

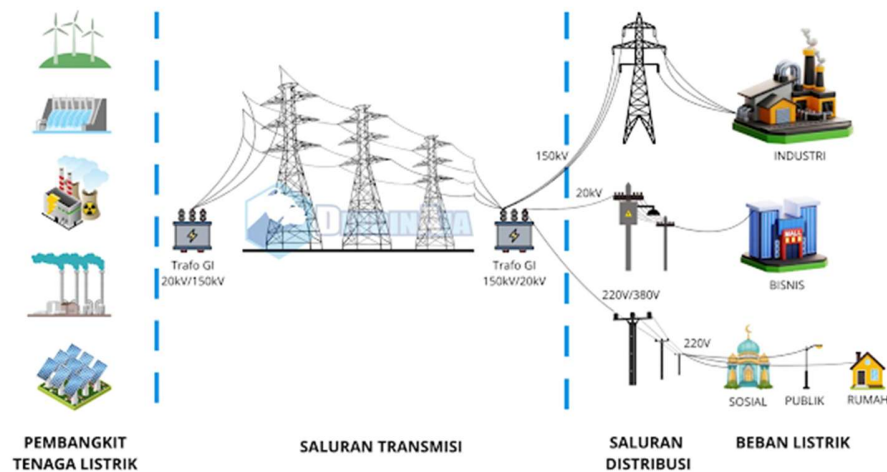
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu kesatuan yang terdiri dari proses pembangkitan, transmisi, dan distribusi tenaga listrik untuk disalurkan kepada konsumen. Pada tahap distribusi, tenaga listrik disalurkan dari gardu induk menuju gardu distribusi dan kemudian ke pelanggan. Sistem distribusi memiliki peran penting karena merupakan tahap akhir yang berhubungan langsung dengan konsumen akhir, sehingga kualitas dan keandalan sistem ini sangat menentukan mutu pelayanan listrik.



Gambar 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Dijelaskan dari Gambar 2.1 bahwa proses dimulai dari pembangkit tenaga listrik yang berada di sisi kiri gambar, yang mencakup berbagai sumber energi seperti tenaga air (PLTA),

tenaga angin (PLTB), tenaga matahari (PLTS), serta pembangkit berbahan bakar fosil. Setiap jenis pembangkit ini menghasilkan listrik dengan kapasitas yang bervariasi sesuai dengan sumber daya yang digunakan. Listrik yang dihasilkan diubah menjadi listrik dengan tegangan tinggi agar dapat dikirimkan lebih efisien melalui saluran transmisi.

Setelah dihasilkan, listrik dialirkan melalui saluran transmisi dengan tegangan tinggi (150 kV) untuk mengurangi kerugian daya selama perjalanan jauh. Dalam saluran transmisi ini, terdapat transformator (Trafo GI) yang berfungsi menurunkan tegangan listrik dari 150 kV menjadi 20 kV untuk disesuaikan dengan kebutuhan distribusi lebih lanjut. Listrik yang sudah melalui saluran transmisi kemudian diteruskan ke saluran distribusi, yang memiliki tegangan 220V hingga 380V, untuk dapat digunakan oleh berbagai sektor.

Di sisi kanan gambar, kita melihat beban listrik yang terbagi menjadi beberapa kategori, yaitu industri, bisnis, sosial, publik, dan rumah tangga. Listrik yang sudah didistribusikan melalui saluran distribusi ini akhirnya sampai ke sektor-sektor pengguna akhir, yang mengkonsumsi energi untuk menjalankan kegiatan operasionalnya, baik itu untuk mesin-mesin industri, perangkat bisnis, fasilitas publik, atau kebutuhan rumah tangga.

Jaringan distribusi tenaga listrik pada umumnya dibagi menjadi dua bagian, yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder. Jaringan distribusi primer bertegangan menengah (biasanya 20 kV di sistem PLN), yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk ke gardu distribusi. Sementara itu, jaringan distribusi sekunder bertegangan rendah (380/220 V), yang menyalurkan energi listrik dari gardu distribusi ke pelanggan.

Dalam sistem distribusi, salah satu faktor penting yang harus dijaga adalah efisiensi penyaluran daya. Efisiensi ini dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti panjang jaringan, luas penampang konduktor, jenis konduktor, serta beban yang ditanggung oleh trafo distribusi. Semakin tinggi beban dan semakin panjang jaringan, maka rugi-rugi daya yang terjadi akan semakin besar.

2.1.2 Gardu Distribusi dan Komponennya

Gardu distribusi adalah bangunan instalasi listrik yang berfungsi menurunkan tegangan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah (380/220 kV) untuk disalurkan ke konsumen, serta dilengkapi komponen pemutus, pengaman, dan pengukur.

