

Analisis Pemasangan Kapasitor Bank Untuk Mengurangi Drop Tegangan Pada Jaringan Distribusi 20 kV Di Penyulang Singapura ULP Pasir Pangaraian PT. PLN (Persero)

Muhammad Ilham¹, Zulfahri², Monice³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning
Jl. Yos Sudarso km. 8 Rumbai, Pekanbaru, Telp. (0761) 52324

Corresponded Author : zulfahri@unilak.ac.id

ABSTRAK

Penyulang Singapura merupakan salah satu jaringan distribusi di bawah pengawasan ULP Pasir Pangaraian yang terdiri dari 30 transformator distribusi dengan total panjang saluran mencapai 60,9 km. Tegangan pada ujung penyulang tercatat sebesar 17,5 kV, lebih rendah dari batas minimum yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri ESDM Nomor 4 Tahun 2009, yaitu 18 kV (-10% dari tegangan nominal 20 kV). Penurunan tegangan ini disebabkan oleh panjangnya jaringan distribusi serta rendahnya faktor daya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak pemasangan kapasitor bank terhadap peningkatan kualitas tegangan dan efisiensi energi. Metode yang digunakan mencakup perhitungan jatuh tegangan, rugi daya, serta simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0.1. Hasil analisis menunjukkan bahwa sebelum pemasangan kapasitor, tegangan terendah adalah 17,336 kV (0,867 pu) dengan rugi daya aktif sebesar 366,472 kW dan rugi daya reaktif 560,217 kVAr. Setelah pemasangan kapasitor bank sebesar 720 kVAr di Bus 30, tegangan meningkat menjadi 18,239 kV (0,912 pu), sedangkan rugi daya aktif dan reaktif masing-masing turun menjadi 296,559 kW dan 453,342 kVAr. Dengan demikian, pemasangan kapasitor bank terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas tegangan dan efisiensi sistem distribusi sesuai standar yang berlaku.

Kata Kunci: Sistem Distribusi, Jatuh Tegangan, Kapasitor

ABSTRACT

The Singapura feeder is part of the electrical distribution network under the supervision of ULP Pasir Pangaraian. It consists of 30 distribution transformers with a total line length of 60.9 km. The end-line voltage is recorded at 17.5 kV, which is below the minimum threshold of 18 kV as stated in the Regulation of the Minister of Energy and Mineral Resources No. 4 of 2009 (-10% of the nominal 20 kV). This voltage drop is primarily caused by the long distribution line and low power factor. This study aims to analyze the effect of installing a capacitor bank on voltage improvement and energy efficiency. The methodology includes voltage drop and power loss calculations, supported by simulation using ETAP 19.0.1 software. The analysis shows that prior to capacitor installation, the lowest voltage was 17.336 kV (0.867 pu), with an active power loss of 366.472 kW and a reactive power loss of 560.217 kVAr. After installing a 720 kVAr capacitor bank at Bus 30, the voltage improved to 18.239 kV (0.912 pu), while the active and reactive losses were reduced to 296.559 kW and 453.342 kVAr, respectively. These results confirm that capacitor bank installation is effective in enhancing voltage quality and improving efficiency in accordance with regulatory standards.

Keywords: *distribution system, voltage drop, capacitor bank, power factor.*

1. PENDAHULUAN

Dalam sistem tenaga listrik, jaringan distribusi merupakan tahapan akhir yang langsung berhubungan dengan konsumen. Oleh karena itu, kualitas daya listrik khususnya stabilitas tegangan dan efisiensi energi menjadi sangat penting untuk dijaga. Salah satu permasalahan umum yang terjadi pada jaringan distribusi adalah jatuh tegangan (voltage drop) yang melebihi batas toleransi, sehingga berdampak pada performa peralatan listrik konsumen dan kerugian energi secara keseluruhan.

Masalah tersebut juga terjadi pada Penyulang Singapura, salah satu jaringan distribusi di bawah pengawasan ULP Pasir Pangaraian PT. PLN (Persero), dengan panjang total saluran mencapai 60,9 km dan terdiri atas 30 unit transformator distribusi. Data pengukuran menunjukkan bahwa tegangan pada ujung penyulang hanya sebesar 17,5 kV. Nilai ini lebih rendah dari standar minimum tegangan menurut Peraturan Menteri ESDM No. 4 Tahun 2009, yaitu 18 kV atau -10% dari tegangan nominal 20 kV. Hal ini menunjukkan bahwa telah terjadi penurunan tegangan sebesar 2,4 kV atau lebih dari ambang batas yang diizinkan.

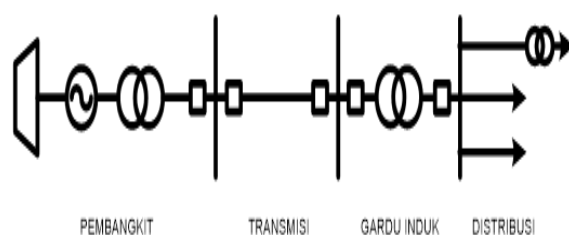
Penyebab utama dari penurunan tegangan ini adalah panjangnya jaringan distribusi yang menimbulkan rugi-rugi daya aktif dan reaktif, serta rendahnya faktor daya akibat dominasi beban induktif. Permasalahan seperti ini juga ditemukan dalam berbagai studi terdahulu, seperti oleh Sivanagaraju dan Satyanarayana (2009) serta Gonen (2008), yang menyatakan bahwa semakin panjang saluran distribusi maka jatuh tegangan dan kerugian daya akan semakin besar.

Beberapa solusi teknis telah dikembangkan untuk mengatasi penurunan tegangan, seperti menaikkan tap pada transformator, rekonfigurasi jaringan, atau pemasangan peralatan kompensasi daya reaktif. Di antara solusi tersebut, pemasangan kapasitor bank dinilai sebagai metode yang paling efisien dan ekonomis untuk memperbaiki tegangan dan faktor daya, sebagaimana dibuktikan dalam penelitian oleh Yudha et al. (2017) dan Laginda et al. (2018).

Berdasarkan hasil studi literatur tersebut, penelitian ini mengembangkan pendekatan pemasangan kapasitor bank dengan menentukan kapasitas dan lokasi optimal berdasarkan metode kompensasi daya reaktif. Dengan demikian, diharapkan terjadi peningkatan tegangan pada ujung penyulang dan pengurangan rugi daya yang signifikan. Analisis dilakukan melalui pendekatan perhitungan teknik dan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0.1.

Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik pada intinya berasal dari empat bagian, yaitu pembangkit, transmisi, distribusi dan pemakaian energi listrik atau beban, dapat ditinjau dari Gambar 1 berikut [4]:



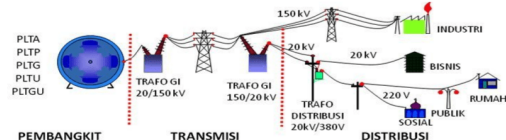
Gambar 1. Sistem Tenaga Listrik

Sistem Distribusi

Jaringan Tegangan Menengah (JTM) sering dinyatakan dengan jaringan distribusi primer sedangkan Jaringan Tegangan Rendah (JTR) sering dinyatakan jaringan distribusi sekunder. Tegangan distribusi 20 kV diturunkan ke level tegangan yang lebih rendah sebagai 380/220V. Berawal dari transformator-transformator distribusi kemudian menuju para pelanggan listrik yang dilayani menggunakan kabel-kabel tegangan rendah menajlar

ke sepanjang lokasi pemukiman yang mencakup pelanggan komersial maupun beberapa industri yang ada pada lokasi tadi [6].

Fungsi distribusi tenaga listrik menjadi pembagi atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa kawasan (pelanggan), serta juga sub sistem tenaga listrik yg langsung terkoneksi dengan pelanggan, sebab catu daya pada pusat-sentra beban (pelanggan) dilayani eksklusif melalui jaringan distribusi. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi memanfaatkan tegangan untuk diturunkan tegangannya menggunakan transformator distribusi sebagai sistem tegangan rendah, yaitu 380/220V. Selanjutnya disalurkan melalui saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen, bisa ditinjau dari Gambar 2 [12].



Gambar 2. Sistem Distribusi

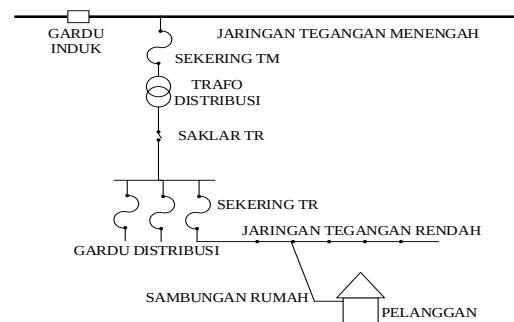
Sistem Distribusi terdiri dua sistem yaitu:

1. Jaringan Sistem Distribusi primer

Jaringan distribusi primer ialah suatu jaringan yang menyalurkan energi listrik bertegangan menengah (sebesar 6 kV atau 20 kV). Pola konfigurasi jaringan di distribusi primer terdiri asal lima tipe yaitu sistem radial, sistem *loop*, sistem *spindel*, sistem *spot network* dan sistem interkoneksi [6].

2. Jaringan Sistem Distribusi Sekunder

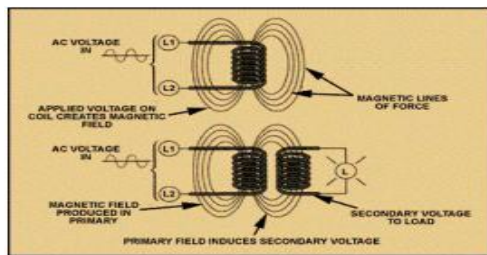
Jaringan distribusi sekunder berupa jaringan bertegangan rendah sebanyak 220/380V. Sistem ini umumnya dianggap sistem tegangan rendah yg akan dihubungkan kepada konsumen/pemakai energi listrik. Jaringan distribusi sekunder bisa dilihat di Gambar 3 [12]



Gambar 3. Jaringan Distribusi Skunder

Transformator

Transformator merupakan sebuah peralatan listrik yang dapat memindahkan serta mengubah energi listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, melalui suatu gandingan magnet dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis [1]. Transformator menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum *ampere* serta induksi *faraday*, dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet/*fluks* medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi, bisa dipandang di Gambar 4 [9].



Gambar 4. Prinsip Hukum Elektro Magnetik

Berikut ini adalah persamaan perbandingan arus primer dan sekunder terhadap belitan primer dan sekunder [3].

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (1)$$

Berikut perhitungan Arus Beban pada Tranformator [14].

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \cos \phi} \quad (2)$$

Keterangan:

- I_p = Arus Primer (*Ampere*)
- I_s = Arus Sekunder (*Ampere*)
- N_p = Belitan Primer
- N_s = Belitan Sekunder
- I = Arus beban (*Ampere*)
- P = Daya aktif (*Watt*)
- $\cos \phi$ = Faktor Daya

Impedansi

Impedansi terdiri atas resistansi (R) dan reaktansi (X). Nilai resistansi ditentukan oleh jenis dan berukuran kawat penghantar [4]. Nilai reaktansi (induktif serta kapasitif) ditentukan panjang antar saluran serta ukuran penghantarnya. Impedansi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut [5].

$$Z = R + jX \quad (3)$$

Sehingga impedansi saluran dapat dicari melalui persamaan berikut:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (4)$$

Keterangan:

- Z = Impedansi (*Ohm*)
- R = Resistansi (*Ohm*)
- jX = Reaktansi (*Ohm*)

Resistansi

Resistansi dari kawat penghantar saluran transmisi adalah penyebab yang terpenting dari rugi-rugi daya (*power losses*) pada saluran [4].

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (5)$$

2. Reaktansi

Reaktansi pada saluran transmisi atau distribusi terdiri dari dua jenis yaitu reaktansi induktif (jX) dan reaktansi kapasitif ($-jX$). Namun pada saluran distribusi, reaktansi kapasitif sangat kecil, sehingga biasanya diabaikan [2]. Berikut ini adalah persamaan reaktansi [11].

$$X = 2\pi fL \quad (6)$$

Keterangan:

- R = besarnya tahanan kawat (*Ohm*)
- ρ = nilai tahanan jenis kawat (*Ohm mm²/m*)
- l = panjang kawat penghantar (*m*)
- A = luas penampang kwat (*mm²*)
- f = Frekuensi (*Hz*)
- L = Induktansi (*Hendry*)
- X = Reaktansi Induktif (*Ohm*)

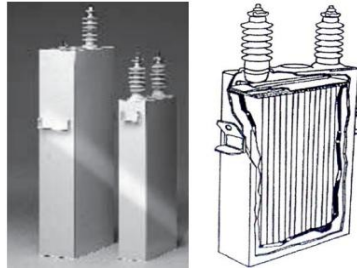
Kapasitor

Fungsi Kapasitor terbagi atas dua kelompok yaitu kapasitor kapasitas tetap dan kapasitor variabel. Sifat dasar kapasitor ialah menyimpan muatan listrik dan pada arus DC kapasitor berfungsi sebagai isolator/penahan arus listrik, pada arus AC kapasitor berfungsi sebagai konduktor/melewatkan arus listrik [10]. *Rating* tegangan unit kapasitor bervariasi dari 240 V hingga 25 kV dan rating kapasitas dari 2,5 kVAr hingga 1 MVar [8].

