

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan pokok yang memiliki peran penting dalam kehidupan manusia salah satunya kebutuhan industri. Di Indonesia, sumber energi listrik kebanyakan masih memanfaatkan energi tak terbarukan seperti yang berasal dari bahan bakar fosil misalnya minyak bumi dan batu bara. Hal tersebut tentunya berdampak buruk pada sektor ketersediaan fosil dan lingkungan. Karena itu pemanfaatan sumber energi terbarukan terus didorong dalam memenuhi berbagai kebutuhan energi listrik di suatu tempat misalnya untuk perkantoran, hotel, termasuk pelabuhan.

Tidak semua energi listrik diterima oleh konsumen ketika disalurkan dari unit pembangkit ke konsumen. Hal ini disebabkan oleh daya di saluran distribusi. Sistem penyaluran dan distribusi tenaga listrik membutuhkan saluran daya yang efektif, ekonomis, stabil, efisien, dan berkualitas tinggi. Secara umum, kualitas daya yang diterima konsumen menentukan seberapa baik sistem tersebut (Mangera & Hardiantono, 2019).

Keandalan sistem pembangkit listrik merupakan suatu ukuran tingkat pelayanan sistem pembangkit terhadap pemenuhan kebutuhan energi listrik beban (konsumen). Peningkatan permintaan energi listrik oleh beban disebabkan oleh pesatnya peningkatan jumlah penduduk mengakibatkan peningkatan standar kenyamanan hidup masyarakat seperti pertumbuhan ekonomi dan semakin majunya perkembangan teknologi. Untuk memenuhi kebutuhan energi listrik, maka dibangun sistem tenaga listrik.

Nilai jatuh tegangan (*voltage drop*) adalah kondisi di mana energi listrik yang disuplai akan berkurang jika melewati elemen-elemen pasif pada rangkaian listrik. Jika energi listrik melewati suatu hambatan seperti konduktor, kontak, dan konektor, sebagian besar energi listrik yang telah disuplai akan hilang atau terdisipasi. PLN memiliki peraturan untuk tingkat variasi tegangan yang diizinkan. "SPLN Tegangan - Tegangan Standar (1995) menyatakan bahwa variasi tegangan pelayanan ditetapkan maksimum +5% dan minimum -4% terhadap tegangan nominal" (Lubis, 2021).

Penyulang Salemba sendiri merupakan bagian dari UP3 Makassar Selatan dan PT. PLN (Persero) UP3 Makassar Selatan, yang memiliki gardu distribusi sebanyak 12 unit. Panjang saluran dan adanya beban-beban induktif yang besar dapat mempengaruhi jatuh tegangan yang signifikan dan menyebabkan penurunan kualitas layanan. Untuk mengurangi jatuh tegangan dan rugi-rugi daya pada penyulang Salemba, penempatan kapasitor bank yang tepat dapat dipilih dengan mempertimbangkan faktor pertumbuhan beban.

Berdasarkan penjelasan yang telah dipaparkan di atas, tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis metode penempatan kapasitor bank yang optimal pada

beroperasi. Se jauh mana suplai listrik dapat menyediakan energi kepada konsumen secara konsisten selama satu tahun menunjukkan keandalan ini. Kualitas, kontinuitas, dan ketersediaan layanan listrik untuk pelanggan adalah masalah utama distribusi listrik (Dasman & Handayani, 2017).

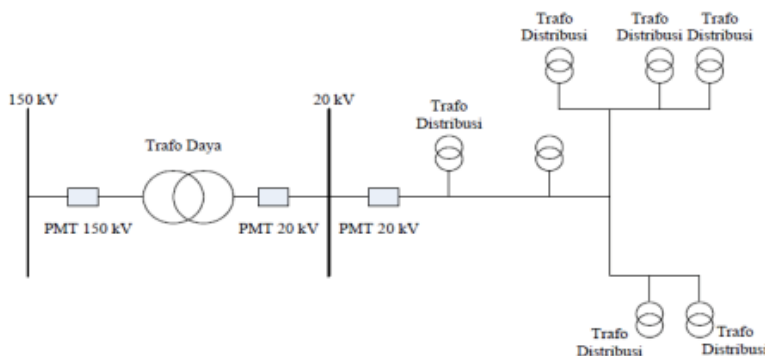
Sistem tenaga listrik terdiri dari jaringan distribusi, yang terdiri dari jaringan penghantar yang menghubungkan gardu induk pusat beban dengan pelanggan. Jaringan distribusi adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang secara langsung terhubung dengan pelanggan. Fungsi jaringan distribusi adalah untuk mendistribusikan energi listrik ke pelanggan sesuai dengan kebutuhan dan tegangan mereka. Kualitas jaringan distribusi berdampak langsung pada kenyamanan pelanggan (Slamet, 2017).

Sistem jaringan distribusi dapat dikelompokkan kedalam dua tingkat, yaitu:

1. Sistem jaringan distribusi primer atau Jaringan Tegangan Menengah (JTM). Sebagaimana diatur dalam UU Ketenagalistrikan No 30 tahun 2009, sistem distribusi primer, juga dikenal sebagai Jaringan Tegangan Menengah (JTM), digunakan sebagai jaringan utama untuk mengurangi rugi-rugi penyaluran (*losses*). PT PLN Persero, pemegang kuasa usaha utama, harus memenuhi persyaratan tegangan yang diperlukan untuk mengurangi rugi-rugi penyaluran.
2. Sistem jaringan distribusi sekunder atau Jaringan Tegangan Rendah (JTR). Sistem jaringan distribusi sekunder, juga dikenal sebagai Jaringan Distribusi
3. Tegangan Rendah (JDTR), adalah bagian hilir dari sistem tenaga listrik. Jaringan tegangan rendah menyalurkan tenaga ke konsumen atau pelanggan tegangan rendah dari Gardu Distribusi. Tegangan rendah PT. PLN (Persero) adalah 127/220 V dan 220/380 V.

Jaringan distribusi terbagi lagi menjadi tiga kelompok besar berdasarkan topologinya:

1. Jaringan Distribusi Radial

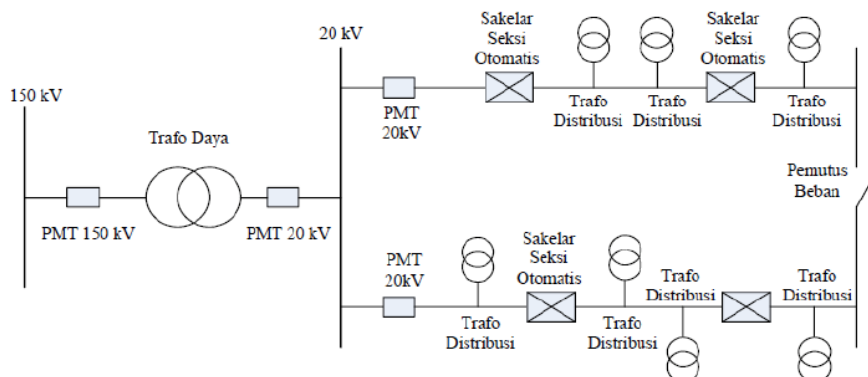


Gambar 2. Jaringan Distribusi Radial

Sumber: Endi Sopyandi

Jaringan Distribusi Radial terjadi ketika sebuah penyulang memiliki banyak pelanggan dan trafo distribusi yang tidak terhubung ke jaringannya, baik dari gardu induk yang sama maupun gardu induk lain. Sistem jaringan ini memiliki kekurangan bahwa jika terjadi gangguan di gardu induk tertentu atau kerusakan pada jaringan utama atau penyulang, semua beban yang melalui jaringan akan diputus.