Komponen utama dari gardu distribusi meliputi :

1. Transformator (Trafo): Fungsinya adalah untuk menurunkan tegangan dari tingkat tinggi (pada jaringan transmisi) menjadi tegangan yang lebih rendah sesuai dengan kebutuhan konsumen. Transformator terdiri dari dua bagian: sisi primer (tegangan tinggi) dan sisi sekunder (tegangan rendah).
2. Pemutus Arus (Circuit Breaker): Pemutus arus berfungsi untuk melindungi sistem kelistrikan dari kerusakan akibat gangguan atau beban lebih. Ketika terjadi gangguan, pemutus arus otomatis memutuskan aliran listrik untuk mencegah kerusakan lebih lanjut.
3. Fuse (Sekering): Fuse atau sekering adalah komponen pengaman yang melindungi sistem kelistrikan dari beban lebih dan korsleting. Fuse bekerja dengan cara melelehkan kawat pemutusnya ketika terjadi arus lebih.
4. Switchgear: Switchgear adalah perangkat yang digunakan untuk mengendalikan dan mengamankan sistem kelistrikan, termasuk saklar dan pemutus arus. Switchgear memungkinkan pemisahan atau pemutusan aliran listrik untuk pemeliharaan atau perbaikan.
5. Panel Distribusi: Panel distribusi digunakan untuk mendistribusikan aliran listrik ke berbagai jalur distribusi. Di dalam panel ini, terdapat pemutus arus, saklar, dan perangkat pengatur lainnya.
6. Busbar: Busbar adalah penghantar listrik besar yang digunakan untuk mendistribusikan listrik ke beberapa cabang atau jalur dalam gardu distribusi. Busbar biasanya terbuat dari logam tembaga atau aluminium.

7. Arrestor (Pengaman Lonjakan Tegangan): Arrestor berfungsi untuk melindungi peralatan di gardu distribusi dari lonjakan tegangan akibat sambaran petir atau gangguan lain. Arrestor bekerja dengan mengalihkan lonjakan tegangan ke tanah.
8. Kabel dan Saluran Distribusi: Kabel dan saluran distribusi adalah bagian yang menghubungkan gardu distribusi ke konsumen akhir. Mereka membawa listrik yang sudah diturunkan tegangannya untuk didistribusikan ke rumah atau bisnis.

Gardu distribusi memiliki berbagai jenis berdasarkan bentuk fisik dan penempatannya, antara lain:

1. Gardu portal (outdoor) — Gardu Portal adalah gardu distribusi dengan kapasitas transformator yang terbatas dan biasanya disambungkan dengan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) konfigurasi T section pada tiang gardu. Pengaman yang digunakan pada gardu portal yaitu Pengaman Lebur Cut-Out (FCO) sebagai pengaman hubung singkat transformator dengan elemen pelebur dan Lightning Arrestor (LA) sebagai sarana pencegah naiknya tegangan pada transformator akibat surja petir. biasanya digunakan di daerah yang memiliki ruang terbuka cukup luas.



Gambar 2.2 Gardu Portal

(sumber : <https://repository.pnj.ac.id/>)

2. Gardu beton (indoor) — Gardu Beton merupakan gardu distribusi yang seluruh komponen utama instalasi yaitu transformator dan peralatan switching / proteksi, terangkai didalam bangunan sipil yang dirancang, dibangun dan difungsikan dengan konstruksi pasangan batu dan beton. Gardu beton memiliki kapasitas transformator yang besar dan dipakai untuk daerah padat beban tinggi.gardu ini ditempatkan di daerah padat penduduk, seperti perkotaan, untuk alasan keamanan dan estetika. (Pasra & Ruswandi, 2016)



Gambar 2.3 Gardu Beton

(sumber : <https://artik.id/>)

3. Gardu kios atau cubicle — Gardu Kios adalah pos distribusi listrik berbentuk kubikel tegangan menengah yang dapat dipindahkan.merupakan tipe tertutup yang terintegrasi antara trafo, panel, dan proteksi. Gardu kios sering dipasang untuk mendukung kebutuhan listrik sementara maupun permanen di pusat keramaian, pasar, atau kawasan pemukiman yang membutuhkan pasokan daya cepat.



Gambar 2.4 Gardu Kios

(sumber : <https://powerindoperkasa.com/>)

Gardu K70C, yang menjadi objek penelitian ini, merupakan gardu distribusi tipe beton (ST3) dengan kapasitas 630 KVA dan berlokasi di Jl. Paseban Dalam No. 75, Salemba, Jakarta Pusat. Gardu ini melayani pelanggan di bawah Penyulang Alengka, yang berasal dari Gardu Induk (GI) Gambir Lama. Berdasarkan hasil pengukuran beban trafo pada bulan Oktober 2025, beban gardu K70C mencapai 81,96 % dari kapasitasnya, yang mengindikasikan kondisi beban tinggi (mendekati batas overload).

Beban trafo yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi energi karena naiknya arus yang mengalir pada penghantar dan kumparan trafo. Selain itu, jika beban antar fasa tidak seimbang, maka rugi daya pada fasa yang lebih tinggi akan meningkat, mengakibatkan kenaikan suhu trafo dan menurunkan efisiensi kerja sistem distribusi.

2.2 Standart Acuan dan Regulasi dalam Pengendalian Susut Energi Listrik

Dokumen dasar yang mengatur toleransi susut energi listrik (losses) PLN mencakup regulasi pemerintah dan standar internal. Dokumen utama meliputi Peraturan Menteri ESDM No. 9 Tahun 2020 terkait efisiensi tenaga listrik dan target susut jaringan, serta standar teknik internal SPLN 1:1978 yang menetapkan batas toleransi susut tertentu, seperti 2% pada sistem distribusi.

