

Implementation of Optimal Capacitor Placement for Improving Network Efficiency on the Feeder

Implementasi Optimal Capacitor Placement untuk Peningkatan Efisiensi Jaringan di Penyulang

Gizella Ch. A Doodoh, Maickel Tuegeh, Glanny Mangindaan

Dept. of Electrical Engineering, Sam Ratulangi University Manado, Kampus Bahu St., 95115, Indonesia

e-mails : gzelladoodoh023@student.unsrat.ac.id, maickel_tuegeh@unsrat.ac.id,
glanny_m@unsrat.ac.id

Received: [date]; Revised: [date]; Accepted: [date]

Abstract — *The Doyot Feeder is one of the electrical distribution networks under the Bengkayang Customer Service Unit (ULP) that experiences significant power losses of 930 kW or 7,91%, along with substantial voltage drops at load point located far from the main substation. These conditions negatively impact distribution efficiency and the quality of electricity supply to customers. This study aims to improve the efficiency of the distribution network through the implementation of Optimal capacitor Placement using the DIgSILENT PowerFactory software. The methodology includes field data collection, system modeling in DIgSILENT, model validation by comparing measurement data and simulation results (with Root Mean Square Error below 5%), and capacitor placement simulation. Capacitor location was determined based on the points with the lowest voltage and highest reactive power. A 1,44 kVAR capacitor was used and placed on the most critical busbar identified through load flow analysis. Simulation results show an improvement in end-feeder voltage from 17,14 kV to 18,43 kV and a reduction in power losses from 930 kW to 890 kW. Additionally, operational cost saving were achieved due to the reduction in energy losses. Therefore, the implementation of Optimal Capacitor Placement proves to be effective in reducing power losses, improving voltage quality, and enhancing the efficiency of the electrical distribution network in the Doyot Feeder.*

Keywords: *Doyot Feeder, losses, capacitor, DIgSILENT PowerFactory, Optimal Capacitor Placement, network.*

Abstrak — *Penyulang Doyot merupakan salah satu jaringan distribusi listrik di bawah Unit Layanan Pelanggan (ULP) Bengkayang yang memiliki tingkat rugi-rugi daya (losses) cukup tinggi, yaitu sebesar 930 kW atau 7,91%, serta mengalami penurunan tegangan yang signifikan pada titik-titik beban yang jauh dari gardu induk. Kondisi ini berdampak pada efisiensi distribusi dan kualitas suplai listrik kepada pelanggan. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi jaringan distribusi listrik melalui implementasi Optimal Capacitor Placement dengan bantuan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory. Metodologi yang digunakan meliputi pengumpulan data teknis*

lapangan, pemodelan sistem jaringan distribusi pada aplikasi DIgSILENT, validasi model melalui perbandingan data pengukuran dan hasil simulasi dengan Root Mean Square Error (RMSE) kurang dari 5%, serta simulasi penempatan kapasitor secara optimal. Penentuan Lokasi berdasarkan titik tegangan terendah dan beban reaktif tertinggi pada jaringan. Kapasitor yang digunakan memiliki nilai 1,44 kVAR dan dipasang pada busbar yang menunjukkan performa paling kritis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa setelah pemasangan kapasitor, terjadi peningkatan tegangan ujung penyulang dari 17,14 kV menjadi 18,43 kV dengan penurunan susut dari 930 kW menjadi 890 kW. Dengan demikian, implementasi Optimal Capacitor Placement terbukti efektif dalam menurunkan susut daya, memperbaiki kualitas tegangan, dan meningkatkan efisiensi jaringan distribusi listrik di Penyulang Doyot.

Kata kunci: *Penyulang Doyot, losses, kapasitor, DIgSILENT PowerFactory, Optimal Capacitor Placement, Efisiensi jaringan.*

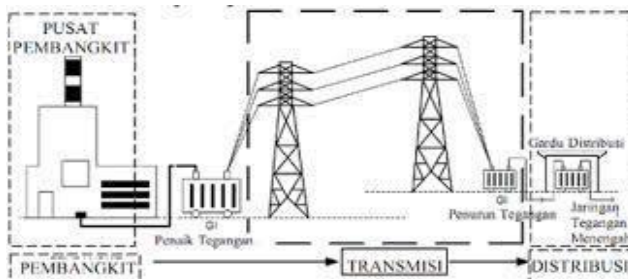
I. PENDAHULUAN

Permintaan terhadap pasokan listrik yang stabil dan efisien terus meningkat seiring berkembangnya kebutuhan energi dari sektor rumah tangga, industri, maupun komersial. PT PLN (Persero), sebagai perusahaan utama dalam penyediaan listrik di Indonesia, menghadapi tantangan besar dalam menjaga kualitas sistem distribusi, terutama terkait tingginya tingkat kehilangan energi (losses) yang berdampak langsung pada performa operasional dan mutu pelayanan kepada pelanggan. Salah satu kasus yang cukup menonjol terjadi pada jaringan distribusi Penyulang Doyot di ULP Bengkayang, di mana rugi daya mencapai angka 141.264 kWh. Besarnya rugi-rugi energi ini umumnya disebabkan oleh tingginya aliran arus reaktif yang timbul akibat dominasi beban induktif, serta panjangnya bentangan jaringan yang menyebabkan fluktuasi beban. Kehadiran arus reaktif dalam sistem distribusi tidak hanya menurunkan efisiensi penyaluran daya, tetapi juga dapat memicu penurunan tegangan dan menambah beban biaya operasional. Untuk itu, dibutuhkan solusi teknis yang mampu menekan rugi-rugi energi serta memperbaiki kinerja sistem. Salah satu metode yang telah terbukti efektif dalam mengatasi permasalahan ini adalah dengan memasang kapasitor shunt pada titik-titik