1. Kapasitor Bank

Kapasitor bank adalah peralatan listrik yang bersifat kapasitif terdiri dari beberapa kapasitor yang dihubungkan secara paralel/seri untuk memperoleh kapasitas kapasitif tertentu. Besaran parameter yang sering dipakai adalah kVAr (*kilo volt ampere reactif*) meskipun pada kapasitor sendiri tercantum besaran kapasitansi yaitu *Farad* (F) atau *microfarad* (μF). Terdapat dua cara pemasangan kapasitor yaitu secara seri dan *shunt*/paralel [7].

Kapasitor berfungsi untuk memperbaiki faktor daya jaringan, mengurangi rugi-rugi (*losses*) jaringan, menetralkan/meniadakan jatuh tegangan dan memperbaiki stabilitas tegangan. Kapasitor Bank (*capacitor banks*) dapat dilihat pada Gambar 5 berikut [8].



Gambar 5. Kapasitor Bank

2. Besaran Kapasitor

Besaran kapasitor ialah besaran yang digunakan dalam menentukan kapasitansi kapasitor, maka kita dapat menaikkan dengan persentase dari jatuh tegangan yang diketahui [17]. Dan untuk kapasitansi kapasitor dapat dihitung menggunakan Persamaan (7) berikut [13]:

$$C = \frac{Qc}{2 \times \pi \times f \times V^2} (\mu F) \quad (7)$$

3. Faktor Kompensasi Kapasitor

Faktor kompensasi kapasitor adalah perbandingan dari nilai kapasitas kapasitor (kVAr) dengan kapasitas daya reaktif total (kVAr). Berikut ini adalah persamaan faktor kompensasi kapasitor [5].

$$K = \frac{kVAr \text{ kapasitor}}{kVAr \text{ total}} \quad (8)$$

4. Penempatan Lokasi Optimum Kapasitor

Penempatan lokasi optimum bertujuan untuk memperoleh tegangan yang lebih baik, dipasangnya kapasitor dengan kapasitas tertentu pada lokasi tertentu disalurkan, sehingga akan diperoleh lokasi penempatan kapasitor yang paling tepat. Untuk tingkat beban yang berubah pemasangan kapasitor dengan tingkat kompensasi (K) tertentu, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [15].

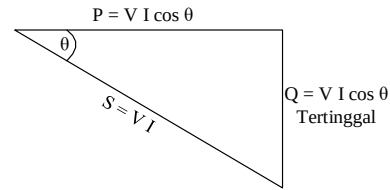
$$X_1 = \left[1 - \frac{(2 \times i - 1)}{2 \times n} \times K \right] \times l \quad (9)$$

Keterangan:

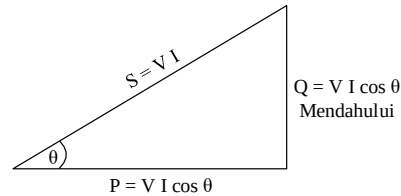
- i = Letak Kapasitor 1,2,3...dst
- K = Faktor Kompensasi
- n = Jumlah Kapasitor
- l = Panjang Saluran Total (m)
- C = Kapasitas Kapasitor (Farad)
- Qc = Kapasitansi Kapasitor (VAr)
- f = Frekuensi (Hz)
- V = Tegangan (Volt)

Segitiga Daya

Segitiga daya merupakan sketsa dari daya Semu (S), daya reaktif (Q) dan daya aktif (P). Terdapat dua sifat pada segitiga daya yaitu bersifat induktif dan kapasitif, dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7 [4].



Gambar 6. Segitiga Daya yang bersifat Induktif



Gambar 7. Segitiga Daya yang bersifat Kapasitif

1. Daya Semu

Daya semu/kompleks (S), dinyatakan dalam satuan *Volt Ampere* (VA), kilo *Volt Ampere* (kVA), dan Mega *Volt Ampere* (MVA) [4].

$$S = V \cdot I = V \cdot I \cdot \cos \theta - jV \cdot I \sin \theta = P - jq \quad (10)$$

Untuk persamaan tiga fasa dinyatakan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (11)$$

Atau dapat dinyatakan dengan segitiga daya dengan persamaan pitagoras:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (12)$$

2. Daya Aktif

Daya aktif (P), dinyatakan dengan satuan *Watt* (W), kilo *Watt* (kW), dan Mega *Watt* (MW) [4].

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi = S \cdot \cos \varphi \quad (13)$$

Untuk persamaan tiga fasa dinyatakan sebagai berikut:

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi = S \cdot \cos \varphi \quad (14)$$

Atau dapat dinyatakan dengan segitiga daya dengan persamaan pitagoras:

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} \quad (15)$$

3. Daya Reaktif

Daya reaktif (Q), dinyatakan dengan satuan *Volt Ampere Reaktif* (VAr), kilo *Volt Ampere Reaktif* (kVAr) dan Mega *Volt Ampere Reaktif* (MVAr) [4].

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi = S \cdot \sin \varphi \quad (16)$$

Untuk persamaan tiga fasa dinyatakan sebagai berikut:

$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin \varphi = S \cdot \sin \varphi \quad (17)$$

Atau dapat dinyatakan dengan segitiga daya dengan persamaan pitagoras:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (18)$$

Keterangan:

- S = Daya Semu (VA)
- P = Daya Aktif (Watt)
- Q = Daya Reaktif (VAr)
- V = Tegangan antar saluran (Volt)
- I = Arus saluran (Ampere)
- cos φ = Faktor Daya
- Sin φ = Faktor Daya (tergantung nilai cos φ)

Rugi Daya

Rugi-rugi daya listrik pada saluran distribusi dibagi menjadi 2 bagian yaitu rugi daya aktif dan rugi daya reaktif [6].

1. Rugi-rugi Daya Aktif

Rugi daya aktif per fasa dapat dilihat pada persamaan berikut [13].

$$\Delta P = I^2 \cdot R \quad (19)$$

Sedangkan rugi-rugi daya aktif tiga fasa adalah sebagai berikut:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (20)$$

2. Rugi-rugi Daya Reaktif

Rugi daya reaktif per fasa dapat dilihat pada persamaan berikut [4].

$$\Delta Q = I^2 \cdot X \quad (21)$$

sedangkan rugi-rugi daya reaktif tiga fasa adalah sebagai berikut:

$$\Delta Q = 3 \cdot I^2 \cdot X \quad (22)$$

Keterangan:

- ΔP = Rugi daya aktif (Watt)
- ΔQ = Rugi daya reaktif (Watt)
- I = Arus beban pada saluran (Ampere)
- R = Resistansi (Ohm)
- X = Reaktansi (Ohm)

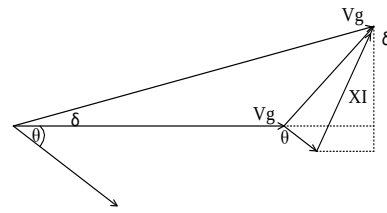
Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan ialah besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar atau bisa dikatakan bahwa adanya perbedaan tegangan antara tegangan kirim dan tegangan terima.