SPLN (Standar PLN) yang mengatur susut energi listrik (losses) utama meliputi SPLN D3.002-2:2008 (susut distribusi teknis 5%-10%), SPLN 1:1978 (susut jaringan 2% pada kondisi tertentu), dan SPLN 72 Tahun 1987 (rugi daya maksimal 5% dan rugi tegangan 10%). Aturan ini membatasi losses energi dari gardu induk hingga pelanggan.

Berikut adalah detail standart acuan yang mengatur susut energi listrik:

1. Peraturan Menteri ESDM No. 9 Tahun 2020

Mengatur target susut jaringan (transmisi dan distribusi) sebagai batas atas untuk perhitungan BPP (Biaya Pokok Penyediaan) dan subsidi listrik.

2. SPLN D3.002-2:2008 (Spesifikasi Transformator Distribusi)

Menyatakan bahwa susut energi pada sistem distribusi dapat ditoleransi dengan nilai maksimal antara 5% hingga 10%. Dokumen ini menjadi acuan untuk pengendalian susut teknis dan non-teknis.

3. SPLN 72 Tahun 1987 (Analisis Rugi Daya)

Menetapkan batasan keandalan sistem distribusi yaitu rugi daya maksimal 5% dan rugi tegangan maksimal 10%.

4. SPLN 1:1978 (Standar Jaringan)

Mengatur susut yang diizinkan pada jaringan distribusi tertentu, di mana salah satu acuannya adalah susut yang diizinkan maksimal 2%.

5. SPLN 50:1997

mengatur mengenai spesifikasi transformator distribusi, yang secara tidak langsung mengatur tentang batas rugi-rugi (susut) teknis pada transformator. Standar ini menjadi acuan untuk efisiensi beban trafo, di mana susut daya dihitung berdasarkan rugi inti dan rugi tembaga, dengan ketentuan bahwa batas susut daya total pada penyulang tidak boleh melebihi

6. Keputusan Direksi PT. PLN (Persero) No.0021.P/DIR/2018

Tentang Pedoman Penyusunan Laporan Neraca Energi (kWh) Formula teknis yang digunakan untuk menghitung susut energi teknis baik pada jaringan distribusi maupun transformator distribusi.

2.3 Efisiensi dan Rugi Daya pada Transformator

Transformator, sebagai perangkat kunci dalam sistem distribusi tenaga listrik, memiliki berbagai karakteristik teknis yang mempengaruhi efisiensi kerjanya. Salah satu faktor utama yang mempengaruhi efisiensi transformator adalah rugi daya yang terjadi selama proses konversi tegangan dan distribusi energi. Rugi daya pada transformator terdiri dari dua jenis utama, yaitu rugi besi (core losses) dan rugi belitan (copper losses). Rugi besi terjadi akibat fenomena histeresis magnetik dan arus eddy pada inti transformator, sedangkan rugi belitan berhubungan dengan resistansi kumparan yang bergantung pada arus beban yang mengalir melalui kumparan.

Berdasarkan Standar (SPLN) No. 50 Tahun 1997, yang merupakan Standar Nasional Indonesia (SNI), dokumen ini mengatur mengenai spesifikasi, perhitungan, serta persyaratan teknis terkait transformator tiga fasa. SPLN 50:1997 memberikan pedoman yang sangat penting dalam memastikan kinerja yang optimal dan keamanan operasional transformator tiga fasa yang digunakan dalam distribusi energi listrik di Indonesia.

Sebagai acuan, spesifikasi dan perhitungan terkait transformator tiga fasa dapat dilihat pada Tabel 2.1, yang menyajikan informasi rinci mengenai kapasitas, daya, dan berbagai parameter teknis lainnya yang diperlukan untuk desain dan pengoperasian transformator tersebut sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Tabel 2.1 Trafo Fasa Tiga SPLN 50 Tahun 1997

KAPASITAS [kVA]	Rugi Besi [Watt]	Rugi Belitan [Watt]
25	75	425
50	150	800
100	300	1,600
160	400	2,000
200	480	2,500

250	600	3,000
315	770	3,900
400	930	4,600
500	1,100	5,500
630	1,300	6,500
800	1,750	9,100
1,000	2,300	12,100
1,250	2,500	15,000
1,600	3,000	18,100
2,000	3,600	21,000
2,500	4,000	25,000

Pada Tabel 2.1 menunjukkan hubungan antara kapasitas trafo (dalam satuan kVA) dan besarnya rugi besi serta rugi belitan. Misalnya, untuk transformator dengan kapasitas 25 kVA, nilai rugi besi tercatat sebesar 75 watt, sedangkan rugi belitan tercatat sebesar 425 watt. Sebaliknya, untuk transformator dengan kapasitas yang lebih besar seperti 2.500 kVA, rugi besi meningkat menjadi 5.000 watt dan rugi belitan mencapai 25.000 watt. Data ini sangat penting dalam desain dan perencanaan distribusi listrik, karena besarnya rugi daya mempengaruhi efisiensi dan biaya operasional sistem distribusi energi listrik.

Dari standar teknis dalam SPLN 50:1997 mengenai rugi daya pada transformator, penting untuk lebih mendalami bagaimana efisiensi transformator dipengaruhi oleh tingkat pembebanan. SPLN 50:1997 memberikan pedoman mengenai rugi besi dan rugi belitan yang terjadi pada transformator, yang merupakan komponen utama dalam mengukur efisiensi operasionalnya. Namun, efisiensi ini tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik teknis transformator, tetapi juga oleh besarnya beban yang diterima oleh transformator selama operasional.

