

ANALISIS KUANTITATIF KONTRIBUSI DAYA REAKTIF KABEL TANAH 20 KV TERHADAP PROFIL TEGANGAN DAN EFISIENSI SISTEM DISTRIBUSI MENGGUNAKAN METODE GAUSS–SEIDEL BERBASIS MATLAB

Abdul Azis¹, *I Nofri², FI Pasaribu³, A Pangestu⁴, C Cholish⁵, Yustika⁶

^{1,2,3,6} Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

⁴ Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Al-Azhar Medan

⁵ Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Medan

*Corresponding author: irfannofri@umsu.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi kontribusi daya reaktif kabel tanah tegangan menengah 20 kV jenis XLPE terhadap profil tegangan dan rugi-rugi daya pada sistem distribusi PT PLN (Persero) Kota Subulussalam. Sistem radial dimodelkan dan dianalisis menggunakan metode aliran daya Gauss–Seidel berbasis MATLAB. Data operasional berupa arus, tegangan, faktor daya, dan parameter kabel digunakan untuk menghitung daya aktif, daya reaktif, serta rugi-rugi daya pada setiap bagian sistem. Hasil menunjukkan bahwa sistem beroperasi dalam batas stabilitas tegangan (0,95–1,05 pu). Distribusi beban tidak merata, dimana bagian B memiliki pembebanan tertinggi dan rugi-rugi daya terbesar. Sistem menunjukkan dominasi daya reaktif dengan faktor daya sebesar 0,8. Kontribusi daya reaktif dari kabel tanah mencapai $\pm 7\%$ hingga $\pm 12\%$ dari total daya reaktif sistem akibat sifat kapasitifnya. Rugi-rugi daya pada bagian A, B, dan C masih berada dalam batas normal (2–3%), namun meningkat signifikan pada bus beban akibat akumulasi pembebanan. Temuan ini menunjukkan bahwa kabel tanah tidak hanya berfungsi sebagai penghantar energi listrik, tetapi juga sebagai sumber daya reaktif yang mempengaruhi kinerja sistem distribusi. Oleh karena itu, pengelolaan daya reaktif dan pemerataan beban diperlukan untuk meningkatkan efisiensi sistem tenaga listrik.

Kata kunci: Aliran daya; Kabel tanah XLPE; Daya reaktif; Rugi-rugi daya; MATLAB; Gauss–Seidel

I. PENDAHULUAN

Energi listrik telah menjadi kebutuhan utama dalam berbagai sektor kehidupan, mulai dari rumah tangga, fasilitas umum, hingga industri. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik, sistem tenaga listrik dituntut untuk mampu menyalurkan daya secara andal, efisien, dan sesuai dengan standar kualitas yang ditetapkan [1]. Dalam sistem distribusi tenaga listrik, kualitas penyaluran energi sangat dipengaruhi oleh kondisi pembebanan, konfigurasi jaringan, serta karakteristik penghantar yang digunakan [2].

Pada sistem distribusi tegangan menengah 20 kV, penggunaan kabel tanah (underground cable) semakin banyak diterapkan, terutama di wilayah perkotaan dan daerah dengan keterbatasan ruang. Kabel tanah memiliki beberapa keunggulan dibandingkan saluran udara, seperti tingkat keandalan yang lebih tinggi, gangguan lingkungan yang lebih rendah, serta estetika yang lebih baik. Namun demikian, kabel tanah juga memiliki karakteristik listrik yang berbeda, khususnya sifat kapasitif yang dapat menghasilkan daya reaktif dalam sistem [3].

Keberadaan daya reaktif dalam sistem tenaga listrik memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja sistem, terutama terhadap profil tegangan, faktor daya, serta rugi-rugi daya. Daya reaktif yang berlebih dapat menyebabkan peningkatan arus, penurunan efisiensi sistem, serta potensi gangguan kestabilan tegangan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap kontribusi daya reaktif, khususnya yang berasal dari kabel tanah, menjadi penting dalam evaluasi sistem distribusi tenaga listrik [4].

Selain itu, panjang saluran kabel dan besarnya arus yang mengalir juga berkontribusi terhadap peningkatan rugi-rugi daya dalam sistem. Rugi-rugi daya yang tinggi tidak hanya menyebabkan pemborosan energi, tetapi juga menurunkan efisiensi operasional sistem distribusi [5]. Dalam kondisi tertentu, distribusi beban yang tidak merata dapat memperparah kondisi ini, sehingga diperlukan analisis yang komprehensif untuk mengidentifikasi titik-titik kritis dalam sistem [6].

Sejumlah penelitian sebelumnya mengenai sistem distribusi tenaga listrik umumnya berfokus pada analisis aliran daya dan rugi-rugi energi menggunakan metode load flow.

Metode ini digunakan untuk mengevaluasi profil tegangan dan performa sistem distribusi secara keseluruhan [7], [8]. Namun, dalam banyak studi tersebut, pengaruh karakteristik kapasitif kabel tanah belum dimodelkan secara eksplisit, padahal kabel tanah memiliki sifat kapasitif yang dapat menghasilkan daya reaktif dan mempengaruhi stabilitas tegangan sistem [9], [10].

Keterbatasan ini menunjukkan adanya celah penelitian, khususnya dalam kuantifikasi kontribusi daya reaktif dari kabel tanah pada setiap segmen jaringan distribusi. Penggunaan kabel tanah dalam sistem distribusi modern juga diketahui memberikan pengaruh terhadap rugi-rugi daya dan kinerja sistem secara keseluruhan [11], [12], [13].

Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada evaluasi kontribusi daya reaktif kabel tanah dengan mempertimbangkan efek kapasitansi secara lebih rinci melalui pemodelan load flow berbasis MATLAB.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu kesatuan yang terintegrasi mulai dari unit pembangkit listrik, unit transmisi listrik, sampai unit distribusi listrik dalam upaya menyalurkan listrik dari produsen kepada konsumen dengan dilengkapi sistem proteksi pada kesatuan tersebut [14]. Ada tiga bagian penting dalam proses penyaluran tenaga listrik, yaitu Pembangkitan, Penyaluran (Transmisi), dan Distribusi. Secara umum skema sistem tenaga listrik ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Sistem Tenaga Listrik

Komponen dasar yang membentuk suatu sistem tenaga listrik adalah generator, transformator, saluran transmisi dan beban. Untuk keperluan analisis sistem tenaga, diperlukan suatu diagram yang dapat mewakili setiap komponen sistem tenaga listrik tersebut. Diagram yang sering digunakan adalah diagram satu garis dan diagram impedansi atau diagram reaktansi [8].