2. Jaringan Distribusi Ring

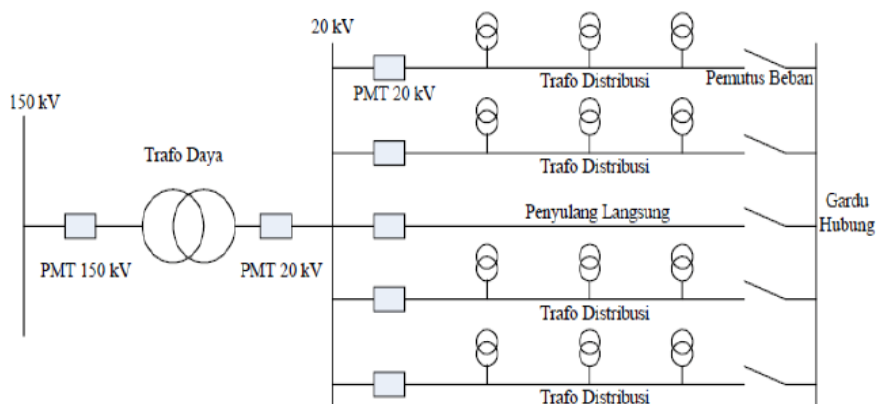


Gambar 3. Jaringan Distribusi Ring

Sumber: Endi Sopyandi

Pada jaringan distribusi ring, pelanggan, trafo distribusi, dan penyulang dipasang pada pelanggan dan trafo distribusi yang dilayani penyulang lainnya. Dengan menggunakan switch, jaringan penghubung ini dapat diputus atau dihubungkan sesuai kebutuhan (Slamet, 2017).

3. Sistem Jaringan Spindel



Gambar 4. Sistem Jaringan Spindel

Sumber: Endi Sopyandi

Sistem jaringan spindel yang sangat andal terdiri dari kelompok kumpulan yang disebut spindel. Pola jaringannya ditandai dengan adanya sejumlah kabel yang keluar dari gardu induk (*feeder*) ke arah titik temu yang disebut gardu hubung. Struktur spindel pada dasarnya adalah struktur radial. (Fayyadl, Sukmadi, & Winardi, 2011).

1.2.3 Studi Aliran Daya (*Load Flow*)

Studi aliran daya, juga dikenal sebagai aliran beban, bertujuan untuk mengetahui bagaimana aliran daya atau tegangan sistem berfungsi pada kondisi operasi keadaan tunak. Selain itu, penelitian ini menyediakan informasi yang diperlukan untuk evaluasi pelaksanaan sistem daya dan analisis usia dan kondisi pembangkit. Selain itu, analisis lebih lanjut membutuhkan data aliran listrik normal dan darurat. (Rosihan, 2023).

Studi aliran daya listrik bertujuan untuk menunjukkan aliran daya atau aliran daya pada kondisi saat sistem beroperasi. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui dan memperoleh operasi sistem yang baik dan dievaluasi berdasarkan kondisi pembangkitan dan pembebanan. Studi ini bisa dilakukan secara manual atau menggunakan aplikasi, namun tetap berfokus pada faktor utama seperti tegangan bus, faktor daya, arus, serta aliran daya dari pembangkitan menuju beban dalam sistem tenaga listrik yang dianalisis. (Faruq, Ridho, Vrayulis, & Julio, 2021).

Perhitungan aliran daya adalah salah satu alat bantu yang sangat penting untuk mengetahui kondisi operasi sistem. Perhitungan aliran daya pada tegangan, arus, dan faktor daya di berbagai simpul jaringan listrik dilakukan pada keadaan operasi normal. Hasilnya kemudian digunakan untuk mensimulasikan kondisi gangguan yang besar, stabilitas transien, dan analisis kontigensi, yaitu keadaan di mana sebagian komponen sistem tidak terhubung dengan baik ke sistem. Perhitungan aliran daya membutuhkan informasi ramalan kebutuhan bebas untuk setiap titik pelayanan, pusat pembangkit, dan fasilitas transmisi. Persamaan aliran daya dari Gardu Induk ke Gardu Induk lainnya juga dapat dimasukkan ke dalam data di atas. (Hasibuan, Isa, Yusoff, & Rahim, 2020).

Tujuan aliran daya adalah untuk menghitung tegangan pada tiap bus dan aliran daya pada tiap cabang jaringan untuk kondisi beban tertentu dalam kondisi normal. Hasil perhitungan ini dapat digunakan untuk mempelajari berbagai masalah yang terkait dengan jaringan, yang meliputi hal-hal berikut:

- a. Pengaturan tegangan (regulasi tegangan), perbaikan faktor daya jaringan, kapasitas kawat penghantar, termasuk rugi-rugi daya.
- b. Perluasan atau pengembangan jaringan, yaitu menentukan lokasi yang tepat untuk penambahan bus beban baru dan unit pembangkitan atau gardu induk baru.

Perencanaan jaringan, yaitu menentukan kondisi jaringan yang diinginkan pada masa mendatang untuk mendukung peningkatan beban.

Dalam analisis studi aliran daya, setiap bus sistem tenaga listrik dapat dibagi

menjadi tiga kategori, yaitu:

1. Bus PQ (Load Bus)
Bus yang menyuplai beban biasanya disebut bus PQ karena besaran yang diketahui adalah P (daya aktif) dan Q (daya reaktif).
2. Bus PV (Generator Bus)
Generator bus disebut bus PV karena hanya ada besaran P dan V yang diketahui.
3. Bus Ayun (Slack Bus)
Besaran-besaran yang diketahui pada bus ayun adalah V yang merupakan tegangan dan δ yang merupakan sudut fasa. Pada umumnya sudut fasa diketahui memiliki nilai nol ($\delta = 0$).