strategis dalam jaringan, yang berfungsi untuk meningkatkan faktor daya dan menurunkan arus reaktif. Berbagai penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa optimalisasi penempatan kapasitor dapat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap pengurangan losses dan peningkatan efisiensi sistem distribusi. Pendekatan yang digunakan pun bervariasi, mulai dari metode konvensional hingga penggunaan algoritma cerdas dan simulasi komputer. Salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan dalam menganalisis dan mengoptimalkan sistem tenaga listrik adalah DIGSILENT PowerFactory, yang memiliki fitur simulasi aliran daya, analisis tegangan, serta kemampuan untuk menentukan lokasi pemasangan kapasitor secara optimal dan akurat. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini diarahkan pada penerapan metode Optimal Capacitor Placement (OCP) pada jaringan distribusi Penyulang Doyot dengan bantuan simulasi menggunakan DIGSILENT PowerFactory. Fokus utamanya adalah menentukan lokasi dan kapasitas kapasitor yang paling efektif dalam menekan susut daya dan memperbaiki kualitas tegangan di jaringan, serta mengevaluasi dampaknya terhadap efisiensi biaya operasional sistem. Melalui pendekatan ini, diharapkan penelitian dapat memberikan solusi teknis yang aplikatif dan efisien bagi PT PLN dalam upaya meningkatkan kinerja sistem distribusi energi di wilayah ULP Bengkayang. Selain itu, hasil studi ini juga dapat dijadikan acuan atau referensi dalam strategi penempatan kapasitor di jaringan distribusi lain yang memiliki karakteristik serupa di seluruh Indonesia.

A. Sistem Distribusi Tegangan Menengah

Sistem distribusi tegangan menengah adalah satu bagian penting dari sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari gardu induk (*substation*) ke konsumen akhir, baik industri, komersial, maupun perumahan. Sistem ini biasanya beroperasi pada rentang tegangan 1 kV hingga 35 kV. Di Indonesia umumnya digunakan tegangan 20kV dan 10kV untuk sistem distribusi tegangan menengah, dan merupakan jembatan antara sistem transmisi tegangan tinggi dan sistem distribusi tegangan rendah yang langsung melayani konsumen. Jarak penyaluran daya listrik dalam sistem distribusi tegangan menengah biasanya lebih panjang dibandingkan dengan sistem tegangan rendah, tetapi lebih pendek dibandingkan dengan sistem transmisi tegangan tinggi. Jarak yang lebih panjang ini dapat menimbulkan rugi-rugi daya yang lebih besar jika tidak dikelola dengan baik.



Gambar 1 Sistem distribusi tegangan menengah

Komponen utama sistem distribusi tegangan menengah yang mendukung penyaluran energi listrik secara efisien:

1. **Gardu induk (*substation*):** Gardu Induk merupakan salah satu bagian vital dalam sistem tenaga Listrik yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari level transmisi (tegangan tinggi) ke level distribusi (tegangan menengah). Gardu induk

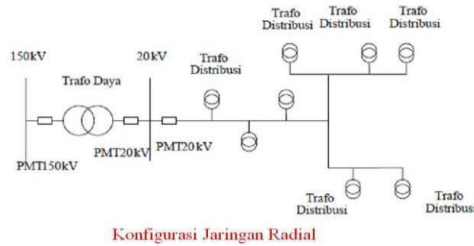
juga bertanggung jawab atas pembagian daya ke beberapa saluran distribusi (penyulang). Gardu induk digunakan untuk menurunkan tegangan dari Tingkat transmisi (misalnya 150 kV atau lebih) ke tingkat distribusi menengah (seperti 20 kV), agar listrik dapat disalurkan dengan aman dan efisien ke konsumen akhir melalui penyulang distribusi.

2. **Penyulang (*feeder*):** Penyulang yang merupakan saluran untuk membawa daya dari gardu induk ke konsumen atau gardu distribusi. Dalam sistem distribusi tegangan menengah, penyulang seringkali memiliki panjang yang cukup signifikan dan melayani berbagai jenis beban induktif, yang dapat menyebabkan rugi-rugi daya jika tidak dioptimalkan. Penyulang biasanya dirancang dalam bentuk jaringan *radial*, *loop*, atau *mesh* tergantung pada kebutuhan keandalan sistem dan karakteristik wilayah yang dilayani.
3. **Transformator Distribusi:** Transformator ini digunakan untuk menurunkan tegangan dari tegangan menengah (20kV atau 10kV) menjadi tegangan rendah (400 V atau 230 V) yang dapat langsung digunakan oleh konsumen akhir. Transformator distribusi biasanya ditempatkan pada gardu distribusi, yang tersebar di berbagai titik sesuai dengan sebaran beban. Keberadaan transformator distribusi sangat penting karena menjadi penghubung terakhir antara sistem distribusi tegangan menengah dan instalasi konsumen. Dengan efisiensi kerja yang tinggi, transformator ini memastikan bahwa daya Listrik dapat dikirimkan dengan tegangan yang stabil dan sesuai standar.
4. **Kabel dan Konduktor:** Pada jaringan distribusi tegangan menengah, konduktor biasanya dipasang baik di udara (*overhead*) maupun dibawah tanah (*underground*), tergantung pada kondisi geografis dan kebutuhan. Penggunaan kabel yang tepat menjadi penting untuk menjaga efisiensi dan stabilitas sistem distribusi. Dalam jaringan distribusi, terdapat dua metode utama pemasangan konduktor, yaitu sistem saluran udara (*overhead line*) dan sistem kabel tanah (*underground cable*). Saluran udara menggunakan konduktor telanjang (*bare conductor*) yang di topang oleh tiang atau menara distribusi.
5. **Drop Tegangan:** adalah penurunan tegangan terjadi disepanjang jaringan distribusi, terutama pada penyulang yang panjang yang menyebabkan kualitas suplai listrik yang buruk bagi konsumen, khususnya yang berada jauh dari gardu induk. Hal ini juga dikarenakan jaringan distribusi tegangan menengah memiliki kapasitas terbatas dalam hal kemampuan membawa arus. Jika beban terus meningkat tanpa ada peningkatan kapasitas jaringan, sistem dapat mengalami *overload* yang berpotensi menyebabkan kerusakan. Fenomena ini terjadi karena setiap konduktor atau kabel dalam sistem distribusi memiliki resistansi dalam impedansi tertentu. Saat arus listrik mengalir melewati kabel, maka Sebagian energi listrik akan berubah menjadi panas akibat hambatan dari