Secara ideal, daya listrik yang diserap pada sisi primer akan sama besarnya dengan daya listrik yang dihasilkan pada sisi sekunder trafo. Namun dalam kenyataannya, hal tersebut tidak akan sama. Hal inilah yang disebut dengan adanya rugi daya pada transformator . Keadaan tersebut menunjukkan adanya energi listrik yang tidak tersalurkan secara penuh dikarenakan adanya perubahan energi listrik menjadi energi yang tidak diharapkan seperti panas dan getaran pada bagianbagian dari trafo itu sendiri. Rugi daya pada trafo terdiri dari rugi inti dan rugi tembaga, dimana secara umum rugi daya pada trafo ditulis:

$$P_{\text{loss}} (\text{ kWh}) = (P_{\text{cu}} \times t) + (P_{\text{core}} \times t) \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

- P_{loss} = rugi daya total trafo (kWh)
- P_{cu} = rugi tembaga trafo (kW)
- P_{core} = rugi inti besi (kW)
- t = Waktu (jam)

Rugi tembaga disebabkan oleh arus yang mengalir pada kumparan trafo, baik di sisi primer maupun sisi sekunder. Rugi tembaga ini berbanding lurus dengan beban sehingga dengan peningkatan arus beban tersebut mengakibatkan rugi tembaga yang semakin besar. Rugi tembaga ini disebabkan oleh pengaruh adanya arus yang mengalir dalam tembaga bahkan mempengaruhi dalam faktor kuadratik, sehingga memberikan nilai yang signifikan terhadap besarnya daya yang terbuang[15]. Adapun pendekatan untuk memperoleh rugi tembaga yaitu:

$$P_{\text{cu}} = I_p^2 \times R_p + I_s^2 \times R_s \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan :

- P_{cu} = rugi tembaga (W)
- I_p, I_s = arus primer dan arus sekunder (A)
- R_p, R_s = resistansi kumparan primer dan sekunder (Ω)

2.4 Pengertian Susut Energi

Susut energi listrik adalah kehilangan energi listrik yang terjadi selama proses distribusi dari pembangkit listrik hingga sampai ke konsumen ,maka susut energi juga bisa dibilang selisih antara energi listrik yang diterima dari jaringan transmisi (UIP2B) dengan energi listrik yang terjual kepada pelanggan akhir.

Berikut adalah rumus perhitungan susut :

$$\text{Susut Energi (\%)} = \frac{E_{\text{terima}} - E_{\text{jual}}}{E_{\text{terima}}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

- E_{terima} = Energi listrik yang diterima dari jaringan transmisi (kWh)
- E_{jual} = Energi listrik yang terjual kepada pelanggan (kWh)

Susut energi merupakan salah satu indikator kinerja utama dalam sistem distribusi tenaga listrik. Nilai susut yang tinggi menunjukkan adanya ketidakefisienan sistem yang dapat menyebabkan kerugian finansial bagi perusahaan dan penurunan keandalan pasokan listrik.

2.5 Klasifikasi Susut energi

Untuk memahami dan mengelola susut energi Listrik, klasifikasi susut energi dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu:

2.5.1 Susut Teknis

Susut Teknis adalah hilangnya energi yang dibangkitkan pada saat disalurkan karena berubah menjadi energi panas, susut ini tidak dapat dihilangkan seperti fenomena alam. Susut teknis terjadi secara alamiah akibat sifat fisik komponen sistem distribusi listrik. Beberapa faktor penyebab susut teknis antara lain:

1. Rugi daya pada penghantar (I^2R losses) akibat arus yang mengalir melalui kabel.
2. Rugi inti dan rugi tembaga pada transformator distribusi.
3. Panjang jaringan distribusi (JTM dan JTR) yang berpengaruh terhadap total tahanan sistem.
4. Ketidakseimbangan beban antar fasa.
5. Kualitas sambungan dan peralatan seperti isolator, konektor, dan panel distribusi.

Berdasarkan Peraturan Direksi PT PLN (PERSERO) Nomor 0021.P/DIR/2018 tentang Pedoman Teknis Penerapan Formula Susut Jaringan Tenaga Listrik di Lingkungan PT PLN (PERSERO).

Susut Teknis sendiri meliputi :

1. Susut Jaringan Tegangan Menengah (JTM)
2. Gardu Distribusi (susut trafo)
3. Susut Jaringan Tegangan Rendah (JTR)
4. Susut Sambungan Rumah (SR)

Berdasarkan Peraturan Direksi PT PLN (PERSERO) Nomor 0021.P/DIR/2018 tentang Pedoman Teknis Penerapan Formula Susut Jaringan Tenaga Listrik, telah diterapkan Rumus Perhitungan Susut Jaringan Teknis Sesuai Worksheet Formula Susut Jaringan Tenaga Listrik yaitu sebagai berikut :

1. Metode Perhitungan Susut Trafo Distribusi

Untuk mencari Susut Trafo Distribusi, dapat dihitung dengan rumus pada Tabel 2.2 sebagai berikut :