1.2.4 Daya Listrik

Energi listrik dalam sirkuit listrik disebut daya listrik. Watt adalah satuan SI untuk banyaknya tenaga listrik yang mengalir per satuan waktu (joule/detik). Ketika arus listrik mengalir melalui rangkaian dengan hambatan listrik, kerja terjadi. Perangkat yang menghasilkan listrik atau menyimpan energi, seperti baterai, dapat menghasilkan listrik dalam bentuk voltampere (VA) atau kilovoltampere (kVA). (Melipurbowo, 2016):

Untuk beban dengan impedansi (Z) dalam sistem listrik arus bolak-balik, ada tiga jenis daya yang diketahui:

1. Daya aktif (P)

Daya aktif atau yang disebut juga daya nyata merupakan daya yang diperlukan oleh beban. Daya aktif adalah Watt dan dinyatakan dalam Persamaan 1 dan Persamaan 2 berikut:

a. Daya 1 fasa

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (1)$$

b. Daya 3 fasa

$$P_{3\varphi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \quad (2)$$

dengan:

P = Daya Aktif (Watt)
 V_L = Tegangan Fasa (V)
 I_L = Arus Fasa (A)
 $\cos \varphi$ = Faktor daya

2. Daya reaktif (Q)

Daya reaktif adalah hasil dari efek induksi elektromagnetik yang disebabkan oleh beban yang memiliki nilai induktif (fase arus tertinggal/*lagging*) atau kapasitif (fase arus mendahului/*leading*). Satuan daya

reaktif adalah Var dinyatakan melalui Persamaan 3 dan Persamaan 4:

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (3)$$

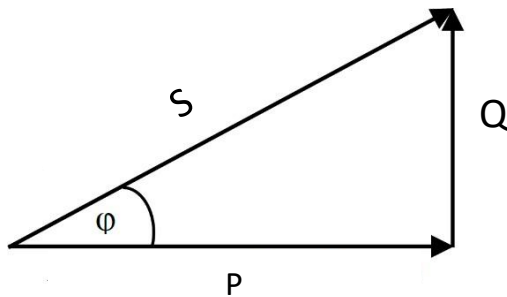
$$Q_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi \quad (4)$$

3. Daya semu (S)

Daya semu merupakan daya yang terukur atau terbaca oleh alat ukur pada beban impedansi (Z). Daya semu ini adalah penjumlahan daya aktif dan daya reaktif secara vektoris. Satuan daya ini adalah VA yang dinyatakan melalui Persamaan:

$$S_{1\phi} = V^- \cdot I^{-*} \quad (5)$$

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L^- \cdot I_L^{-*} \quad (6)$$



Gambar 5. Segitiga Daya

Sumber: (Noor, Ananta, & Sunardiyo, 2017)

1.2.5 Faktor Daya

Faktor daya adalah cosinus dari perbedaan sudut fasa arus dan tegangan. Faktor daya disimbolkan dengan $\cos \varphi$ yang mana berkisar antara 0 dan 1 dan menunjukkan nilai yang lebih tinggi jika nilainya lebih dekat ke 1. Daya aktif (P) dibagi dengan daya semu (S) untuk menentukan nilai faktor daya. Sebagian besar beban dan peralatan pengiriman sistem tenaga, seperti saluran dan transformator, bersifat induktif, sehingga beroperasi pada faktor daya tertinggal. Beroperasi pada faktor daya tertinggal membuat sistem tenaga membutuhkan aliran Var tambahan, yang menyebabkan kapasitas sistem berkurang, kerugian sistem meningkat, dan tegangan sistem berkurang (Arhami, Lomi, & Sulistiawati, 2023).

Faktor daya dapat dinyatakan dengan rumus pada Persamaan 7

$$\begin{aligned} \text{Faktor Daya} &= \frac{\text{Daya aktif (P)}}{\text{Daya Nyata (S)}} \quad (7) \\ &= \frac{kW}{kVA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{V.I \cos \varphi}{V.I} \\
 &= \cos \varphi
 \end{aligned}$$

Penurunan faktor daya listrik akan terjadi ketika daya reaktif ditambahkan. Salah satu cara mudah untuk menghindari penurunan faktor daya listrik adalah dengan memasang kapasitor atau menggunakan peralatan konsumen dengan faktor daya tinggi. Peralatan dengan faktor daya 1.0 hanya memiliki resistansi murni dan digunakan dengan paling efisien dalam jaringan listrik. Peralatan dengan faktor daya rendah (0,5) memiliki induktansi, yang menyebabkan kerugian lebih besar dalam sistem pasokan tenaga listrik. Sudut fase rendah biasanya disebabkan oleh penggunaan peralatan induktif seperti transformator, motor induksi, lampu TL, dan peralatan elektronik lainnya, dimana hal ini terkait dengan perbedaan fase antara arus dan tegangan pada terminal peralatan.

Semakin kecil faktor daya yang digunakan maka akan semakin besar arus ke beban (Firdausi, Auliq, & Fitriana, 2024) dapat dilihat pada Persamaan 8 dan Persamaan 9

$$P = |V| |I| \cos \varphi \quad (8)$$

$$|I| = \frac{P}{|V| \cos \varphi} \quad (9)$$

1.2.6 Kapasitor Bank

Kapasitor bank adalah alat listrik yang dirancang untuk meningkatkan power factor (pf) dan terdiri dari rangkaian kapasitor yang dirangkai dalam suatu panel yang disebut panel kapasitor bank. Panel kapasitor bank terdiri dari lapisan logam yang disusun seri atau paralel dan memiliki resistor di dalamnya yang berfungsi sebagai alat internal untuk membuang tegangan yang tidak diperlukan. (Almanda & Majid, 2019).

Kapasitor memiliki beberapa fungsi dalam sistem tenaga, diantaranya sebagai berikut:

1. Menyuplai daya reaktif untuk memaksimalkan penggunaan daya kompleks,
2. Memperbaiki faktor daya,
3. Mengurangi jatuh tegangan, menghindari kelebihan beban trafo,
4. Memberikan lebih banyak daya yang tersedia,
5. Menghindari kenaikan arus dan suhu pada kabel,
6. Menghemat daya/efisiensi.

Dalam jaringan listrik, pemasangan kapasitor daya melibatkan pemasangan kapasitor secara paralel pada instalasi listrik. Tujuan pemasangan kapasitor ini adalah untuk meningkatkan efisiensi faktor daya ($\cos \phi$). Power faktor yang rendah sangat tidak diinginkan karena hal itu akan mengakibatkan peningkatan arus, yang menyebabkan bertambahnya kehilangan daya aktif pada semua elemen sistem tenaga listrik dari pusat pembangkit listrik hingga ke

pemakai listrik. (Noor, Ananta, & Sunardiyo, 2017).

Mempunyai faktor daya sedekat mungkin ke satu sangat penting untuk memastikan kondisi suplai sistem tenaga listrik yang paling menguntungkan secara ekonomis dan teknik. Jumlah daya reaktif harus diminimalkan untuk mengoptimalkan pemanfaatan daya PLN. Sebaliknya, PLN, sebagai penyedia layanan listrik, menghitung daya yang digunakan oleh peralatan listrik selama satuan waktu yang dikumpulkan pada akhir bulan. (Noor, Ananta, & Sunardiyo, 2017).

Pada saluran distribusi, daya reaktif dapat diserap oleh beban induktif, menyebabkan jatuh tegangan di sisi penerima. Kapasitor bank berfungsi untuk mengimbangi daya reaktif dan memastikan tegangan tetap pada levelnya pada kondisi beban penuh (Dermawan, Samsinar, & Nurudin, 2019).