2.2 Kualitas Daya

Listrik yang berkualitas adalah listrik yang mempunyai tegangan dan frekuensi yang konstan sesuai dengan nilai nominalnya. Dalam kisaran yang ditentukan, frekuensi yang stabil dan sangat dekat dengan nilai nominalnya (dalam sepersekian persen) [15].

Permasalahan yang sering terjadi pada kualitas daya listrik (Power Quality) yaitu permasalahan daya listrik yang mengalami penyimpangan baik tegangan, arus, dan frekuensi sehingga menimbulkan kegagalan atau kesalahan operasi pada peralatan [16]. Suplay daya listrik dari generator pembangkit sampai ke beban dioperasikan dalam batas toleransi parameter kelistrikannya seperti tegangan, arus, frekuensi, dan bentuk gelombang. Perubahan dan deviasi diluar batas toleransi parameter tersebut sangat berpengaruh terhadap kualitas daya yang menyebabkan operasi tidak efisien dan dapat merusak perangkat. Kualitas daya banyak dipengaruhi oleh jenis beban yang tidak linear, ketidakseimbangan pembebanan, distorsi gelombang harmonik yang melebihi standar dan lain- lain. Penurunan kualitas daya dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi pada sisi beban, bahkan menyebabkan penurunan kapasitas daya pada sumber pembangkit (generator) [17].

2.3 Daya Listrik

Daya aktif adalah daya rata-rata yang sesuai dengan kekuatan sebenarnya ditransmisikan atau dikonsumsi oleh beban [3]. Beberapa contoh dari daya aktif adalah energi panas, energi mekanik, cahaya dan daya aktif memiliki satuan berupa watt (W). Berikut ini merupakan persamaan daya aktif [18].

$$P = V \cdot I \cdot \cos \phi \text{ (1 phasa)}$$

$$P = 3 \cdot VL \cdot IL \cdot \cos \phi \text{ (3 phasa)}$$

Dimana :

P = Daya Aktif (watt)

V = Tegangan (volt)

I = Arus (ampere)

Cos ϕ = Faktor daya

VL = Tegangan Jaringan (volt)

IL = Arus Jaringan (ampere)

Daya reaktif adalah jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet [1]. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator, motor, lampu pijar dan lain-lain. Daya reaktif memiliki satuan berupa volt ampere reactive (VAR). Berikut ini merupakan persamaan daya reaktif [19].

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \phi \text{ (1phasa)}$$

$$Q = 3 \cdot VL \cdot IL \cdot \sin \phi \text{ (3phasa)}$$

Dimana :

Q = Daya Reaktif (VAR)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

VL = Tegangan Jaringan (Volt)

IL = Arus Jaringan (ampere)

Daya Semu adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian antara tegangan dan arus dalam suatu jaringan atau daya yang merupakan hasil penjumlahan trigonometri daya aktif dan daya reaktif [2]. Daya semu ialah daya yang dikeluarkan sumber alternation current (AC) atau di serap oleh beban. Satuan dari daya semu yaitu volt ampere (VA). Berikut persamaan dari daya semu :

$$S = V \cdot I$$

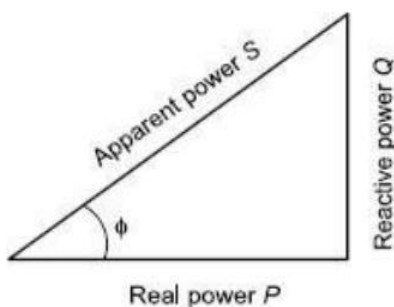
Dimana :

S = Daya Semu (VA)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Hubungan dari ketiga daya diatas disebut sistem segitiga daya dapat digambarkan seperti gambar di bawah ini



Gambar 2. Segitiga Daya

Untuk menghitung parameter daya listrik dalam sistem distribusi, digunakan persamaan dasar segitiga daya yang terdiri dari daya aktif, daya reaktif, dan daya semu. Ketiga komponen daya ini saling berhubungan dan digunakan sebagai dasar dalam analisis aliran daya serta evaluasi kinerja sistem tenaga listrik. Persamaan tersebut digunakan untuk menentukan besarnya daya yang disalurkan dan menjadi acuan dalam perhitungan rugi-rugi daya pada sistem [12], [13]. Hubungan daya pada gambar segitiga daya dapat dijelaskan dengan persamaan pada Tabel 1

Tabel 1 Persamaan Segitiga Daya		
Daya	Rumus	Satuan
Daya Aktif (P)	$P = V \cdot I \cdot \cos \phi$	Watt
Daya Reaktif (Q)	$Q = V \cdot I \cdot \sin \phi$	VAR
Daya Semu (S)	$S = V \times I$	VA

2.4 Faktor Daya

Faktor daya adalah perbandingan antara daya aktif dengan daya semu. Faktor daya atau faktor kerja menggambarkan sudut phasa antara daya aktif dan daya semu. Daya aktif digunakan untuk mengoperasikan beban-beban pada pelanggan listrik [13]. Daya semu dihasilkan oleh generator pembangkit yang ditransmisikan ke pelanggan listrik. Daya reaktif yang bertambah akan menyebabkan turunnya faktor daya listrik. Cara yang mudah untuk mengantisipasi turunnya faktor daya listrik dapat dilakukan dengan memilih

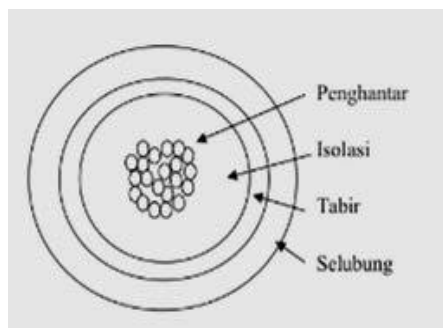
beban-beban yang mempunyai faktor daya besar juga dapat dilakukan dengan memasang kapasitor.

Kapasitor adalah komponen listrik yang justru menghasilkan daya reaktif pada jaringan dimana dia tersambung [6]. Pemasangan kapasitor dapat memperbaiki faktor daya, jika faktor daya diperbaiki maka daya reaktif dapat berkurang dan mendekati daya aktif. Suatu beban dengan faktor daya 1.0 merupakan beban yang hanya mengandung nilai [14].

