaluran energi listrik pada sistem distribusi. Berdasarkan hasil simulasi kondisi eksisting, masih terdapat sejumlah bus yang memiliki nilai tegangan di bawah batas minimum yang ditetapkan dalam SPLN, yaitu 90% dari tegangan nominal (18 kV). Kondisi tersebut terlihat

pada hasil Single Line Diagram PSS SINCAL, di mana beberapa bus ditampilkan dengan warna merah sebagai indikator bahwa tegangan berada di bawah batas yang diizinkan.

Penurunan tegangan pada Penyulang Pelangas terutama disebabkan oleh panjang jaringan distribusi yang mencapai sekitar 113,15 km. Semakin panjang saluran distribusi, semakin besar impedansi total jaringan yang terdiri dari resistansi dan reaktansi penghantar. Ketika arus mengalir menuju beban, impedansi tersebut menyebabkan terjadinya jatuh tegangan (*voltage drop*) yang semakin besar pada lokasi yang jauh dari Gardu Induk.

Selain panjang jaringan, besarnya pembebanan pada penyulang juga memberikan pengaruh terhadap penurunan tegangan. Pada saat kondisi beban puncak (WBP), Penyulang Pelangas memiliki beban sebesar 5,5 MW, sehingga arus yang mengalir pada penghantar meningkat. Bertambahnya arus menyebabkan rugi-rugi tegangan pada penghantar menjadi semakin besar, terutama pada ruas-ruas saluran yang memiliki panjang relatif jauh dari sumber.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa bus-bus yang berada pada bagian tengah hingga ujung penyulang merupakan lokasi yang mengalami tegangan terendah. Kondisi tersebut sesuai dengan karakteristik sistem distribusi radial, di mana tegangan akan semakin menurun seiring bertambahnya jarak dari Gardu Induk akibat akumulasi jatuh tegangan pada setiap ruas saluran.

Setelah dilakukan optimasi dengan pemasangan capacitor bank pada bus N1693, profil tegangan mengalami peningkatan pada seluruh jaringan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh bus telah berada di atas batas minimum tegangan sebesar 18 kV (90%), yang ditunjukkan dengan perubahan warna bus menjadi hijau pada tampilan SLD PSS SINCAL. Selain itu, grafik profil tegangan setelah optimasi memperlihatkan kurva tegangan yang lebih tinggi dan lebih stabil dibandingkan kondisi eksisting.

Perbaikan profil tegangan tersebut terjadi karena capacitor bank menyuplai daya reaktif secara lokal di sekitar pusat beban. Dengan berkurangnya kebutuhan daya reaktif yang harus disuplai dari Gardu Induk, arus yang mengalir sepanjang penghantar menjadi lebih kecil sehingga jatuh tegangan pada jaringan juga menurun. Akibatnya, tegangan pada setiap bus meningkat dan menjadi lebih mendekati tegangan nominal.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penempatan capacitor bank pada lokasi yang tepat mampu meningkatkan kualitas tegangan sistem distribusi tanpa harus melakukan perubahan konfigurasi jaringan maupun penambahan penghantar.

Analisis Susut Daya (*Losses*)

Susut daya merupakan daya yang hilang selama proses penyaluran energi listrik akibat adanya impedansi pada penghantar maupun transformator distribusi. Berdasarkan hasil simulasi Load Flow menggunakan PSS SINCAL, nilai susut daya aktif pada kondisi eksisting sebesar 0,622 MW, sedangkan setelah dilakukan optimasi menurun menjadi 0,474 MW. Dengan demikian terjadi penurunan susut daya sebesar 0,148 MW atau sekitar 23,79%.

Besarnya susut daya pada kondisi eksisting dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah panjang jaringan distribusi yang cukup panjang. Penyulang Pelangas memiliki panjang saluran lebih dari 113 km, sehingga resistansi total penghantar menjadi relatif besar. Ketika arus listrik mengalir melalui penghantar tersebut, sebagian energi listrik akan berubah menjadi panas akibat tahanan penghantar, sehingga menimbulkan susut daya.