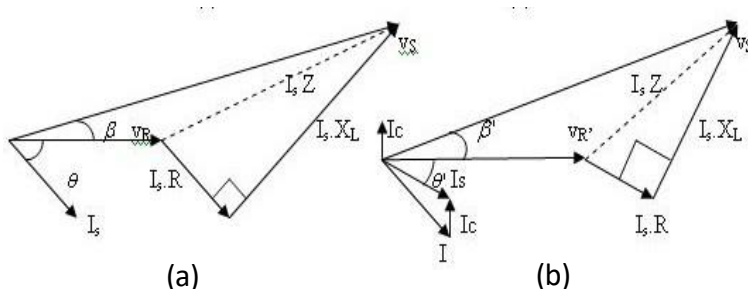
Kapasitor yang disebut shunt terhubung secara paralel dengan saluran distribusi. Fungsi kapasitor shunt adalah mengalirkan arus atau daya reaktif untuk mengimbangi sebagian besar komponen reaktif yang dibutuhkan oleh beban induktif. Kapasitor seri didefinisikan sebagai kapasitor yang dihubungkan secara seri dengan impedansi yang tepat. Karena perlengkapan keamanannya yang kompleks, penggunaannya dibatasi pada saluran distribusi. Biaya pemasangan kapasitor seri biasanya lebih tinggi daripada kapasitor paralel. Kapasitor seri dapat meningkatkan tegangan secara otomatis seiring dengan peningkatan beban, dan kapasitor seri yang lebih besar memiliki faktor daya yang lebih rendah untuk meningkatkan tegangan (Rofii & Ferdinand, 2018).

1.2.7 Pengaruh Pemasangan Kapasitor Bank

Untuk mengurangi rugi-rugi saluran dan meningkatkan profil tegangan, kapasitor yang terhubung secara paralel atau shunt memberikan daya reaktif atau arus untuk menetralkan keluaran antar fasa dari arus yang diperlukan oleh beban induktif. Untuk menghitung penurunan tegangan pada penyulang atau feeder yang panjang dengan faktor daya yang rendah, Persamaan 10 berikut dapat digunakan: (Saragih, Lomi, & Sulistiawati, 2018).

$$\Delta V_p = I_R \cos \theta + I_X \sin \theta \quad (10)$$

Gambar 6. memperlihatkan bahwa kapasitor paralel dapat menginjeksikan arus dan membuat vektor arus berubah ke arah leading. Ini memungkinkan untuk mengatasi penurunan tegangan yang disebabkan oleh beban induktif saluran dan memastikan bahwa tegangan pada beban tetap konstan dalam kondisi yang diinginkan.



Gambar 6. Diagram Phasor Tegangan
(a) Tanpa Kapasitor Shunt, (b) dengan Kapasitor Shunt
Sumber: (Wijanarko, Sukmadi, & Nugroho, 2011)

Ketika kapasitor ditempatkan pada akhir saluran, resultan drop tegangannya dapat dihitung melalui Persamaan:

$$\Delta V_{p'} = I_R \cos\theta' + (I_L X_L - I_C X_C) \sin\theta' \quad (11)$$

dengan:

V_s = Tegangan dari sisi pengirim (Volt)

V_r = Tegangan pada sisi penerima (Volt)

R = Resistansi saluran (Ohm)

X = Reaktansi saluran (Ohm)

X_L = Reaktansi induktif (Ohm)

X_C = Reaktansi kapasitif (Ohm)

I_P = Komponen arus aktif (Ampere)

I_Q = Komponen arus reaktif induktif (Ampere)

I_R = Komponen real arus (Ampere)

I_X = Reaktansi jaringan (Ampere)

P = Daya aktif yang dikirim ke beban

Q = Daya reaktif yang dikirim ke beban

Ketika kapasitor shunt dipasang, arus I_C masuk ke sistem, meningkatkan faktor daya dan mengurangi I_L . Akibatnya, drop tegangan ($I_L \times X_L$) berkurang, sehingga V_r meningkat. Gambar 6 (a). menunjukkan pernyataan ini, sehingga Persamaan berikut dapat ditulis: (Amelia, 2024).

$$V_r = V_s - (I_R + jI_X) \quad (12)$$

Pada Gambar 6 (b). menjelaskan bahwa:

$$V_{r'} = V_s - (I_R + jI_L X_L - jI_C X_C) \quad (13)$$

Maka, selisih jatuh tegangan dapat dinyatakan dengan:

$$\begin{aligned}\Delta V_r &= V_{r'} - V_r \\ &= [V_s - (IR + jI_L X_L - jI_C X_C)] - [V_s - (IR + jI_L X_L)] \\ &= jI_C X_C\end{aligned}\tag{14}$$

1.2.8 Konduktor

Penghantar berfungsi untuk mengirimkan atau mentransmisikan tenaga listrik dari satu tempat ke tempat lain. Dalam menyalurkan tenaga listrik, akan ada rugi-rugi tegangan. Besar rugi-rugi tegangan ini bervariasi tergantung pada jenis penghantar yang digunakan dan besarnya arus yang melalui penghantar tersebut. Namun, penting untuk mempertimbangkan jenis penghantar yang akan digunakan untuk mengurangi rugi-rugi tegangan yang ditimbulkan oleh impedansi penghantar.

Aluminium dan tembaga adalah penghantar umum yang paling sering digunakan dalam sistem tenaga (Sajayasa, Widharma, Narottama, Sunaya, & Suputra, 2022). Jenis penghantar yang umum digunakan pada sistem tenaga listrik, yaitu:

1. AAC (All Aluminium Conductor), kabel konduktor yang mana seluruhnya terbuat dari aluminium.
2. AAAC (All Aluminium Alloy Conductor), jenis penghantar yang seluruhnya disusun oleh campuran aluminium.
3. ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced), kabel penghantar aluminium yang diperkuat dengan baja.
4. ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced), kabel konduktor aluminium yang diperkuat dengan campuran logam.

Beberapa faktor harus dipertimbangkan saat memilih penghantar untuk saluran transmisi atau distribusi. Ini termasuk konduktivitas penghantar, berat, impedansi penghantar, daya penghantar, ukuran, isolasi penghantar, jenis beban yang dilayani, dan kondisi lingkungan sekitar penyulang (Sajayasa, Widharma, Narottama, Sunaya, & Suputra, 2022).

1.2.9 Resistansi

Resistansi adalah tahanan penghantar pada saluran distribusi yang menyebabkan kerugian daya. Besarnya kerugian daya yang terjadi pada saluran tergantung pada berbagai faktor, termasuk panjang saluran, luas penampang kawat, dan jenis kawat yang digunakan (Mangera & Hardiantono, 2019).