Penurunan tegangan terdiri dari dua komponen yaitu:

- 1) I.R, yaitu rugi tegangan akibat tahanan saluran
- 2) I.X, yaitu rugi tegangan akibat reaktansi induktif saluran

Persamaan jatuh tegangan didapatkan dari diagram vektor arus dan tegangan pada saluran distribusi seperti yang terlihat pada Gambar 8 [6].



Gambar 8. Diagram Vektor Arus dan Tegangan Saluran Distribusi

Berikut persamaan tegangan yang mendasari diagram vektor pada Gambar 8 adalah sebagai berikut [13].

$$V_D = I \cdot R \cos \varphi + I \cdot X \sin \varphi \quad (23)$$

sehingga jatuh tegangan saluran distribusi (V_D) per fasa adalah:

$$V_D = I(R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (24)$$

Jatuh tegangan saluran distribusi (V_D) dengan sistem 3 fasa adalah:

$$V_{D\ 3\phi} = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (25)$$

Jatuh tegangan saluran distribusi (V_D) dengan sistem 3 fasa adalah:

$$V_{D\ 3\phi} = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \cdot l \quad (26)$$

Keterangan:

Voltage regulator (V_R) adalah jatuh tegangan relatif yang dinyatakan dalam persamaan berikut [4].

$$V_R = V_S - V_D \quad (27)$$

Voltage regulator (V_R) dalam persen adalah jatuh tegangan relatif yang dinyatakan dalam persamaan berikut [4].

$$(\%)V_R = \frac{V_R - V_S}{V_S} = \frac{V_D}{V_S} \quad (28)$$

Keterangan:

- V_D = Jatuh tegangan (Volt)
- V_R = Regulasi jatuh tegangan (Volt)
- V_S = Tegangan kirim (Volt)
- I = Arus beban (Ampere)
- R = Tahanan kabel (Ohm)
- X = Reaktansi kabel (Ohm)
- φ = Sudut dari faktor daya beban
- l = Panjang saluran (m)

Besaran Per-Unit

Besaran volt, ampere dan ohm, sering dinyatakan sebagai persen atau per satuan dengan suatu nilai dasar atau acuan yang ditetapkan untuk masing-masingnya. Rumus berikut memberikan hubungan untuk besaran per unit tegangan [16].

$$\text{Volt per unit} = \frac{\text{volt sesungguhnya, } V}{\text{volt dasar, } V} \quad (29)$$

2. METODA PENELITIAN

Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam beberapa tahapan yang terstruktur guna mencapai tujuan untuk menganalisis pemasangan kapasitor bank dalam mengurangi jatuh tegangan dan memperbaiki faktor daya pada jaringan distribusi 20 kV. Adapun tahapan penelitian tersebut adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Dilakukan pengumpulan informasi dari berbagai sumber seperti buku teks, jurnal ilmiah, dan standar regulasi (SPLN 72:1987 dan Permen ESDM No. 20 Tahun 2020) untuk mendasari teori dan metodologi yang digunakan.

2. Pengumpulan Data Lapangan

Mengumpulkan data primer dan sekunder yang diperlukan, termasuk:

- Data panjang saluran dan konfigurasi jaringan
- Data teknis kawat penghantar dan transformator
- Data profil pembebanan pada masing-masing trafo
- Data tegangan awal (pangkal dan ujung penyulang)

3. Analisis Kebutuhan Kompensasi

Berdasarkan nilai daya reaktif dan faktor daya awal, ditentukan kebutuhan kapasitor bank dengan menghitung:

- Kapasitas daya reaktif yang perlu dikompensasi
- Besaran kapasitansi kapasitor menggunakan rumus:

$$C = \frac{Q_c}{2 \times \pi \times f \times V^2} (\mu F)$$

4. Penentuan Lokasi Optimal Pemasangan

Menentukan titik pemasangan kapasitor bank berdasarkan titik jatuh tegangan tertinggi dan lokasi beban dominan. Dalam hal ini dipilih Bus 31 sebagai lokasi pemasangan.

5. Simulasi Menggunakan ETAP 19.0.1

Melakukan simulasi kondisi jaringan distribusi sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor bank. Parameter yang dianalisis antara lain:

- Tegangan per unit (Vpu)
- Rugi daya aktif dan reaktif
- Faktor daya

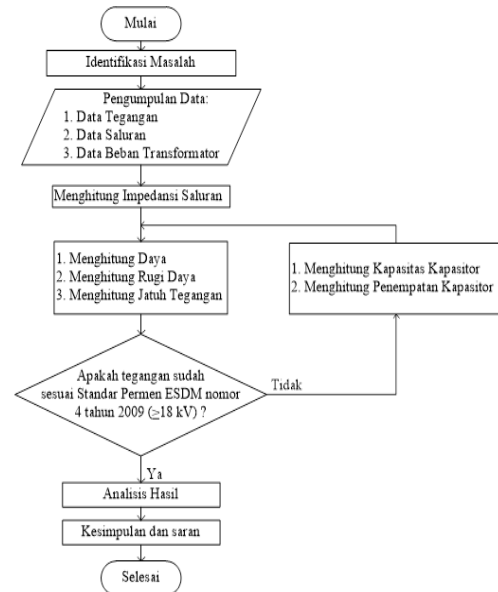
6. Analisis dan Evaluasi Hasil

Membandingkan hasil simulasi sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor untuk menilai efektivitas dari tindakan perbaikan yang dilakukan.

8. Kesimpulan dan Rekomendasi

Menarik kesimpulan berdasarkan hasil analisis serta memberikan saran teknis yang relevan untuk penerapan di lapangan.

Tahapan yang dilakukan pada penelitian ini seperti diagram alir pada Gambar 9.



Gambar 9. Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Impedansi Saluran

Berikut Tabel 1 hasil perhitungan resistansi, reaktansi dan impedansi pada Saluran Penyulang Singapura:

Tabel 1. Impedansi Saluran Penyulang Singapura

No	Bus	(l) km	(R) Ohm/km	(X) Ohm/km	(Z) Ohm/km
1	BUS2	2	0,43240	0,66100	0,78987
2	BUS3	2,75	0,59455	0,90888	1,08607
3	BUS4	0,25	0,05405	0,08263	0,09873
4	BUS5	0,85	0,18377	0,28093	0,33569
5	BUS6	1,2	0,25944	0,39660	0,47392
6	BUS7	0,3	0,06486	0,09915	0,11848
7	BUS8	2,1	0,45402	0,69405	0,82936
8	BUS9	2,95	0,63779	0,97498	1,16505
9	BUS10	2,3	0,49726	0,76015	0,90835
10	BUS11	2,45	0,52969	0,80973	0,96759
11	BUS12	0,5	0,10810	0,16525	0,19747
12	BUS13	2,35	0,50807	0,77668	0,92809
13	BUS14	2,1	0,45402	0,69405	0,82936
14	BUS15	3,6	0,77832	1,18980	1,42176
15	BUS16	2	0,43240	0,66100	0,78987
16	BUS17	3,25	0,70265	1,07413	1,28353
17	BUS18	2,1	0,45402	0,69405	0,82936
18	BUS19	1,2	0,25944	0,39660	0,47392
19	BUS20	0,05	0,01081	0,01653	0,01975
20	BUS21	1,05	0,22701	0,34703	0,41468
21	BUS22	0,5	0,10810	0,16525	0,19747
22	BUS23	1,1	0,23782	0,36355	0,43443
23	BUS24	0,15	0,03243	0,04958	0,05924
24	BUS25	0,4	0,08648	0,13220	0,15797
25	BUS26	1,05	0,22701	0,34703	0,41468
26	BUS27	0,5	0,10810	0,16525	0,19747
27	BUS28	0,7	0,15134	0,23135	0,27645
28	BUS29	0,5	0,10810	0,16525	0,19747