konduktor tersebut. Akibatnya, energi listrik yang sampai ke ujung saluran menjadi lebih kecil dari yang dikirim dari sumber. Semakin panjang kabel atau semakin besar arus yang mengalir, semakin besar pula drop tegangan yang terjadi. Penurunan ini tidak hanya berdampak pada performa alat-alat listrik konsumen, tetapi juga bisa mempercepat kerusakan peralatan jika terjadi terus-menerus dalam jangka waktu Panjang.

Adapun beberapa jenis sistem distribusi tegangan menengah:

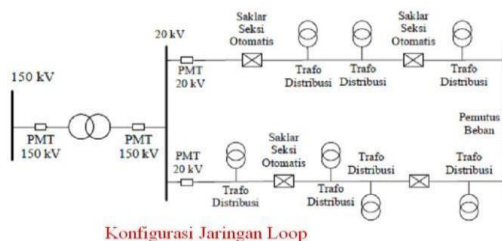
1. Radial system:



gambar 2 Konfigurasi jaringan sistem Radial

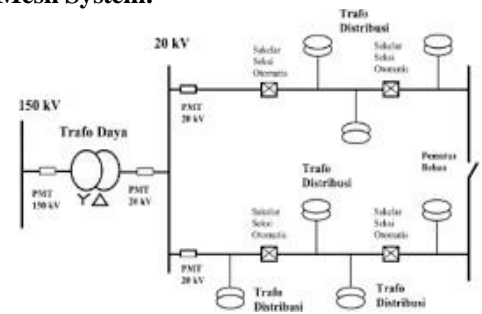
Radial System adalah jenis sistem distribusi yang paling sederhana, dimana daya listrik disalurkan dari gardu induk menuju beban melalui satu jalur penyulang. Sistem ini mudah dirancang dan dioperasikan, tetapi memiliki kelemahan dalam hal keandalan. Jika terjadi gangguan pada satu titik, suplai daya ke seluruh jalur akan terhenti. Sistem ini hanya memiliki satu jalur pasokan untuk setiap titik beban, artinya jika terdapat gangguan atau kerusakan pada salah satu titik dalam jalur tersebut, maka semua pelanggan yang berada setelah titik gangguan itu akan kehilangan suplai listrik.

2. **Loop System:** Sistem distribusi loop merupakan konfigurasi jaringan listrik yang dirancang agar aliran daya dapat mengalir melalui dua jalur berbeda yang saling terhubung. Tujuannya adalah untuk meningkatkan keandalan pasokan listrik, terutama Ketika terjadi gangguan pada salah satu jalur. Dalam sistem ini, beban tetap dapat menerima suplai daya melalui jalur alternatif, sehingga risiko pemadaman total dapat diminimalisir.



gambar 3 konfigurasi jaringan sistem Loop

3. Mesh System:



gambar 4 konfigurasi jaringan sistem Mesh

Sistem distribusi mesh merupakan konfigurasi jaringan dengan struktur yang sangat kompleks, di mana setiap jalur distribusi atau penyulang saling terhubung membentuk pola seperti jaring. Koneksi antar penyulang tidak terbatas hanya pada satu arah, melainkan memungkinkan aliran daya dari berbagai sisi secara simultan. Keunggulan utama dari sistem ini adalah tingkat keandalan yang sangat tinggi, karena jika terjadi gangguan di salah satu jalur, beban tetap dapat disuplai melalui jalur lainnya tanpa menyebabkan gangguan signifikan kepada konsumen.

B. Losses (susut daya)

Susut daya atau losses merupakan fenomena yang secara alami terjadi dalam sistem penyaluran energi listrik, baik pada jalur transmisi maupun distribusi. Energi listrik yang dibangkitkan tidak seluruhnya dapat sampai ke konsumen akhir karena Sebagian mengalami kehilangan selama proses penyaluran. Kehilangan ini disebabkan oleh berbagai faktor teknis maupun non-teknis, dan berdampak langsung terhadap efisiensi dan performa sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

1. **Losses teknis**, umumnya terjadi akibat adanya resistansi pada konduktor dan komponen sistem seperti transformator. Saat arus listrik mengalir, resistansi ini menyebabkan Sebagian energi berubah menjadi panas, sehingga mengurangi jumlah energi yang benar-benar sampai ke beban. Selain itu, kehadiran beban induktif seperti motor listrik dan transformator juga berkontribusi terhadap munculnya arus reaktif yang memperbesar rugi-rugi daya, karena arus tersebut tidak menghasilkan kerja nyata namun tetap membebani jaringan.
2. **Losses non-teknis**, yaitu kehilangan energi yang tidak disebabkan oleh karakteristik fisik sistem, melainkan oleh kesalahan operasional atau tindakan ilegal.

Dampak dari losses sangat signifikan terhadap performa sistem tenaga listrik. Semakin tinggi losses, maka semakin besar energi yang terbuang, yang menyebabkan menurunnya efisiensi penyaluran dan meningkatnya biaya operasional. Oleh karena itu, pengendalian losses menjadi salah satu indikator penting dalam peningkatan efisiensi jaringan distribusi.