Nilai tahanan atau resistansi dari suatu penghantar dapat diketahui dengan

rumus pada Persamaan 15:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (15)$$

dengan:

R = Nilai resistansi penghantar (Ohm)

ρ = Tahanan jenis pada suhu 20°C

= 0,0175 ohm mm^2/m untuk tembaga

= 0,0287 ohm mm^2/m untuk aluminium

L = Panjang kawat

A = Luas penampang

1.2.10 Reaktansi

Reaktansi adalah garis magnetik dalam bentuk lingkaran konsentrik yang mengelilingi konduktor yang dilalui arus listrik. Dalam situasi ini, arus bolak-balik medan di sekitar konduktor berubah dan mengait dengan konduktor itu sendiri dan konduktor-konduktor lain yang berdekatan. Saluran memiliki sifat induktansi karena adanya kaitan kaitan fluks. Untuk jaringan distribusi, reaktansi penghantar biasanya terdiri dari induktansi. Oleh karena itu, reaktansi ini disebut induktif (X_L) (Anugrah, Eteruddin, & Arlenny, 2020).

Rumus untuk menghitungnya adalah sebagai berikut:

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L \quad (16)$$

dengan:

X_L = Reaktansi jaringan (ohm)

f = Frekuensi (Hz)

L = Induktansi (Henry)

1.2.11 Jatuh Tegangan (Voltage Drop)

Pada jaringan distribusi, jatuh tegangan dihitung sebagai perbedaan antara tegangan pada ujung pengirim dan tegangan pada ujung penerima. Pengaruh tahanan dan reaktansi saluran, perbedaan sudut fasa antara arus dan tegangan, dan besarnya arus beban menyebabkan jatuh tegangan. Impendansi, beban, dan jarak mempengaruhi jatuh tegangan pada arus bolak-balik (Sudiro, Patras, & Mangindaan, 2017).

Jatuh tegangan dapat dinyatakan dengan Persamaan 17:

$$\Delta V = |V_s| - |V_r| \quad (17)$$

dengan:

ΔV = Drop tegangan (Volt)

V_s = Tegangan ujung kirim

V_r = Tegangan ujung terima (Volt)

Kemudian untuk menghitung jatuh tegangan dalam persen (%) dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\Delta V\% = \frac{\Delta V}{v} \times 100\% \quad (18)$$

Menurut SPLN nomor 72 tahun 1987 penurunan tegangan maksimum pada beban penuh, yang diperbolehkan di beberapa titik pada jaringan distribusi adalah sebagai berikut: (Sudiro, Patras, & Mangindaan, 2017).

1. SUTM = 5% dari tegangan kerja bagi sistem radial.
2. Trafo Distribusi = 3% dari tegangan kerja.
3. Saluran tegangan rendah = 4% dari tegangan kerja tergantung kepadatan beban.
4. Sambungan rumah = 1% dari tegangan nominal.

Besarnya jatuh tegangan dapat dihitung dengan Persamaan berikut: (Darmana, 2015)

$$V_{drop} = \ell (R \cos\theta + jX_L \sin\theta) \quad (19)$$

dengan:

V_{drop} = Jatuh tegangan

I = Arus rata-rata di ujung saluran

R = Resistansi saluran

X = Reaktansi rangkaian

θ = Sudut fasa antara arus dan tegangan

ℓ = Panjang saluran

1.2.12 Perangkat Lunak ETAP Power Station 19.0.1

Perangkat lunak ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) berfungsi untuk mendukung simulasi sistem tenaga listrik. Program ini memiliki kemampuan untuk simulasi tenaga listrik secara offline, pengelolaan data secara online, atau pengendalian sistem secara real-time. ETAP juga memiliki fitur yang berbeda yang digunakan untuk melihat pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi, dan sistem distribusi. ETAP dapat dilakukan untuk analisis tenaga listrik menggunakan dua standar, ANSI dan IEC.

Standar-standar ini berbeda dalam hal frekuensi yang digunakan, yang menyebabkan perbedaan spesifikasi peralatan yang sesuai dengan frekuensi tersebut. Selain itu, simbol elemen listrik yang digunakan untuk analisis dengan ETAP berbeda (Abdullah & Badaruddin, 2020).

Simulasi OCP berfungsi untuk memperbaiki level tegangan sistem, dengan menambah kapasitor pada bus yang mengalami penurunan tegangan secara otomatis. Hal ini berarti, ETAP 19.0.1 akan menghitung kapasitas kapasitor dan jumlah bank kapasitor minimal yang mampu memperbaiki sistem, sehingga kita tidak perlu menghitungnya secara manual. (Firdausi, Auliq, & Fitriana, 2024).

Cara-cara berikut dapat digunakan untuk menemukan penempatan kapasitor yang ideal melalui simulasi OCP: (Firdausi, Auliq, & Fitriana, 2024).

1. Gunakan software ETAP untuk memasukkan data pembangkit, beban, jumlah bus, dan impedansi saluran.
2. Untuk mengetahui kondisi sistem, lakukan proses aliran beban (*load flow*) dengan metode Newton Raphson.
3. Optimalisasikan penempatan kapasitor menggunakan software ETAP.
4. Kemudian lihat di mana lokasi kapasitor yang ideal dan kapasitasnya setelah menggunakan ETAP untuk optimalisasi penempatan kapasitor.
5. Setelah menyelesaikan pemasangan bank kapasitor sesuai dengan hasil optimalisasi, jalankan kembali program aliran beban.

1.3 Rumusan Masalah

1. Bagaimana profil tegangan pada setiap bus pada penyulang Salemba pada tahun 2025.
2. Bagaimana profil tegangan pada setiap bus pada penyulang Salemba pada tahun 2045.
3. Bagaimana memperbaiki profil tegangan pada bus yang tidak memenuhi standar pada penyulang Salemba pada tahun 2045.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Menentukan profil tegangan pada setiap bus pada penyulang Salemba pada tahun 2025.
2. Menentukan profil tegangan pada setiap bus pada penyulang Salemba pada tahun 2045.
3. Menentukan kapasitas kapasitor pada bus yang tidak memenuhi standar pada penyulang Salemba pada tahun 2045.

1.5 Batasan Masalah

Untuk menghindari pembahasan yang melebar, Batasan masalah penelitian ini di batasi pada daerah penelitian yaitu PT PLN Gardu (GI) Panakkukang pada penyulang Salemba di Kota Makassar.

1.6 Manfaat Penelitian

1. Memberi gambaran kondisi profil tegangan pada setiap bus pada penyulang salemba pada tahun 2025 dan tahun 2045.
2. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai pedoman atau petunjuk untuk menentukan lokasi dan kapasitas Kapasitor pada penyulang Salemba yang tidak memenuhi standar tegangan PLN.

1.7 Metode Penelitian

Adapun metode yang dilakukan untuk penyusunan Tugas Akhir ini yaitu sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Studi dilakukan dengan mengumpulkan informasi yang berkaitan dengan pembahasan dan juga permasalahan yang diangkat baik berupa buku ataupun sumber lainnya.
2. Metode Pengambilan Data
Metode ini dilakukan dengan pengukuran secara langsung di lokasi penelitian ataupun mengumpulkan data sekunder yang dikumpulkan oleh sumber yang sudah ada, misalnya pada perusahaan lokasi penelitian.
3. Analisis Data
Metode ini dilakukan dengan mengolah semua data yang telah dikumpulkan dengan Persamaan matematis yang digunakan.