No	Bus	(l) km	(R) Ohm/km	(X) Ohm/km	(Z) Ohm/km
29	BUS30	3,45	0,74589	1,14023	1,36252
30	BUS31	3,7	0,79994	1,22285	1,46125
31	BUS32	0,05	0,01081	0,01653	0,01975
32	BUS33	3,6	0,77832	1,18980	1,42176
33	BUS34	0,5	0,10810	0,16525	0,19747
34	BUS35	3,5	0,75670	1,15675	1,38227
35	BUS36	2	0,43240	0,66100	0,78987
36	BUS37	2,35	0,50807	0,77668	0,92809
37	BUS38	1,5	0,32430	0,49575	0,59240

Jatuh Tegangan pada Penyulang Singapura

Jatuh tegangan pada Penyulang Singapura dapat dilakukan menggunakan Persamaan (26), *Voltage regulator* menggunakan menggunakan Persamaan (27), persentase jatuh tegangan yaitu menggunakan Persamaan (28), dan tegangan Per Unit menggunakan persamaan (29). Berikut Tabel 2 hasil perhitungan jatuh tegangan pada Penyulang Singapura:

Tabel 2. Jatuh Tegangan pada Penyulang Singapura

No	Bus	V _D (Volt)	V _R (%)	V _R (kV)	kV (PU)
Tegangan Pangkal				19,9	0,995
1	BUS2	102,469	0,515	19,798	0,990
2	BUS3	140,895	0,712	19,657	0,983
3	BUS4	12,809	0,065	19,644	0,982
4	BUS5	43,549	0,222	19,600	0,980
5	BUS6	61,481	0,314	19,539	0,977
6	BUS7	15,370	0,079	19,523	0,976
7	BUS8	107,592	0,547	19,549	0,977
8	BUS9	151,142	0,773	19,398	0,970
9	BUS10	117,839	0,607	19,280	0,964
10	BUS11	125,524	0,651	19,155	0,958
11	BUS12	25,617	0,134	19,129	0,956
12	BUS13	120,401	0,629	19,034	0,952
13	BUS14	107,592	0,565	18,927	0,946
14	BUS15	184,444	0,975	18,742	0,937
15	BUS16	102,469	0,547	18,640	0,932
16	BUS17	166,512	0,893	18,473	0,924
17	BUS18	107,592	0,582	18,366	0,918
18	BUS19	61,481	0,335	18,304	0,915
19	BUS20	2,562	0,014	18,363	0,918
20	BUS21	53,796	0,293	18,309	0,915
21	BUS22	25,617	0,140	18,284	0,914
22	BUS23	56,358	0,308	18,227	0,911
23	BUS24	7,685	0,042	18,220	0,911
24	BUS25	20,494	0,112	18,199	0,910
25	BUS26	53,796	0,294	18,255	0,913
26	BUS27	25,617	0,140	18,230	0,911
27	BUS28	35,864	0,196	18,220	0,911
28	BUS29	25,617	0,141	18,194	0,910
29	BUS30	176,759	0,962	18,189	0,909
30	BUS31	189,568	1,042	17,999	0,899
31	BUS32	2,562	0,014	17,997	0,899
32	BUS33	184,444	1,025	17,815	0,891
33	BUS34	25,617	0,144	17,789	0,889
34	BUS35	179,321	1,007	17,635	0,882

No	Bus	V _D (Volt)	V _R (%)	V _R (kV)	kV (PU)
35	BUS36	102,469	0,581	17,533	0,877
36	BUS37	120,401	0,687	17,413	0,871
37	BUS38	76,852	0,441	17,336	0,867

Daya pada Penyulang Singapura

Perhitungan daya dilakukan dengan mencari daya aktif menggunakan Persamaan (13) dan daya reaktif menggunakan Persamaan (18). Berikut Tabel 3 hasil perhitungan daya pada Penyulang Singapura:

Tabel 3. Perhitungan Daya Pada Penyulang Singapura

No	Bus	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAr)
1	BUS2	112,800	95,880	59,421
2	BUS3	-	-	-
3	BUS4	113,490	96,467	59,785
4	BUS5	3,460	2,941	1,823
5	BUS6	6,460	5,491	3,403
6	BUS7	7,380	6,273	3,888
7	BUS8	24,220	20,587	12,759
8	BUS9	102,650	87,253	54,074
9	BUS10	8,530	7,251	4,493
10	BUS11	-	-	-
11	BUS12	38,750	32,938	20,413
12	BUS13	67,820	57,647	35,726
13	BUS14	57,900	49,215	30,501
14	BUS15	63,430	53,916	33,414
15	BUS16	63,200	53,720	33,293
16	BUS17	100,340	85,289	52,857
17	BUS18	197,680	168,028	104,134
18	BUS19	71,280	60,588	37,549
19	BUS20	20,990	17,842	11,057
20	BUS21	-	-	-
21	BUS22	53,980	45,883	28,436
22	BUS23	10,150	8,628	5,347
23	BUS24	46,360	39,406	24,422
24	BUS25	7,840	6,664	4,130
25	BUS26	-	-	-
26	BUS27	19,840	16,864	10,451
27	BUS28	28,830	24,506	15,187
28	BUS29	59,510	50,584	31,349
29	BUS30	40,830	34,706	21,509
30	BUS31	-	-	-
31	BUS32	91,570	77,835	48,237
32	BUS33	-	-	-
33	BUS34	102,420	87,057	53,953
34	BUS35	53,750	45,688	28,315
35	BUS36	72,430	61,566	38,155
36	BUS37	68,050	57,843	35,848
37	BUS38	-	-	-
TOTAL		1715,940	1458,549	903,927

Rugi Daya pada Penyulang Singapura

Perhitungan rugi daya dilakukan dengan mencari rugi daya aktif dapat digunakan Persamaan (20) dan rugi daya reaktif dapat digunakan Persamaan (22). Berikut Tabel 4 hasil perhitungan rugi daya pada Penyulang Singapura:

Tabel 4. Rugi Daya Pada Penyulang Singapura

No	Bus	ΔP (kW)	ΔQ (kVAr)
1	BUS2	34,465	52,686
2	BUS3	-	-
3	BUS4	4,361	6,667
4	BUS5	0,014	0,021
5	BUS6	0,068	0,104
6	BUS7	0,022	0,034
7	BUS8	1,669	2,551
8	BUS9	42,099	64,356
9	BUS10	0,227	0,347
10	BUS11	-	-
11	BUS12	1,017	1,555
12	BUS13	14,639	22,378
13	BUS14	9,535	14,575
14	BUS15	19,620	29,993
15	BUS16	10,821	16,542
16	BUS17	44,320	67,750
17	BUS18	111,154	169,919
18	BUS19	8,257	12,623
19	BUS20	0,030	0,046
20	BUS21	-	-
21	BUS22	1,973	3,016
22	BUS23	0,154	0,235
23	BUS24	0,437	0,668
24	BUS25	0,033	0,051
25	BUS26	-	-
26	BUS27	0,267	0,407
27	BUS28	0,788	1,205
28	BUS29	2,399	3,667
29	BUS30	7,789	11,907
30	BUS31	-	-
31	BUS32	0,568	0,868
32	BUS33	-	-
33	BUS34	7,103	10,859
34	BUS35	13,695	20,935
35	BUS36	14,212	21,725
36	BUS37	14,737	22,529
37	BUS38	-	-
TOTAL		366,472	560,217

Besaran dan Penempatan Kapasitor pada Penyulang Singapura

Untuk menentukan pemasangan Kapasitor maka akan dilakukan perhitungan daya total baru untuk menentukan kapasitas kapasitor dan penempatan kapasitor akan dilakukan perbaikan dengan memperbaiki faktor daya $\cos \phi$ 0,99. Maka dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut:

1. Perhitungan Daya semu total baru dengan perbaikan faktor daya $\cos \phi$ 0,99:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \phi = S \cdot \cos \phi$$

$$1458,549 \text{ kW} = S \times 0,99$$

$$S_{\text{baru}} = \frac{1458,549 \text{ kW}}{0,99} = 1473,281 \text{ kVA}$$

2. Daya reaktif total baru dengan perbaikan faktor daya $\cos \phi$ 0,99:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$Q_{\text{baru}} = \sqrt{1473,281^2 - 1458,549^2} = 207,826 \text{ kVAr}$$

3. Kapasitas Kapasitor dengan mengurangi nilai daya reaktif lama dan daya reaktif baru

$$Q_c = Q_{\text{lama}} - Q_{\text{baru}}$$

$$Q_c = 903,927 \text{ kVAr} - 207,826 \text{ kVAr} = 696,1 \text{ kVAr}$$

Dalam hal ini pemasangan kapasitor berukuran 696,1 kVAr tidak terdapat di pasaran. Ukuran yang ada dipasaran adalah ukuran kapasitor 720 kVAr, maka dalam perbaikan faktor daya ini kapasitor yang digunakan adalah 720 kVAr lebih besar dari nilai yang dibutuhkan untuk mencapai nilai faktor daya $\cos \phi$ 0,99.

4. Kapasitansi Kapasitor Bank

Kapasitansi kapasitor dapat dihitung dengan Persamaan (7).

$$C = \frac{Q_c}{2\pi f V^2}$$

$$C = \frac{720000 \text{ VAr}}{2 \times 3,14 \times 50 \times (20000)^2} = 0,00000573248 \text{ F} = 5732,48 \mu\text{F}$$

5. Kompensasi dan penempatan Kapasitor Bank

Berikut ini adalah perhitungan kompensasi kapasitor menggunakan Persamaan (8).

$$K = \frac{\text{kVAR cap}}{\text{kVAR tot}}$$

$$K = \frac{720 \text{ kVAR}}{903,927 \text{ kVAR}} = 0,796$$

Penempatan kapasitor dapat dihitung dengan Persamaan (9).

$$X_1 = \left[1 - \frac{(2 \times i - 1)}{2 \times n} \times K \right] \times l$$

$$X_1 = \left[1 - \frac{(2 \times 1 - 1)}{2 \times 1} \times 0,796 \right] \times 60,9 = 36,6618 \text{ km}$$

Diperoleh lokasi optimal penempatan kapasitor pada 36,6618 kms maka bus yang paling mendekati adalah bus 30 yaitu 36,5 kms, sehingga akan dilakukan pemasangan pada bus 30.

Perbaikan Jatuh Tegangan pada Penyulang Singapura

Berikut Tabel 5 adalah perhitungan jatuh tegangan yang dilakukan setelah penambahan kapasitor di Penyulang Singapura:

Tabel 5. Perbaikan Jatuh Tegangan Penyulang Singapura

No	Bus	V_D (Volt)	V_R (%)	V_R (kV)	kV (PU)
Tegangan Pangkal				19,9	0,995
1	BUS2	66,388	0,334	19,834	0,992
2	BUS3	91,283	0,460	19,742	0,987

No	Bus	V _D (Volt)	V _R (%)	V _R (kV)	kV (PU)
3	BUS4	8,298	0,042	19,734	0,987
4	BUS5	28,215	0,143	19,706	0,985
5	BUS6	39,833	0,202	19,666	0,983
6	BUS7	9,958	0,051	19,656	0,983
7	BUS8	69,707	0,353	19,673	0,984
8	BUS9	97,922	0,498	19,575	0,979
9	BUS10	76,346	0,390	19,498	0,975
10	BUS11	81,325	0,417	19,417	0,971
11	BUS12	16,597	0,085	19,400	0,970
12	BUS13	78,006	0,402	19,339	0,967
13	BUS14	69,707	0,360	19,269	0,963
14	BUS15	119,498	0,620	19,150	0,957
15	BUS16	66,388	0,347	19,083	0,954
16	BUS17	107,880	0,565	18,976	0,949
17	BUS18	69,707	0,367	18,906	0,945
18	BUS19	39,833	0,211	18,866	0,943
19	BUS20	1,660	0,009	18,904	0,945
20	BUS21	34,854	0,184	18,869	0,943
21	BUS22	16,597	0,088	18,853	0,943
22	BUS23	36,513	0,194	18,816	0,941
23	BUS24	4,979	0,026	18,811	0,941
24	BUS25	13,278	0,071	18,798	0,940
25	BUS26	34,854	0,185	18,834	0,942
26	BUS27	16,597	0,088	18,818	0,941
27	BUS28	23,236	0,123	18,811	0,941
28	BUS29	16,597	0,088	18,795	0,940
29	BUS30	114,519	0,606	18,791	0,940
30	BUS31	122,818	0,654	18,669	0,933
31	BUS32	1,660	0,009	18,667	0,933
32	BUS33	119,498	0,640	18,549	0,927
33	BUS34	16,597	0,089	18,532	0,927
34	BUS35	116,179	0,626	18,433	0,922
35	BUS36	66,388	0,360	18,366	0,918
36	BUS37	78,006	0,425	18,288	0,914
37	BUS38	49,791	0,272	18,239	0,912