Resistansi murni dan merupakan pembebanan yang paling efisiensi. Beban dengan faktor daya yang rendah (0.5) merupakan beban yang mengandung nilai induktansi yang menyebabkan kerugian yang lebih tinggi dalam sistem suplay tenaga listrik. Faktor daya yang rendah berhubungan dengan beda fasa antara arus dan tegangan pada terminal beban. Sudut fasa arus beban yang rendah biasanya diakibatkan oleh penggunaan beban induktif seperti transformator, motor induksi, lampu TL dan beban elektronik lainnya

2.5 Kabel Bawah Tanah

Dalam transmisi dan distribusi tenaga listrik banyak dilakukan berbagai cara diantaranya melalui saluran udara (Over Head Line) dan saluran kabel bawah tanah (Underground Transmision). Untuk menghindari hal tersebut maka digunakan kabel transmisi yang dipasang dibawah permukaan tanah yang disebut kabel bawah tanah (Underground Cable) [20]. Pada umumnya konstruksi kabel tanah yang digunakan untuk distribusi tenaga listrik tegangan rendah dan tegangan menengah. Dibagi menjadi dua bagian yaitu bagian utama dan bagian pelengkap [17].



Gambar 3. Bagian Utama Kabel Bawah Tanah

Bagian pelengkap, terdiri dari bantalan, perisai, bahan pengisi, sarung kabel, dan lapisan penahan kebocoran air. Bagian pelengkap ini berguna untuk memperbaiki sifat-sifat kabel tanah sebagai tenaga listrik [21].



Gambar 4 Kabel Tanah (XLPE)

2.6 Pemanfaatan MATLAB dalam Analisis Sistem Tenaga Listrik

MATLAB (Matrix Laboratory) merupakan perangkat lunak komputasi numerik yang широко digunakan dalam analisis sistem tenaga listrik karena kemampuannya dalam melakukan perhitungan matriks, pemodelan sistem, serta simulasi numerik secara efisien. Dalam studi sistem tenaga listrik, MATLAB banyak digunakan untuk analisis aliran daya (load flow), stabilitas sistem, serta evaluasi kualitas daya [22].

Pada analisis aliran daya, MATLAB digunakan untuk membentuk matriks admitansi bus (Ybus) yang merepresentasikan hubungan antar bus dalam sistem tenaga listrik. Matriks ini menjadi dasar dalam penyelesaian persamaan aliran daya menggunakan metode iteratif seperti Gauss-Seidel atau Newton-Raphson. Keunggulan MATLAB terletak pada kemampuannya dalam menangani perhitungan kompleks secara cepat serta menyediakan visualisasi hasil dalam bentuk grafik yang memudahkan interpretasi data [23].

Metode Gauss-Seidel yang diimplementasikan dalam MATLAB bekerja dengan melakukan iterasi terhadap nilai tegangan pada setiap bus hingga mencapai kondisi konvergen. Metode ini relatif sederhana dan stabil, sehingga cocok digunakan pada sistem distribusi dengan jumlah bus yang tidak terlalu besar.

Selain itu, MATLAB juga memungkinkan integrasi parameter fisik sistem seperti resistansi, reaktansi, dan kapasitansi kabel, sehingga model yang dihasilkan lebih mendekati kondisi nyata [24]. Dalam konteks kabel tanah, parameter kapasitansi dapat dimodelkan sebagai komponen shunt dalam matriks Ybus yang berkontribusi terhadap daya reaktif sistem. Penggunaan MATLAB dalam penelitian ini memberikan beberapa keuntungan, antara lain:

1. meningkatkan akurasi perhitungan dibandingkan metode manual,
2. memungkinkan simulasi berbagai kondisi sistem,
3. serta menghasilkan visualisasi yang mendukung analisis dan interpretasi hasil.

Dengan demikian, MATLAB menjadi alat yang efektif dalam mendukung analisis dan evaluasi kinerja sistem distribusi tenaga listrik [25].

III. METODE PENELITIAN

3.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis aliran daya (load flow analysis) untuk mengevaluasi kinerja sistem distribusi tenaga listrik tegangan menengah 20 kV berbasis kabel tanah jenis XLPE pada PT PLN (Persero) Kota Subulussalam. Analisis dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu:

1. Perhitungan analitis, untuk memperoleh daya aktif, daya reaktif, dan rugi-rugi daya berdasarkan data operasional sistem.
2. Simulasi numerik menggunakan MATLAB, dengan metode iteratif Gauss-Seidel untuk memperoleh solusi tegangan pada setiap bus secara lebih stabil.

Pendekatan ini digunakan untuk meningkatkan akurasi analisis dibandingkan metode perhitungan konvensional.

3.2 Data dan Parameter Sistem

Data yang digunakan dalam penelitian meliputi:

- a. Tegangan sistem: 380V
- b. Arus beban pada tiap bagian (A, B, C)
- c. Faktor daya ($\cos \phi = 0,8$)
- d. Panjang kabel tanah: 28,8 km
- e. Parameter kabel XLPE (resistansi dan reaktansi)

Sistem dimodelkan dalam bentuk jaringan radial yang terdiri dari:

- a. 1 bus slack (sumber),
- b. 3 bus beban (Bagian A, B, dan C).

Nilai daya aktif dan daya reaktif dihitung berdasarkan data pengukuran lapangan.

Tabel 2. Data Operasional Sistem

Bagian	Arus (A)	Tegangan (V)	$\cos \phi$
A	3100	380	0,8
B	3200	380	0,8
C	3000	380	0,8
Load Bus	32530	380	0,8

Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa nilai arus pada masing-masing bagian sistem memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Bagian B memiliki arus terbesar sebesar 3200 A, diikuti oleh bagian A dan C. Sementara itu, nilai arus pada load bus jauh lebih besar karena merupakan akumulasi dari seluruh beban sistem. Tegangan pada seluruh bagian berada pada nilai yang sama, yaitu 380 V, dengan faktor daya sebesar 0,8 yang menunjukkan adanya komponen daya reaktif dalam sistem.

Tabel 3. Parameter Kabel Tanah

Parameter	Nilai
Jenis Kabel	XLPE
Resistansi (R)	0,44 Ω/km
Reaktansi (X)	0,52 Ω/km
Kapasitansi (C)	0,25 μF/km
Panjang Kabel	28,8 km

Berdasarkan Tabel 3, kabel tanah yang digunakan merupakan jenis XLPE dengan parameter resistansi, reaktansi, dan kapasitansi yang mempengaruhi karakteristik sistem distribusi. Nilai resistansi dan reaktansi berkontribusi terhadap rugi-rugi daya, sedangkan kapasitansi kabel menyebabkan munculnya daya reaktif dalam sistem. Dengan panjang kabel mencapai 28,8 km, pengaruh parameter tersebut menjadi signifikan terhadap peningkatan rugi-rugi daya dan kontribusi daya reaktif pada sistem tenaga listrik.