Selain faktor panjang jaringan, besarnya aliran daya reaktif juga memberikan kontribusi terhadap meningkatnya susut daya. Sebelum dilakukan optimasi, kebutuhan daya reaktif

seluruh beban masih dipenuhi oleh Gardu Induk sehingga daya reaktif harus mengalir sepanjang penyulang. Aliran daya reaktif ini menyebabkan arus total pada penghantar meningkat, meskipun daya aktif yang disalurkan tetap sama.

Berdasarkan prinsip dasar sistem tenaga, susut daya pada penghantar mengikuti persamaan:

$$P_{loss} = I^2 R \quad (4)$$

di mana:

- P_{loss} = susut daya (W)
- I = arus penghantar (A)
- R = resistansi penghantar (Ω)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa susut daya berbanding lurus dengan kuadrat arus. Oleh karena itu, sedikit penurunan arus akan menghasilkan penurunan susut daya yang cukup signifikan.

Setelah capacitor bank dipasang pada bus N1693, sebagian kebutuhan daya reaktif dipenuhi secara lokal sehingga daya reaktif yang harus disuplai dari Gardu Induk menjadi lebih kecil. Berkurangnya aliran daya reaktif menyebabkan arus pada penghantar menurun. Penurunan arus inilah yang mengakibatkan susut daya pada saluran distribusi juga mengalami penurunan.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penurunan terbesar terjadi pada susut daya saluran (*line losses*), sedangkan susut pada transformator hanya mengalami perubahan yang relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa capacitor bank lebih efektif mengurangi rugi-rugi pada penghantar distribusi dibandingkan pada transformator.

Selain menurunkan susut daya, berkurangnya arus juga menyebabkan kemampuan penghantar dalam menyalurkan daya menjadi lebih baik karena pembebanan penghantar menurun. Kondisi tersebut berdampak pada meningkatnya efisiensi sistem distribusi dan kualitas pelayanan kepada pelanggan.

Analisis Pengaruh Capacitor Bank

Pemasangan capacitor bank merupakan salah satu metode kompensasi daya reaktif yang banyak diterapkan pada sistem distribusi tenaga listrik untuk meningkatkan kualitas penyaluran energi listrik. Pada penelitian ini, capacitor bank dipasang pada bus N1693 berdasarkan hasil analisis kondisi eksisting yang menunjukkan adanya penurunan tegangan pada beberapa bus serta besarnya susut daya pada Penyulang Pelangas. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PSS SINCAL, pemasangan capacitor bank memberikan pengaruh positif terhadap kinerja sistem distribusi yang ditinjau dari profil tegangan, susut daya, faktor daya, dan aliran daya reaktif.

a. Perbaikan Profil Tegangan

Salah satu dampak utama dari pemasangan capacitor bank adalah meningkatnya profil tegangan pada jaringan distribusi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa setelah capacitor bank dipasang pada bus N1693, tegangan pada seluruh bus mengalami peningkatan sehingga berada di atas batas minimum yang dipersyaratkan oleh SPLN, yaitu 90% dari tegangan nominal 20 kV (18 kV).

Peningkatan tegangan terjadi karena capacitor bank menghasilkan daya reaktif (*reactive power*) yang dibutuhkan oleh beban di lokasi pemasangan. Dengan tersedianya daya reaktif secara lokal, kebutuhan daya reaktif dari Gardu Induk menjadi berkurang sehingga jatuh tegangan (*voltage drop*) sepanjang penyulang dapat diminimalkan. Kondisi ini terlihat pada

grafik profil tegangan setelah optimasi, di mana kurva tegangan berada pada nilai yang lebih tinggi dibandingkan kondisi eksisting dan seluruh bus telah memenuhi standar operasi yang ditetapkan.

b. Penurunan Susut Daya

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa pemasangan capacitor bank mampu menurunkan susut daya aktif (*active power losses*) pada Penyulang Pelangas. Nilai susut daya aktif setelah optimasi menjadi lebih kecil dibandingkan kondisi sebelum optimasi. Penurunan ini menunjukkan bahwa proses penyaluran energi listrik menjadi lebih efisien karena energi yang hilang selama transmisi dan distribusi dapat dikurangi.