1.8 Sistematika Penelitian

Dalam melakukan penyusunan skripsi ini agar lebih teratur dan sistematis maka disusun menurut sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I	PENDAHULUAN Merupakan bab yang berisikan gambaran awal dari skripsi ini yaitu tentang latar belakang penulisan, kajian teori, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, metode penelitian dan juga sistematika dalam penulisannya.
BAB II	METODE PENELITIAN Merupakan bab yang akan membahas metode yang digunakan dalam penelitian, proses pengambilan data, dan metode analisa dalam menyelesaikan penelitian. digunakan dalam penelitian, proses pengambilan data, dan metode analisa dalam menyelesaikan penelitian.
BAB III	HASIL PENELITIAN

Merupakan bab inti penulisan yang membahas profil tegangan dan penempatan optimal kapasitas kapasitor bank guna meminimalkan jatuh tegangan pada sistem distribusi melalui analisis data yang dilakukan.

BAB IV

KESIMPULAN DAN SARAN

Merupakan bab yang berisi kesimpulan dari hasil analisis data serta pembahasan permasalahan dan saran-saran.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di PT. PLN (Persero) UP3 Makassar Selatan, Jl. Letjen Hertasning Jl. Tamalate No. 99, Bonto Makkio, Kec. Rappocini, Kota Makassar, Sulawesi Selatan dan Laboratorium Mesin-Mesin Listrik dan Penggerak Daya, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Waktu penelitian dilakukan pada bulan Juni 2024 sampai dengan bulan Juli 2025.

2.2 Alat dan Instrumen Penelitian

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Satu unit laptop ROG Strix G512LU_G512LU.
2. Software Electrical Transient Analysis Program (ETAP) 19.0.1.

2.3 Metode Pengumpulan Data

Metode pengambilan data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu studi literatur dan pengambilan data di lapangan.

1. Studi literatur

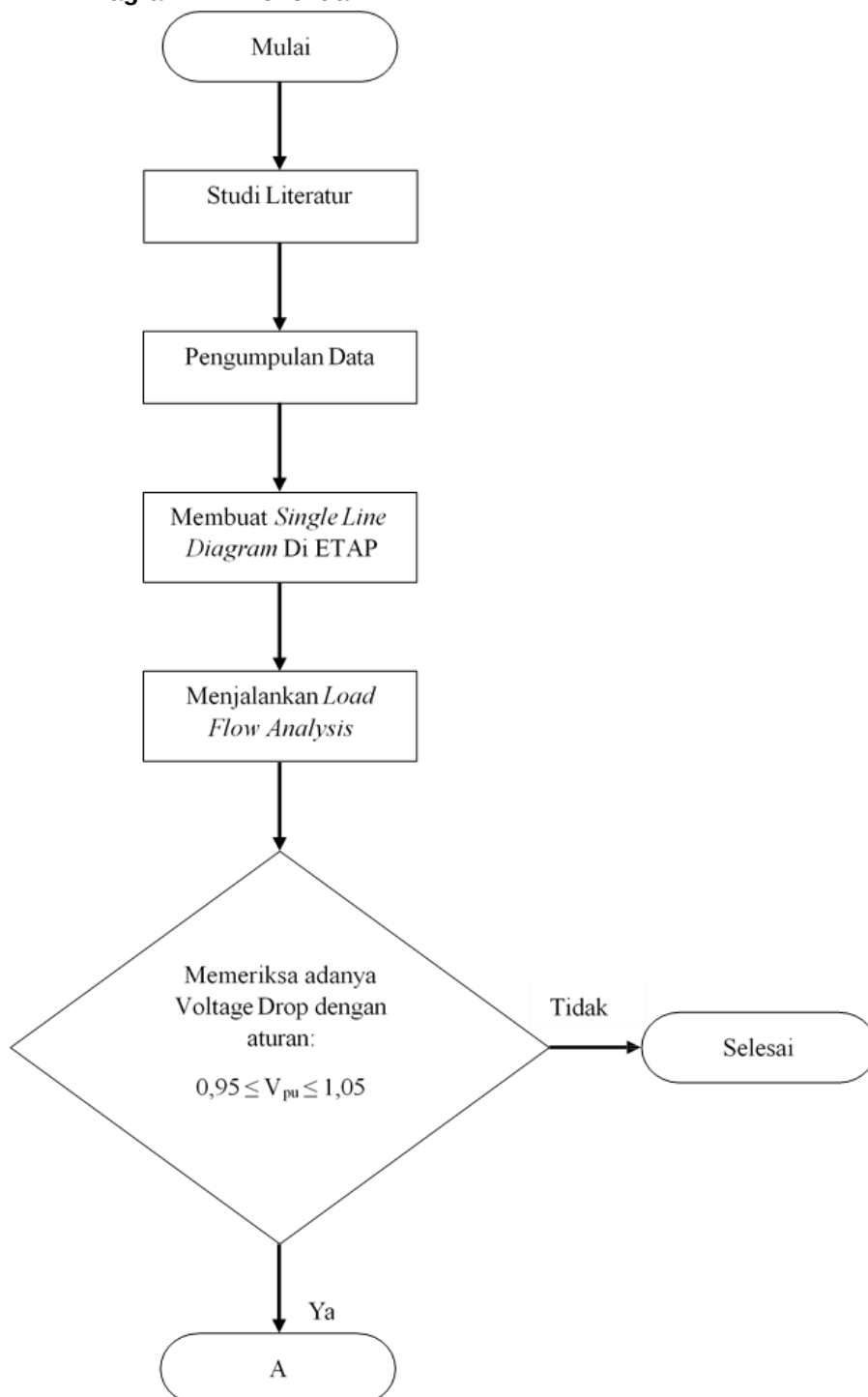
Metode penelitian melibatkan pengkajian berbagai referensi yang mencakup karya penulis yang terdapat dalam buku, artikel dan jurnal ilmiah terdahulu, sumber-sumber yang diakses melalui internet, serta bahan pustaka lainnya yang relevan.