3.3 Pemodelan Aliran Daya

Analisis aliran daya dilakukan menggunakan metode Gauss-Seidel, dengan persamaan dasar:

$$V_i = \left(\frac{1}{Y_{ii}} \right) \left[\frac{(P_i - jQ_i)}{V_i^*} - \sum (Y_{ij} * V_j) \right]$$

Dimana :

- Y_{ii} = Elemen diagonal matriks Ybus
- P_i = Daya aktif pada bus i
- Q_i = Daya reaktif pada bus i
- V_j = Tegangan pada bus j
- Y_{ij} = Elemen matriks Ybus antara bus i dan j
- V_i* = Konjugat kompleks dari V_i

Metode Gauss-Seidel dipilih dalam penelitian ini karena memiliki keunggulan dalam hal kestabilan konvergensi pada sistem distribusi radial dengan jumlah bus yang relatif kecil. Meskipun metode Newton-Raphson dikenal memiliki kecepatan konvergensi yang lebih tinggi, metode tersebut memerlukan pembentukan matriks Jacobian yang lebih kompleks serta sensitivitas yang lebih tinggi terhadap kondisi awal. Oleh karena itu, untuk sistem distribusi yang tidak terlalu besar seperti pada penelitian ini, metode Gauss-Seidel dianggap lebih sederhana, stabil, dan memadai dalam memperoleh solusi aliran daya yang akurat [4], [26].

3.4 Perhitungan Daya dan Rugi-Rugi

Perhitungan daya dilakukan menggunakan persamaan tiga fasa:

Daya semu:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I$$

Daya aktif:

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Daya reaktif:

$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Rugi-rugi daya dihitung menggunakan:

$$P_{loss} = 3I^2RL$$

$$Q_{loss} = 3I^2XL$$

3.5 Analisis Daya Reaktif Kabel Tanah

Analisis daya reaktif pada kabel tanah dilakukan untuk mengetahui kontribusi karakteristik kapasitif kabel terhadap sistem distribusi tenaga listrik. Kabel tanah, khususnya jenis XLPE, memiliki sifat kapasitif yang dapat menghasilkan daya reaktif tambahan, yang berpengaruh terhadap profil tegangan, arus sistem, serta efisiensi penyaluran daya. Oleh karena itu, analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi besarnya kontribusi daya reaktif dari kabel tanah dan dampaknya terhadap kinerja sistem secara keseluruhan.

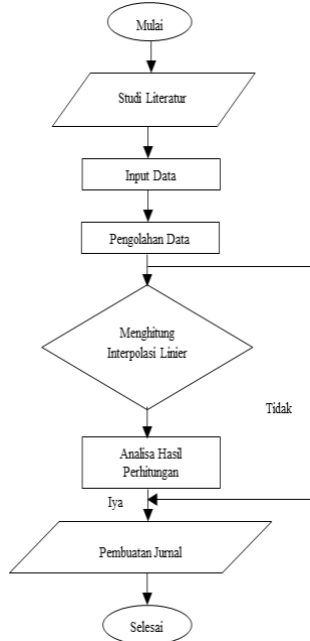
Dalam penelitian ini, perhitungan daya reaktif kabel dilakukan berdasarkan parameter kapasitansi kabel dan panjang saluran, yang kemudian diintegrasikan ke dalam model sistem distribusi. Selanjutnya, kontribusi daya reaktif kabel dibandingkan dengan daya reaktif beban untuk mengetahui tingkat pengaruhnya terhadap total daya reaktif sistem.

Tahapan penelitian yang dilakukan dalam analisis ini meliputi:

1. Pengumpulan data sistem distribusi, meliputi data arus, tegangan, faktor daya, serta parameter kabel tanah yang digunakan sebagai dasar perhitungan.
2. Perhitungan daya listrik (S, P, dan Q) untuk setiap bagian sistem, guna mengetahui besarnya daya semu, daya aktif, dan daya reaktif yang mengalir dalam jaringan.
3. Perhitungan rugi-rugi daya, baik daya aktif maupun daya reaktif, untuk mengevaluasi efisiensi sistem distribusi tenaga listrik.
4. Pemodelan sistem pada MATLAB, dengan membentuk matriks admitansi (Ybus) serta parameter jaringan lainnya untuk merepresentasikan kondisi sistem secara numerik.
5. Simulasi aliran daya menggunakan metode Gauss-Seidel, untuk memperoleh nilai tegangan pada setiap bus serta distribusi daya dalam sistem.
6. Analisis hasil dan interpretasi sistem, yang mencakup evaluasi profil tegangan, distribusi daya, kontribusi daya reaktif kabel, serta identifikasi potensi ketidakefisienan dalam sistem.

Dengan tahapan tersebut, diharapkan diperoleh gambaran yang komprehensif mengenai peran kabel tanah sebagai sumber daya reaktif serta pengaruhnya terhadap kinerja sistem distribusi tenaga listrik.

3.6 Flowchart Penelitian

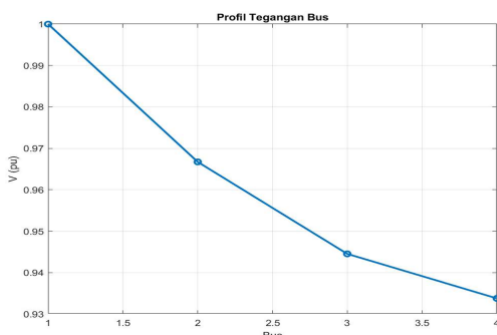


Gambar 5. Diagram Alir Penelitian
IV. HASIL DAN ANALISA

4.1 Hasil Simulasi Tegangan Sistem

Hasil simulasi aliran daya menggunakan metode Gauss-Seidel menunjukkan bahwa nilai tegangan pada setiap bus berada dalam rentang yang masih memenuhi standar operasi sistem distribusi tenaga listrik, yaitu berkisar antara 0,95 pu hingga 1,05 pu. Hal ini menunjukkan bahwa sistem masih berada dalam kondisi stabil dan mampu menyuplai beban tanpa mengalami gangguan tegangan yang signifikan.

Secara umum, bus yang berada lebih dekat dengan sumber memiliki nilai tegangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan bus yang berada di ujung jaringan. Penurunan tegangan yang terjadi disebabkan oleh impedansi saluran kabel tanah yang terdiri dari resistansi dan reaktansi, sehingga menyebabkan rugi-rugi tegangan sepanjang saluran distribusi.