Penurunan susut daya terutama terjadi pada saluran distribusi karena capacitor bank mengurangi arus yang mengalir pada penghantar. Semakin kecil arus yang mengalir pada penghantar, maka semakin kecil pula energi yang hilang akibat tahanan penghantar. Oleh karena itu, pengurangan arus akibat kompensasi daya reaktif secara langsung menurunkan susut daya pada jaringan distribusi.

c. Perbaikan Faktor Daya

Pemasangan capacitor bank juga memberikan pengaruh terhadap peningkatan faktor daya (*power factor*) sistem. Sebelum dilakukan optimasi, sebagian besar kebutuhan daya reaktif dipenuhi oleh Gardu Induk sehingga daya semu (*apparent power*) yang disalurkan relatif besar. Setelah capacitor bank dipasang, sebagian kebutuhan daya reaktif dipenuhi secara lokal sehingga komponen daya reaktif yang harus disuplai dari sumber menjadi lebih kecil.

Berkurangnya komponen daya reaktif menyebabkan nilai faktor daya sistem meningkat atau menjadi lebih mendekati satu (*unity power factor*). Faktor daya yang lebih baik menunjukkan bahwa pemanfaatan daya aktif menjadi lebih efektif dan kapasitas jaringan dapat digunakan secara lebih optimal.

d. Pengurangan Aliran Daya Reaktif

Selain meningkatkan faktor daya, capacitor bank juga berfungsi mengurangi aliran daya reaktif yang berasal dari Gardu Induk menuju beban. Berdasarkan hasil simulasi *Load Flow*, kebutuhan daya reaktif dari sumber mengalami penurunan setelah pemasangan capacitor bank. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian kebutuhan daya reaktif telah dipenuhi langsung oleh capacitor bank pada lokasi pemasangan.

Berkurangnya aliran daya reaktif memberikan beberapa keuntungan, antara lain menurunkan arus pada penghantar, mengurangi pembebanan saluran distribusi, memperbaiki profil tegangan, serta meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Dengan demikian, jaringan distribusi dapat menyalurkan daya aktif secara lebih optimal kepada pelanggan.

e. Efektivitas Penempatan Capacitor Bank

Berdasarkan hasil simulasi, penempatan capacitor bank pada bus **N1693** terbukti efektif dalam meningkatkan performa Penyulang Pelangas. Hal ini ditunjukkan oleh meningkatnya profil tegangan hingga seluruh bus memenuhi batas minimum standar SPLN, menurunnya susut daya aktif, berkurangnya kebutuhan daya reaktif dari sumber, serta membaiknya faktor daya sistem.

Pemilihan lokasi pemasangan capacitor bank pada bus N1693 juga menunjukkan bahwa kompensasi daya reaktif akan memberikan hasil yang lebih optimal apabila ditempatkan

pada area yang memiliki kebutuhan daya reaktif tinggi atau berada di dekat bagian jaringan yang mengalami penurunan tegangan terbesar. Dengan demikian, energi reaktif dapat disuplai langsung di sekitar pusat beban sehingga aliran daya reaktif yang melalui penghantar menjadi lebih kecil.

Analisis Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Tabel 3 Analisis Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