Tabel 2.2 Rumus Perhitungan Susut Trafo Distribusi

No	Nama	Rumus Perhitungan
1	kWh input Trafo	$\text{kWh In JTM} - \text{Susut 12R JTM} - \text{kWh}$ Jual TM
2	Kapasitas rata-rata terpasang (S Trafo)	Jumlah kapasitas terpasang / jumlah Trafo
3	Rugi Besi (P Besi)	Data
4	Rugi Tembaga (P Cu)	Data
5	kWh input per Trafo (E Trafo)	$\text{kWh In Trafo} / \text{Jumlah Trafo}$
6	Faktor Beban Trafo (LF Trafo)	Hasil Pengukuran
7	Faktor Kerja Trafo (FK Trafo)	Hasil Pengukuran
8	Beban Puncak per Trafo (kVA Trafo)	$\text{E Trafo} / (\text{waktu} \times \text{LF Trafo} \times \text{FK Trafo})$
9	Faktor rugi beban Trafo (LLF Trafo)	$0.3 \times \text{LF Trafo} + 0,7 \times (\text{LF Trafo})^2$
10	Rugi beban Trafo (P Trafo)	$\text{P Besi} + (\text{kVA Trafo} / \text{S Trafo}) \times \text{P Cu} \times$ LLF Trafo
11	Faktor koreksi	Asumsi *)

*) Faktor Koreksi Trafo disesuaikan dari angka susut korelasi antara kVA rata rata dan pembebanan rata - rata sesuai Tabel 2.3.

Faktor Koreksi trafo diambil dari data pembebanan trafo sesuai dengan Tabel 2.3 dibawah ini:

Tabel 2.3 Faktor Koreksi Trafo

DAYA KVA	SUSUT % PEMBEBANAN TRAFO										
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	110%
25	4.91	2.70	2.08	1.84	1.77	1.78	1.83	1.91	2.00	2.12	2.24
50	4.90	2.68	2.05	1.81	1.72	1.72	1.76	1.83	1.92	2.02	2.13
100	4.90	2.68	2.05	1.81	1.72	1.72	1.76	1.83	1.92	2.02	2.13
160	4.08	2.22	1.68	1.47	1.39	1.38	1.41	1.46	1.53	1.60	1.69
200	3.92	2.14	1.63	1.43	1.36	1.36	1.39	1.44	1.51	1.59	1.67
250	3.92	2.13	1.61	1.41	1.34	1.33	1.35	1.40	1.46	1.54	1.62
315	3.99	2.17	1.65	1.45	1.37	1.36	1.39	1.44	1.51	1.58	1.67
400	3.79	2.06	1.56	1.36	1.29	1.28	1.30	1.35	1.41	1.48	1.56
500	3.59	1.95	1.48	1.30	1.23	1.22	1.24	1.28	1.34	1.41	1.48
630	3.37	1.83	1.39	1.22	1.15	1.14	1.16	1.20	1.26	1.32	1.39
800	3.57	1.95	1.48	1.30	1.24	1.24	1.26	1.31	1.37	1.44	1.52
1000	3.76	2.05	1.56	1.38	1.31	1.31	1.34	1.39	1.46	1.53	1.62

2. Metode Perhitungan Susut Jaringan Tegangan Rendah (JTR)

Untuk mencari Susut Jaringan Tegangan Rendah (JTR), dapat dihitung dengan rumus pada Tabel 2.4 sebagai berikut :

Tabel 2.4 Rumus Perhitungan Susut JTR

No	Nama	Rumus Perhitungan
1	kWh input JTR (KWh In JTR)	kWh In Trafo - Susut Trafo
2	Jumlah jurusan	Data SILM
3	kWh input per Jurusan (E JTR)	kWh In JTR / Jumlah Jurusan
4	Faktor Beban JTR (LF JTR)	Hasil Pengukuran
5	Faktor Beban JTR (LF JTR)	Hasil Pengukuran
6	Node per Jurusan	Panjang jurusan /0,04
7	Beban Puncak per Penyulang (E In)	E JTR/ (waktu x LF JTR x FK JTR)
8	Beban Puncak per Node (E Out)	E In / Node
9	Beban Penyulang ekivalen (E Ek)	$E_{In} + E_{In} \cdot E_{Out} + E_{Out}^2 / 3$
10	Panjang JTR/Jurusan (L JTR)	Total Panjang JTR / Jumlah Jurusan
11	Tahanan Penghantar (R JTR)	$R_x (1 + \alpha(t_2 - t_1))$ $t_2 = 40^\circ\text{C}$ $t_1 = 20^\circ\text{C}$
12	Rugi beban puncak/penyulang (P JTR)	$= (L \text{ JTR} \times R \text{ JTR} / 1000) \times (E \text{ Ek JTR} / (1,732 \times 0,38))^2$
13	Faktor rugi beban JTR (LLF JTR)	$0,3 \times LF \text{ JTR} + 0,7 \times (LF \text{ JTR})^2$
14	Faktor koreksi	Asumsi
15	Susut I ² R JTR	Waktu x Jumlah Jurusan x P JTR x LLF JTR x Faktor Koreksi

3. Metode Perhitungan Susut Sambungan Rumah (SR)

Untuk mencari Susut Sambungan Rumah (SR), maka dapat dihitung dengan rumus pada Tabel 2.5 sebagai berikut :