Gambar 6. Profil Tegangan Bus

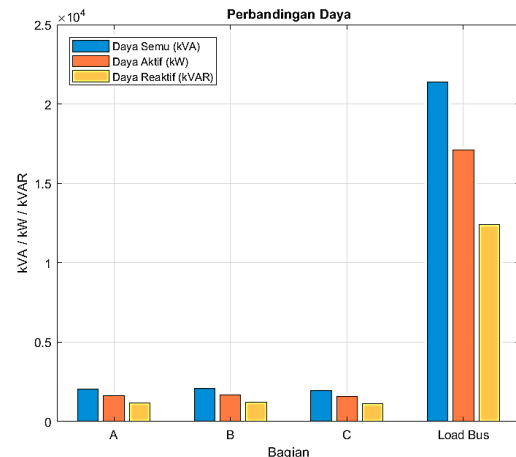
Gambar 6 memperlihatkan kecenderungan penurunan tegangan dari bus sumber menuju bus beban. Pola ini merupakan karakteristik umum sistem distribusi radial, dimana semakin jauh jarak dari sumber maka semakin besar penurunan tegangan yang terjadi. Jika grafik menunjukkan tegangan mendekati batas bawah (0,95 pu), maka sistem perlu dievaluasi lebih lanjut untuk menghindari kondisi undervoltage.

4.2 Analisis Distribusi Daya

Berdasarkan hasil perhitungan, distribusi daya menunjukkan bahwa bagian B memiliki nilai daya aktif dan daya reaktif terbesar dibandingkan bagian lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa bagian B merupakan titik dengan pembebanan tertinggi dalam sistem distribusi.

Selain itu, terlihat bahwa nilai daya reaktif cukup signifikan dibandingkan daya aktif, yang menunjukkan bahwa sistem masih didominasi oleh komponen reaktif. Kondisi ini umumnya disebabkan oleh penggunaan beban induktif seperti motor listrik dan transformator, serta kontribusi kapasitif dari kabel tanah.

Dominasi daya reaktif ini berdampak pada peningkatan arus sistem, karena arus total merupakan hasil kombinasi antara komponen aktif dan reaktif. Akibatnya, sistem menjadi kurang efisien dan berpotensi meningkatkan rugi-rugi daya.



Gambar 7. Perbandingan Daya

Gambar 7 menunjukkan bahwa daya semu memiliki nilai terbesar dibandingkan daya aktif dan daya reaktif pada setiap bagian sistem, yang mengindikasikan adanya pengaruh signifikan komponen daya reaktif terhadap total daya. Pada bagian A, B, dan C, distribusi daya relatif seimbang dengan nilai yang tidak berbeda jauh, sehingga menunjukkan kondisi pembebanan yang masih terdistribusi secara normal.

Namun, pada load bus terjadi peningkatan yang sangat signifikan pada daya semu, daya aktif, dan daya reaktif, yang mencerminkan adanya akumulasi pembebanan dalam sistem. Besarnya selisih antara daya semu dan daya aktif juga menunjukkan bahwa faktor daya sistem belum optimal, dimana daya reaktif masih cukup dominan.

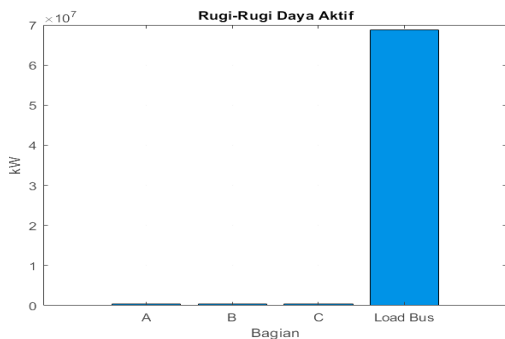
Kondisi ini berdampak pada peningkatan arus sistem yang berpotensi memperbesar rugi-rugi daya serta menurunkan efisiensi sistem distribusi. Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan daya reaktif untuk meningkatkan faktor daya dan kinerja sistem secara keseluruhan.

4.3 Analisis Rugi-Rugi Daya

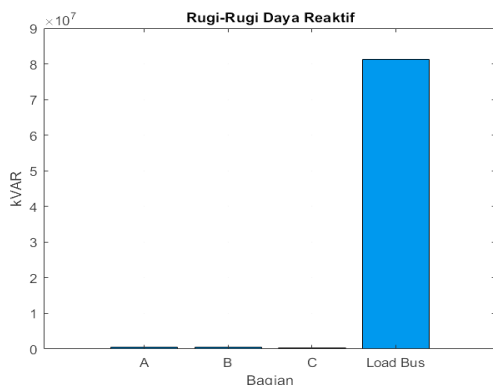
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rugi-rugi daya pada masing-masing bagian sistem berada dalam kisaran 2–3% untuk daya aktif dan 3–4% untuk daya reaktif. Nilai ini masih tergolong normal untuk sistem distribusi tenaga listrik.

Namun demikian, rugi-rugi daya terbesar terjadi pada bagian B, yang memiliki arus paling tinggi. Hal ini sesuai dengan teori bahwa rugi-rugi daya berbanding lurus dengan kuadrat arus (I^2), sehingga peningkatan arus akan menyebabkan peningkatan rugi-rugi secara signifikan.

Pada sisi load bus, terjadi peningkatan rugi-rugi daya yang sangat besar dibandingkan bagian lainnya. Hal ini menunjukkan adanya akumulasi beban yang tinggi serta kemungkinan distribusi daya yang tidak merata dalam sistem.



Gambar 8. Grafik Rugi-Rugi Daya Reaktif



Gambar 9. Grafik Rugi-Rugi Daya Reaktif

Gambar 8 dan 9 memperlihatkan hubungan langsung antara besarnya arus dan rugi-rugi yang dihasilkan. Bagian dengan arus tertinggi akan menghasilkan rugi-rugi terbesar. Selain itu, grafik ini juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi titik-titik kritis dalam sistem yang memerlukan perbaikan atau optimasi.

4.4 Analisis Pengaruh Kabel Tanah

Kabel tanah yang digunakan dalam sistem distribusi memiliki karakteristik kapasitif yang menyebabkan munculnya daya reaktif tambahan dalam sistem. Semakin panjang kabel yang digunakan, maka semakin besar kontribusi daya reaktif yang dihasilkan.

Kontribusi daya reaktif dari kabel tanah ini dapat menyebabkan peningkatan tegangan pada kondisi tertentu, terutama saat beban rendah. Selain itu, daya reaktif tambahan juga dapat memperbesar arus yang mengalir dalam sistem, sehingga berpotensi meningkatkan rugi-rugi daya.

Dengan panjang kabel mencapai 28,8 km, pengaruh kapasitansi kabel menjadi cukup signifikan dan perlu diperhitungkan dalam analisis sistem tenaga listrik.