No	Peneliti	Metode	Hasil Penelitian
1	Hanif Syuhdi, Sarma Thaha, Nurhayati Jabir	Analisis Load Flow (ETAP)	Pemasangan capacitor bank meningkatkan faktor daya dan memperbaiki tegangan pada jaringan distribusi tegangan menengah PT PLN ULP Maros.
2	Kukuh Maulana, Abraham Lomi, Irrine Budi S.	Optimasi penempatan capacitor bank menggunakan analisis Load Flow (ETAP)	Penempatan capacitor bank yang optimal mampu meminimalkan rugi-rugi daya serta meningkatkan profil tegangan pada sistem distribusi 20 kV Lombok.
3	Christopher Elchrisa, L.M. Kamil, Ade Irawaty Tolago	Optimasi penempatan capacitor bank menggunakan analisis Load Flow (ETAP)	Penempatan capacitor bank pada lokasi optimal meningkatkan kualitas tegangan pada jaringan distribusi 20 kV Feeder IS.03 Rayon Limboto.
4	Bagus Ferdiansah, Agus Margiantono, Fahrudin Ahmad	Analisis pengaruh capacitor bank (ETAP)	Pemasangan capacitor bank meningkatkan faktor daya dan mengurangi nilai jatuh tegangan (<i>voltage drop</i>) pada jaringan distribusi.
5	Penelitian ini	Analisis Load Flow dan optimasi penempatan capacitor bank (PSS SINCAL)	Pemasangan capacitor bank pada bus N1693 meningkatkan profil tegangan sehingga seluruh bus memenuhi standar SPLN (>18 kV), menurunkan susut daya aktif dari 0,622 MW menjadi 0,474 MW (23,79%), serta mengurangi kebutuhan daya reaktif dari 2,180 MVar menjadi 1,151 MVar.

Untuk mengetahui tingkat keberhasilan penelitian yang dilakukan, hasil optimasi penempatan capacitor bank pada Penyulang Pelangas dibandingkan dengan beberapa penelitian terdahulu yang membahas penerapan capacitor bank pada sistem distribusi tenaga listrik. Perbandingan dilakukan berdasarkan metode yang digunakan serta hasil yang diperoleh terhadap peningkatan profil tegangan, penurunan susut daya, dan perbaikan faktor daya.

Evaluasi Kinerja Sistem

Secara keseluruhan, hasil optimasi menunjukkan bahwa pemasangan capacitor bank pada bus N1693 mampu meningkatkan kinerja operasi Penyulang Pelangas. Perbaikan tersebut ditunjukkan oleh meningkatnya kualitas tegangan, berkurangnya susut daya, menurunnya kebutuhan daya reaktif dari sumber, serta tidak ditemukannya kondisi undervoltage maupun overvoltage setelah optimasi. Dengan demikian, penerapan capacitor bank pada lokasi tersebut

dapat dinilai efektif dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik 20 kV.

Tabel 4 Parameter Hasil Load Flow Evaluasi Kinerja Sistem

Indikator	Hasil Evaluasi	Keterangan
Tegangan minimum	> 18 kV	Memenuhi standar SPLN
Tegangan maksimum	Tidak melebihi batas operasi	Tidak terjadi overvoltage
Susut daya aktif	0,474 MW	Menurun setelah optimasi
Kebutuhan daya reaktif	1,151 MVar	Berkurang setelah pemasangan capacitor bank
Faktor daya	Meningkat	Sistem lebih efisien
Keandalan sistem	Meningkat	Profil tegangan lebih stabil dan kualitas penyaluran lebih baik

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis menggunakan perangkat lunak PSS SINCAL, didapatkan hasil optimasi penempatan capacitor bank pada jaringan distribusi 20 kV Penyulang Pelangas mampu meningkatkan kinerja sistem distribusi tenaga listrik. Penempatan capacitor bank pada lokasi yang optimal terbukti memperbaiki profil tegangan, terutama pada node-node kritis yang sebelumnya mengalami tegangan rendah, sehingga nilai tegangan menjadi lebih mendekati tegangan nominal. Selain itu, pemasangan capacitor bank juga mampu mengurangi aliran daya reaktif yang mengakibatkan penurunan rugi-rugi daya (losses), sehingga efisiensi penyaluran energi listrik menjadi lebih baik.