C. Capacitor High Voltage

Kapasitor tegangan tinggi merupakan perangkat pasif yang digunakan dalam sistem tenaga listrik, khususnya pada jaringan tegangan tinggi, untuk memperbaiki faktor daya, mengurangi rugi-rugi daya, serta meningkatkan efisiensi jaringan. Kapasitor juga adalah komponen listrik yang digunakan untuk menyimpan

dan melepaskan energi dalam bentuk medan listrik. Dalam jaringan distribusi tenaga listrik, khususnya yang beroperasi pada tegangan menengah hingga tinggi, arus reaktif yang dihasilkan oleh beban induktif sering kali menyebabkan penurunan kualitas daya serta rugi energi yang cukup signifikan.

Kapasitor untuk tegangan tinggi memiliki konstruksi khusus yang memungkinkan mereka bekerja dengan aman dalam kondisi ekstrem. Bahkan penyekat (dielektrik) yang digunakan biasanya dipilih secara selektif agar mampu menahan tegangan besar tanpa mengalami kerusakan atau kebocoran medan listrik. Beberapa kapasitor dilengkapi dengan pendingin, baik alami maupun menggunakan minyak, untuk menjaga suhu kerja tetap stabil selama beroperasi.

D. Aplikasi DiGSILENT PowerFactory

Digsilent Powerfactory (digital simulation and electrical network calculation) merupakan perangkat lunak simulasi teknis yang dirancang untuk analisis, perencanaan, dan optimasi sistem tenaga listrik. Aplikasi ini sering digunakan oleh insinyur tenaga listrik untuk memodelkan dan memverifikasi performa jaringan distribusi dan transmisi, serta untuk menganalisis berbagai kondisi operasional dan dinamis pada sistem kelistrikan. Perangkat lunak digsilent memungkinkan pengguna untuk melakukan analisis aliran daya, simulasi dinamis, analisis gangguan, perhitungan rugi-rugi energi, stabilitas sistem, dan banyak lagi. Digsilent dirancang agar dapat digunakan dalam berbagai jenis studi kelistrikan, mulai dari sistem tegangan rendah hingga tegangan tinggi, termasuk optimasi jaringan distribusi tegangan menengah yang kompleks.

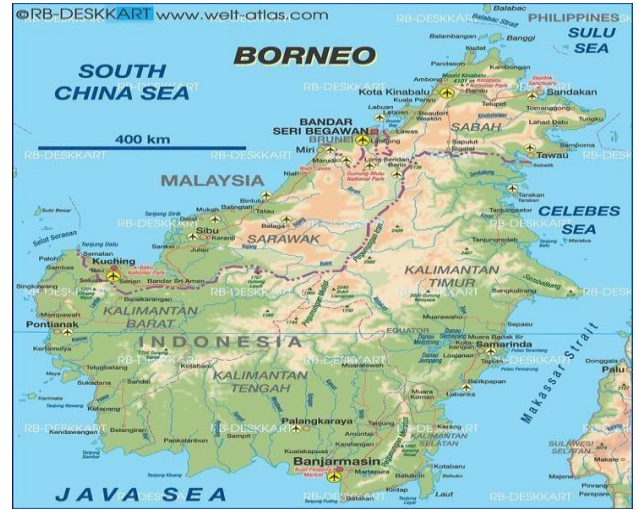
PowerFactory memungkinkan pengguna untuk membangun model sistem tenaga berdasarkan data riil, sehingga hasil analisis yang dihasilkan dapat mencerminkan kondisi actual di lapangan. Dalam sistem distribusi tegangan menengah seperti Penyulang Doyot, pemanfaatan PowerFactory sangat penting untuk memvisualisasikan dan mengevaluasi performa jaringan secara menyeluruh, dengan memasukan informasi detail tentang elemen-elemen jaringan seperti jenis dan kapasitas transformator, konfigurasi jaringan salurn udara tegangan menengah (SUTM), titik-titik beban, serta data pengukuran tegangan dan arus. Model yang telah dibentuk kemudian digunakan sebagai dasar untuk melakukan simulasi aliran daya (load flow analysis), yang memberikan Gambaran distribusi tegangan dan arus pada berbagai titik di dalam jaringan.

II. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

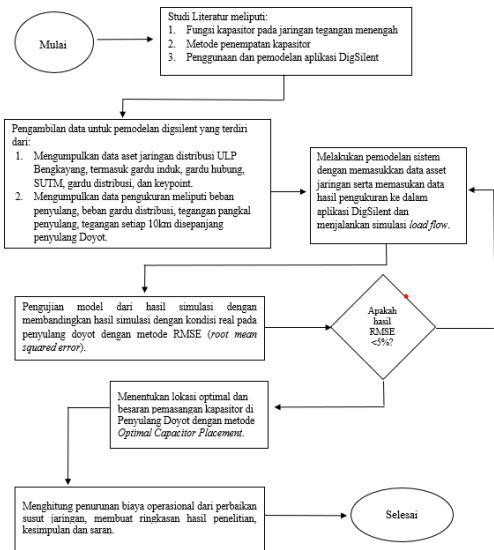
Penelitian akan dimulai pada bulan Februari sampai dengan bulan Mei 2025 yang berlokasi di dusun Doyot, Magmagan Karya, Kec. Lumar, Kabupaten bengkayang, Kalimantan barat.

Lokasi penelitian berjarak 217 KM dari Kota Pontianak dengan waktu tempuh kurang lebih 4 jam dengan jalan darat. Secara geografis terletak berbatasan dengan Negara Malaysia dan termasuk salah satu daerah 3T (terdepan, terluar, dan terpencil).