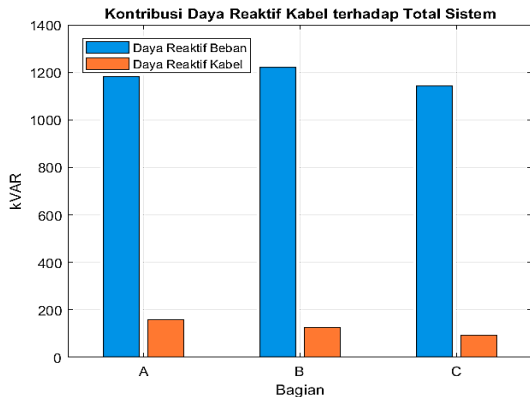
Tabel 4. Kontribusi Daya Reaktif Kabel

Bagian	Q Beban (kVAR)	Q Kabel (kVAR)	Q Total (kVAR)	Kontribusi Kabel (%)
A	1182,01	±157	±1339	±11,7%
B	1220,13	±126	±1346	±9,4%
C	1143,88	±94	±1238	±7,6%

Berdasarkan Tabel 4, terlihat bahwa kabel tanah memberikan kontribusi tambahan terhadap daya reaktif pada setiap bagian sistem. Nilai daya reaktif kabel berada pada kisaran ±7% hingga ±12% dari total daya reaktif, dengan kontribusi terbesar terjadi pada bagian A dan terkecil pada bagian C.

Meskipun daya reaktif kabel lebih kecil dibandingkan daya reaktif beban, kontribusinya tetap signifikan dan tidak dapat diabaikan. Hal ini disebabkan oleh sifat kapasitif kabel tanah yang menghasilkan daya reaktif tambahan ke dalam sistem, terutama pada saluran dengan panjang yang lebih besar.

Dengan demikian, kabel tanah berperan sebagai sumber daya reaktif dalam sistem distribusi, yang dapat mempengaruhi karakteristik aliran daya serta efisiensi sistem tenaga listrik.



Gambar 10 Grafik Kontribusi Daya Reaktif

Gambar 10 menunjukkan bahwa daya reaktif beban mendominasi pada setiap bagian sistem, sedangkan kontribusi daya reaktif dari kabel tanah relatif lebih kecil. Pada bagian A, B, dan C, daya reaktif kabel berada pada kisaran $\pm 100-150$ kVAR, jauh di bawah daya reaktif beban.

Meskipun nilainya lebih kecil, kontribusi kabel tanah tetap signifikan karena berasal dari sifat kapasitif kabel. Semakin panjang kabel, semakin besar daya reaktif yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa kabel tanah tidak hanya sebagai penghantar, tetapi juga sebagai sumber daya reaktif yang mempengaruhi kondisi sistem tenaga listrik.

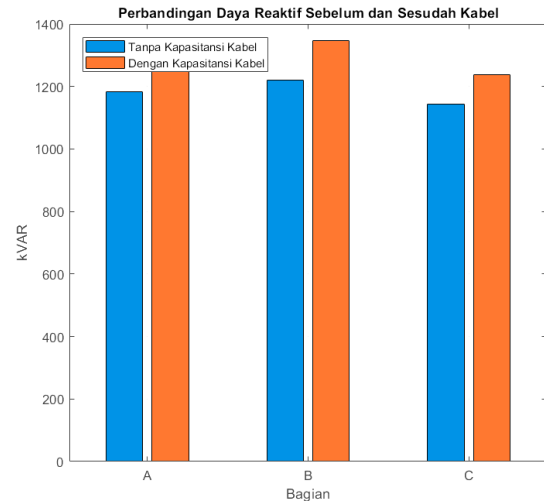
Tabel 5. Perbandingan Sebelum dan Sesudah Kapasitansi Kabel

Bagian	Tanpa Kabel (kVAR)	Dengan Kabel (kVAR)	Selisih (kVAR)
A	1182,01	± 1339	meningkat
B	1220,13	± 1346	meningkat
C	1143,88	± 1238	meningkat

Berdasarkan Tabel 5, terlihat bahwa nilai daya reaktif pada seluruh bagian sistem mengalami peningkatan setelah mempertimbangkan kapasitansi kabel. Pada bagian A, B, dan C, daya reaktif dengan adanya kabel lebih besar dibandingkan kondisi tanpa kabel.

Peningkatan ini menunjukkan bahwa kabel tanah berkontribusi sebagai sumber daya reaktif tambahan dalam sistem. Besarnya selisih daya reaktif pada masing-masing bagian dipengaruhi oleh panjang saluran kabel, dimana semakin panjang kabel maka kontribusi daya reaktif yang dihasilkan semakin besar.

Dengan demikian, kapasitansi kabel memiliki peran penting dalam mempengaruhi total daya reaktif sistem dan perlu diperhitungkan dalam evaluasi kinerja sistem tenaga listrik.



Gambar 11 Grafik Perbandingan Daya Reaktif Sebelum dan Sesudah Kabel

Gambar 11 menunjukkan bahwa nilai daya reaktif meningkat pada seluruh bagian sistem setelah mempertimbangkan kapasitansi kabel. Pada bagian A, B, dan C, daya reaktif dengan adanya kabel lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa kabel.

Peningkatan ini disebabkan oleh sifat kapasitif kabel tanah yang menghasilkan daya reaktif tambahan ke dalam sistem. Hal ini menunjukkan bahwa kabel tanah berkontribusi langsung terhadap total daya reaktif, sehingga perlu diperhitungkan dalam evaluasi kinerja sistem tenaga listrik.

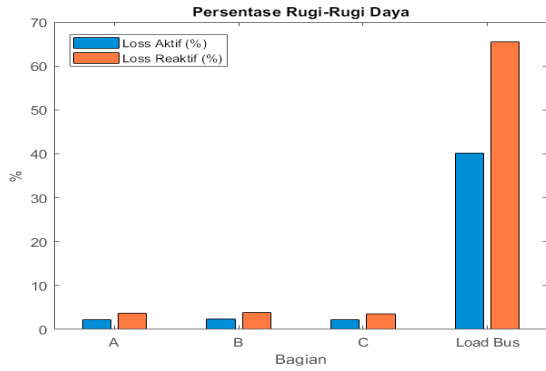
4.5 Evaluasi Kinerja Sistem

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, sistem distribusi tenaga listrik menunjukkan bahwa:

- pembebanan tidak merata pada setiap bagian,
- terdapat dominasi daya reaktif dalam sistem,
- serta peningkatan rugi-rugi daya pada bagian dengan arus tinggi.

Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem masih dapat beroperasi dengan baik, namun belum optimal dari segi efisiensi. Dominasi daya reaktif menyebabkan faktor daya sistem menjadi rendah, sehingga diperlukan upaya perbaikan untuk meningkatkan performa sistem.