Hasil simulasi berbagai alternatif penempatan menunjukkan bahwa lokasi capacitor bank yang dipilih memberikan peningkatan profil tegangan dan penurunan losses yang lebih optimal dibandingkan kondisi eksisting. Dengan demikian, tujuan penelitian yang meliputi optimasi penempatan capacitor bank, identifikasi lokasi strategis pemasangan, pemodelan menggunakan perangkat lunak PSS SINCAL, serta analisis pengaruh capacitor bank terhadap profil tegangan dan efisiensi sistem tenaga telah tercapai sesuai dengan hasil simulasi yang diperoleh.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis optimasi penempatan capacitor bank pada sistem distribusi 20 kV Penyulang Pelangas menggunakan perangkat lunak PSS SINCAL, dapat disimpulkan bahwa optimasi penempatan capacitor bank pada bus N1693 berhasil meningkatkan profil tegangan pada Penyulang Pelangas, di mana setelah optimasi seluruh bus memiliki tegangan di atas batas minimum 18 kV (90% dari tegangan nominal 20 kV) sehingga telah memenuhi standar tegangan yang berlaku pada sistem distribusi. Karakteristik beban dan konfigurasi jaringan turut berpengaruh terhadap penentuan lokasi pemasangan capacitor bank, mengingat Penyulang Pelangas memiliki panjang jaringan sekitar 113,15 km dengan beban maksimum 5,5 MW yang menyebabkan terjadinya penurunan tegangan dan peningkatan susut daya pada bagian tengah hingga ujung penyulang, sehingga penempatan capacitor bank pada lokasi dengan kebutuhan daya reaktif tinggi mampu memberikan perbaikan kinerja sistem secara lebih efektif. Lokasi optimal pemasangan capacitor bank ditentukan melalui analisis

Load Flow pada PSS SINCAL dengan mempertimbangkan kondisi profil tegangan, kebutuhan daya reaktif, serta distribusi pembebanan pada jaringan; dari tiga titik lokasi kandidat yang ditetapkan, kandidat 3 pada bus N1693 terbukti menjadi lokasi paling efektif untuk pemasangan capacitor bank karena mampu memperbaiki profil tegangan, menurunkan susut/rugi-rugi daya, serta meningkatkan efisiensi sistem distribusi. Secara keseluruhan, pemasangan capacitor bank memberikan dampak positif terhadap kinerja sistem distribusi, yaitu menurunkan susut daya aktif dari 0,622 MW menjadi 0,474 MW atau sebesar 23,79%, mengurangi kebutuhan daya reaktif dari sumber, meningkatkan faktor daya, serta memperbaiki kualitas penyaluran energi listrik pada Penyulang Pelangas.