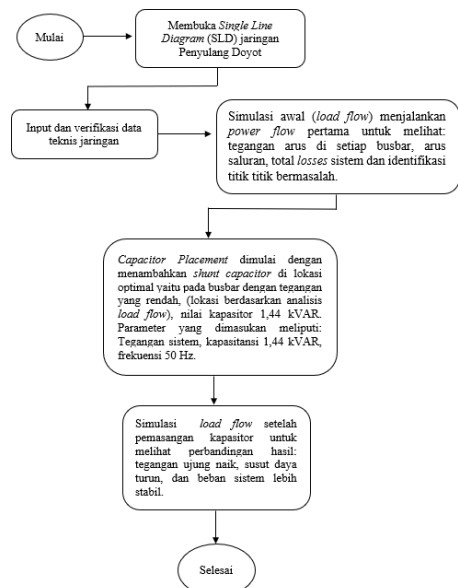


gambar 5 Lokasi Penelitian Dusun Doyot

B. Flowchart Penelitian dan Diagram alur cara kerja DiGSILENT PowerFactory



gambar 6 Flowchart Penelitian



gambar 7 Diagram alur cara kerja DiGSILENT PowerFactory

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Teknis dan Pengukuran

Pada tahap ini, data teknis dan hasil pengukuran memiliki peranan penting sebagai dasar dalam proses pemodelan dan simulasi sistem distribusi pada Penyulang Doyot. Seluruh data dikumpulkan melalui observasi langsung di lapangan serta melalui dokumentasi teknis yang diperoleh dari ULP Bengkayang.

1. Data Spesifikasi Kapasitor

Pemasangan kapasitor dalam jaringan distribusi bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi daya akibat arus reaktif serta meningkatkan faktor daya sistem. Spesifikasi kapasitor yang digunakan dalam penelitian ini meliputi merek, kapasitas, tegangan nominal, frekuensi, dan tipe kapasitor. Tabel berikut menunjukkan detail spesifikasi kapasitor yang diterapkan dalam simulasi.

Tabel 1 Spesifikasi Kapasitor

| | Kapasitas (kVAR) | Tegangan Nominal (kV) | Frekuensi (Hz) | Tipe |
|--------|---------------------|-----------------------------|-------------------|------------------------------------|
| Cooper | 1,44 | 50/125 | 50 | Ex Single Phase Capacitor |

2. Data aset jaringan ULP Bengkayang

Tabel 2 Data Aset ULP Bengkayang

| Jenis Aset | Jumlah | Spesifikasi | Lokasi |
|---------------------|---------|--|---------------------------------|
| Gardu Induk | 1 bh | 2 bh @ 30MVA 150 kV – 20kV | Bengkayang |
| Gardu Hubung | 4 bh | 20 kV | Sepanjang Penyulang Doyot |
| Penyulang | 4 bh | Doyot, Pucuk Rebung, Magmagan, Darit | ULP Bengkayang |
| Jaringan SUTM | 752 kms | A3C 3x150 mmsq, A3C 3x70 mmsq, A3C 3x35 mmsq. | ULP Bengkayang |
| Gardu Distribusi | 364 bh | 20 kV - 400 V 200kVA, 160kVA, 100kVA, 50kVA, 25kVA | ULP Bengkayang |
| Keypoint | 57 bh | Recloser, LBS dan Sectionalizer. | ULP Bengkayang |

Data ini digunakan untuk membangun model sistem pada perangkat lunak DIGSILENT dan menganalisis distribusi daya pada jaringan Penyulang Doyot

3. Data Pengukuran Beban dan Tegangan Penyulang

Pengukuran beban dan tegangan dilakukan di berbagai titik sepanjang Penyulang Doyot untuk mengetahui kondisi operasional jaringan distribusi. Data ini mencakup tegangan yang terukur pada setiap lokasi, waktu pengukuran, serta koordinat geografisnya. Hasil pengukuran ini sebagai parameter dalam penentuan tingkat akurasi model.

Tabel 3 Pengukuran beban dan tegangan

| Lokasi | Tegangan RS (kV) | Tegangan ST (kV) | Tegangan RT (kV) | Jam |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| PLBN | | | | 15:55– 16:10 |
| Jagoi | 16,53 | 16,73 | 16,58 | |
| Babang Simpang | | | | |
| Take (Jagoi) | 16,72 | 16,89 | 16,64 | 16:35 |
| Babang) Simpang | | | | |
| Gresik, Sanggau | 16,85 | 17,04 | 16,72 | 17:04 |
| Ledo, Seluas | | | | |
| Sujah, Kec. | 16,77 | 16,91 | 16,65 | 17:35– 17:38 |
| Seluas Recloser | 20,06 | 20,17 | 19,94 | 10:12– 10:16 |
| Sempayuk Desa | 19,60 | 19,60 | 19,39 | 10:40– 10:58 |
| Sempayuk Kec. Ledo | 19,114 | 19,118 | 18,80 | 11:23– 11:28 |
| Kandasan, Sanggau | 18,27 | 18,33 | 18,15 | 12:24– 12:29 |
| Ledo Lapangan | | | | |
| Futsal, Sanggau | 17,85 | 17,96 | 17,73 | 12:52– 12:56 |
| Ledo Pangkal | | | | |
| Penyulang Doyot | 21,03 | 21,03 | 21,03 | 12:18 |

B. Pemodelan Sistem dan Validasi

Tabel 4 Validasi model dengan data pengukuran

| Titik | Real (kV) | Simulasi (kV) | Deviasi (kV) |
|-------------------------------|-----------|---------------|--------------|
| PLBN Jagoi babang | 16,61 | 17,14 | 0,52 |
| Simpang Take | 16,75 | 17,18 | 0,43 |
| Simpang Gresik, | 16,87 | 17,40 | 0,53 |
| Sujah, Kec. Seluas | 16,77 | 17,70 | 0,93 |
| Recloser Sempayu | 20,05 | 19,91 | -0,14 |
| Desa Sempayu | 19,53 | 19,30 | -0,23 |
| Kec. Ledo | 19,01 | 19,00 | -0,01 |
| Kandangan, Sanggau Ledo | 18,25 | 18,50 | 0,25 |
| Lapangan Futsal, Sanggau Ledo | 17,84 | 18,10 | 0,26 |
| Pangkal Penyulang Doyot | 21,03 | 20,71 | -0,32 |