Selain itu, nilai rugi-rugi yang tinggi pada load bus menunjukkan bahwa distribusi daya belum optimal dan perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut terhadap konfigurasi jaringan.



Gambar 12 Grafik Persentase Rugi – Rugi Daya

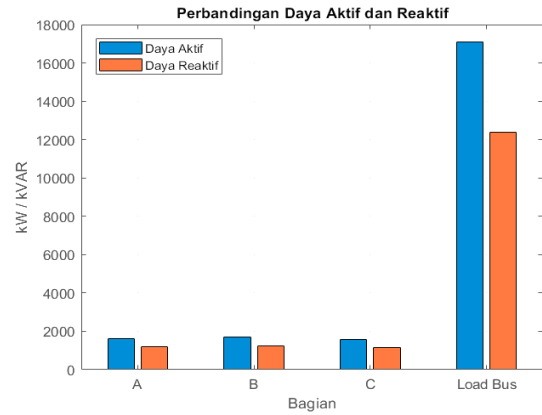
Gambar 12 menunjukkan bahwa persentase rugi-rugi daya pada bagian A, B, dan C relatif kecil, yaitu berkisar antara 2–4% untuk daya aktif maupun reaktif. Nilai ini masih berada dalam batas normal untuk sistem distribusi tenaga listrik.

Namun, pada bagian load bus terlihat peningkatan yang sangat signifikan, dimana rugi-rugi daya aktif mencapai sekitar 40% dan daya reaktif sekitar 65%. Hal ini menunjukkan adanya akumulasi beban yang tinggi serta potensi ketidakefisienan dalam distribusi daya pada titik tersebut.

Nilai rugi-rugi daya yang tinggi pada load bus (40% untuk daya aktif dan 65% untuk daya reaktif) tidak merepresentasikan rugi-rugi pada satu segmen jaringan secara fisik, melainkan merupakan hasil pendekatan agregat dari total pembebanan sistem yang dipusatkan pada satu titik (load bus). Dalam pemodelan ini, load bus berfungsi sebagai titik akumulasi seluruh beban, sehingga nilai rugi-rugi yang diperoleh mencerminkan akumulasi arus dan daya sistem secara keseluruhan, bukan rugi-rugi lokal pada satu saluran. Besarnya arus total yang mengalir menuju load bus juga menyebabkan peningkatan rugi-rugi yang bersifat kuadrat terhadap arus ($\propto I^2$), sehingga menghasilkan nilai yang jauh lebih besar dibandingkan pada masing-masing segmen jaringan.

Sebagai perbandingan, pada sistem distribusi tenaga listrik yang beroperasi secara normal, rugi-rugi daya umumnya berada pada kisaran 2–5%. Oleh karena itu, nilai rugi-rugi yang tinggi pada load bus dalam penelitian ini lebih tepat diinterpretasikan sebagai indikator akumulasi pembebanan dan ketidakseimbangan distribusi daya, bukan sebagai kondisi operasional normal. Untuk memperoleh estimasi yang lebih representatif, diperlukan pemodelan yang lebih rinci dengan pembagian beban pada setiap bus sehingga distribusi aliran daya dapat dianalisis secara lebih akurat.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa meskipun sebagian besar sistem masih beroperasi secara efisien, namun bagian load bus menjadi titik kritis yang memerlukan evaluasi lebih lanjut untuk mengurangi rugi-rugi daya.



Gambar 13 Perbandingan Daya Aktif Dan Reaktif

Gambar 13 menunjukkan bahwa daya aktif memiliki nilai lebih besar dibandingkan daya reaktif pada setiap bagian sistem. Hal ini menandakan bahwa sistem masih didominasi oleh komponen daya aktif, meskipun kontribusi daya reaktif tetap cukup signifikan.

Pada bagian load bus, terlihat peningkatan yang sangat besar baik pada daya aktif maupun daya reaktif, yang menunjukkan akumulasi pembebanan sistem. Besarnya daya reaktif ini menunjukkan bahwa sistem masih memiliki faktor daya yang belum optimal, sehingga berpotensi meningkatkan arus dan rugi-rugi daya.

Dengan demikian, diperlukan pengelolaan daya reaktif untuk meningkatkan efisiensi sistem, terutama pada bagian dengan pembebanan tinggi.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem distribusi tenaga listrik 20 kV berbasis kabel tanah pada PT PLN (Persero) Kota Subulussalam masih beroperasi dalam kondisi stabil, dimana profil tegangan berada dalam batas yang diizinkan (0,95–1,05 pu). Hal ini menunjukkan bahwa sistem masih mampu menyuplai beban secara normal.
2. Distribusi pembebanan pada sistem tidak merata, dimana bagian B memiliki nilai arus dan daya terbesar dibandingkan bagian lainnya, sehingga menjadi kontributor utama terhadap peningkatan rugi-rugi daya dalam sistem.

3. Daya reaktif dalam sistem tergolong dominan dengan faktor daya sebesar 0,8, yang berdampak pada peningkatan arus dan penurunan efisiensi sistem tenaga listrik.
4. Kabel tanah memberikan kontribusi daya reaktif tambahan akibat sifat kapasitifnya, dengan persentase berkisar antara $\pm 7\%$ hingga $\pm 12\%$ terhadap total daya reaktif sistem. Hal ini menegaskan bahwa kabel tanah tidak hanya berfungsi sebagai penghantar, tetapi juga sebagai sumber daya reaktif yang mempengaruhi kinerja sistem distribusi.
5. Rugi-rugi daya pada masing-masing bagian sistem (A, B, dan C) masih berada dalam batas normal (sekitar 2–3% untuk daya aktif dan 3–4% untuk daya reaktif). Namun, nilai rugi-rugi yang sangat tinggi pada load bus (40% daya aktif dan 65% daya reaktif) merupakan hasil pendekatan agregat dari akumulasi pembebanan sistem, sehingga tidak merepresentasikan rugi-rugi aktual pada satu segmen jaringan secara fisik.
6. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun sistem masih beroperasi dengan baik, efisiensi sistem belum optimal akibat dominasi daya reaktif dan ketidakseimbangan distribusi beban. Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan daya reaktif serta pemerataan beban untuk meningkatkan kinerja sistem distribusi tenaga listrik.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Diperlukan kompensasi daya reaktif pada sistem distribusi, seperti pemasangan kapasitor bank atau perangkat kompensasi lainnya, untuk mengurangi dominasi daya reaktif dan meningkatkan faktor daya sistem.
2. Perlu dilakukan pemerataan distribusi beban pada setiap bagian jaringan, khususnya pada bagian dengan pembebanan tinggi, guna mengurangi akumulasi arus dan menekan rugi-rugi daya dalam sistem.
3. Dalam perencanaan dan analisis sistem distribusi, pengaruh kapasitansi kabel tanah perlu dipertimbangkan secara lebih detail, karena terbukti memberikan kontribusi terhadap daya reaktif sistem.
4. Untuk memperoleh hasil yang lebih representatif, disarankan menggunakan pemodelan sistem yang lebih rinci, dengan pembagian beban pada setiap bus serta mempertimbangkan parameter jaringan secara lebih lengkap.

analisis dengan menggunakan metode yang lebih kompleks seperti Newton–Raphson atau software simulasi (ETAP/DIGSILENT), serta mengkaji pengaruh daya reaktif terhadap stabilitas tegangan dan kualitas daya secara lebih mendalam.