Tabel 2.5 Rumus Perhitungan Susut SR

No	Nama	Rumus Perhitungan
1	kWh input SR (kWh In SR)	kWh In JTR - Susut JTR
2	Jumlah konsumen TR	Data SILM
3	kWh input per Konsumen (E SR)	kWh In SR/ Jumlah konsumen
4	Faktor Beban SR (LF SR)	LF JTR
5	Faktor Kerja SR (FK SR)	FK JTR
6	Beban Puncak per Jurusan (kVA SR)	E SR/ (waktu x LF JTR x FK JTR)
7	Panjang SR (L SR)	Total Panjang SR/ Jumlah konsumen
8	Tahanan Penghantar (R SR)	$R_x (1 + \alpha(t_2 - t_1))$ $t_2 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
9	Rugi beban puncak/konsumen (P SR)	$(L\text{ SR} \times R\text{ JTR} / 1000) \times (KVA\text{ JTR} / 0.22)^2$
10	Faktor rugi beban SR (LLF SR)	$0.3 \times LF\text{ JTR} + 0.7 \times (LF\text{ JTR})$
11	Susut I^2R SR	Waktu x Jumlah konsumen x P SR x LLF SR x Faktor Koreksi SR

Berdasarkan Peraturan Direksi PT PLN (PERSERO) Nomor 0021.P/DIR/2018 tentang Pedoman Teknis Penerapan Formula Susut Jaringan Tenaga Listrik yang telah dituangkan pada Tabel 2.3 , Tabel 2.4 ,Tabel 2.5 Didapatkan rumus perhitungan :

$$Susut Trafo (kWh) = Waktu \times Jumlah Trafo \times P Trafo \times LLF Trafo :(2.4)$$

Faktor Koreksi

$$Susut JTR (kWh) = Waktu \times Jumlah Jurusan \times P JTR \times LLF JTR(2.5)$$

x Faktor Koreksi

$$Susut SR (kWh) = (Waktu \times Jumlah Konsumen \times P SR \times LLF SR)(2.6) \\ + (Jumlah Konsumen \times Waktu \times 1.73)/1000$$

Keterangan :

Waktu	: 24 Jam x 1 periode bulan
Jumlah Trafo	: Banyaknya Trafo
Jumlah Jurusan	: Banyaknya Jurusan pada PHB-TR
Jumlah Konsumen	: Banyaknya Konsumen pada gardu K70C
P Trafo	: Rugi beban Trafo
P JTR	: Rugi beban JTR
P SR	: Rugi beban SR
LLF Trafo	: Faktor rugi beban Trafo
LLF JTR	: Faktor rugi beban JTR
LLF SR	: Faktor rugi beban SR
Faktor Koreksi	: Faktor Koreksi Trafo disesuaikan dari angka susut korelasi antara kVA rata rata dan pembebanan rata – rata (Asumsi)

Perhitungan susut energi pada jaringan distribusi listrik adalah suatu perhitungan yang sangat kompleks . Perhitungan susut energi jaringan distribusi yang tepat hanya dapat dilakukan melalui proses pengukuran energi yang dilalui dalam periode waktu tertentu pada masing-masing komponen dari sistem distribusi. Hal ini tentunya memerlukan banyaknya alat ukur energi yang akan digunakan dan menyebabkan susut. Adapun penyebab besarnya susut pada jaringan distribusi antara lain adalah keadaan alamiah jaringan itu sendiri seperti panjang jaringan yang cenderung terus bertambah, beban yang melebihi kemampuan hantar arus penampang yang dapat memperburuk susut teknis jaringan tenaga listrik . Susut teknis ini tidak dapat dihilangkan karena merupakan kondisi bawaan atau susut yang terjadi karena alasan teknik dimana energi menyusut berubah menjadi panas pada jaringan Tegangan Tinggi (JTT), Gardu Induk (GI), Jaringan Tegangan Menengah (JTM), Gardu Distribusi (GD), Jaringan Tegangan Rendah (JTR), Sambungan Rumah (SR) dan Alat Pengukur dan Pembatas (APP).

2.5.2 Susut Non-Teknis

Susut Non Teknis adalah energi listrik yang hilang karena dikonsumsi oleh pelanggan maupun non pelanggan dan tidak tercatat dalam penjualan. Susut non-teknis terjadi akibat faktor non-fisik yang berkaitan dengan administrasi, perilaku pelanggan, maupun kesalahan pengukuran.

Faktor-faktor penyebab susut non-teknis antara lain:

1. Pencurian listrik (illegal connection).
2. Manipulasi atau kerusakan kWh meter.
3. Kesalahan pencatatan data pelanggan (DIL) atau gangguan sistem billing.
4. Kesalahan teknis dalam proses pembacaan meter atau komunikasi data AMR/AMI.

Untuk menekan susut non-teknis, PLN melakukan upaya seperti inspeksi lapangan oleh tim P2TL, revalidasi data pelanggan, dan penggantian meter lama dengan sistem prabayar atau meter digital otomatis.