2. Pengambilan data

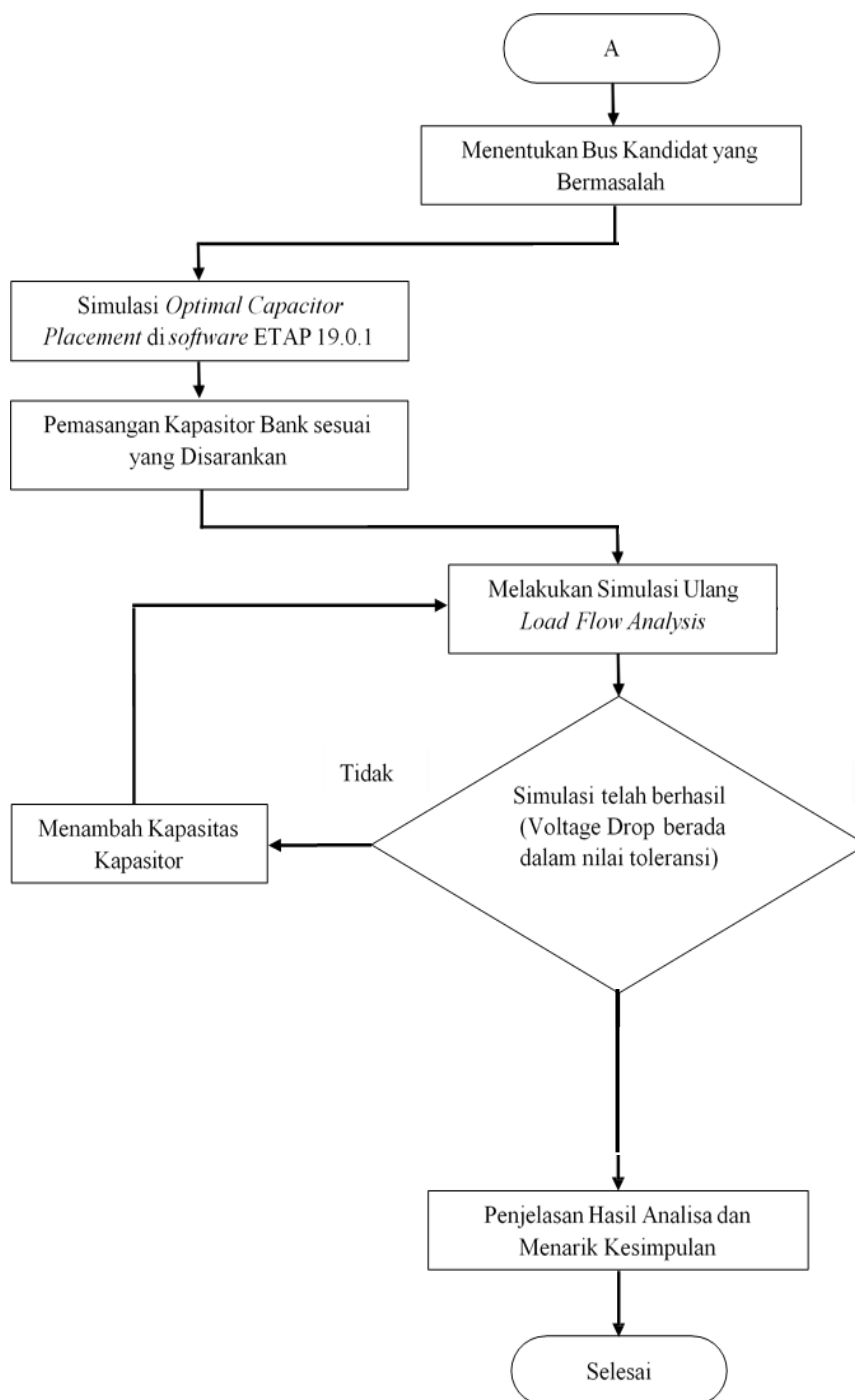
Data diperoleh dengan melakukan penelitian dan pengumpulan data sekunder yang berasal dari PT. PLN (Persero) UP3 Makassar Selatan. Gambar 7. menampilkan data penyulang satu jalur Adiyaksa, yang mencakup 12 buah trafo distribusi, serta bus 20 kV dan bus 0,4 kV (400 volt). Data ini nantinya akan dimanfaatkan sebagai referensi dalam proses pemodelan stasiun listrik satu jalur menggunakan perangkat lunak ETAP.

Selain data dalam bentuk *single line diagram*, ada juga data pengukuran penyulang Salemba PT. PLN (Persero) UP3 Makassar Selatan triwulan keempat dari Oktober hingga Desember 2024. Data ini mencakup data transformator distribusi, daya yang diserap oleh beban dan konsumen, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Data ini akan membantu dalam proses analisis sistem yang ingin diketahui.

2.4 Diagram Alir Penelitian



Gambar 7. Diagram Alir Penelitian (1)



Gambar 8. Diagram Alir Penelitian (2)