Perbaikan Daya pada Penyulang Singapura

Perhitungan perbaikan daya setelah dilakukan pemasangan kapasitor. Berikut Tabel 6 hasil perhitungan daya pada Penyulang Singapura:

Tabel 6. Hasil Perbaikan Daya

No	Bus	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAr)
1	BUS2	96,848	95,880	13,662
2	BUS3	-	-	-
3	BUS4	97,441	96,467	13,746
4	BUS5	2,971	2,941	0,419
5	BUS6	5,546	5,491	0,782
6	BUS7	6,336	6,273	0,894
7	BUS8	20,795	20,587	2,933
8	BUS9	88,134	87,253	12,433
9	BUS10	7,324	7,251	1,033
10	BUS11	-	-	-
11	BUS12	33,270	32,938	4,693
12	BUS13	58,229	57,647	8,214
13	BUS14	49,712	49,215	7,013
14	BUS15	54,460	53,916	7,683
15	BUS16	54,263	53,720	7,655
16	BUS17	86,151	85,289	12,153
17	BUS18	169,725	168,028	23,943

No	Bus	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAr)
18	BUS19	61,200	60,588	8,633
19	BUS20	18,022	17,842	2,542
20	BUS21	-	-	-
21	BUS22	46,346	45,883	6,538
22	BUS23	8,715	8,628	1,229
23	BUS24	39,804	39,406	5,615
24	BUS25	6,731	6,664	0,950
25	BUS26	-	-	-
26	BUS27	17,034	16,864	2,403
27	BUS28	24,753	24,506	3,492
28	BUS29	51,094	50,584	7,208
29	BUS30	35,056	34,706	4,945
30	BUS31	-	-	-
31	BUS32	78,621	77,835	11,091
32	BUS33	-	-	-
33	BUS34	87,936	87,057	12,405
34	BUS35	46,149	45,688	6,510
35	BUS36	62,187	61,566	8,773
36	BUS37	58,427	57,843	8,242
37	BUS38	-	-	-
TOTAL		1473,282	1458,549	207,832

Perbaikan Rugi Daya pada Penyulang Singapura

Rugi daya pada Penyulang Singapura setelah dilakukan pemasangan Kapasitor Bank yaitu dengan menghitung arus perbaikan menggunakan Persamaan (2), arus sekunder menggunakan Persamaan (1) dimana kondisi *existing* arus rata-ratanya adalah 82,656 *Ampere* dan setelah pemasangan adalah 73,253 *Ampere*. sehingga dilakukan perhitungan nilai rugi daya. Berikut ini Tabel 7 arus dan rugi daya setelah dilakukan pemasangan Kapasitor:

Tabel 7. Hasil Rugi daya dan Arus sesudah pemasangan Kapasitor

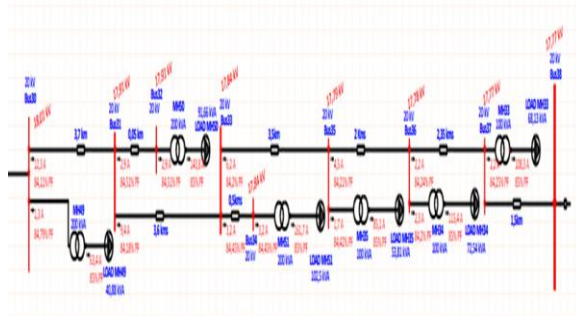
No	Bus	Arus (A)	Rugi Aktif (ΔP) kW	Rugi Reaktif (ΔQ) kVAr
1	BUS2	141,020	25,797	39,435
2	BUS3	-	-	-
3	BUS4	142,688	3,301	5,047
4	BUS5	4,357	0,010	0,016
5	BUS6	8,154	0,052	0,079
6	BUS7	9,320	0,017	0,026
7	BUS8	30,558	1,272	1,944
8	BUS9	130,243	32,457	49,616
9	BUS10	10,871	0,176	0,269
10	BUS11	-	-	-
11	BUS12	49,664	0,800	1,223
12	BUS13	87,234	11,599	17,731
13	BUS14	74,778	7,616	11,643
14	BUS15	82,498	15,891	24,293
15	BUS16	82,522	8,834	13,504
16	BUS17	131,859	36,650	56,027
17	BUS18	260,859	92,685	141,685
18	BUS19	94,286	6,919	10,577
19	BUS20	27,701	0,025	0,038
20	BUS21	-	-	-
21	BUS22	71,459	1,656	2,532
22	BUS23	13,466	0,129	0,198

No	Bus	Perbaikan		
		Arus (A)	Rugi Aktif (ΔP) kW	Rugi Reaktif (ΔQ) kVAr
23	BUS24	61,525	0,368	0,563
24	BUS25	10,413	0,028	0,043
25	BUS26	-	-	-
26	BUS27	26,319	0,225	0,343
27	BUS28	10,710	0,052	0,080
28	BUS29	79,056	2,027	3,098
29	BUS30	38,308	3,284	5,020
30	BUS31	-	-	-
31	BUS32	122,590	0,487	0,745
32	BUS33	-	-	-
33	BUS34	138,244	6,198	9,474
34	BUS35	72,995	12,096	18,491
35	BUS36	98,768	12,654	19,344
36	BUS37	93,245	13,252	20,259
37	BUS38	-	-	-
Total			296,559	453,342

Hasil Simulasi ETAP 19.0.1

1. Sebelum Dilakukan Pemasangan Kapasitor.

Berikut ini adalah gambar keadaan *existing* dari ujung saluran Penyulang Singapura sebelum dilakukannya pemasangan Kapasitor menggunakan *software* ETAP 19.0.1.

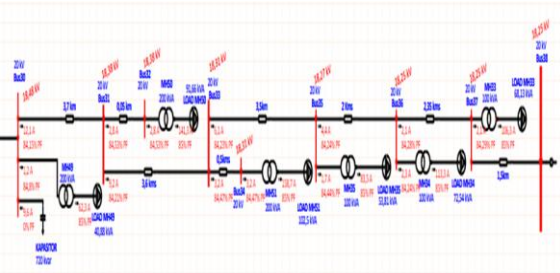


Gambar 10. Sebelum Pemasangan Kapasitor

Pada Gambar 10 dapat dilihat tegangan ujung pada saluran di Penyulang Singapura adalah 17,77 kV, sedangkan pada perhitungan manual diperoleh nilai jatuh tegangan pada ujung saluran di Penyulang Singapura adalah 17,336 kV.

2. Sesudah Dilakukan Pemasangan Kapasitor.

Berikut ini adalah gambar keadaan dari ujung saluran Penyulang Singapura setelah dilakukannya pemasangan Kapasitor *software* ETAP 19.0.1.