Model jaringan distribusi Penyulang Doyot dibangun dalam software DIGSILENT PowerFactory dengan memasukkan data topologi, parameter jaringan, serta data beban. Model ini kemudian divalidasi menggunakan metode Root Mean Square Error (RMSE), dengan hasil deviasi tegangan pada beberapa titik yang ada pada tabel 4:

Dari tabel 4 dapat dihitung nilai Root Mean Squared Error (RMSE) menggunakan rumus sebagai berikut:

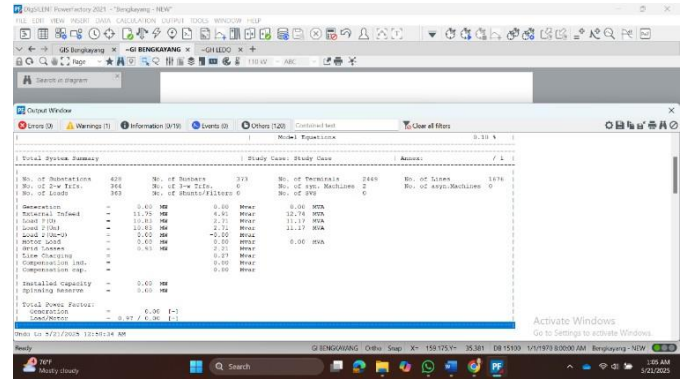
$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Pengukuran(i) - Simulasi(i))^2}{n}}$$

Karena hasil perhitungan RMSE seluruh titik adalah $< 5\%$, maka model simulasi DIGSILENT valid dan layak di lanjutkan ke tahap optimalisasi kapasitor.

C. Hasil Simulasi Feeder Doyot Sebelum Pemasangan Kapasitor

Tabel 5 Sebelum Pemasangan Kapasitor

| Parameter | Satuan | Nilai |
|------------------|--------|-------------|
| Tegangan pangkal | kV | 20.71 |
| Tegangan ujung | kV | 17.14 |
| Beban puncak | kW | 11.750 |
| Susut jaringan | kW / % | 930 / 7,91% |



gambar 8 Hasil Sebelum Pemasangan Kapasitor

Sebelum dilakukan intervensi teknis berupa pemasangan kapasitor, dilakukan simulasi awal menggunakan perangkat lunak DIGSILENT PowerFactory untuk memahami kondisi actual jaringan distribusi listrik di Penyulang Doyot, ULP Bengkayang. Tujuan utama dari simulasi ini adalah untuk memetakan karakteristik distribusi daya dan mengevaluasi kinerja sistem dalam kondisi eksisting, khususnya dari segi tegangan, beban, dan rugi-rugi daya (losses). Hasil simulasi yang ditampilkan dalam table menunjukkan bahwa pada titik pangkal penyulang, tegangan yang di catat adalah sebesar 20,71 kV. Sedangkan pada ujung penyulang, tegangan turun secara signifikan menjadi hanya 17,14 kV. Hal ini menandakan terjadinya penurunan tegangan (voltage drop) sebesar 3,57 kV sepanjang jalur distribusi. Penurunan ini cukup besar dan berada diluar batas toleransi tegangan menurut standar PLN, yang biasanya berkisar $< 5\%$ dari tegangan nominal. Penurunan tegangan yang drastic ini tentu akan berdampak buruk terhadap kinerja peralatan listrik pelanggan, terutama yang berada di ujung penyulang.

Selain itu, beban puncak yang tercatat dalam simulasi adalah sebesar 11,750 kW, dan rugi-rugi daya jaringan berada pada angka 930 kW, atau sekitar 7,91% dari total daya yang disalurkan. Presentase susut ini tergolong tinggi dan mencerminkan inefisiensi sistem distribusi. Rugi-rugi daya sebesar itu menunjukkan bahwa hampir 1/12 dari total energi yang disalurkan tidak sampai ke konsumen, melainkan hilang di jaringan, umumnya dalam bentuk panas akibat resistansi konduktor dan arus reaktif dari beban induktif.

D. Optimal Capacitor Placement

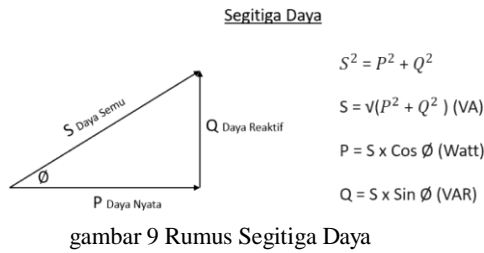
1. Metode Penentuan lokasi optimal

Penentuan Lokasi optimal pemasangan kapasitor dilakukan menggunakan pendekatan berbasis simulasi aliran daya (loadflow) dalam perangkat lunak DIGSILENT PowerFactory. Simulasi dilakukan untuk beberapa scenario pemasangan kapasitor di titik-titik yang menunjukkan:

- Tegangan paling rendah (di bawah 18 kV)
- Beban reaktif tertinggi
- Jarak terjauh dari gardu induk

2. Nilai faktor daya sebelum pemasangan kapasitor

Untuk mencari nilai faktor daya digunakan rumus segitiga daya sebagai berikut:



Dimana:

Lokasi: Penyulang Doyot

Daya aktif: (P)= 3,249 MW

Daya reaktif: (Q)= 1,657 MVAR

Daya semu: (S)= 3,647 MVA

$\cos \phi = 0,89$

Kapasitor yang digunakan untuk disimulasikan: 1,44 kVAR, perhitungan nilai kapasitansi yang dibutuhkan:

- $Q_c = 1440 \text{ VAR}$
- $V = 17,140 \text{ KV}$
- $F = 50 \text{ Hz}$

Menghitung kuadrat tegangan:

$$V^2 = (17,140)^2 = 293,779,600 \text{ Volt}^2$$

Menghitung nilai $2\pi f$

$$2\pi f = 2.3,1216 \times 50 = 314,16 \text{ rad/s}$$

$$V^2 \times 2\pi f = 293,779,600 \times 314,16 = 92,312,114,656$$

Memasukan nilai menggunakan rumus kapasitansi kapasitor dimana=

$$C = \frac{QC}{V^2 \times 2\pi f} = \frac{1440}{92,312,114,656}$$

$$C = 1,559 \times 10^{-8} \text{ f}$$

$$C = 1,559 \times 10^{-8} \text{ f}$$

$$C = 156 \mu \text{ F (mikrofarad)}$$

3. Hasil simulasi setelah pemasangan kapasitor Pemasangan kapasitor sebesar 1,44 kVAR dilakukan pada busbar di ujung penyulang (Gardu Hubung Sanggauledo). Hasil simulasi menunjukkan:

Tabel 6 Perbandingan Kinerja Sebelum dan Sesudah Pemasangan Kapasitor

| Parameter | Satuan | Nilai | Nilai | Deviasi |
|------------------|-------------|-------------|-------------|---------|
| | | Sebelum | Setelah | |
| Tegangan pangkal | kV | 20,71 | 20,71 | - |
| Tegangan ujung | kV | 17,14 | 18,43 | 1,29 |
| Beban puncak | kW | 11,750 | 11,720 | -0,03 |
| Susut jaringan | kW / % | 930 / 7,91% | 890 / 7,59% | -40 |
| Faktor Daya | $\cos \phi$ | 0,89 | 0,96 | |

Dari hasil evaluasi berbagai parameter dalam sistem distribusi, dapat disimpulkan bahwa penerapan Optimal Capacitor Placement memberikan kontribusi nyata dalam meningkatkan efisiensi serta kualitas tegangan pada Penyulang Doyot. Tegangan di sisi pangkal jaringan tetap berada di angka 20,71 kV, yang menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor tidak memberikan perubahan berarti pada area yang dekat dengan sumber daya. Sebaliknya, perbaikan paling menonjol terjadi di ujung penyulang, di mana tegangan mengalami kenaikan dari 17,14 kV menjadi 18,43 kV. Hal ini membuktikan keberhasilan peningkatan kestabilan suplai listrik pada area yang sebelumnya rentan terhadap penurunan tegangan. Selain itu, beban puncak mengalami penurunan ringan dari 11.750 kW menjadi 11.720 kW. Walaupun perubahannya kecil, kondisi ini mengindikasikan bahwa beban arus reaktif dalam jaringan telah berkurang, yang berkontribusi pada peningkatan efisiensi energi secara keseluruhan. Rugi-rugi daya atau susut jaringan juga menunjukkan penurunan yang signifikan, yakni dari 930 kW (7,91%) menjadi 890 kW (7,59%), atau sebesar 40 kW. Pengurangan ini penting karena mencerminkan penghematan energi dan efisiensi biaya operasional. Secara keseluruhan, penempatan kapasitor pada titik yang tepat terbukti efektif dalam menekan losses dan meningkatkan performa sistem distribusi baik dari sisi teknis maupun ekonomi.

E. Perhitungan dan Analisis Efisiensi

Sebelum pemasangan kapasitor:

$$\text{Efisiensi} = \left(\frac{11.750}{12.680} \right) \times 100\% = 92,68\%$$

$$\text{Beban Puncak} = 11.750 \text{ kW}$$

$$\text{Susut Daya} = 930 \text{ kW}$$

$$\text{Daya masuk} = 11.750 + 930 + 12.680 \text{ kW}$$

Setelah pemasangan kapasitor

$$\text{Efisiensi} = \left(\frac{11.720}{12.610} \right) \times 100\% = 92,94\%$$

$$\text{Beban Puncak} = 11.720 \text{ kW}$$

$$\text{Susut Daya} = 890 \text{ kW}$$

$$\text{Daya Masuk} = 11.720 + 890 + 12.610 \text{ kW}$$

Efisiensi meningkat dari 92,68% menjadi 92,94%, menunjukkan adanya peningkatan efisiensi sebesar 0,26% karena pemasangan kapasitor yang optimal.

Penghematan biaya akibat berkurangnya susut jaringan dapat dihitung dengan rumus

Rupiah Saving/bulan = Deviasi Susut Jaringan x 720 x Load factor (LF) (0,45) x Tarif Listrik (Rp/kW).

Diketahui:

- Pengurangan susut = 40 kW
 - Waktu = 720 jam/bulan
 - Load Factor = 0,45
 - Tarif listrik rata-rata PLN = Rp 1.444,70/kWh
- Energi yang dihemat = 40 x 720 x 0,45 = 12.960 kWh/bulan
- Rupiah Saving = 12.960 x 1.444,70 = Rp 18.732.912

Dari hasil analisis dan perhitungan di atas, dapat disimpulkan bahwa pemasangan kapasitor secara optimal:

- Mengurangi susut daya sebesar 40 kW
- Meningkatkan efisiensi sistem hingga 0,26%
- Menghemat biaya operasional sebesar Rp 18.732.912 juta/bulan