2.6 Pengukuran dan Pemantauan Energi Listrik

Pengukuran energi listrik merupakan proses penting dalam menentukan besarnya energi masuk dan energi keluar pada suatu sistem distribusi. Dalam penelitian ini, pengukuran energi masuk dilakukan menggunakan kWh meter pantau yang terpasang pada trafo Gardu K70C, sedangkan energi keluar diperoleh dari total penjualan energi pelanggan prabayar dan pascabayar yang terhubung ke gardu tersebut.

kWh meter pantau berfungsi untuk merekam secara real-time jumlah energi listrik yang mengalir melalui sisi sekunder transformator. Data dari alat ini menjadi dasar utama dalam analisis susut energi aktual pada gardu distribusi. Dengan membandingkan hasil pembacaan kWh meter pantau dan total energi pelanggan, dapat diperoleh nilai susut gardu yang menunjukkan selisih energi akibat rugi daya, kesalahan ukur, maupun anomali pemakaian pelanggan.

Selain kWh meter pantau, PLN juga mengembangkan sistem Automatic Meter Reading (AMR) dan Advanced Metering Infrastructure (AMI) yang memungkinkan pemantauan energi secara otomatis dan berkelanjutan. Teknologi ini sangat membantu dalam mendeteksi pola konsumsi abnormal, potensi pencurian energi, serta meningkatkan akurasi data pengukuran.

2.7 Penertiban Pemakaian Tenaga Listrik (P2TL)

Penertiban Pemakaian Tenaga Listrik (P2TL) adalah salah satu kegiatan operasional PLN yang bertujuan untuk mengendalikan susut energi non-teknis. Kegiatan ini dilakukan melalui inspeksi lapangan, pemeriksaan instalasi pelanggan, verifikasi pengukuran, serta penindakan terhadap pelanggaran pemakaian tenaga listrik. Dasar hukum pelaksanaan P2TL antara lain diatur dalam:

1. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) No. 27 Tahun 2017 tentang Pelayanan Tenaga Listrik kepada Konsumen.
2. Peraturan Direksi PT PLN (PERSERO) nomor 0028.P/DIR/2023 tentang Penertiban Pemakaian Tenaga Listrik.

P2TL berperan penting dalam menekan susut non-teknis melalui tindakan preventif (pemeriksaan berkala), korektif (penertiban dan penegakan hukum), serta edukatif (penyuluhan kepada pelanggan). Data hasil kegiatan P2TL sering kali digunakan untuk menentukan prioritas wilayah atau pelanggan yang perlu diaudit berdasarkan tingkat susut atau temuan anomali energi.

Dalam konteks penelitian ini, hasil analisis susut energi pada Gardu K70C akan digunakan sebagai dasar dalam penentuan prioritas operasi P2TL, sehingga tindakan lapangan dapat difokuskan pada area dengan potensi kehilangan energi tertinggi.

2.8 Kerangka Teoritis Penelitian

Penelitian ini didasarkan pada hubungan antara beban trafo, susut energi, dan prioritas operasi P2TL. Beban trafo yang tinggi (mendekati overload) berpotensi meningkatkan rugi-rugi teknis akibat arus yang besar, serta dapat memperburuk kondisi jaringan apabila terjadi ketidakseimbangan antar fasa. Di sisi lain, apabila energi yang terjual kepada pelanggan tidak sebanding dengan energi yang diterima dari kWh meter pantau, maka terdapat indikasi adanya susut non-teknis yang perlu ditindaklanjuti melalui kegiatan P2TL.

Secara konseptual, nilai susut energi aktual pada Gardu K70C dapat dijadikan parameter evaluasi efisiensi distribusi dan indikator awal untuk menentukan prioritas pemeriksaan pelanggan oleh tim P2TL. Dengan demikian, analisis ini tidak hanya memberikan gambaran teknis mengenai kinerja sistem distribusi, tetapi juga mendukung strategi pengendalian susut energi yang terintegrasi antara aspek teknis dan operasional di PLN UP3 Menteng.