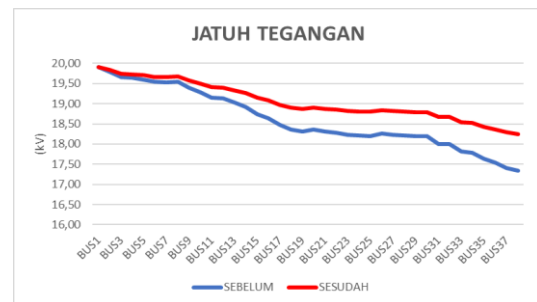
Gambar 11. Setelah Pemasangan Kapasitor

Pada Gambar 11 dapat dilihat tegangan ujung pada saluran di Penyulang Singapura adalah 18,25 kV, sedangkan pada perhitungan manual diperoleh nilai jatuh tegangan pada ujung saluran di Penyulang Singapura adalah 18,239 kV.

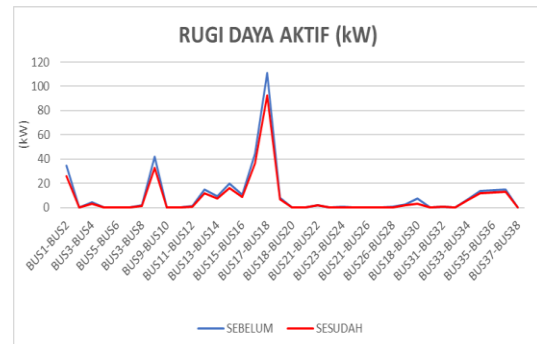
Perbandingan Perbaikan pada Penyulang Singapura

Dari hasil perbandingan dapat dilihat beberapa perubahan diantaranya seperti tegangan dan rugi daya, sebagai berikut.

1. Grafik perbandingan jatuh tegangan pada Penyulang Singapura

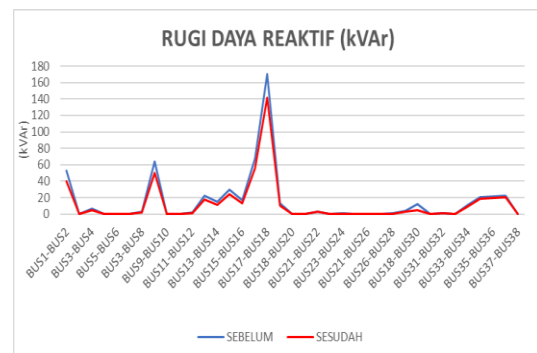


2. Grafik perbandingan rugi daya aktif pada Penyulang Singapura



Gambar 13. Grafik Rugi Daya Aktif

3. Grafik perbandingan rugi daya reaktif pada Penyulang Singapura



Gambar 14. Grafik Rugi Daya Reaktif

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor bank sebesar 720 kVAr pada Bus 30 berhasil meningkatkan kualitas tegangan dan efisiensi sistem distribusi pada Penyulang Singapura. Sebelum pemasangan, tegangan terendah tercatat sebesar 17,336 kV (0,867 pu), yang berada di bawah batas standar minimum 18 kV. Setelah pemasangan, tegangan meningkat menjadi 18,239 kV (0,912 pu), menunjukkan peningkatan yang signifikan dan telah memenuhi ketentuan Permen ESDM No. 4 Tahun 2009. Selain itu, rugi daya aktif mengalami penurunan dari 366,472 kW menjadi 296,559 kW, dan rugi daya reaktif menurun dari 560,217 kVAr menjadi 453,342 kVAr. Penurunan rugi daya ini membuktikan bahwa pemasangan kapasitor bank mampu meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan. Dengan demikian, metode yang digunakan dalam penelitian ini efektif dalam menyelesaikan permasalahan jatuh tegangan dan rendahnya faktor daya pada jaringan distribusi 20 kV.

Saran

Pemasangan Kapasitor ini dapat memperbaiki tegangan dan faktor daya pada penyulang Singapura. Untuk itu, dalam perbaikan tegangan di Penyulang Singapura ini dapat dilakukan dengan metode perbaikan tegangan lainnya.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Kadir, "Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik," *Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*, vol. 53, no. 9, p. 78, 2000.
- [2] A. Tanjung, "Analisis Sistem Distribusi 20 kV untuk Memperbaiki Kinerja dan Keandalan Sistem Distribusi Menggunakan Electrical Transient Analysis Program," *Seminar Nasional Teknologi Informasi Komunikasi dan Industri 4*, p. ISSN :2085-9902, 2012.
- [3] Aslimeri, Ganefri, and Z. Hamdi, *Teknik Transmisi Tenaga Listrik*. Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional, 2008.
- [4] C. Cekdin and T. Barlian, *Transmisi Daya Listrik*. Palembang: CV. Andi Offset, 2013.
- [5] D. A. Arismunandar and D. S. Kuwahara, *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid II*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 2004.
- [6] Dasman and Handayani, "Evaluasi Keandalan Sistem Distribusi 20 Kv Menggunakan Metode Saidi," *Jurnal Teknik Elektro ITP*, vol. 6, no. 2, p. 173, 2017.
- [7] E. S. Yudha, M. Haddin, and M. Ismail, "Simulasi Perbaikan Drop Tegangan Dengan Kapasitor," pp. 1–17.
- [8] PT. (Persero) PLN, *Buku Pedoman Pemeliharaan Kapasitor*. Jakarta: PT. PLN (Persero), 2014.
- [9] PT. (Persero) PLN, *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga*. Jakarta: PT. PLN (Persero), 2010.
- [10] R. B. Laginda, H. Tumaliang, and S. Silimang, "Perbaikan Kualitas Tegangan Pada Jaringan Distribusi Primer 20 KV Di Kota Tahuna," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. Vol.7 No.2, pp. 93–102, 2018.
- [11] S. Sivanagaraju and S. Satyanarayana, *Electric Power Transmission and Distribution*. New Delhi: Pearson Education, 2009.
- [12] Suhadi and T. Wrahatnolo, *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1*. Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional, 2008.
- [13] T. Gonen, *Electric Power Distribution System Engineering*. California: Mcgraw Hill College, 1985.
- [14] T. Gonen, *Electric Power Distribution System Engineering Second Edition*. California: CRC Press, 2008.
- [15] T. S. Prof. Ir. M. S. Hutaeruk, *Transmisi Daya Listrik*. Jakarta: Erlangga, 1996.
- [16] W. D. J. Stevenson, *Analisa Sistem Tenaga*. Malang: Universitas Brawijaya, 1983.
- [17] Z. Tharo, A. Tarigan, S. Anisah, and K. T. Yuda, "Penggunaan Kapasitor Bank Sebagai Solusi Drop Tegangan Pada Jaringan 20 kV," *Semnastek USU*, pp. 82–86, 2020.