REFERENSI

- Abadi, A., & Syafii. (2015). Analisa Perbaikan Profil Tegangan Sistem Tenaga Listrik Sumbar Menggunakan Kapasitor Bank dan Tap Transformator. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 4(2), 158. <https://doi.org/10.25077/jnte.v4n2.145.2015>
- Alland, K., & Arfah Z., E. (2013). Perancangan Kebutuhan Kapasitor Bank untuk Perbaikan Faktor Daya pada Line Mess I di PT. Bumi Lamongan Sejati (WBL). *Jurnal Teknik Elektro*, 2(1), 29–35.
- Almanda, D., & Majid, N. (2019). Studi Analisa Penyebab Kerusakan Kapasitor Bank Sub Station Welding di PT. Astra Daihatsu Motor. *Resistor (Elektronika Kendali Telekomunikasi Tenaga Listrik Komputer)*, 2(1), 7–14. <https://doi.org/10.24853/resistor.2.1.7-14>
- Arhami, K. M., Lomi, A., & Budi S, I. (2023). Meningkatkan Profil Tegangan pada Sistem Distribusi 20 kV Lombok. *Magnetika*, 7, 312–327.
- Desmira, N., & Khoirunnisa. (2020). Pengaruh susut energi (losses) pada jaringan distribusi (studi kasus: di PT. Krakatau Daya Listrik). *Energi Dan Kelistrikan: Jurnal Ilmiah*, 12(2), 80–89.
- Elchrisa, C., Amali, L. K., & Tolago, A. I. (2019). Analisis Optimasi Penempatan Kapasitor Bank pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV Feeder IS.03 Rayon Limboto untuk Memperbaiki Kualitas Tegangan. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 1(1), 25–31. <https://doi.org/10.37905/jjee.v1i1.2725>
- Ferdiansah, B., Margiantono, A., & Ahmad, F. (2023). Analisis Pengaruh Kapasitor Bank terhadap Nilai Faktor Daya dan Nilai Jatuh Tegangan. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 5(2), 234–241. <https://doi.org/10.37905/jjee.v5i2.20893>
- Manalu, J. T., Panggabean, S. M., Napitupulu, J., Sinaga, J., & Jumari, J. (2023). Analisa Rugi-Rugi Daya pada Saluran Distribusi Tegangan Menengah 20 kV di PT. PLN (Persero) UP3 Sibolga. *Jurnal Teknologi Energi Uda: Jurnal Teknik Elektro*, 12(1), 15. <https://doi.org/10.46930/jteu.v12i1.2843>
- Napitupulu, J., Ginting, Y., & Gaol, M. L. (2019). 302-181-715-1-10-20191021 (1). *VIII*(September), 62–72.
- Nilhusna, Rauf, R., & Budiman. (2024). Analisa Susut Tegangan dan Rugi-Rugi Daya pada SUTM 20 kV pada Unit PT. PLN (Persero) ULP Lubuk Sikaping Pasaman Sumatera Barat. *Jurnal Mesil*, 5(2), 117–128. <https://doi.org/10.53695/jm.v5i2.1129>
- Pramono, T. J., & Soewono, S. (2018). Analisis Drop Tegangan pada Jaringan Tegangan Menengah. *Energi & Kelistrikan*, 10, 26–37.
- Rafi, M. (2023). Pengaruh Sudut Daya pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah Jaringan Kabel dan Udara. *RELE (Rekayasa Elektriika dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, 6(1), 24–28. <https://doi.org/10.30596/rele.v6i1.15452>
- Rifka Alkhilyatul Ma'rifat, I Made Suraharta, I. I. J. (2024). *MENYUSUTKAN RUGI – RUGI*

DAYA PADA PENYULANG MTL DAN PENYULANG BJM DENGAN MEREKONFIGURASI JARINGAN TEGANGAN MENENGAH. 2, 306–312.

- Siregar, A. M., Badriana, B., Yusdartono, H. M., & Hasibuan, A. (2023). Perbaikan Nilai Susut Teknis Jaringan Tegangan Menengah pada Feeder K.H. 05 (Case Study PLN ULP Krueng Geukueh). *Jurnal Energi Elektrik*, 12(1), 24. <https://doi.org/10.29103/jee.v12i1.11708>
- Suprianto. (2018). Analisa Tegangan Jatuh pada Jaringan Distribusi 20 kV PT. PLN Area Rantau Prapat Rayon Aek Kota Batu. *Journal of Electrical Technology*, 3(2), 64–72.
- Syuhdi, A. H., Sarma, T., & Nurhayati, J. (2023). Analisis Pengaruh Kapasitor Bank untuk Perbaikan Faktor Daya dan Tegangan Menengah PT. PLN ULP Maros. *Journal of Power and Energy Systems*, 1(2), 1–9.
- Syukri, S., Muliadi, M., & Akbar, A. (2024). Analisa Perhitungan Susut Teknis di PT. PLN (Persero) Rayon Singkil. *Elektrika*, 16(1), 20. <https://doi.org/10.26623/elektrika.v16i1.8854>
- Yuntyansyah, P. A., Wibawa, U., & Utomo, T. (2015). Studi Perkiraan Susut Teknis dan Alternatif Perbaikan pada Penyulang Kayoman Gardu Induk Sukorejo. *Program Studi Teknik Elektro, Universitas Brawijaya*, 1–8.
- Zuraidah, T., AmaniDarma, T., Siti, A., & Tri, Y. K. (2020). Penggunaan Kapasitor Bank sebagai Solusi Drop Tegangan pada Jaringan 20 kV. *Seminar Nasional Teknik (Semnastek) USU*, 82–86.