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemodelan, simulasi, dan analisis yang dilakukan terhadap jaringan distribusi listrik di Penyulang Doyot menggunakan perangkat lunak DIGSILENT PowerFactory, dapat disimpulkan bahwa model jaringan yang dibangun memiliki tingkat akurasi tinggi dengan nilai Root Mean Square (RMSE) di bawah 5%, sehingga layak dijadikan dasar untuk simulasi lebih lanjut. Model tersebut telah divalidasi dengan data lapangan, menunjukkan deviasi tegangan yang masih berada dalam batas toleransi, yang artinya hasil simulasi dapat merepresentasikan kondisi actual jaringan dengan baik. Lebih lanjut, melalui fitur Optimal Capacitor Placement, ditentukan Lokasi strategis untuk pemasangan kapasitor shunt sebesar 1,44 kVAR pada titik dengan tegangan di ujung penyulang dari 17,14 kV dalam hal ini Lokasi yang ditentukan adalah Gardu Hubung Sanggauledo dan kemudian tegangan menjadi 18,43 kV dan penurunan susut daya dari 930 kW menjadi 890 kW. Efisiensi ini tidak hanya berdampak pada sisi teknis, tetapi juga memberikan penghematan biaya operasional sebesar Rp 18.732.912 per bulan, dengan penurunan susut energi mencapai 12.960 kWh per bulan, menjadikan implementasi strategi ini sebagai Solusi yang efektif dan ekonomis dalam meningkatkan kinerja sistem distribusi di wilayah tersebut

B. Saran

Berdasarkan hasil analisis dan temuan selama penelitian, penulis memberikan beberapa saran yang dapat dijadikan bahan pertimbangan untuk pengembangan yang lebih lanjut. PT PLN ULP Bengkayang disarankan untuk mempertimbangkan penerapan pemasangan kapasitor secara lebih luas di titik-titik lain yang memiliki karakteristik jaringan serupa, terutama pada area ujung penyulang dengan beban tinggi dan tegangan rendah. Perangkat lunak DIGSILENT PowerFactory terbukti sangat membantu dalam proses analisis dan optimasi jaringan.

V. KUTIPAN

- [1] e. a. Ayu Permata, "Quantum Genetic Algorithm Application on Penyulang Penyabangan Distribution Network, Bali," *Jurnal Teknik Elektro*, Vol. 11, No. 2, pp. 101-110, 2023.
- [2] "Standard For Shunt Power Capacitors," 2012.
- [3] e. a. I Kadek Anggara, "Simulasi Pemodelan ETAP pada Sistem Distribusi Listrik di Hotel Melia Bali," *Jurnal Teknologi Kelistrikan*, Vol. 8, No. 1, pp. 45-53, 2022.
- [4] e. a. Ratih, "Analisis Perhitungan Losses pada Jaringan Tegangan Rendah dengan Perbaikan Pemasangan Kapasitor," *Jurnal Teknik Elektro Pamekasan*, Vol. 10, No. 3, pp. 150-160, 2021 .
- [5] e. a. Andira, "Pengurangan Rugi-Rugi Daya Menggunakan Algoritma Genetika: Studi Kasus PT PLN Rayon Bintang," *Jurnal Teknologi Energi*, Vol. 7, No. 2, pp. 75-85, 2023.
- [6] D. P. F. Documentation, "Digital Simulation Electrical Network Calculation : User Manual.," 2024.
- [7] M. Nasir, *Dasar-dasar Sistem Tenaga Listrik*, Penerbit Teknik Elektro Indonesia, 2020.
- [8] W. Stevenson, *Elements of Power System Analysis*, New York: Graw- Hill Book Company, 1982.

- [9] P. P. (Persero), "Laporan Statistic Kinerja Jaringan Distribusi ULP Bengkayang," PLN Unit Induk Distribusi Kalimantan Barat., Pontianak, 2022.
- [10] A. Kadir, *Dasar Sistem Tenaga Listrik*, Bandung: Penerbit Andi, 2015.
- [11] Suwarno, *Pemanfaatan Kapasitor dalam Sistem Distribusi Tenaga Listrik.*, Jakarta: Erlangga, 2014.
- [12] T. Gonen, *Electric power distribution system engineering*, Boca Raton, America Serikat: CRC Press (Taylor & Francis Group), 2015.
- [13] N. M. & M. N. Acharya, "An analytical approach for DG allocation in primary distribution network," *International journal of electrical power & energy system.*, vol. 28 no. 10, pp. 669-678, 2006.
- [14] J. W. N. R. & C. S. Arrillaga, *Power system quality assessment*, Chichester: John Wiley & Sons, 2000.
- [15] J. J. G. & W. D. Stevenson, *Power system analysis*, New York, Amerika Serikat: McGraw-Hill, Inc, 1994.

TENTANG PENULIS



Gizella Ch. A Doodoh, penulis adalah anak sulung, lahir di Lembean, Sulawesi Utara, pada tanggal 9 juli 2003. Penulis menempuh Pendidikan pertama di SDN katolik St. Theresia, Minahasa Utara pada tahun 2009 sampai 2015, setelah itu pada tahun 2015 melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP N 1 Airmadidi sampai tahun 2018. Kemudian Penulis melanjutkan Pendidikan di SMA N 1 Airmadidi, Minahasa Utara pada tahun 2018 hingga lulus pada tahun 2021. Penulis memulai Pendidikan di Universitas Sam Ratulangi pada tahun 2021, di Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Elektro dengan mengambil konsentrasi minat Teknik Tenaga Listrik (Tegangan Tinggi, Arus Kuat) pada tahun 2023. Dalam menempuh Pendidikan, Penulis telah melaksanakan Kerja Praktek di PT. PLN (Persero) Unit Induk Distribusi, pada bulan juli sampai oktober 2024 yang berlokasi di Pontianak, Kalimantan Barat, dan mengikuti Kuliah Kerja Terpadu (KKT) pada bulan April sampai Mei pada KKT Posko Khusus yang berlokasi di Gedung Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Universitas Sam Ratulangi Manado. Kemudian pada bulan Februari sampai April tahun 2025 melakukan penelitian dan pengambilan data di PT PLN (Persero) ULP Bengkayang, Kalimantan Barat. Penulis juga mengikuti organisasi baik didalam kampus maupun di luar kampus.