ACKNOWLEDGEMENT

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada PT PLN (Persero) Kota Subulussalam yang telah memberikan kesempatan, dukungan, serta data yang diperlukan dalam pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU) atas dukungan akademik, bimbingan, serta fasilitas yang telah diberikan selama proses penelitian hingga penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. N. Fadliilah *et al.*, “Analisis Asesmen Kabel 20 kV pada Saluran Kabel Tegangan Menengah di PLN ULP Prima Majalaya,” 2023.
- [2] S. Zulhafizan, “Perencanaan Saluran Tegangan Rendah Menggunakan Kabel Bawah Tanah di Lingkungan Universitas Tanjungpura,” vol. 4, no. 6, pp. 1714–1731, 2024.
- [3] S. A. Shalsabilla and Y. La Goa, “Analisis Dan Evaluasi Sistem Grounding Pada Instalasi Listrik Untuk Mengurangi Risiko Kebakaran Dan Kerusakan Peralatan Di Central Control Room Unit GAS PIPELINE PT . X,” vol. 1, no. 2, 2025.
- [4] N. Samburi, A. Fateh, and M. Nor, “A Comparative Study of Gauss-Seidel and Newton- Raphson Methods in Power Flow Analysis,” vol. 6, no. 2, pp. 89–95, 2025.
- [5] I. Optimal, C. Placement, and E. Jaringan, “Implementation of Optimal Capacitor Placement for Improving Network Efficiency on the Feeder,” pp. 1–8.
- [6] A. Siagian, M. E. Dalimunthe, and Z. Tharo, “Analisis Keandalan Sistem Konfigurasi Jaringan Penyulang 20 Kv di PT . PLN (Persero) ULP Pakam Kota Berbasis Matlab,” vol. 5, no. 1, pp. 18–31.
- [7] A. J. Besin, S. Kurniati, and F. J. Likadja, “Analisis Aliran Daya Listrik Pada Penyulang Besikama ULP Atambua,” vol. 2, no. 1, pp. 1–7, 2025.
- [8] J. Multidisiplin and S. Volume, “3 1,2,3,” vol. 10, no. 9, 2026.
- [9] A. Daya and S. T. Listrik, “Artikel Analisis Load Flow pada Kilang dan Utilitas PPSDM,” pp. 1–10, 2023.
- [10] S. Kehilangan, S. Transmisi, and A.

- Pangestu, "Impression : Jurnal Teknologi dan Informasi," vol. 4, no. 2, 2025.
- [11] A. Gupta, Y. Xie, H. Jiang, and H. Singh, "A Strong Baseline for Point Cloud Registration via Direct Superpoints Matching".
- [12] W. Shi, H. Li, and Z. Wang, "Underground Power Distribution System Restoration Using Inverter Based Resources," pp. 1–10.
- [13] M. A. A. Bishri, M. E. Dalimunthe, and D. Lesmana, "Analysis of Reactive Power Flow in an Electric Power System," vol. 6, no. 3, pp. 198–203, 2024, doi: 10.52005/fidelity.v6i3.237.
- [14] J. Huang, B. Cui, X. Zhou, and A. Bernstein, "A Generalized LinDistFlow Model for Power Flow Analysis".
- [15] A. Hamdani, "Analisis Penentuan Lokasi Gangguan Saluran Kabel Bawah Tanah Tegangan Menengah Menggunakan Metode Direct Circuit Analysis 20 KV di PT Cikarang Listrindo," vol. 7, no. 1, pp. 165–174.
- [16] R. Hayati, "Analisis Kebutuhan Daya pada Jaringan Distribusi 20 KV Sistem Radial A-119," vol. 6, no. 1, pp. 118–121, 2022.
- [17] R. Rasyid, "and Engineering Analisa Kualitas Daya Listrik Pada Gardu Distribusi Universitas Khairun," vol. 4, no. 1, pp. 28–40, 2021.
- [18] J. Carlos, P. Cruz-romero, and J. C. Bravo-rodríguez, "Evaluation of the power frequency magnetic field generated by three-core armored cables through 3D finite element simulations," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 213, no. April, p. 108701, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108701.
- [19] T. A. P. Cables, J. Carlos, M. Hatlo, and P. Cruz-romero, "On Simplified 3D Finite Element Simulations of," pp. 1–14, 2018, doi: 10.3390/en11113081.
- [20] B. Power *et al.*, "Software etap 12.6," pp. 46–59, 2019.
- [21] R. Yaldi, M. A. Muthalib, A. Hasibuan, and D. Fariadi, "of the article here , brief 18 words (In English) Font , Bold , Align Text Left , One Single Space , 14pt) Write Research the of the article here , brief and precise , max 18 words (In English) Power Quality Analysis of a 20kV Primary Distribution Line Using ETAP," vol. 2, pp. 2–11, 2024.
- [22] H. B. Trung, "Multi-period power flow analysis in distribution systems with distributed generation using the nonlinear programming model Pham Nang Van, Nguyen Thi Hoai Thu *," vol. 104, pp. 49–58, 2025.
- [23] A. Tyagi, K. Kumar, M. A. Ansari, and B. Kumar, "An efficient load flow solution for distribution system with addition of distributed generation using improved harmony search algorithms," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 7, 2020, doi: 10.1186/s43067-020-00014-7.
- [24] Q. Z. Advisor, "Power Flow Calculation in Distribution Systems".
- [25] S. H. Almomin and I. O. Habiballah, "Review On Load Flow Of Distributed Energy Resources In Distribution System," vol. 10, no. 12, pp. 167–169, 2021.
- [26] A. Nur, N. Chamim, K. T. Putra, and M. F. Al, "Power Flow Analysis of Electrical Network Systems Using Gauss-Seidel Method and Python," vol. 4, no. 1, pp. 28–36, 2023.