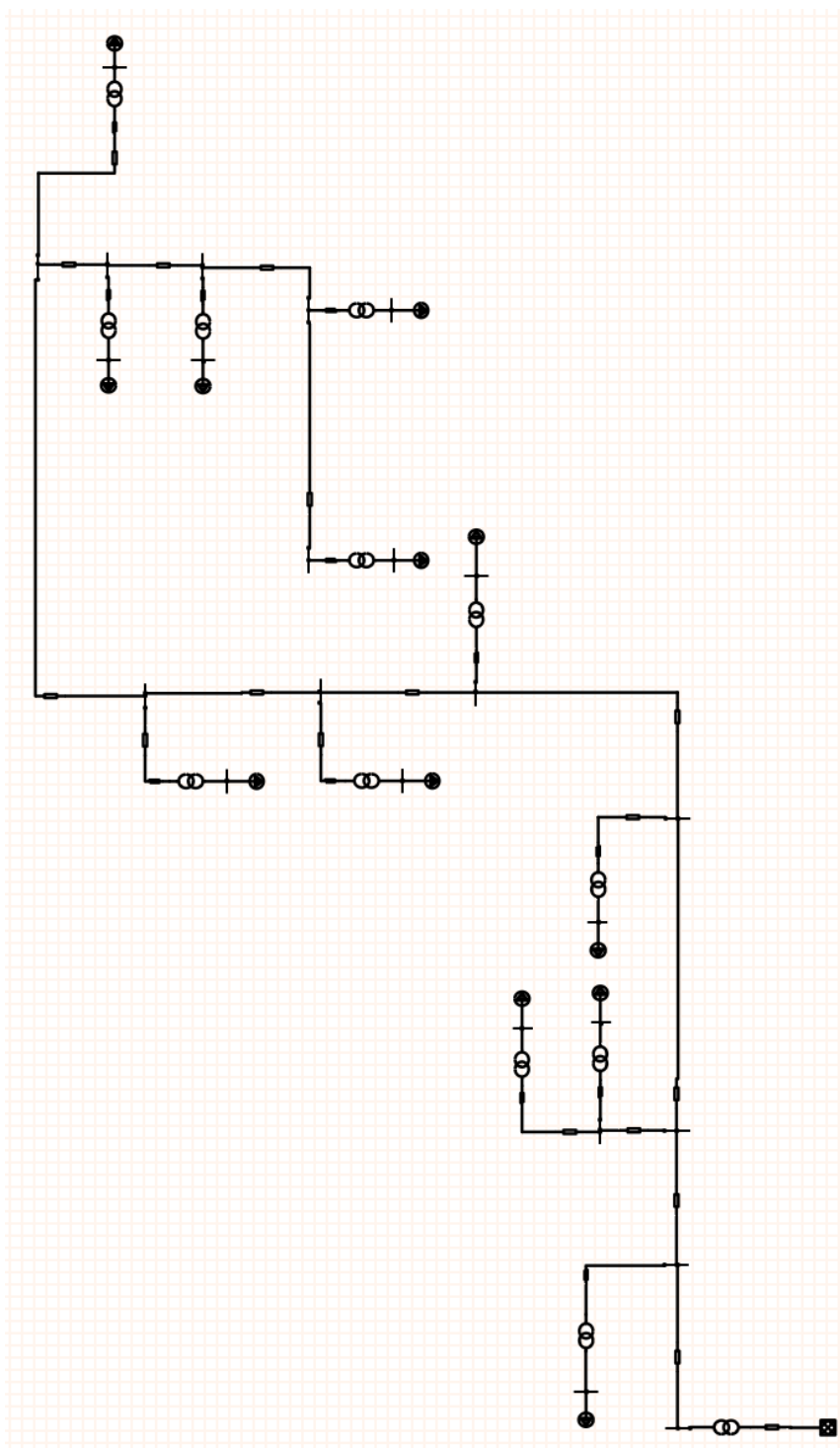
2.5 Data Penelitian

Untuk melakukan simulasi aliran daya menggunakan software ETAP, dibutuhkan beberapa data yang harus dipenuhi yang diperoleh dari PLN UP3 Makassar Selatan. Data yang diperoleh yaitu data transformator dan data beban. Adapun data yang diperoleh dari PLN UP3 dapat dilihat pada Tabel 1.

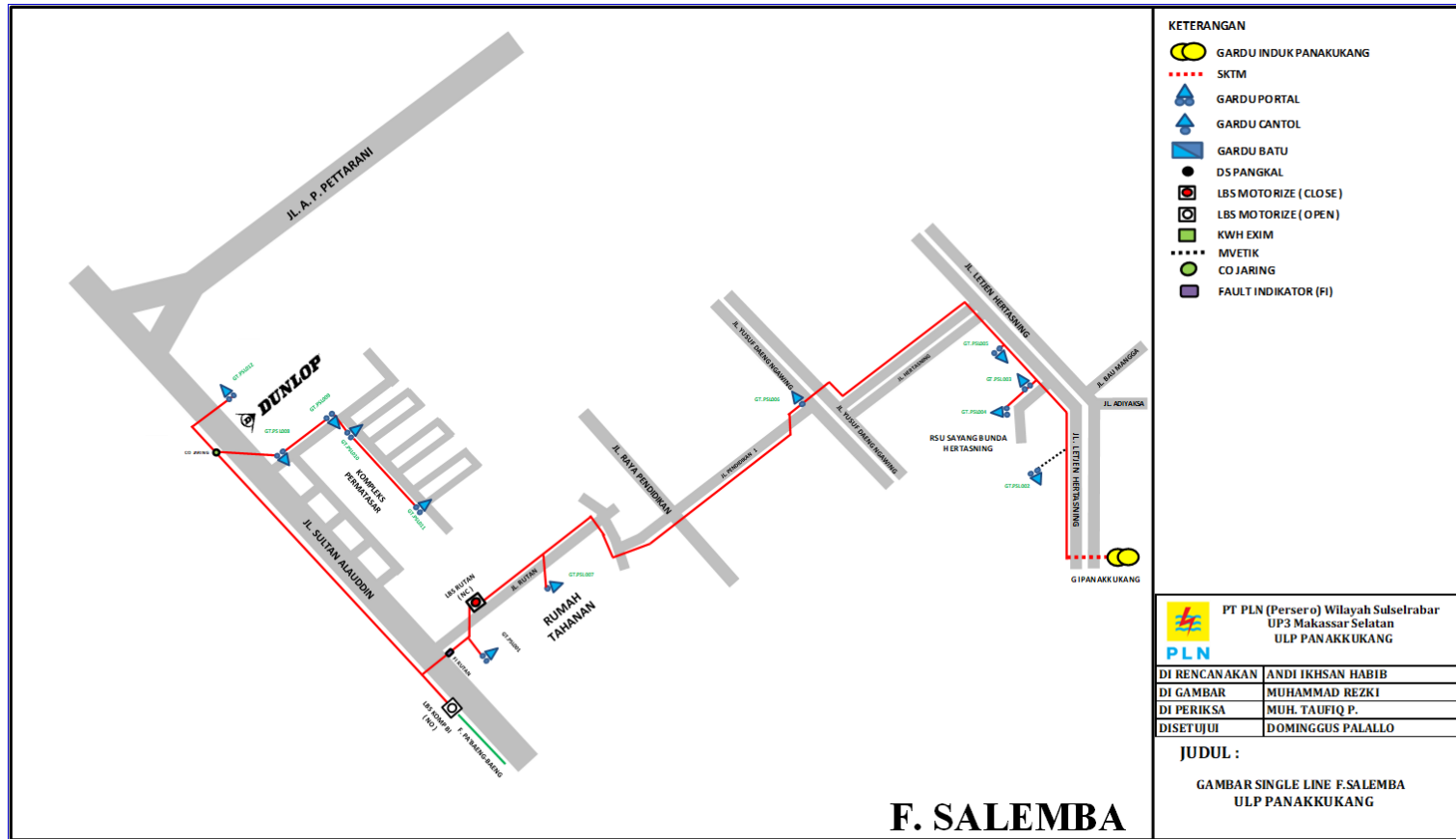
Tabel 1. Data Gardu Penyulang Salemba PLN UP3

NO	KODE GARDU	LOKASI	DAYA TRAF0 (KVA)	BEBAN TRAF0	
				PERSEN (%)	KVA
1	GT.PSL002	JL.KOMPLEKS PERMATASARI	50	45,47%	22,73
2	GT.PSL003	HOTEL HERTASNING	160	15,86%	25,37
3	GT.PSL004	AP PETTARANI SAMPING PENJUAL MOBIL	250	51,29%	128,22
4	GT.PSL005	JL. HERTASNING	100	35,57%	35,57
5	GT.PSL006	JL.HERTASNING RS IBU DAN ANAK	100	3,54%	3,54
6	GT.PSL007	JL. YUSUF DG NGAWINGSAMPING MASJID DEKAT PALLUBASA	160	30,34%	48,54
7	GT.PSL001	JL. RUTAN, KANTOR KEMENKUMHAM	200	31,72%	63,44
8	GT.PSL008	JL SULTAN ALAUDDIN KOMPLEKS PERMATA SARI	160	27,84%	48,55
9	GT.PSL009	JL. SULTAN ALAUDDIN	160	52,24%	83,58
10	GT.PSL010	RUKO PERMATA SARI	100	42,56%	42,56
11	GT.PSL011	JL.KOMP.PERMATASARI	100	20,97%	20,97
12	GT.PSL012	BENGKEL MAHAPUTRA	100	65,14%	65,14

Tabel 1 yang menunjukkan pembebanan setiap transformator yang berada pada penyulang Salemba masih di bawah 50 persen dari kapasitas maksimumnya



Gambar 9. Diagram Satu Garis Penyulang Salemba



Gambar 10. Single Line Diagram Penyulang Salemba