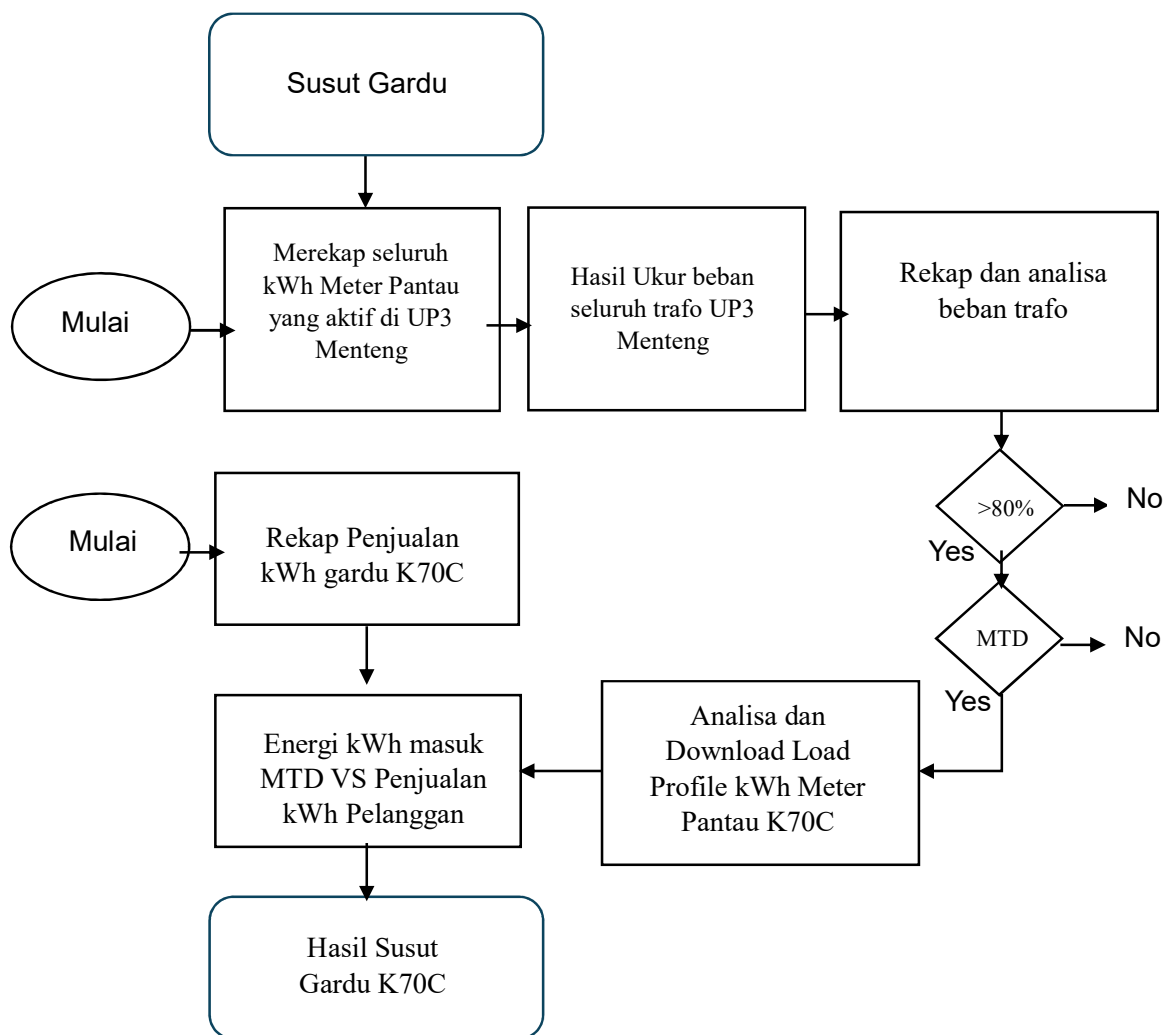
2.9 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian dan kajian terkait pengendalian susut energi listrik di lingkungan PLN antara lain:

1. Syamsudin, Z., Erlina, E., & Suyanto, H. (2015). Analisis susut energi pada tegangan rendah di wilayah PT. PLN (Persero) Area Bulungan. *Sutet*, 5(2), 51-61.
2. Rachmat, A., & Prasetyo, A. (2020). Analisis Susut Daya pada Jaringan Distribusi 20 kV dengan Metode Perbandingan Energi Masuk dan Energi Terjual. *Jurnal Teknik Elektro*, Universitas Diponegoro.
3. Sabputra, Y. A., Sukmadi, T., & Karnoto, K. (2011). Analisa Susut Energi Non Teknis pada Jaringan Distribusi PT. PLN (PERSERO) UPJ KENDAL (Doctoral dissertation, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik).

2.10 Kerangka Penelitian

Pada penelitian ini, penting untuk menggambarkan proses sistematis yang digunakan untuk menganalisis susut energi pada gardu K70C. untuk menunjukkan alur langkah demi langkah untuk mendapatkan angka susut gardu secara akurat dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Flowchat Penelitian

Pada Gambar 2.5 dijelaskan langkah-langkah dalam penelitian mengenai susut energi pada gardu K70C. Proses dimulai dengan merekap ketersediaan seluruh kWh meter pantau yang terpasang pada gardu distribusi di UP3 Menteng. Selanjutnya, dilakukan pengukuran beban pada seluruh trafo UP3 Menteng. Apabila beban trafo lebih dari 80%, maka dilakukan analisis lebih lanjut mengenai Load Profile kWh Meter (LPF). Jika tidak, proses penelitian akan berhenti di tahap tersebut. Apabila beban lebih dari 80% dan kWh meter pantau tersedia dan aktif maka dilakukan analisis dan pengunduhan Load Profile kWh pada Meter Pantau K70C. Kemudian, data energi kWh yang masuk pada MTD dibandingkan dengan penjualan kWh pelanggan untuk memperoleh hasil susut energi pada gardu K70C. Proses ini memberikan langkah praktis untuk mengetahui besarnya susut pada gardu distribusi di PLN UP3 Menteng.

Proses penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat susut energi yang terjadi pada gardu K70C, yang merupakan bagian dari sistem distribusi listrik di UP3 Menteng. Dengan mengukur dan membandingkan data energi yang masuk dan penjualan energi kepada pelanggan, penelitian ini berfokus untuk mengidentifikasi penyebab utama dari susut energi yang terjadi, baik yang bersifat teknis maupun non-teknis. Langkah-langkah dalam flowchart ini memastikan bahwa analisis dilakukan dengan data yang akurat dan relevan, sehingga menghasilkan temuan yang dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi sistem distribusi energi dan mengurangi kerugian akibat susut energi.